

Kahden sedimentin resuspensiota arvioivan
menetelmän vertailu viidellä erilaisella
järvellä

Lauri Happo

Pro gradu -
tutkielma

Helsingin yliopisto

Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta

Ympäristötieteiden
laitos

Akvaattiset tieteet/limnologia

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta		Laitos – Institution– Department Ympäristötieteiden laitos	
Tekijä – Författare – Author Lauri Johannes Hoppo			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Kahden sedimentin resuspensiota arvioivan menetelmän vertailu viidellä erilaisilla järvellä			
Oppiaine – Läroämne – Subject Limnologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year 11/2016	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 51
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Sedimentin resuspensio on merkittävä järven ekologiaan ja trofiatasoon vaikuttava tekijä. Sitä on tutkittu lukuisin eri menetelmin, joista kaikki eivät ole vertailukelpoisia toistensa kanssa. Kaksi suosittua sedimentin resuspensiota arvioivaa menetelmää ovat merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmä, jotka perustuvat sedimenttikeräimien keräämän sedimentoituvan aineksen orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen suhteeseen. Merkkiainemenetelmä perustuu orgaanisen aineksen erilaiseen suhteeseen vesipatsaassa ja pintasedimentissä. SPIM/SPOM-menetelmä on orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen sedimentaationopeuden lineaariseen regressioon perustuva malli, joka perustuu oletukseen, että primäärituotannon orgaanisen aineksen osuus on 100 %.</p> <p>Molempia menetelmiä on käytetty lukuisissa julkaisuissa, mutta laajaa vertailua menetelmien välillä ei ole tehty. Tässä Pro gradu -tutkielmassa menetelmien antamia resuspensiotuloksia verrattiin viidellä järvellä ja 23:lla sedimentaatiopisteellä, joilla tehtiin 3 – 6 kuukauden mittainen sedimentaatiotutkimus. Tutkimuksessa mukana olleet järvet olivat Säkylän Pyhäjärvi, Kiinan Taihu-järvi, Hiidenveden Kirkkojärvi, Jokioisten Rehtijärvi ja Vesijärven Enonselkä. Järvet poikkesivat toisistaan kokonsa ja morfologiansa puolesta. Osa järvien sedimentaatiopisteistä erosi toisistaan syvyydeltään tai kasvillisuudeltaan. Työn tarkoituksena oli selvittää menetelmien soveltuvuus erilaisissa olosuhteissa.</p> <p>Sedimentaatiotutkimusten aikana sedimenttikeräimet tyhjennettiin kahden viikon välein. Keräinaineen määrän perusteella määritettiin sedimentaationopeus. Keräinaineesta määritettiin myös orgaanisen aineksen pitoisuus menetelmien laskukaavoja varten. Lisäksi merkkiainemenetelmää varten otettiin vesi- ja pintasedimenttinäytteet, joiden orgaanisen aineksen osuus määritettiin merkkiainemenetelmän kaavaa varten. Menetelmien antamia resuspensiotuloksia testattiin parittaisella t-testillä tai Wilcoxonin testillä. Järven eri pisteiden merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän suhdetta testattiin toisten pisteiden vastaavaan suhteeseen Mann-Whitneyn U-testillä. Lisäksi vesipatsaan ja pintasedimentin orgaanisen aineksen osuuden sekä merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän suhteen välisen eron korrelaation merkitsevyyttä testattiin Pearsonin tai Spearmanin testillä.</p> <p>Pyhäjärvellä merkkiainemenetelmän osuus SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarviosta oli keskimäärin 70 – 90 %, Taihulla 73 – 78 %, Kirkkojärvellä 95 – 116 %, Rehtijärvellä 88 – 95 % ja Enonselällä 89 – 97 %. Menetelmien välillä ei ollut merkitsevää eroa millään Kirkkojärven pisteellä eikä Rehtijärven ja Enonselän syvimmillä pisteillä. Muilla pisteillä menetelmien antamat tulokset erosivat merkitsevästi. Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioasteen suhde erosi matalimpien ja syvimpien pisteiden välillä, mutta kasvillisuus- ja pelagiaalivyöhykkeiden välillä ei ollut merkitsevää eroa. Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuudella oli heikko negatiivinen korrelaatio merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän välisen suhteen eroon. Pintasedimentin orgaanisen aineksella vastaava korrelaatio oli negatiivinen ja kohtalainen.</p> <p>Suurimmat erot menetelmien välillä aiheutuivat merkkiainemenetelmän aliarvioimasta resuspensioasteesta, joka oli selvimmin havaittavissa suurilla ja matalilla järvillä. Resuspension aliarvioiminen johtui näytteenotossa tapahtuneissa virheissä. Matalilla järvillä pintasedimentti resuspendoitui jatkuvasti, jolloin vesinäyte sisälsi resuspendoitunutta sedimenttiä, ja pintasedimenttinäyte sisälsi karkeaa epäorgaanista ainesta, joka ei vastannut todellista resuspendoitunutta sedimenttiä. Menetelmien väliset erot olivat pienimmillään syvillä pisteillä ja pienillä järvillä, joilla näytteiden edustavuus oli selkeästi parempi. SPIM/SPOM-menetelmä yliarvioi kaikkialla hiukan sedimentin resuspensiota, koska se ei ota huomioon epäorgaanista sedimentaatiota. Molemmat menetelmät olivat melko herkkiä sedimenttikeräimessä tapahtuvalle orgaanisen aineksen hajoamiselle.</p> <p>Merkkiainemenetelmä soveltuu parhaiten pienille ja syville järville, eikä se ole herkkä epäorgaaniselle sedimentaatiolle. Suurilla, matalilla ja avoimilla järvillä SPIM/SPOM-menetelmä on luotettavampi. Molempien menetelmien tuloksiin kannattaa suhtautua kriittisesti.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Merkkiainemenetelmä, SPIM/SPOM-menetelmä, orgaaninen aines, epäorgaaninen aines, bruttosedimentaatio, nettosedimentaatio			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Leena Nurminen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
1.1. Sedimentin resuspensio	3
1.2. Sedimentin resuspension mittaaminen.....	5
1.3. Merkkiainemenetelmä	7
1.4. SPIM/SPOM-menetelmä	8
1.5. Vertailututkimus.....	11
2. Aineisto ja menetelmät	12
2.1. Järvet	12
2.2. Alloktoninen aines ja piilevät	14
2.3. Sedimentaatiotutkimus ja näytteenotto	16
2.4. Vertailu	17
3. Tulokset.....	18
3.1. Järvikohtaiset tulokset	18
3.1.1. Pyhäjärvi	18
3.1.2. Taihu	21
3.1.3. Kirkkojärvi	23
3.1.4. Rehtijärvi.....	25
3.1.5. Enonselkä	28
3.2. Yhdistetyt korrelaatiot	30
4. Tulosten tarkastelu	32
4.1. Järvikohtainen tarkastelu	32
4.1.1. Pyhäjärvi	32
4.1.2. Taihu	33
4.1.3. Kirkkojärvi	35
4.1.4. Rehtijärvi.....	37
4.1.5. Enonselkä	38
4.2. Järvien välinen vertailu.....	39
5. Johtopäätökset.....	45
6. Kiitokset	46
7. Kirjallisuus	46
8. Liitteet	52

1. Johdanto

1.1. Sedimentin resuspensio

Järvien rehevöityminen on maailmanlaajuinen ongelma, joka johtuu pääasiassa nopeasti kasvaneesta ja intensiivisestä maanviljelystä (Smith 2003). Pitkään jatkanut ulkoinen ravinnekuormitus johtaa usein järven pohjasedimentin ravinnepitoisuuden kasvuun, joka taas voimistaa sisäistä kuormitusta. Sisäinen kuormitus voi olla merkittävin ravinnelähde rehevöityneissä vesistöissä (Søndergaard ym. 1999). Se voi ylläpitää vesistön korkeaa trofiatasoa, vaikka ulkoinen kuormitus olisi pienentynyt huomattavasti (Søndergaard ym. 1999).

Sisäisen kuormituksen voimakkuutta säätelevät pohjasedimentin fysikaalis-kemialliset ominaisuudet ja ravinteiden pitoisuus. Redox-vaikutteisista ravinnevirroista hapettomasta sedimentistä alusveteen tiedetään jo varsin paljon, mutta mekaanisen resuspension vaikutusta sisäiseen kuormitukseen on tutkittu vähemmän (Hamilton & Mitchell 1997). Sedimentin vapautuessa takaisin vesipatsaaseen sen sisältämät ravinteet voivat palautua takaisin kiertoon (Niemistö ym. 2009). Matalissa ja rehevissä järvissä resuspension aiheuttama sisäinen kuormitus voi olla tärkein kuormituslähde ja rehevyystasoa ylläpitävä tekijä (Niemistö ym. 2009). Resuspensio voi vaikuttaa järven trofiatasoon (Hamilton & Mitchell 1997).

Sedimentin resuspensiota tapahtuu, kun sedimentin pinnalla esiintyvä virtausnopeus (shear velocity) ylittää sedimentille kriittisen arvon (Weyhenmeyer 1998). Bengtsson ym. (1990) ovat arvioineet, että kriittinen arvo lujittumattomalle sedimentille olisi $0,5 - 1,7 \text{ cm s}^{-1}$ riippuen sedimentin koostumuksesta ja lujittuneelle noin 5 cm s^{-1} . Sedimentin kriittinen arvo siis nousee häiriintymättömissä olosuhteissa. Erityisesti syvillä alueilla kriittisen arvon ylittävät virtausnopeudet ovat melko harvinaisia (Lemmin & Imboden 1987). Toisaalta sedimentille kriittisen virtausnopeuden kerran ylittyessä resuspensio on nopeaa ja voi jatkua, vaikka virtausnopeus laskisi alle kriittisen arvon (Bengtsson ym. 1990).

Tuulta ja sen muodostamaa aallokkoa voidaan pitää tärkeimpinä resuspension aiheuttajina erityisesti avoimissa matalissa järvissä (Carper & Bachmann 1984, Bengtsson & Hellström 1992). Aallokko aiheuttaa huomattavasti herkemmin sedimentin resuspensiota kuin muut

tuulen aiheuttamat virtaukset (Bengtsson ym. 1990). Kun etenevä aalto saapuu matalaan veteen, jonka syvyys on alle puolet sen aallonpituudesta, aalto koskettaa pohjaa ja aiheuttaa sedimentin sekoittumisen vesipatsaaseen (Carper & Bachmann 1984). Tuulen nopeus, kesto ja tuulelle altis pyyhkäisymatka ovat tärkeimpiä aallonpituuteen aiheuttavia tekijöitä (Carper & Bachmann 1984). Siksi altteimpia aallokon aiheuttamalle sedimentin resuspensiolle ovat matalat, laajat ja avoimet järvet, joissa tuuli pääsee puhaltamaan esteettömästi. Vastaavasti syvät, pienet ja suojaiset järvet ovat vähiten alttiita aaltojen aiheuttamalle resuspensiolle.

Resuspensioaste voi olla kuitenkin korkea myös pienissä ja syvissä järvissä, joissa pinta-aallokon vaikutus pohjaan on hyvin pientä (Imboden & Lemmin 1987, Horppila & Niemistö 2008). Syvissä ja kerrostuneissa järvissä seisovat aallot (seiches) ja etenevät sisäiset aallot (internal waves) ovatkin usein tärkeämmässä roolissa kuin pinta-aallokko ja voivat aiheuttaa voimakasta resuspensiota (Sakai ym. 2002). Seisovien ja sisäisten aaltojen merkitystä sedimentin resuspensioon lisää se, että ne vaikuttavat muodostuessaan laajaan pohja-alueeseen, kun taas pinnalla kulkevat aallot vaikuttavat useimmin vain tiettyyn, rajattuun osaan järvioluetta (Sakai ym. 2002). Lisäksi syvillä pohjilla sedimentin orgaaninen pitoisuus on yleensä korkeampi kuin matalilla pohjilla (Murase & Sakamoto 2000), joka tekee syvistä alueista alttiimpia resuspensiolle (Huttula 1994a).

Kalojen tai pohjaeläinten aiheuttama bioturbaatio voi olla paikoin huomattavin resuspension aiheuttaja (Katz ym. 2012). Tärkein vaikutus bioturbaatiolla on yleensä kuitenkin ylläpitää sedimentin löyhää rakennetta, jolloin sedimentti on alttiimpi tuulen aiheuttamalle resuspensiolle (Davis 1993, Tatrai ym. 1994, Scheffer ym. 2003). Näiden resuspensiota aiheuttavien tekijöiden lisäksi myös virtaavan veden ja ihmistoiminnan vaikutus voi olla huomattavaa, mutta yleensä paikoittaista ja pienelle alueelle rajattua.

Håkanson (1982) on jakanut järven pohjan kolmeen eri osaan: eroosiovyöhyke, kulkeutumisvyöhyke ja akkumulaatiovyöhyke. Eroosialueelle ei koskaan sedimentoidu hienoa ainesta (Håkansonin raja $6 \mu\text{m}$). Kulkeutumisvyöhykkeelle tapahtuu sedimentaatiota, mutta se keskeytyy toisinaan myrskyn, täyskierron tai muiden virtausten takia, jolloin sedimenttiä resuspendoituu vesipatsaaseen. Akkumulaatiovyöhykkeellä sedimentaatio on periaatteessa jatkuvaa ilman häiriöitä. Käytännössä matalilla alueilla sedimentti siis resuspendoituu usein, mutta pohja-ainesta ei koskaan sekoitu suuria määriä vesipatsaaseen. Syvemmillä pohja-ainesta taas resuspendoituu harvemmin, mutta

resuspendoituneen aineksen määrä voi olla huomattava, kun vesipatsaaseen sekoittuu edellisen resuspension jälkeen sedimentoitunut aines (Bengtsson ym. 1990).

Resuspensiota tapahtuu voimakkaimmin ja useimmin alueilla, jotka ovat alttiita tuulen ja virtausten vaikutuksille, eli tyypillisesti rantojen tuntumassa (Bloesch 1982). Rantojen tuntumassa toistuvasti resuspendoituva aines liikkuu hiljalleen järven syvänteiden akkumulaatiopohjaa kohti, mikä aiheuttaa pohjamateriaalin lajittumista virtausolosuhteiden mukaan (Bloesch 1982). Kauttaaltaan hyvin matalissa järvissä ei ole lainkaan akkumulaatiopohjaa, joten koko altaan sedimentti voi ajoittain sekoittua eikä pohjamateriaalin lajittelua tapahdu (Bengtsson & Hellström 1992).

Yleisesti ottaen kaikki sedimentistä koostuva hieno aines voi resuspendoitua, levät mukaan lukien (Weyhenmeyer 1998). Pääosa resuspendoituvasta sedimentistä on partikkelimaisessa muodossa (Hamilton & Mitchell 1997). Hyvin hienon pohja-aineksen kohdalla resuspendoitumisalttiuteen vaikuttaa enemmän partikkelin tiheys kuin koko (Peterson 1999). Orgaaninen aines voikin resuspendoitua huomattavasti herkemmin kuin epäorgaaninen aines (Huttula 1994a). Erityisesti eutrofisissa ja matalissa järvissä kesäinen kasviplankton tuotanto määrää pitkälti sedimentoituvan ja sitä kautta myös resuspendoituvan materiaalin laadun. Voimakkaiden kukintojen jälkeen sedimentoituva kasviplankton muokkaa sedimentin pintaa orgaanisemmaksi ja löyhemmäksi, jolloin se on alttiimpi resuspensiolle (Niemistö ym. 2008). Suurin osa resuspendoituneesta materiaalista onkin peräisin äskettäin laskeutuneesta ohuesta sedimenttikerroksesta (Bengtsson & Hellström 1992).

1.2. Sedimentin resuspension mittaaminen

Koska resuspension merkitys vesistön ekologiaan on niin merkittävä, sitä on tutkittu lukuisin eri menetelmin lukuisissa erilaisissa vesistöissä (Weyhenmeyer 1998). Monissa tutkimuksissa on selvitetty sedimentin resuspensiota aiheuttavia tekijöitä, resuspensioastetta, ravinteiden resuspensiota sekä kriittisiä virtausnopeuksia. Kuitenkin monissa eri tutkimuksissa käytössä ovat olleet täysin erilaiset tutkimusmenetelmät, joten harvat tutkimukset ovat toistensa kanssa täysin vertailukelpoisia. Jopa samassa järvessä käytetyt eri tutkimusmenetelmät voivat antaa täysin erilaisia arvioita resuspensioasteesta

(Koski-Vähälä ym. 2000). Tulokset ovat siksi hyvin menetelmäriippuvaisia (Weyhenmeyer 1998) ja antavat parhaimmillaankin vain hyvän arvion todellisesta resuspensioasteesta.

Weyhenmeyer (1998) on listannut tieteellisissä julkaisuissa käytettyjä resuspensiota mittaavia menetelmiä, joista yksinkertaisin on tasapainokaavan avulla laskettava karkea arvio vesistön pitkäaikaisesta sedimentin resuspensioasteesta. Kuitenkin sedimentin resuspensiosta halutaan yleensä tarkempaa ajallista ja paikallista tietoa, joita varten tarvitaan myös muita metodeja. Sedimentin liikkumista suoraan mittaavia välineitä ovat muun muassa videokamerat, kaikuluotaimet, infrapunasensorit, virtausmittarit, merkkiaineet sekä sähkönjohtavuusmittarit.

Muita menetelmiä ovat myös eri vesikerroksista otettujen vesinäytteiden vertailu sekä pohjasedimentin laadun muutoksiin ja vaihteluun perustuvat sedimenttimittaukset. Useissa tutkimuksissa suosittu keino on käyttää tilastollisia sovelluksia tuulen tai virtauksen voimakkuuden ja vesipatsaan kiintoaineen välisen korrelaation kuvaamiseen, mutta keino vaatii intensiivistä kenttätutkimusta eikä siksi sovellu pitkän ajan tutkimukseen (de Vicente 2010). Tärkeisiin menetelmiin lukeutuvat lisäksi kenttähavaintojen ja muiden tietojen yhdistämisen pohjalta tehdyt mallit sekä kontrolloiduissa olosuhteissa tehdyt laboratoriomittaukset (Weyhenmeyer 1998). Yleensä paras arvio resuspensiosta saadaan, kun yhdistetään eri metodeja (Bloesch 1994, Weyhenmeyer 1998).

Yksinkertaisuutensa, edullisuutensa ja nopeutensa takia suosittu menetelmä on kerätä sedimenttikeräimellä vesipatsaasta sedimentoituva materiaali (Weyhenmeyer 1998), ja erottaa jollakin menetelmällä nettosedimentaatio eli primäärinen sedimentaatio ja resuspendoitunut sedimentti eli sekundäärinen sedimentaatio toisistaan.

Yksinkertaisimmillaan sedimenttikeräintä voidaan käyttää avuksi määrittäessä tasapainokaavan avulla vesistön resuspensioastetta (Bloesch 1994), mutta tällöin arvioidaan pikemminkin koko järven resuspensiota kuin yksittäisiä resuspendoitumistapahtumia. Cornett ym. (1994) ovat myös määrittäneet resuspension osuuden isotooppien avulla. Esimerkiksi Isotooppi Cs137 esiintyy akkumuloituneena pohjasedimentissä, mutta sen aktiivisuus on vähäisempää tuoreessa materiaalissa.

Flower (1991) on kehittänyt erimallisiin sedimenttikeräimiin perustuvan resuspensioasteen määrittämenetelmän. Syvillä vesialueilla voi lisäksi käyttää menetelmää, jossa lähempänä pintaa sijaitsevat keräimet kuvaavat nettosedimentaatiota, ja pohjan lähellä sijaitsevat keräimet sedimentaation lisäksi myös resuspensiota (Bloesch 1982). Yksinkertainen

mahdollisuus on lukea kaikki sedimenttikeräimeen laskeutunut materiaali resuspendoituneeksi aineksi, erityisesti jos kokonaissedimentaatiomäärät ovat korkeita ja voidaan todennäköisin syin pitää suurinta osaa (>95 %) keräinaineksen sedimentistä resuspendoituneena (Kelderman ym. 2012).

Kaikissa edellä mainituissa menetelmissä on kuitenkin omat puutteensa ja epätarkkuutensa (Weyhenmeyer 1998), osassa jopa selkeitä virheitä (Evans & Håkanson 1992, Koski-Vähälä ym. 2000), eivätkä menetelmät ole kovin suosittuja. Merkkiaineen pitoisuuseroihin vesipatsaassa ja pintasedimentissä perustuvaa merkkiainemenetelmää sekä keräinsedimentin orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen osuuden suhteeseen perustuvaa SPIM/SPOM-menetelmää on sen sijaan käytetty lukuisissa tutkimuksissa (mm. Gasith 1975, Weyhenmeyer 1995 ym., Weyhenmeyer 1997, Koski-Vähälä ym. 2000, Horppila & Nurminen 2005b).

1.3. Merkkiainemenetelmä

Gasithin (1975) kehittämä merkkiainemenetelmä perustuu siihen, että tietyn merkkiaineen pitoisuus vesipatsaassa ja sedimentissä on merkitsevästi erilainen. Merkkiaineena käytetään tyypillisesti orgaanisen aineksen pitoisuutta (mm. Gasith 1975, Horppila & Nurminen 2005a,b) tai tyypipitoisuutta (Koski-Vähälä ym. 2000). Myös esimerkiksi klorofylli a:ta ja tiettyjä metalleja on käytetty merkkiaineena (Håkanson ym. 1989, Bloesch 1994). Ainoa selkeä vaatimus merkkiaineen valintaan on sen selvästi erilainen pitoisuus vesipatsaassa ja sedimentissä (Håkanson ym. 1989).

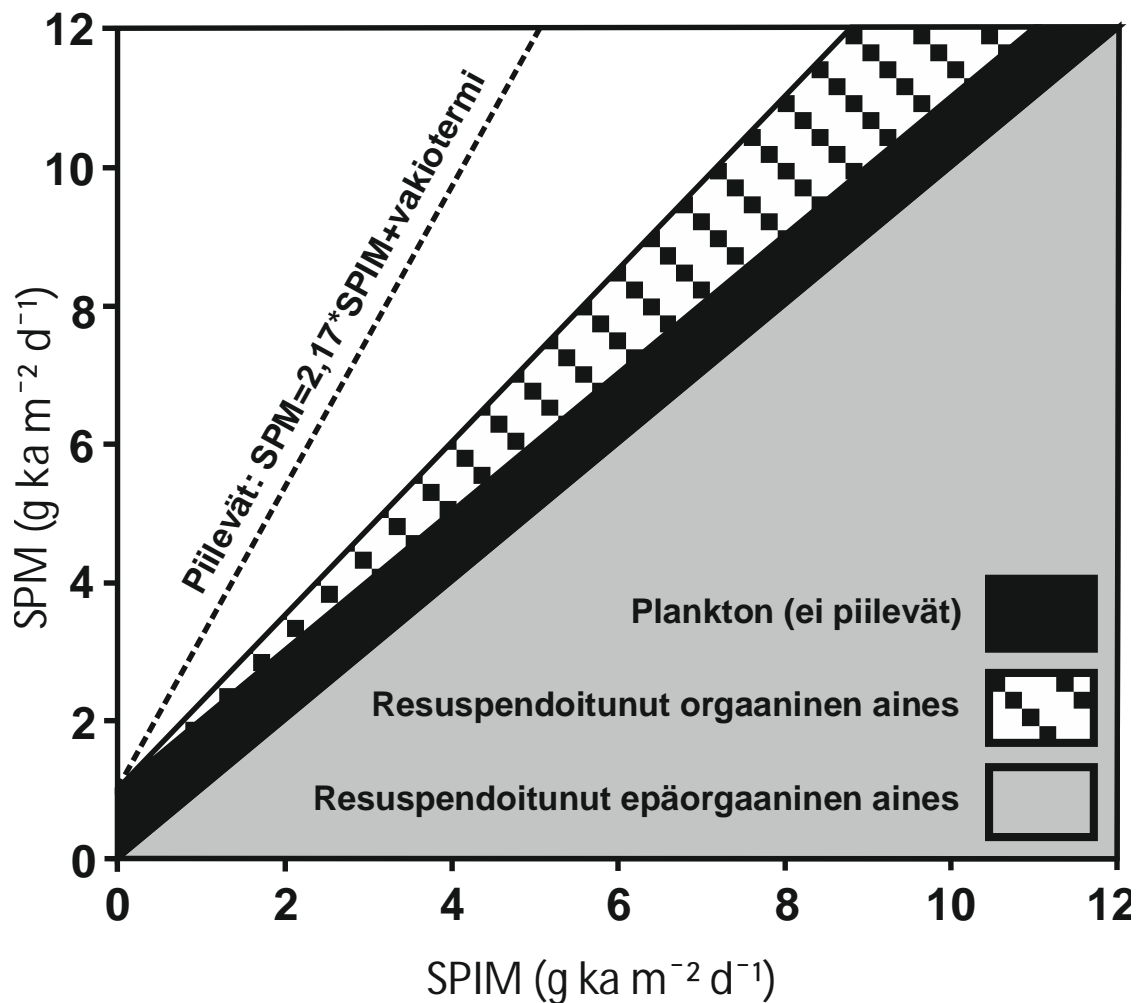
Orgaanista ainesta merkkiaineena käytettäessä resuspensioaste määritetään seuraavalla kaavalla:

$$R = S \frac{f_S - f_T}{f_R - f_T},$$

jossa R = resuspensioaste (g ka m^{-2}) (ka = kuiva-aine), S = bruttosedimentaatio (g ka m^{-2}), f_S = bruttosedimentaation orgaaninen osuus (%), f_R = pintasedimentin orgaaninen osuus (%) ja f_T = vesipatsaan kiintoaineen orgaaninen osuus (%). Menetelmässä vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus edustaa primäärituotantoa ja pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus resuspendoitunutta sekundääristä sedimentaatiota.

1.4. SPIM/SPOM-menetelmä

Weyhenmeyerin ym. (1995) kehittämä SPIM/SPOM-menetelmä perustuu sedimenttikeräimellä kerätyn epäorgaanisen aineksen (SPIM) ja kokonaisaineksen (SPM) lineaariseen regressioon. Hajontakuvaajan x-akselille sijoitetaan koko kauden aikana eri jaksojen aikainen epäorgaanisen aineksen sedimentoitumisnopeus ja y-akselille kaiken aineksen tai orgaanisen aineksen sedimentoitumisnopeus.



Kuva 1. Primäärisen ja sekundäärisen sedimentaation määrittäminen keräinmateriaalin epäorgaanisen aineksen ja kokonaisaineksen suhteen avulla.

Kaavassa epäorgaanisen aineksen ja kokonaisaineksen regressiosuoran vakiotermi kuvaa planktontuotantoa, josta saadaan kaava $R = S - \text{vakiotermi}$, jossa R = resuspendoitunut aines eli sekundäärinen sedimentaatio ja S = bruttosedimentaatio. Vakiotermi kuvaa täten planktontuotantoa eli primääristä sedimentaatiota (kuva 1). Myöhemmin Weyhenmeyer (1997) korjasi regressiomallia autokorrelaation välttämiseksi korvaamalla y-akselin

kokonaisaineksen (SPM) orgaanisella aineksella (SPOM). Korjattua mallia onkin käytetty useissa tutkimuksissa (mm. Horppila & Nurminen 2005b, Niemistö ym. 2012, Tammeorg ym. 2013).

SPIM/SPOM-malli olettaa siis kaiken nettosedimentaation orgaaniseksi ainekseksi. Tästä syystä malliin sisältyy joitakin rajoituksia. Jokien tuoman allohtonisen materiaalin määrän täytyy olla mitätön, jotta voidaan olettaa keräinaineksen koostuvan ainoastaan primäärisestä ja sekundäärisestä sedimentaatiosta. Metodien mukaan primäärisedimentaatio koostuu planktonista, jonka orgaaninen osuus on 100 %. Epäorgaanisen aineksen puuttuessa sedimenttikeräimestä pitäisi primäärisen sedimentaation osuuden siis olla 100 %, koska resuspendoituneesta aineksesta osan pitäisi aina olla epäorgaanista ainesta (Weyhenmeyer ym. 1995).

Koska resuspendoituva aines käytännössä sisältää aina myös orgaanista ainesta, ei nettosedimentaatiota ja resuspensiota voi erottaa erottaa vielä näin. Weyhenmeyer ym. (1995) esittivät vakiotermin yläpuolisen orgaanisen aineksen olevan resuspendoitunutta orgaanista ainesta (kuva 1). Weyhenmeyerin ym. (1995) esitystä tukevat havainnot, jossa näin arvioidun keräinmateriaalin resuspendoituneen aineksen orgaaninen osuus on vastannut todellisen pintasedimentin orgaanisen aineksen osuutta.

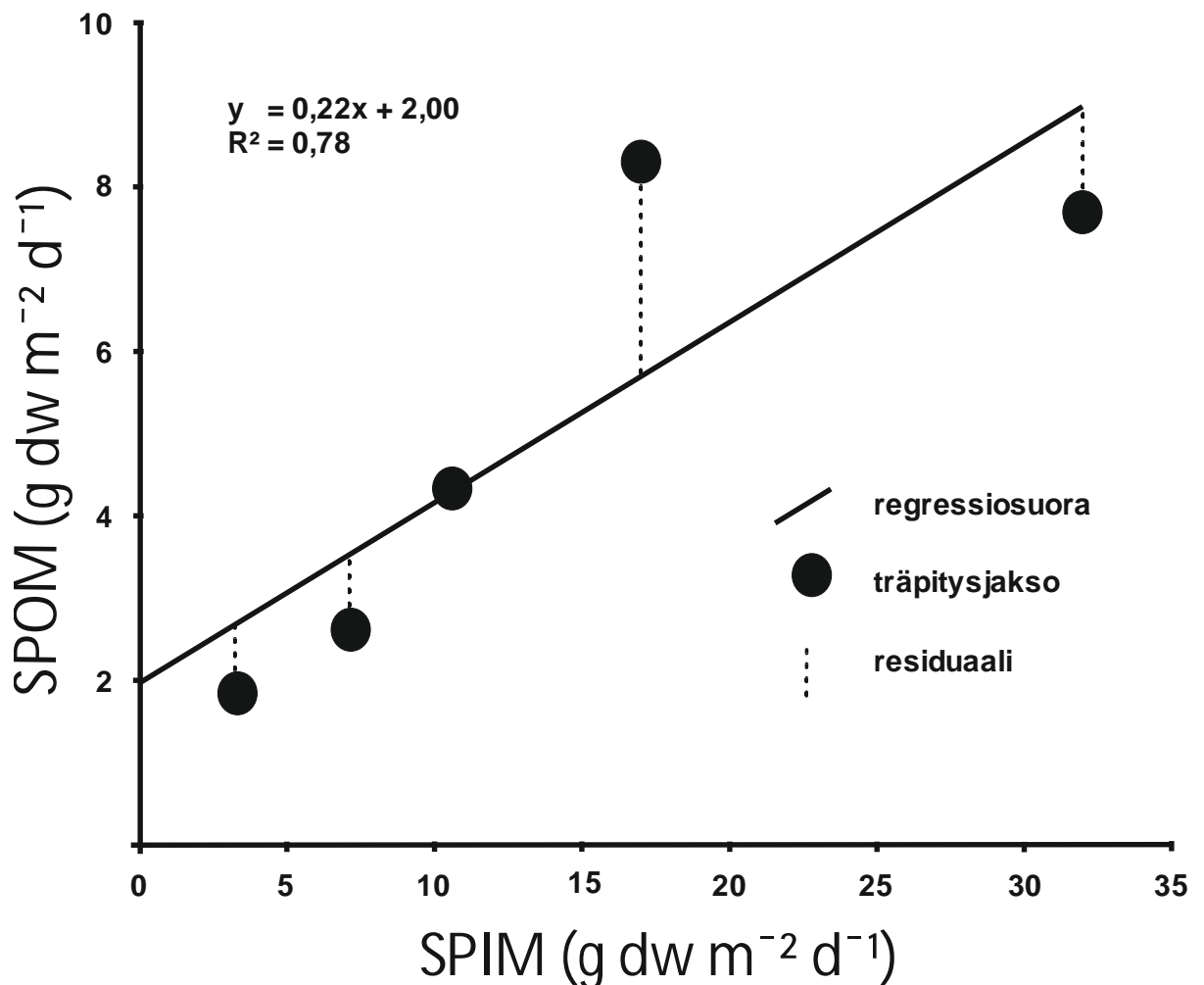
Piilevät sisältävät huomattavan määrän epäorgaanista ainesta (SPIM) ja voivat runsaina esiintyessään aiheuttaa resuspension osuuden yliarvioimista (Weyhenmeyer ym. 1995). Piilevien 47 % epäorgaanisesta osuudesta Weyhenmeyer ym. (1995) ovatkin arvioineet piileville oman regressioviivan $y = 2,17 * \text{vakio termi}$. Pääsääntöisesti piilevien vaikutus SPIM:iin on ollut tutkimuksissa mitätöntä (Weyhenmeyer ym. 1995 & 1997, Horppila & Nurminen 2005b).

Koska SPIM/SPOM-menetelmää käytettäessä regressioon otetaan mukaan koko kauden kaikki mittaukset (Weyhenmeyer ym. 1995 & 1997, Koski-Vähälä ym. 2000, Horppila & Nurminen 2005b, Tammeorg ym. 2013), olettaa malli primäärisen sedimentaation olevan vakiota. Koska tämä ei kuitenkaan ole uskottavaa, on Weyhenmeyer (1995) esittänyt regressioviivan residuaalien kuvaavan planktonsedimentaation variaatiota kauden aikana.

Kuvassa 2 on viisi kuvitteellista sedimentaatiojaksoa. Keräinaineksen epäorgaanisen ja orgaanisen materiaalin suhdetta kuvaa regressioviiva, joka leikkaa y-akselin arvossa 2,00. Tällöin koko kauden nettosedimentaatioksi arvioidaan SPIM/SPOM-menetelmän avulla

2,00 g ka m⁻² d⁻¹ (ka = kuiva-aine). Regressioviiva kuvaa kuitenkin keskiarvoa, jonka alapuolella on kolme jaksoa ja reilusti yläpuolella yksi jakso.

Weyhenmeyerin (1995) ajatuksen mukaan regressioviivan yläpuoliset residuaalit esittävät korkeaa planktonsedimentaatiota, ja regressioviivan alapuoliset vastaavasti matalaa planktonsedimentaatiota (kuva 2). Planktonsedimentaation voi ajatella primääriseksi nettosedimentaatioksi, jolloin kuvaajassa esitetyt jaksottaiset nettosedimentaatioasteet olisivatkin 1,5; 1,5; 2,0; 4,0 ja 1,0 g ka m⁻² d⁻¹ vasemmalta oikealle lukien keskiarvon 2,0 ka m⁻² d⁻¹ sijaan. Weyhenmeyer (1995) havaitsi kaudenaikaisten residuaalien ja vesipatsaan klorofylli a:n konsentraation vaihtelun kanssa selvän yhteyden.



Kuva 2. Kasviplankton tuotannon arviointi SPIM/SPOM-suhteen piirretyn regressiosuoran residuaalien avulla.

1.5. Vertailututkimus

Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien eroja mittaavia tutkimuksia ei ole paljonkaan julkaistu, mutta Koski-Vähälä ym. (2000) ovat käyttäneet julkaisussaan rinnakkain näitä metodeja. Julkaisussa ei ollut tarkempaa analyysiä menetelmien eroista, mutta tulokset olivat melko samansuuntaisia molemmilla metodeilla. Molemmat menetelmät vaikuttivat yliarvioivan resuspension osuutta kokonaissedimentaatiosta.

Horppila ja Nurminen (2005b) ovat lisäksi tehneet menetelmien välille keräinmateriaalin herkkyysanalyysin orgaanisen aineksen suhteen. Merkkiainemenetelmällä arvio resuspensioasteesta pieneä keräinmateriaalin orgaanisen aineksen pitoisuuden kasvaessa, kun taas SPIM/SPOM-menetelmän avulla laskettu resuspensioastearvio kasvoi keräinaineen orgaanisen aineksen pitoisuuden kasvaessa (Horppila & Nurminen 2005b).

Merkkiainemenetelmän kaavalla laskettu resuspensioarvio paljastui herkemäksi virheille, jos orgaanisen aineksen pitoisuutta yli- tai aliarvioitiin. SPIM/SPOM-menetelmä osoittautui taas herkemäksi nettosedimentaation voimakkaalle vaihtelulle (Horppila & Nurminen 2005b). Horppila ja Nurminen (2005b) ehdottavatkin tutkimuksensa pohjalta SPIM/SPOM-menetelmää käytettäväksi vesistöissä, joissa bakteerien aktiivisuus on voimakasta ja hajoaminen nopeaa, ja merkkiainemenetelmää vesistöihin, joissa esiintyy voimakkaita syanobakteerikukintoja.

Vaikka molemmat metodit sopivat Horppilan ja Nurminen (2005b) mielestä hyvin matalien järvien resuspensioasteen arvioimiseen ja antavat samansuuntaisia tuloksia, laaja menetelmävertailu erilaisten järvien välillä kuitenkin puuttuu. Tässä Pro gradu-työssä verrattiin merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmää viidellä erilaisella järvellä, joilla kaikilla on tehty useiden kuukausien mittainen sedimentaatiotutkimus.

Merkkiainemenetelmässä käytettiin merkkiaineena orgaanista ainesta, joten sedimentaatiotutkimusjaksojen aikana kerätty aineisto riitti kaikilla järvilla resuspension arvioimiseen sekä merkkiainemenetelmällä että SPIM/SPOM-menetelmällä. Kaikki tutkimusjärvet olivat kooltaan ja morfologialtaan erilaisia. Lisäksi kaikki järvet kärsivät jonkinasteisesta rehevöitymisestä. Työn tavoitteena oli selvittää menetelmien soveltuvuus erityyppisillä järvilla ja erilaisissa olosuhteissa.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1. Järvet

Tutkimuksessa mukana olleita järviä ovat Säkylän Pyhäjärvi (N 60°00', E 22°17'), Taihujärvi Jiangsu-provinssissa Kiinassa (N 31°11', E 120°09'), Vihdin Hiidenveden Kirkkojärvi (N 60°24', E 24°18'), Jokioisten Rehtijärvi (N 60° 51', E 23°30') ja Lahden Vesijärven Enonselkä (N 61°01', E 25°35') (koordinaatisto WGS84).

Pyhäjärven pinta-ala on 155 km², keskisyvyys 5,5 m ja suurin syvyys 26,2 m (taulukko 1). Pyhäjärven sedimentaatiotutkimus suoritettiin 22.5. - 10.10.2012 viidellä eri pisteellä, joista pisteet 1, 2 ja 3 sijaitsivat avoimella itärannalla 1,5, 3 ja 4,5 metrin syvyydellä. Näytepisteet 4 ja 5 sijaitsivat avoimella pelagiaalialueella 6 metrin syvyydessä. Tutkimuksen aikainen kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus vaihtelivat Pyhäjärvellä välillä 15 – 30 ja 520 – 1180 ja klorofylli a -pitoisuus välillä 6 – 17 µg l⁻¹ (taulukko 1).

Taihun pinta-ala on 2338 km², keskisyvyys 1,9 m ja suurin syvyys 3 m (taulukko 1). Taihun pinta-alasta ¾ on kasviplanktonin hallitsemaa avoimen veden aluetta ja ¼ vesikasvien hallitsemaa makrofytyttövyöhykettä (Zhu ym. 2008). Taihulla sedimentaatiotutkimus tehtiin 5.8.2012 – 31.1.2013 kuudella eri pisteellä, joista 1, 2 ja 3 sijaitsivat avoimella alueella järven pohjoispäässä ja 4, 5 ja 6 suojaisella makrofytyttöjen peittämällä alueella. Alueiden vedenlaatu eroaa toisistaan huomattavasti (Zhu ym. 2015). Tutkimuksen aikainen kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus vaihtelivat Taihulla välillä 25 – 132 ja 660 – 3520 µg l⁻¹ (taulukko 1). Vastaavasti klorofylli a -pitoisuus vaihteli välillä 1 – 113 µg l⁻¹ (taulukko 1).

Kirkkojärvi on yksi Hiidenveden altaista. Se on rehevä järvi, jonka pinta-ala on 1,6 km², suurin syvyys 3,5 metriä ja keskisyvyys 1,1 metriä (Horppila & Nurminen 2005b). Kirkkojärvellä tutkimus suoritettiin 1.6. – 20.9.2000 kahden viikon jaksoissa neljällä eri näytepisteellä. Pisteet 1 ja 2 sijaitsivat tuulelle alteimmalla kaakkoispuolella, ja pisteet 3 ja 4 järven suojaisella lounaispuolella. Kummallakin puolella järveä olevista pisteistä toinen oli kasvillisuuden sisällä (1 ja 3) ja toinen avoveden puolella (2 ja 4). Kirkkojärven kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus vaihtelivat tutkimuksen aikana välillä 46 – 91 ja 700 – 1000 µg l⁻¹ klorofylli a:n pitoisuuden vaihdellessa välillä 2 – 22 µg l⁻¹ (taulukko 1).

Taulukko 1. Kirkkojärven kokonaistyyppipitoisuudet ovat avovesikauden näytteiden minimi- ja maksimipitoisuuksia vuodelta 2000 pisteeltä Kirkkojärvi keskiosa 16 (Syke, Hertta-tietokanta). Taihun kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuudet sekä syvyys ovat korkean ja matalan tuotantojakson keskiarvoja, eivät koko kauden ääriarvoja (Zhu ym. 2015). Enonselän klorofylli-a-tulokset ovat pisteeltä Lankiluoto 10 (Ketola, Mirva, kirj. tiedonanto 2016).

Järvi	Sijainti N (WGS84)	Sijainti E (WGS84)	Syvyys (m)	Pinta-ala (km ²)	Keskisyvyys (m)	Suurin syvyys(m)	Klorofylli a (µg l ⁻¹)	Kokonaisfos- fori (µg l ⁻¹)	Kokonaistyyppi (µg l ⁻¹)
PJ1	61°3.4'	22°17.7'	1,5	155	5,5	26,2	6-17	15-28	520-1180
PJ2	61°3.3'	22°17.6'	3	155	5,5	26,2	6-17	17-30	520-1000
PJ3	61°3.2'	22°17.5'	4	155	5,5	26,2	7-16	16-30	560-940
PJ4	61°4.0'	22°13.1'	6	155	5,5	26,2	6-16	20-30	530-910
PJ5	60°58.0'	22°18.1'	6	155	5,5	26,2	6-16	19-29	540-850
T1	31°25.0'	120°12.6'	1,5*	2338	1,9	3	5-48	64-132*	1830-2770*
T2	31°20.6'	120°13.0'	2*	2338	1,9	3	3-113	92-126*	2030-3520*
T3	31°16.5'	120°9.4'	2,5*	2338	1,9	3	2-97	112-116*	1990-3360*
T4	31°26.2'	120°23.5'	1,5*	2338	1,9	3	1-7	25-36*	660-2040*
T5	31°22.2'	120°22.6'	1,5*	2338	1,9	3	1-6	28-35*	800-1960*
T6	31°23.0'	120°23.0'	1,5*	2338	1,9	3	3-37	98-103*	1870-2850*
KJ1	60°24.3'	24°18.4'	<2	1,6	1,1	3,5	10-16	50-87	700-1000*
KJ2	60°24.4'	24°18.3'	<2	1,6	1,1	3,5	11-22	53-91	700-1000*
KJ3	60°24.4'	24°17.4'	<2	1,6	1,1	3,5	2-10	47-57	700-1000*
KJ4	60°24.4'	24°17.5'	<2	1,6	1,1	3,5	5-12	46-63	700-1000*
RJ1	60°50.7'	23°28.8'	24	0,4	9,2	25	5-21	63-87	980-1260
RJ2	60°50.5'	23°29.7'	22	0,4	9,2	25	5-17	60-80	960-1240
RJ3	60°50.3'	23°30.0'	2	0,4	9,2	25	2-24	37-73	630-1260
EN1	61°0.4'	25°36.2'	<10	26	6,1	40	4-28*	17-35	330-860
EN2	61°1.2'	25°36.1'	30	26	6,1	40	4-28*	18-84	320-1250
EN3	61°1.7'	25°35.0'	28	26	6,1	40	4-28*	19-60	330-1050
EN4	61°1.6'	25°33.8'	<10	26	6,1	40	4-28*	16-40	330-1000
EN5	61°2.6'	25°34.2'	<10	26	6,1	40	4-28*	19-41	340-890

Rehtijärven pinta ala on 39 ha, keskisyvyys 9,2 m ja suurin syvyys 25 m. Järvi on kerrostuva ja sitä voidaan pitää rehevänä (Horppila & Niemistö 2008). Tutkimuksessa olevista järvistä Rehtijärvi on ainoa, jossa sisäisten aaltojen on arvioitu olevan tärkein resuspensiota aiheuttava tekijä (Horppila & Niemistö 2008). Rehtijärvellä sedimentaatiotutkimus tehtiin 31.5. – 26.10.2005 kolmella pisteessä, joiden syvyydet olivat 24, 22 ja 2 metriä. Rehtijärven kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus vaihtelivat tutkimusjakson aikana välillä 37 – 87 ja 630 – 1260 $\mu\text{g l}^{-1}$. Klorofylli a -pitoisuus vaihteli välillä 2 – 28 $\mu\text{g l}^{-1}$ (taulukko 1).

Enonselkä on Lahden Vesijärven eteläisin allas, jonka pinta-ala on 26 km², keskisyvyys 6,1 m ja suurin syvyys 40 m. Järvi on rehevä ja kerrostuva. Alusvesi kärsii ajoittaisesta hapettomuudesta, ja fosforipitoisuuden vaihtelu on osittain tästä syystä suurta (Niemistö ym. 2012). Enonselällä tutkimus suoritettiin 26.5. – 4.11.2009 viidellä pisteellä, joista 1, 4 ja 5 sijaitsivat alle kymmenen metrin syvyydessä, ja pisteet 2 ja 3 28 – 30 metrin syvyydessä. Enonselän kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus vaihtelivat välillä 16 – 84 ja 330 – 1250 $\mu\text{g l}^{-1}$ klorofylli a -pitoisuuden vaihdella välillä 4 – 28 $\mu\text{g l}^{-1}$ (taulukko 1).

2.2. Alloktoninen aines ja piilevät

Sedimentoitua alloktoninen aines ja piilevä heikentävät huomattavasti SPIM/SPOM-menetelmän luotettavuutta. Jotta menetelmää voidaan käyttää, molempien virhelähteiden merkityksen täytyy olla olematon. Jokien mukana Pyhäjärveen tuoman alloktonisen aineksen teoreettinen sedimentaationopeus vaihteli kauden aikana välillä 0 – 0,2 g ka m⁻² d⁻¹ (Ventelä ym. 2015). Alloktonisen aineksen mahdollinen vaikutus resuspensioasteeseen oli korkeimmillaankin alle 1 %. Koska jokisuut sijaitsivat lisäksi useiden kilometrien päässä näytepisteistä, voitiin alloktonisen aineksen vaikutus arvioida olemattomaksi. Pyhäjärven piilevien biomassa vaihteli sedimentaatiotutkimuksen aikana välillä 0,3 – 3,3 mg l⁻¹ (Ventelä ym. 2015). Piilevät olivat runsaimmillaan kesäkuussa ja aivan sedimentaatiokauden lopussa lokakuussa ja niiden osuus koko kasviplanktonyhteisöstä oli keskimäärin 49 % vaihdellen välillä 19 – 94 % (Ventelä ym. 2015). Piilevien biomassa pysyi koko kauden suhteellisen matalana, ja piilevien mahdollinen vaikutus resuspensioasteeseen niin pienenä, että SPIM/SPOM-menetelmä soveltui järvellä käyttöön.

Taihu-järveen laskee yli 60 jokea, mutta niiden merkitys järven kiintoainepitoisuuteen on merkityksetön tuulen ja aallokon aiheuttamaan sedimentin resuspensioon verrattuna (Zhu, Guangwei, 2014, kirj. tiedonanto). Sedimentaatiopisteiden lähistöllä mitattiin myös koko tutkimusjakson ajan piileväpitoisuutta. Pitoisuudet pysyivät suurimman osan ajasta alle 0,1 mg Γ^{-1} . Suurimmillaan pitoisuus nousi joulukuussa pisteen 1 läheisyydessä, jolloin se oli 2,5 mg Γ^{-1} (Zhu, Guangwei, 2014, kirj. tiedonanto). Alloktonisen aineksen ja piilevän pitoisuudet olivat koko kauden ajan niin pieniä, että SPIM/SPOM-menetelmä soveltui ennakkovaatimustensa puolesta käyttöön järvellä.

Myös Kirkkojärvellä piilevän pitoisuus pysyi matalana koko jakson aikana, ja oli korkeimmillaan 2 mg Γ^{-1} (Horppila & Nurminen 2005b). Sekä alloktonisen aineksen että piilevän pitoisuus olivat koko sedimentaatiojakson niin matalia, että niiden teoreettinen vaikutus resuspensioasteeseen oli alle 1 %. Tästä syystä niiden vaikutus arvioitiin merkityksettömäksi (Horppila & Nurminen 2005b). Myös tässä tutkielmassa niiden vaikutus jätettiin huomioimatta.

Rehtijärveltä ei ole tutkimusvuodelta piilevädataa, mutta Pirkanmaan ELY-keskus on ottanut ja Suomen Ympäristökeskus määrittänyt useana vuonna vuodesta 2002 lähtien Rehtijärven kasviplanktonlajiston ja -biomassan. Piileväpitoisuus on ollut kaikilla määrityskerroilla alle 0,5 mg Γ^{-1} (Syke, Hertta-tietokanta), joten piilevien vaikutus jätettiin huomioimatta. Järveen laskee neljä pientä puroa, mutta niiden kuormitusdataa ei ole saatavissa. Veden viipymä järvessä on 2,4 vuotta, joten pieneksi järveksi virtaus on melko hidas (Horppila & Niemistö 2008). Alloktonisen aineksen mahdollinen vaikutus resuspensioasteeseen arvioitiin myös tämän järven kohdalla merkityksettömäksi.

Niemistö ym. (2012) arvioivat Vesijärveen tulevan alloktonisen aineksen pitoisuuden merkityksettömäksi. Piilevän pitoisuus vaihteli vuoden 2009 avovesikauden aikana välillä 0 – 0,5 mg Γ^{-1} seurantapisteellä Lankiluoto10 (Syke, Hertta-tietokanta). Pitoisuudet pysyivät niin pieninä, että mahdolliset vaikutukset resuspensioasteeseen olivat mitättömiä.

2.3. Sedimentaatiotutkimus ja näytteenotto

Sedimentaatiota mitattiin pohjan läheisyydestä 30 cm:n korkuisilla putkenmallisilla sedimenttikeräimillä, joiden pituuden ja halkaisijan suhde oli 6:1. Tällaisten keräimien on havaittu soveltuvan parhaiten laskeutuvan materiaalin keräämiseen (Bloesch & Burns 1980). Jokaisella pisteellä oli 3 – 5 rinnakkaista sedimenttikeräintä.

Sedimenttikeräimet tyhjennettiin kahden viikon välein. Samanaikaisesti otettiin merkkiainemenetelmää varten pisteestä riippuen joko kouranoutimella ohut kerros pintasedimenttiä tai putkinoutimella 1 cm:n paksuinen pintasedimenttinäyte. Kaikilta pisteiltä otettiin jokaisella näytteenottokerralla 2 – 3 rinnakkaista pintasedimenttinäytettä.

Keräinsedimentti ja pintasedimenttinäytteet kuivattiin ja hehkutettiin standardin SFS 3008 mukaisesti orgaanisen aineen pitoisuuden selvittämiseksi menetelmien laskutoimituksia varten. Kuivatun keräinsedimentin määrän perusteella määritettiin myös sedimentoitumisnopeus $S = g \text{ ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, jossa $g \text{ ka}$ on sedimentin kuivapaino, m^{-2} sedimenttikeräimen suun pinta-ala ja d sedimentaatiojakson kesto.

Muun näytteenoton yhteydessä vesipatsaasta otettiin myös kiintoaine-, ravinne- ja klorofylli a -kokoomanäytteet Limnos-näytteenottimella. Rinnakkaisia näytteitä otettiin jokaiselta pisteeltä 2 – 3. Pullot säilöttiin standardin SFS-EN 872 mukaisesti. Klorofylli a -näytteet suodatettiin 225 mm Hg:n ja kiintoainenäytteet noin 500 mm Hg:n paineella Whatman Glass Microfiber Filters GF/C 47 mm-suodattimien läpi. Klorofylli-a-pitoisuus määritettiin suodattimista standardin SFS 577 mukaisesti. Kiintoainepitoisuus määritettiin standardin SFS-EN 872 mukaisesti, ja kiintoaineen orgaanisen aineksen pitoisuus merkkiainemenetelmän kaavaa varten standardin SFS 3008 mukaisesti. Kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuus määritettiin ravinnenäytteistä standardien SFS 3026 (kok. P) ja SFS 3031 (kok. N) periaatteiden mukaisesti. Ravinnemääryksissä käytettiin hapetuksen jälkeen Lachat QuickChem FIA+ 8000 Series analysointia.

Taihun näytteenotto erosi hiukan muilla järvillä tehdystä näytteenotosta, sillä pintasedimenttinäyte otettiin ainoastaan tutkimuskauden alussa. Lisäksi määrittäminen menetelmät eivät olleet SFS:n mukaisia, mutta periaatteiltaan vastaavia (Zhu ym. 2015).

Merkkiainemenetelmän laskukaavassa käytetään useimmiten sedimenttikeräimien tyhjennyksen aikaan otettujen pintasedimentti- ja vesipatsasnäytteiden orgaanisen aineksen osuutta (mm. Horppila & Niemistö 2008). Tähän ei kuitenkaan ole vakiintunutta tapaa eikä kaikissa julkaisuissa edes mainita minkä näytteenottokerran orgaanisen aineksen osuuksia kaavassa käytetään.

Keräinten tyhjennyksen aikaan otetut näytteet eivät kuvaa parhaalla tavalla keräinmateriaalin koostumusta. Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus kuvaa senhetkistä primäärituotantoa eli vasta tulevaisuudessa sedimentoituvaa ainesta, ja pintasedimentti taas kuvaa senhetkistä sedimentoitunutta ainesta eli tulevaisuudessa mahdollisesti resuspendoituvaa ainesta. Siksi edellisen kerran pintasedimentin ja vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuudet voisivat edustaa paremmin keräimeen laskeutunutta resuspendoitunutta sedimenttiä ja bruttosedimentaatiota kuin samaan aikaan otetut näytteet. Kuitenkin orgaanisen aineksen pitoisuus voi muuttua nopeasti niin pintasedimentissä kuin vesipatsaassa voimakkaan primäärituotannon tai sedimentin resuspension johdosta. Horppila ja Nurminen (2005) arvioivatkin epävarmuustekijöiden takia kuvaavimman pintasedimentin ja vesipatsaan orgaanisen pitoisuuden olevan kahden peräkkäisen näytteenoton keskiarvo. Myös tässä Pro gradu-tutkielmassa merkkiainemenetelmän kaavassa käytetään pintasedimentin ja vesipatsaan orgaanisen aineksen kahden näytteenottokerran keskiarvopitoisuuksia.

SPIM/SPOM-menetelmää käytettäessä voidaan koko kauden nettosedimentaatio arvioida joko vakioksi tai esittää residuaalit kauden aikaiseksi nettosedimentaation vaihteluksi. Tässä tutkimuksessa residuaalit otettiin huomioon kauden aikaisessa nettosedimentaation vaihtelussa.

2.4. Vertailu

Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien arvioimien resuspensioasteiden eroa testattiin pisteittäin parittaisella t-testillä tai ei-parametrisella Wilcoxonin testillä, jos aineiston normalisuus ei täytynyt. Jos menetelmillä ei ollut merkitsevää eroa resuspensioasteessa, testattiin eroavatko menetelmien arvioimat nettosedimentaatioarviot toisistaan. Samoilla testeillä testattiin myös eroaako bruttosedimentaatioaste tilastollisesti merkitsevästi kummastakaan resuspensioasteesta.

Kaikkien järvien eri pisteiden merkkiaine- ja SPIM/SPOM-resuspensioarvion suhdetta toisten pisteitten vastaavaan suhteeseen testattiin riippumattomalla Mann-Whitneyn U-testillä. Tällä selvitettiin vaikuttavatko eri syvyysvyöhykkeet tai kasvillisuus menetelmien välisiin eroihin. Tilastollisissa testeissä käytetyt arvot olivat eri pisteiden kahden viikon aikaiset keskiarvotulokset.

Tutkimuksessa testattiin myös vesipatsaan ja pintasedimentin orgaanisen aineksen osuuden sekä merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän välisen suhteen eron korrelaation merkitsevyyttä Pearsonin tai Spearmanin testillä riippuen hajonnan lineaarisuudesta. Tällä tavoin saatiin selville millä tavoin näytteenotto vaikutti menetelmien välisiin eroihin.

Tilastolliset testit tehtiin SPSS-ohjelmalla. Tilastollisesti merkitsevän p-arvon raja tässä tutkimuksessa oli $<0,05$ kaikissa muissa testeissä paitsi Pearsonin ja Spearmanin korrelaation merkitsevyytsteissä, joissa p-arvon rajana oli $<0,01$.

Tuloksissa esitetään myös eri pisteiden pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuudet sekä SPIM/SPOM-menetelmän ennustama vastaava resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus. Näitä vertailemalla voidaan saada selkeä kuva menetelmien mahdollisesta virhelähteestä sillä menetelmien toimiessa hyvin pitäisi orgaanisen aineksen pitoisuuden olla molemmissa sama.

3. Tulokset

3.1. Järvikohtaiset tulokset

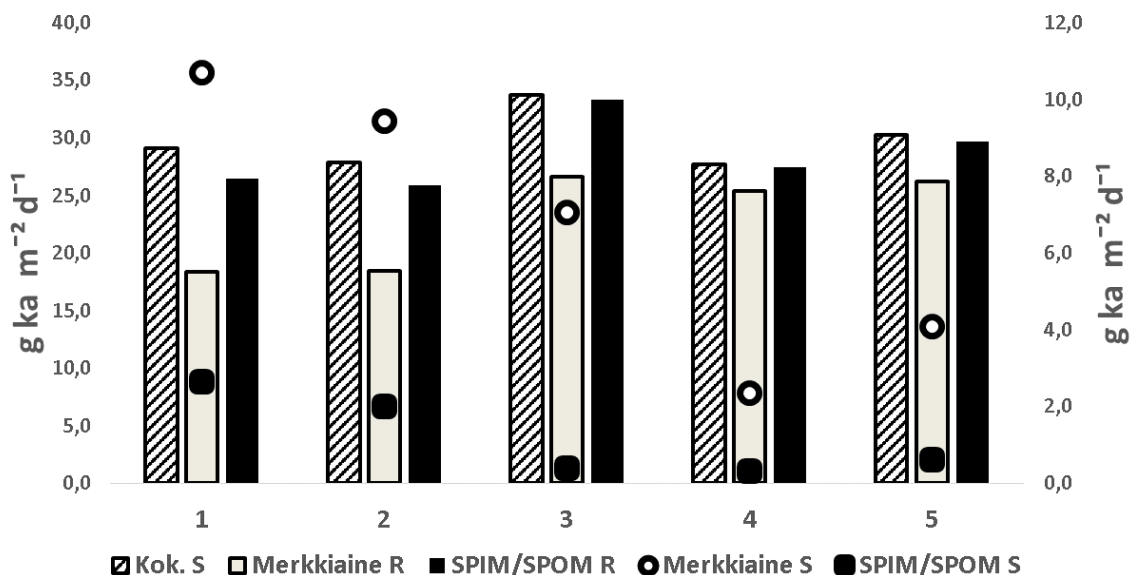
3.1.1. Pyhäjärvi

Pyhäjärvellä kokonaissedimentaation keskiarvo oli $30 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen välillä $8 - 117 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Keskimääräinen pisteittäinen bruttosedimentaatio vaihteli välillä $28 - 34 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 3). Pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli eri pisteiden välillä $0,6 - 15,1 \%$ (liite 3). Pintasedimentin orgaaninen pitoisuus oli pienimmillään matalimmassa pisteessä kasvaen syvemmille pisteille päin. Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus vaihteli pisteillä välillä $38 - 95 \%$ ollen keskimäärin $57 - 64 \%$. Keräinsedimentin orgaaninen pitoisuus vaihteli välillä $14 - 28 \%$ (liite 3). Vesipatsaan ja

keräinsedimentin orgaanisen aineksen pitoisuuden vaihtelu oli samansuuntaista kaikilla pisteillä. Pitoisuus oli kuitenkin keskimäärin korkein matalilla pisteillä ja vastaavasti matalin syvillä pisteillä.

Merkkiainemenetelmällä laskettu sedimentin resuspensioaste oli Pyhäjärvellä keskimäärin $23 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen välillä $5 - 102 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Keskimääräinen resuspensioaste eri pisteillä vaihteli välillä $18 - 27 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 3). Resuspensioaste oli keskimäärin $63 - 89 \%$ kokonaissedimentaatiosta. Resuspension osuus kokonaissedimentaatiosta oli syvillä pisteillä suurempi kuin matalilla pisteillä.

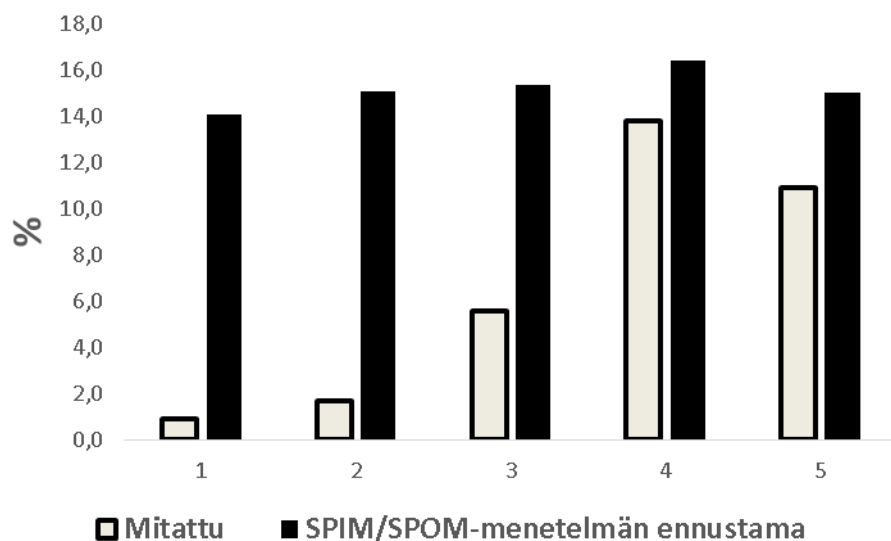
SPIM/SPOM-menetelmällä laskettu keskimääräinen resuspensioaste Pyhäjärvellä oli $28,5 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä välillä $6 - 116 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Keskimääräinen resuspensioaste eri pisteillä vaihteli välillä $26 - 33 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 3). SPIM/SPOM-menetelmällä määritetty resuspensioaste oli keskimäärin $90 - 98 \%$ kokonaissedimentaatiosta. Myös SPIM/SPOM-menetelmällä määritetty resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta oli pienempi matalilla pisteillä kuin syvällä.



Kuva 3. Pyhäjärven bruttosedimentaatio sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän arvioimat resuspensio- ja nettosedimentaatioasteet pisteittäin. Bruttosedimentaatio ja resuspensioasteet ovat vasemmalla akselilla ja nettosedimentaatio oikealla akselilla.

Kaikkien pisteiden resuspensioarviot erosivat toisistaan ja bruttosedimentaatiosta tilastollisesti merkitsevästi (pisteet 1 – 4 parittainen t-testi, piste 5 Wilcoxonin testi, $p < 0,05$). Merkkiainemenetelmän resuspensioasteen osuus SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioasteesta vaihteli pisteittäin keskimäärin välillä 70 – 90 % (liite 3). Pisteiden 1 ja 2 sekä 1 ja 3 välillä tällä suhteella ei ollut merkitsevää eroa ($p = 0,05 – 1,00$), mutta kaikkien muiden pisteiden välillä suhteen ero oli merkitsevä ($p < 0,05$).

Merkkiainemenetelmällä määritetty nettosedimentaatioaste Pyhäjärvellä oli keskimäärin $7 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä välillä $1,4 – 19,4 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Keskimääräinen nettosedimentaatioaste eri pisteillä vaihteli välillä $2,3 – 10,7 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 3). SPIM/SPOM-menetelmällä määritettynä Pyhäjärven keskimääräinen nettosedimentaatio oli $1,2 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä välillä $-0,8 – 5,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Pistekohtainen keskimääräinen nettosedimentaatio vaihteli välillä $0,3 – 2,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 3). Merkkiainemenetelmällä arvioidut nettosedimentaatioarviot olivat keskimäärin 4 – 18 kertaa suurempia kuin SPIM/SPOM-menetelmällä lasketut. Syvemmillä alueilla ero oli huomattavasti pienempi.



Kuva 4. Pyhäjärven eri pisteiden pintasedimentin ja SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen orgaaninen pitoisuus.

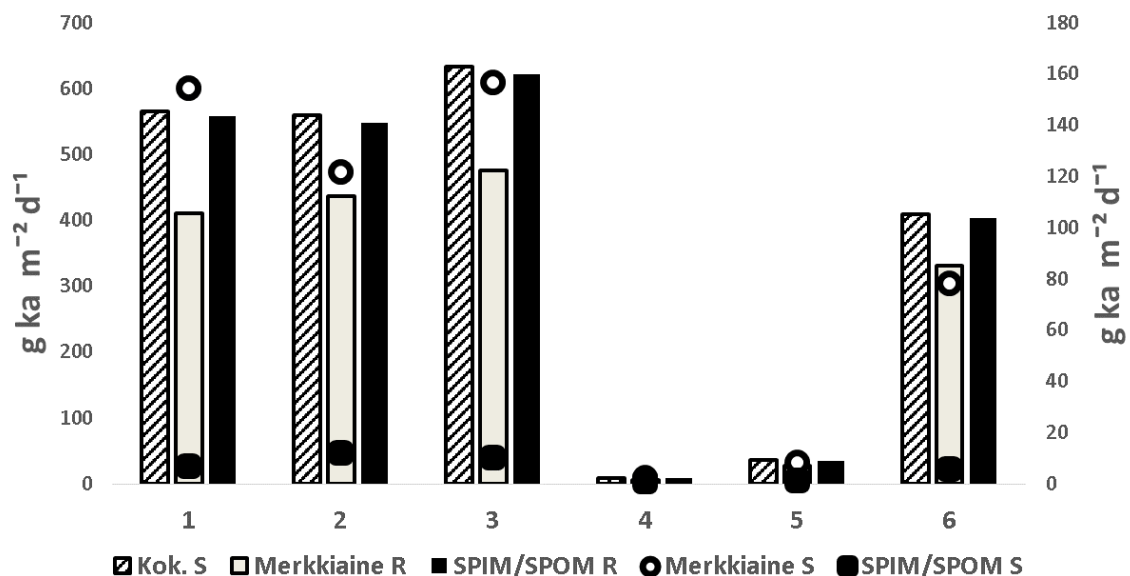
SPIM/SPOM-menetelmällä arvioidun resuspendoituneen sedimentin orgaaninen pitoisuus vaihteli $14,1 – 16,4 \text{ %}$:n välillä, joka oli matalilla alueilla jopa 15-kertainen pintasedimenttinäytteiden pitoisuuksiin verrattuna (kuva 4).

3.1.2. Taihu

Taihulla kaikilta pisteiltä laskettu kokonaissedimentaation keskiarvo oli $369 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $1,3 - 2420 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 2). Vaihtelu oli suurta erityisesti avoimien pisteiden 1, 2, 3 ja 4 sekä suojaisten pisteiden 4 ja 5 välillä niin, että avointen pisteiden kokonaissedimentaatio oli huomattavasti korkeampaa.

Pistekohtainen keskiarvo vaihteli välillä $8,9 - 633 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 5). Pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus vaihteli eri pisteillä välillä $0,6 - 8,9 \%$ (liite 3). Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus vaihteli kauden aikana eri pisteillä välillä $8 - 100 \%$ ja keräinsedimentin orgaaninen osuus välillä $7 - 53 \%$ (liite 3). Keskimäärin orgaanisen aineksen pitoisuudet olivat suurempia suojaisilla pisteillä 4 ja 5.

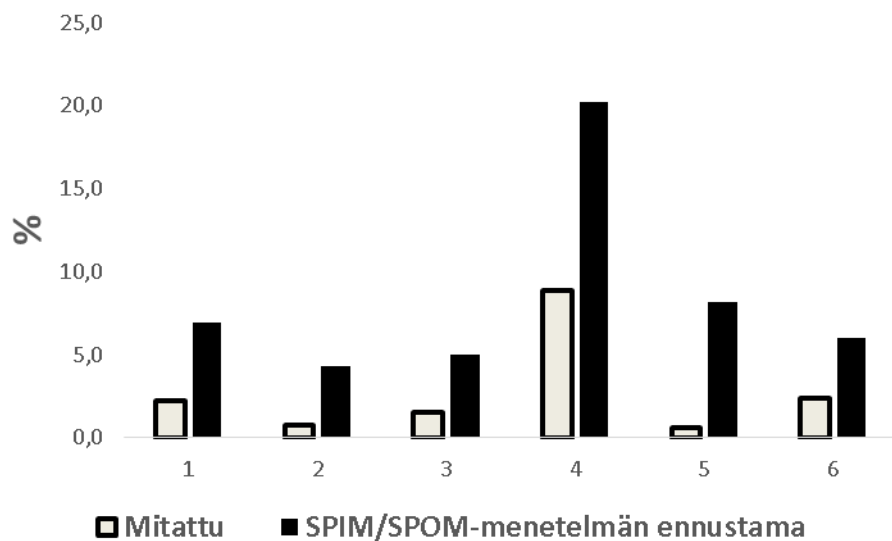
Keskimääräinen merkkiainemenetelmällä laskettu sedimentin resuspensioaste Taihulla oli $282 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $0,9 - 1830 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 2). Pistekohtainen resuspensioasteen keskiarvo vaihteli välillä $6,4 - 476 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 5). Merkkiainemenetelmällä määritetty resuspensioaste oli keskimäärin $65 - 76 \%$ kokonaissedimentaatiosta. Resuspension osuus kokonaissedimentaatiosta oli hieman korkeampi kasviplanktonvyöhykkeellä kuin makrofytytyvyöhykkeellä.



Kuva 5. Taihun bruttosedimentaatio sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien arvioimat resuspensio- ja nettosedimentaatioasteet pisteittäin. Bruttosedimentaatio ja resuspensioasteet ovat vasemmalla akselilla ja nettosedimentaatio oikealla akselilla.

SPIM/SPOM-menetelmällä laskettu resuspensioaste Taihulla oli keskimäärin $362 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $1,1 - 2400 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 2). Pistekohtainen resuspensioasteen keskiarvo vaihteli välillä $8 - 622 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 5). SPIM/SPOM-menetelmällä määritetty resuspensioaste oli keskimäärin $88 - 98 \%$ kokonaissedimentaatiosta. Myös SPIM/SPOM-menetelmällä määritetty resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta oli korkeampi kasviplanktonvyöhykkeellä kuin makrofyttivyöhykkeellä.

Kaikki resuspensioarviot erosivat toisistaan ja lähes kaikki bruttosedimentaatiosta tilastollisesti merkitsevästi (Wilcoxonin testi, $p < 0,05$). Ainoastaan SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvion ja bruttosedimentaation välinen ero pisteellä 4 oli tilastollisesti merkityksetön ($p = 0,062$). Merkkiainemenetelmän arvioiman resuspensioasteen osuus SPIM/SPOM-menetelmän arviosta vaihteli pisteittäin keskimäärin $73 - 78 \%$. Suhteella ei ollut merkitsevää eroa pisteiden välillä ($p = 0,20 - 0,98$)



Kuva 6. Taihun eri pisteiden pintasedimentin ja SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen orgaaninen pitoisuus.

Merkkiainemenetelmällä määritetty nettosedimentaatioaste Taihulla oli keskimäärin $87 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä $0,5 - 584 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Pistekohtainen nettosedimentaation keskiarvo vaihteli välillä $2,4 - 157 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 5). SPIM/SPOM- menetelmällä määritetty nettosedimentaatio oli keskimäärin $6,3 \text{ g ka m}^{-2}$

d^{-1} vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $-0,7 - 17,6 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$. Eri pisteiden kaudenaikaiset keskiarvot vaihtelivat välillä $0,9 - 11,9 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (kuva 5).

SPIM/SPOM-menetelmän ennustama resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli eri pisteillä välillä $4,3 - 20,2 \%$ (kuva 6). SPIM/SPOM-menetelmän ennustama orgaanisen aineksen pitoisuus oli $2 - 15$ kertaa korkeampi kuin pintasedimenttinäytteen orgaanisen aineksen pitoisuus.

3.1.3. Kirkkojärvi

Bruttosedimentaatio Kirkkojärvellä oli keskimäärin $27 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$. Kaudenaikainen sedimentaationopeus eri pisteiden välillä vaihteli välillä $3 - 66 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (liite 1). Kaudenaikainen keskimääräinen sedimentaationopeus vaihteli pisteittäin välillä $8,9 - 45,4 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (kuva 7). Sedimentaatioaste oli korkeampaa tuulelle alttiilla puolella. Vyöhykkeiden välillä pelagiaalialueiden sedimentaatio oli kasvillisuusvyöhykkeitä nopeampaa. Pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen osuus vaihteli kauden aikana eri pisteiden välillä $12,1 - 32,1 \%$ (liite 3). Vesipatsaan orgaaninen pitoisuus vaihteli vastaavasti välillä $28,3 - 100 \%$ ja keräinsedimentin välillä $13,1 - 42,7 \%$ (liite 3). Orgaaniset pitoisuudet olivat korkeampia sekä suojaisammalla puolella että kasvillisuusvyöhykkeessä.

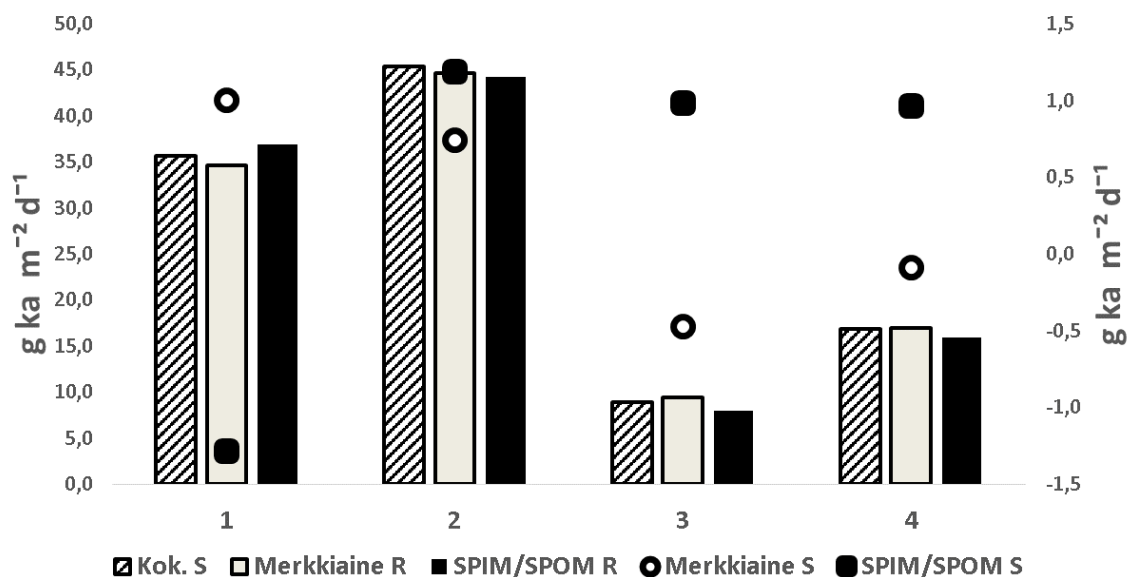
Merkkiainemenetelmällä arvioitu resuspensioaste Kirkkojärvellä oli keskimäärin $26 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $2,3 - 57,5 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (liite 1). Eri pisteiden kauden aikainen keskiarvo vaihteli välillä $9,4 - 44,6 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (kuva 7). Menetelmän arvioiman resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta eri pisteillä oli keskimäärin $97 - 99 \%$.

SPIM/SPOM-menetelmällä arvioitu sedimentin resuspensioaste Kirkkojärvellä oli keskimäärin $26 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä $2 - 68 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (liite 1). Kauden aikainen keskiarvo eri pisteillä vaihteli välillä $8,0 - 44,2 \text{ g ka m}^{-2} d^{-1}$ (kuva 7). SPIM/SPOM-menetelmän arvioiman resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta vaihteli eri pisteillä keskimäärin välillä $83 - 104 \%$.

Merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarviot eivät eronneet toisistaan yhdelläkään pisteellä merkitsevästi (piste 1 Wilcoxonin testi, pisteet 2 – 4 parittainen t-testi, $p = 0,12 - 0,61$). Merkkiainemenetelmän resuspensioarvio ei eronnut myöskään bruttosedimentaatiosta merkitsevästi (piste 1 Wilcoxonin testi, pisteet 2 – 4 parittainen t-testi, $p = 0,36 - 0,92$), mutta SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvio sen sijaan erosi kaikilla pisteillä bruttosedimentaatiosta (piste 1 Wilcoxonin testi, pisteet 2 – 4 parittainen t-testi, $p = 0,00 - 0,02$).

Merkkiainemenetelmän resuspensioasteen osuus SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioasteesta vaihteli eri pisteillä välillä keskimäärin 95 – 116 %.

Merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvion suhteella ei ollut merkitsevää eroa pisteiden 1 ja 2 sekä 2 ja 4 välillä ($p = 0,065 - 0,279$). Suhdeluvut erosivat muiden pisteiden välillä tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$).

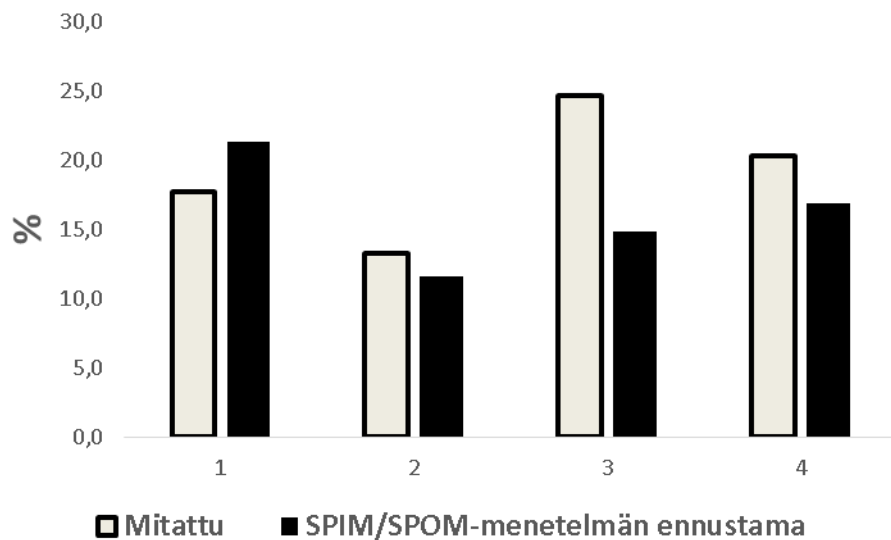


Kuva 7. Kirkkojärven bruttosedimentaatio sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien arvioimat resuspensio- ja nettosedimentaatioasteet pisteittäin. Bruttosedimentaatio ja resuspensioasteet ovat vasemmalla akselilla ja nettosedimentaatio oikealla akselilla.

Merkkiainemenetelmällä arvioitu nettosedimentaatioaste Kirkkojärvellä oli keskimäärin $0,3 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä $-5,8 - 9,1 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Eri pisteiden resuspensioasteen keskiarvot vaihtelivat välillä $-0,5 - 1,0 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 7). SPIM/SPOM- menetelmän arvioima nettosedimentaatioaste oli Kirkkojärvellä keskimäärin

0,5 g ka m⁻² d⁻¹ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä -1,8 – 2,3 g ka m⁻² d⁻¹. Eri pisteiden kaudenaikaiset nettosedimentaatioasteen keskiarvot vaihtelivat välillä -1,3 – 1,2 g ka m⁻² d⁻¹ (kuva 7). Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien nettosedimentaatioarviot erosivat merkitsevästi ainoastaan pisteellä 3 (parittainen t-testi, p<0,05), muilla pisteillä erot eivät olleet merkitseviä (pisteet 1 ja 2 parittainen t-testi, piste 4 Wilcoxonin testi, p<0,05).

SPIM/SPOM-menetelmän ennustama resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli eri pisteillä välillä 11,6 – 21,4 % (kuva 8). SPIM/SPOM-menetelmän ennustama orgaanisen aineksen pitoisuus oli pistettä 1 lukuun ottamatta pienempi kuin pintasedimenttinäytteen orgaanisen aineksen pitoisuus. Erot olivat 13 – 40 %:n suuruusluokkaa.



Kuva 8. Kirkkojärven eri pisteiden pintasedimentin ja SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen orgaaninen pitoisuus.

3.1.4. Rehtijärvi

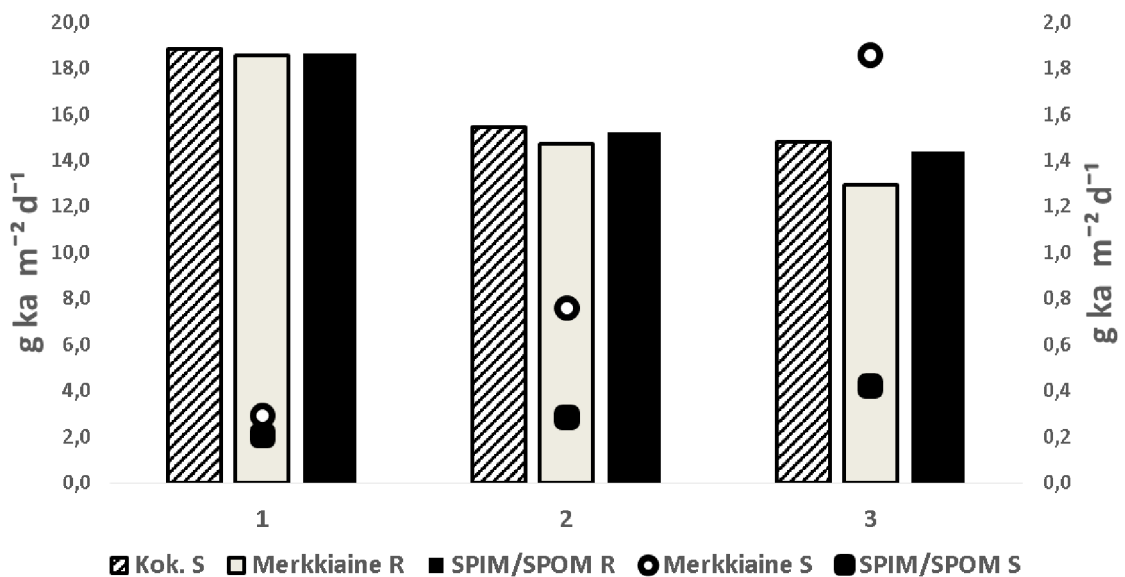
Bruttosedimentaation kauden aikainen keskiarvo Rehtijärvellä oli 16,4 g ka m⁻² d⁻¹ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä 5,9 – 45,9 g ka m⁻² d⁻¹ (liite 2). Eri pisteiden kaudenaikainen keskiarvo vaihteli välillä 15,5 – 18,9 g ka m⁻² d⁻¹ (kuva 9).

Pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen osuus vaihteli kauden aikana eri pisteillä välillä 10,9 – 18,9 % (liite 3). Vesipatsaan orgaaninen pitoisuus vaihteli vastaavasti välillä 21,7 – 71,6 %, ja keräinsedimentin välillä 10,2 – 13,2 % (liite 3). Vesipatsaan ja

keräinsedimentin orgaanisen aineksen osuus olivat keskimäärin korkeimmillaan matalimmalla pisteellä.

Merkkiainemenetelmän arvioima keskimääräinen resuspensioaste Rehtijärvellä oli 15,4 g ka m⁻² d⁻¹ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä 4,7 – 44,7 g ka m⁻² d⁻¹ (liite 2). Eri pisteillä keskimääräinen kaudenaikainen merkkiainemenetelmän arvioima resuspensioaste vaihteli välillä 12,9 – 18,6 g ka m⁻² d⁻¹ (kuva 9). Merkkiainemenetelmän arvioiman resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta eri pisteillä oli keskimäärin 85 – 96 %.

SPIM/SPOM-menetelmän avulla arvioidun resuspensioasteen keskiarvo Rehtijärvellä oli 16,1 g ka m⁻² d⁻¹ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä 5,7 – 45,4 g ka m⁻² d⁻¹ (liite 2). Eri pisteillä kaudenaikainen keskimääräinen resuspensioaste vaihteli välillä 14,4 – 18,7 g ka m⁻² d⁻¹ (kuva 9). SPIM/SPOM-menetelmän arvioiman resuspensioasteen osuus kokonaissedimentaatiosta eri pisteillä oli keskimäärin 88 – 98 %.

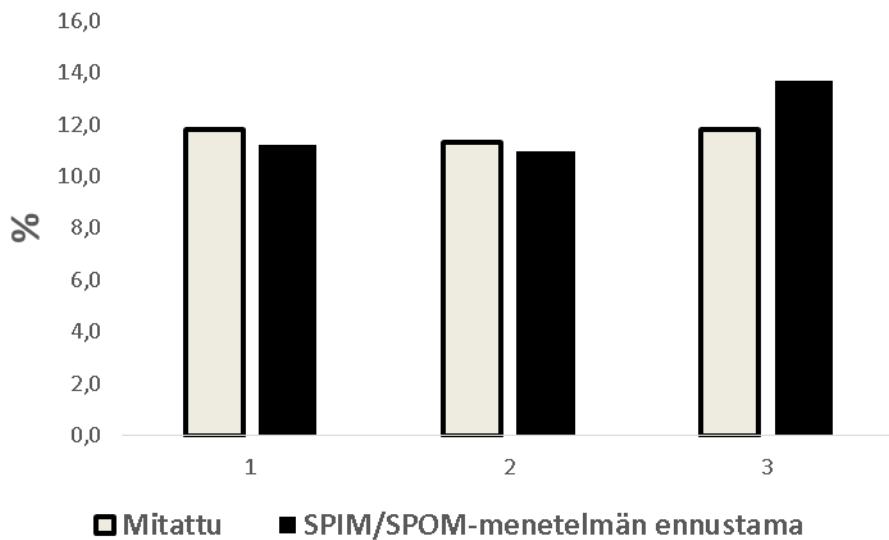


Kuva 9. Rehtijärven bruttosedimentaatio sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien arvioimat resuspensio- ja nettosedimentaatioasteet pisteittäin. Bruttosedimentaatio ja resuspensioasteet ovat vasemmalla akselilla ja nettosedimentaatio oikealla akselilla.

Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien resuspensioarviot erosivat toisistaan ja bruttosedimentaatiosta merkitsevästi pisteillä 2 (Wilcoxonin testi, p<0,05) ja 3 (parittainen t-testi, p<0,05). Pisteellä 1 ainoastaan SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvio ja

bruttosedimentaatio erosivat toisistaan (Wilcoxonin testi, $p < 0,05$), eikä resuspensioasteiden tai merkkiainemenetelmän resuspensioasteen ja bruttosedimentaatioasteen välillä ollut merkitsevää eroa (Wilcoxonin testi, $p = 0,24 - 0,26$). Merkkiainemenetelmän arvion osuus SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarviosta oli keskimäärin 97 – 99 %. Pisteiden 1 ja 3 välillä suhde erosi tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$), mutta pisteiden 1 ja 2 sekä 2 ja 3 suhteiden välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa ($p = 0,05 - 0,546$).

Merkkiainemenetelmällä arvioitu nettosedimentaatioaste oli Rehtijärvellä keskimäärin $1,0 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen eri pisteillä kauden aikana välillä $-2,7 - 3,0 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Eri pisteillä kaudenaikainen keskiarvo vaihteli välillä $0,3 - 1,9 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 9). SPIM/SPOM-menetelmän arvioima nettosedimentaatio oli Rehtijärvellä keskimäärin $0,3 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ kauden aikaisen vaihteluvälin eri pisteillä ollessa $-0,1 - 0,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Eri pisteiden kaudenaikainen keskiarvo vaihteli välillä $0,2 - 0,4 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 9). Pisteellä 1 nettosedimentaatioasteiden välillä ei ollut merkitsevää eroa (Wilcoxonin testi, $p = 0,14$).



Kuva 10. Rehtijärven eri pisteiden pintasedimentin ja SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen orgaaninen pitoisuus.

SPIM/SPOM-menetelmän ennustama resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli eri pisteillä välillä 11 – 13,7 % (kuva 10). SPIM/SPOM-menetelmän ennustama orgaanisen aineksen pitoisuus oli matalalla pisteellä hieman suurempi ja syvemmillä pisteillä hieman pienempi kuin pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuus. Erot olivat 3 – 16 %.

3.1.5. Enonselkä

Vesijärven Enonselällä bruttosedimentaatio oli keskimäärin $15,5 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $4,2 - 62,9 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Kaudenaikainen pisteittäin keskiarvo vaihteli välillä $7,2 - 24,3 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 11). Pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli kauden aikana eri pisteillä välillä $10,8 - 17,5 \%$ (liite 3). Vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus vaihteli vastaavasti $39,8 - 96,6 \%$:n, ja keräinsedimentin $13,2 - 24,3 \%$:n välillä (liite 3). Pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus oli keskimäärin korkeampi syvemmillä pisteillä 2 ja 3, kun taas vesipatsaan orgaaninen pitoisuus oli keskimäärin korkeampi matalilla pisteillä 1, 4 ja 5.

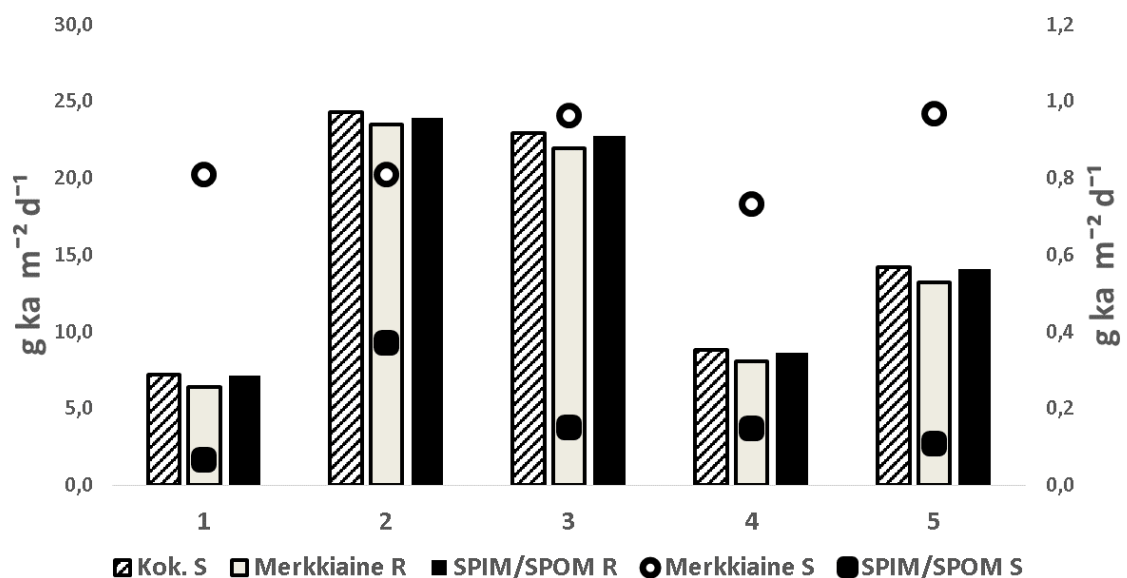
Merkkiainemenetelmällä arvioitu resuspensioaste oli Enonselällä keskimäärin $14,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $3,5 - 59,1 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Kaudenaikainen keskimääräinen resuspensioaste eri pisteillä oli $6,4 - 23,5 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 11). Merkkiainemenetelmän resuspensioarvion osuus kokonaissedimentaatiosta vaihteli eri pisteillä keskimäärin välillä $88 - 96 \%$.

SPIM/SPOM-menetelmällä arvioitu sedimentin resuspensioasta oli Enonselällä keskimäärin $15,3 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $4,1 - 62,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (liite 1). Kaudenaikainen pisteittäin keskiarvo vaihteli välillä $7,1 - 23,9 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 11). SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvion osuus kokonaissedimentaatiosta vaihteli eri pisteillä välillä $98 - 99 \%$.

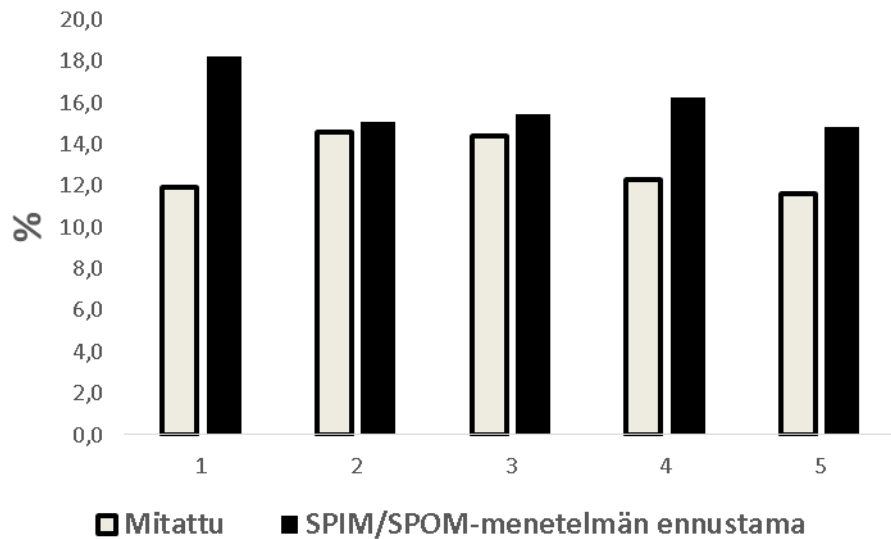
Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien resuspensioarviot sekä merkkiainemenetelmän resuspensioarvio ja bruttosedimentaatio erosivat tilastollisesti merkitsevästi pisteillä 1 ja 3 – 5 (pisteet 1 ja 5 parittainen t-testi, pisteet 3 ja 4 Wilcoxonin testi, $p < 0,05$), mutta pisteellä 2 menetelmien sekä merkkiainemenetelmän ja bruttosedimentaation välillä ei ollut merkitsevää eroa (parittainen t-testi, $p = 0,11 - 0,26$). SPIM/SPOM-menetelmä erosi bruttosedimentaatiosta pisteillä 2 ja 4 (piste 2 parittainen t-testi, piste 4 Wilcoxonin testi, $p < 0,05$). Muilla pisteillä merkitsevää ero ei ollut (pisteet 1 ja 5 parittainen t-testi, piste 3 Wilcoxonin testi, $p = 0,10 - 0,54$). Merkkiainemenetelmän arvion osuus SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarviosta vaihteli välillä $89 - 97 \%$. Pisteiden 2 ja 3 sekä 4 ja 5 menetelmien väliset suhdeluvut eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ($p =$

0,72 – 0,80). Muiden pisteiden välisten suhteiden erot olivat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,05$).

Merkkiainemenetelmällä arvioitu nettosedimentaatioaste Enonselällä oli keskimäärin $0,9 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $-1,4 - 3,8 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Kauden aikainen keskimääräinen nettosedimentaatioaste eri pisteillä vaihteli välillä $0,7 - 1,0 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 11). SPIM/SPOM-menetelmällä arvioitu nettosedimentaatioaste oli keskimäärin $0,2 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ vaihdellen kauden aikana eri pisteillä välillä $-0,3 - 1,0 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Kaudenaikainen keskimääräinen nettosedimentaatioaste pisteittäin vaihteli välillä $0,1 - 0,4 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 11). Nettosedimentaatioarvioilla pisteellä 2 ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa (parittainen t-testi, $p=0,18$).



Kuva 11. Enonselän bruttosedimentaatio sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien arvioimat resuspensio- ja nettosedimentaatioasteet pisteittäin. Bruttosedimentaatio ja resuspensioasteet ovat vasemmalla akselilla ja nettosedimentaatio oikealla akselilla.

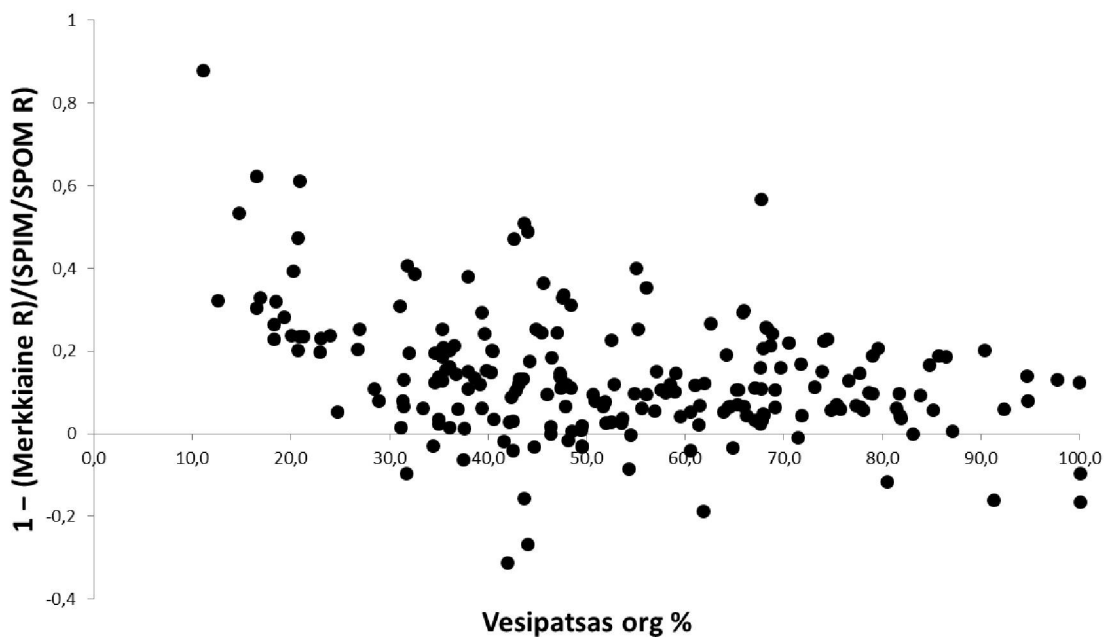


Kuva 12. Enonselän eri pisteiden pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus.

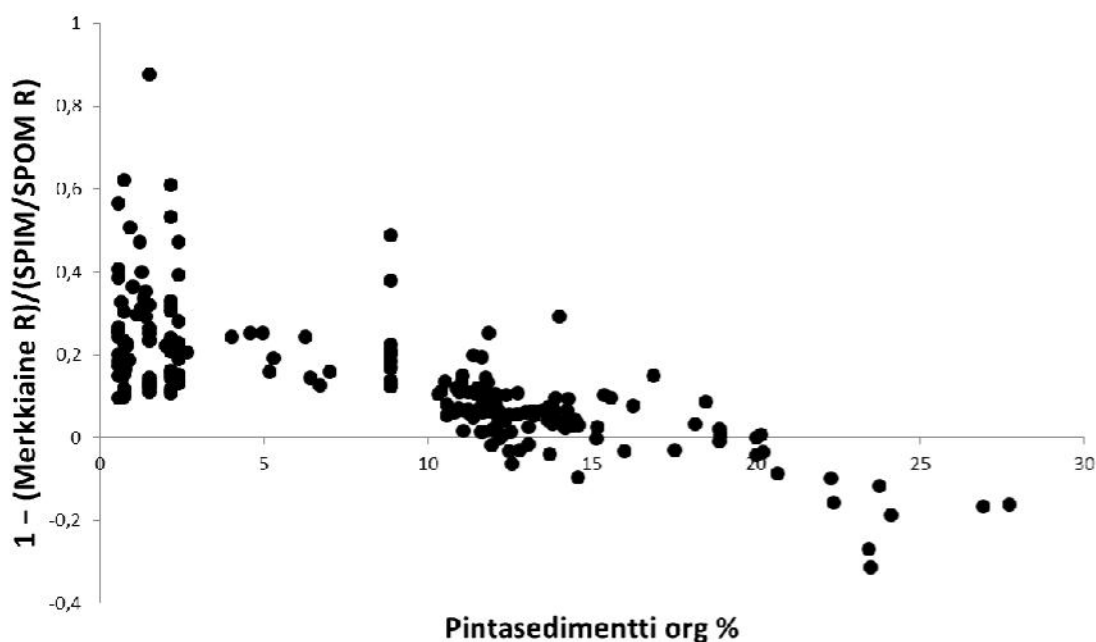
SPIM/SPOM-menetelmän ennustama resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen osuus vaihteli eri pisteillä välillä 15,1 – 18,6 % (kuva 12). SPIM/SPOM-menetelmän ennustama orgaanisen aineksen pitoisuus oli kaikilla pisteillä hieman suurempi kuin pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuus. Erot olivat 3 – 53 %.

3.2. Yhdistetyt korrelaatiot

Kaikkien järvien kaikkien pisteiden kattavan kaavan $1 - \frac{R_{\text{merkkiaine}}}{R_{\text{SPIM/SPOM}}}$ erotuksen ja vesipatsaan orgaanisen aineksen välinen korrelaatio oli kohtalainen ja negatiivinen (Spearmanin korrelaatio, $p < 0,00$) r-arvon ollessa -0,30 (kuva 13). Vastaavasti merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän välisen suhteen eron ja pintasedimentin orgaanisen aineksen välillä oli vahva negatiivinen korrelaatio (Pearsonin korrelaatio, $p < 0,00$), jonka r-arvo oli -0,73 (kuva 14).



Kuva 13. Kaikkien viiden järven yhdistetyn vesipatsaan orgaanisen aineksen osuuden sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän suhteen välisen eron korrelaatio. Yksi piste kuvaa yhden kahden viikon jakson mittauksia yhdessä pisteessä yhdellä järvellä.



Kuva 14. Kaikkien viiden järven yhdistetyn pintasedimentin orgaanisen aineksen osuuden sekä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän suhteen välisen eron korrelaatio. Yksi piste kuvaa yhden kahden viikon jakson mittauksia yhdessä pisteessä yhdellä järvellä.

4. Tulosten tarkastelu

4.1. Järvikohtainen tarkastelu

4.1.1. Pyhäjärvi

Pyhäjärvellä resuspensiota arvioivat menetelmät poikkesivat kaikilla pisteillä tilastollisesti merkitsevästi toisistaan ja bruttosedimentaatiosta. Vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus oli yksi tekijä, joka välttämättä vaikutti jollain lailla menetelmien eroihin. Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus Pyhäjärvellä vaihteli kauden aikana voimakkaasti, mutta oli kaikissa mittauksissa alle 100 %. Merkkiainemenetelmä arvioi tuon orgaanisen aineksen pitoisuuden nettosedimentaation orgaaniseksi pitoisuudeksi, kun taas SPIM/SPOM-menetelmä oletti nettosedimentaation orgaanisen aineksen pitoisuudeksi 100 % kaikilla pisteillä.

Luultavasti nettosedimentaation orgaaninen pitoisuus on jotain tältä väliltä. Pyhäjärvi on matala, suuri ja erittäin avoin järvi. Aallokon aiheuttama resuspensio on matalilla alueilla usein lähes jatkuvaa, ja vesipatsaassa on siksi useimmiten sekoittuneena jonkin verran resuspendoitunutta sedimenttiä.

On lisäksi epätodennäköistä, että SPIM/SPOM-menetelmällä oletettu nettosedimentaation orgaaninen osuus olisi todellisuudessa 100 %, koska piilevää esiintyi vesipatsaassa koko kauden ajan (Ventelä ym. 2015). Vaikka piilevien sedimentaation orgaanisen aineksen arvioinnissa tulevat virheet eivät juuri vaikuta kokonaissedimentaatioon tai -resuspensioon, niillä voi olla kuitenkin merkittävä vaikutus menetelmällä tehtyyn nettosedimentaatioarvioon. Teorettinen piileväpitoisuuden vaihteluun perustuva piilevien sedimentaatio oli Pyhäjärvellä voimakkaimmillaan kuiva-aineeksi muunnettuna (Wolnomiejski & Witek 2013) $0,2 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Ventelä ym. 2015). Syvemmillä alueilla tämä olisi jopa kaksinkertaistanut SPIM/SPOM-menetelmällä arvioidun nettosedimentaationopeuden. Keräimeen mahdollisesti laskeuduttuaan piilevä on vähintäänkin häirinnyt SPIM/SPOM-suhdetta ja tätä kautta koko kauden resuspensioarviota.

Myös pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus poikkesi huomattavasti SPIM-SPOM-menetelmän arviosta. Todennäköisesti suurin ero johtuu näytteenottoon liittyvistä ongelmista. 1,5 ja 3 metrin alueet olivat hiekkaisia eroosiopohjia, joista pintasedimenttinäytteen sai ainoastaan kouranoutimella. Näytteen karkea pohja-aines ei kuitenkaan vastannut vesipatsaaseen resuspendoituvaa, huomattavasti orgaanisempaa ainesta. Syvemmillä alueilla näyte pystyttiin ottamaan putkinoutimella, mutta vielä 4,5 metrin syvyydellä sedimentti oli edelleen liian karkeaa edustaakseen resuspendoituvaa sedimenttiä. Todennäköisesti pohjanlaadusta johtuvista syistä myös eri syvyysvyöhykkeiden merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän suhteet erosivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan matalimpia pisteitä lukuun ottamatta.

Merkkiainemenetelmä ei vaikuta soveltuvan kovin hyvin Pyhäjärvelle. Järvi on liian avoin ja sedimentti jatkuvassa liikkeessä myös vesipatsaassa. Lisäksi erityinen ongelma järvellä ovat eroosiorannat, joilta on erittäin haastavaa ottaa edustavia pintasedimenttinäytteitä. Merkkiainemenetelmä yliarvioi nettosedimentaation osuutta ja aliarvioi resuspensioastetta. Voimakas nettosedimentaatiovaihtelu vaikuttaa lisäksi epäilyttävältä, sillä klorofylli a-pitoisuus pysyi koko kauden ajan suhteellisen tasaisena.

Myös SPIM/SPOM-menetelmä vaikuttaa jossain määrin virheelliseltä. Virheet eivät kuitenkaan ole yhtä suuria kuin merkkimenetelmällä. Menetelmä silti vähättelee nettosedimentaatioastetta jonkin verran. SPIM/SPOM-menetelmä muun muassa arvioi pisteellä 3 kahdella jaksolla nettosedimentaatioasteen olleen negatiivista. Virhe saattaa johtua yhtä lailla nopeasta hajoamisesta, piileväsedimentaatiosta tai orgaanisen aineksen muutoksista pintasedimentistä.

4.1.2. Taihu

Myös Taihulla merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmät poikkesivat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi. Lisäksi menetelmien resuspensioasteet ja bruttosedimentaatio erosivat yhtä pistettä lukuun ottamatta merkitsevästi. Ongelmat vaikuttivat samankaltaisilta kuin Pyhäjärvellä.

Vesipatsaan orgaanisen aineksen keskimääräinen pitoisuus oli erityisesti avoimilla pisteillä hyvin matala. Taihun pinta-ala on 15 kertaa suurempi kuin Pyhäjärven, mutta keskisyvyys

vain kolmasosa Pyhäjärven keskisyvyydestä. Todennäköisesti vesipatsaassa on jatkuvasti sekoittuneena resuspendoitunutta sedimenttiä. Tästä syystä merkkiainemenetelmä yliarvioi toistuvasti nettosedimentaationopeutta. Suojaisilla kasvillisuuspisteillä vesipatsaan orgaanisen aineksen keskimääräinen pitoisuus oli korkeampi kuin avoimilla pisteillä, mutta kuitenkin selkeästi alle 100 %.

Piileväbiomassa ei noussut sedimentaatiokauden aikana korkeaksi sedimentaatiopisteiden lähetyvillä, joten teoreettinen piilevien aiheuttama nettosedimentaatio jäi melko matalaksi. Toisaalta kasviplanktonnäytteitä otettiin ainoastaan neljän viikon välein, jolloin piileväbiomassapiikki on voinut jäädä havaitsematta. Järven muissa osissa havaittiin useamman kerran sedimentaatiokauden aikana 5 – 8 mg l⁻¹ piileväpitoisuuksia (Zhu, Guangwei, kirj. tiedonanto 2014). SPIM/SPOM-menetelmän oletama vesipatsaan oletama 100 %:n orgaanisen aineksen osuus vaikuttaa kuitenkin liioitellulta.

SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen sedimentin ja merkkiainemenetelmää varten otettujen pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuuksien erot olivat Taihulla suuria. Myös Taihulla resuspendoituvaa sedimenttiä edustavan pintasedimenttinäytteen ottaminen oli haastavaa. Näytteet otettiin kouramaisella näytteenottimella. Lisäksi järven mataluuden ja laajuuden takia herkästi resuspendoituva orgaaninen sedimenttiaines on usein jatkuvasti resuspendoituneena, eikä sedimentin pinnalta välttämättä löydy resuspendoituvaa sedimenttiä edustavaa ainesta.

Todennäköisesti menetelmien välisiin eroihin vaikutti eniten pintasedimenttinäytteiden liian vähäinen orgaaninen osuus. Taihulla otettiin kauden aikana lisäksi ainoastaan yksi näyte sedimentaatiopistettä kohden, joten mahdolliset kausittaiset vaihtelut jäivät myös huomioimatta.

Merkkiainemenetelmä ei sovellu kovin hyvin Taihulle, jonka sedimentti on jatkuvassa liikkeessä. Menetelmä aliarvioi resuspensioastetta ja yliarvioi nettosedimentaatioastetta, joka nousi paikoin todella korkeisiin lukemiin. SPIM/SPOM-menetelmä vaikuttaa toimivan Taihulla paremmin, mutta koska sen antamat nettosedimentaatioarviot ovat melko pieniä, voi melko vähäisenkin piileväsedimentaatio, alloktonisen aines ja keräimessä hajoava sedimentti helposti vaikuttaa nettosedimentaatioasteeseen.

Vaikka kasvillisuusasteilla 4 ja 5 netto- ja kokonaissedimentaatioaste olivat todella paljon pienempiä kuin avoimilla alueilla, merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvion suhteella ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa eri pisteiden välillä. Kasvillisuudella ei siis Taihulla ollut vaikutusta menetelmien välisiin eroihin.

4.1.3. Kirkkojärvi

Kirkkojärvellä merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien resuspensioarviot eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkitsevästi. Menetelmien väliset nettosedimentaatioasteetkaan eivät eronneet merkitsevästi kuin yhdellä pisteellä. Toisaalta merkkiainemenetelmän resuspensioarvio ei eronnut merkitsevästi kokonaissedimentaatioasteestakaan. Vaikka menetelmien välillä ei ollut selkeää eroa, vaikuttavat molempien menetelmien arvioimat usein toistuneet negatiiviset nettosedimentaatioarviot epäilyttäviltä. Myös Koski-Vähälä ym. (2000) ovat havainneet merkkiainemenetelmän arvioivan resuspensioasteeksi toisinaan yli 100 % kokonaissedimentaatioasteesta. Resuspensio voi joskus hetkellisesti ylittää kokonaissedimentaation, mutta jatkuva ylittäminen ei ole uskottavaa (Kozerski 1994).

Myös Kirkkojärvellä vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus pysyi koko kauden ajan alle sadassa prosentissa. Orgaanisen aineksen pitoisuus oli keskimäärin selkeästi matalampi ja sedimentaatioaste korkeampi pisteillä 1 ja 2 kuin pisteillä 3 ja 4. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että vallitseville tuulille alttiimmilla pisteillä 1 ja 2 oli vesipatsaassa jatkuvasti sekoittuneena enemmän resuspendoitunutta sedimenttiä kuin pisteillä 3 ja 4. Erityisesti pisteiden 1 ja 2 vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuudet olivat epäilyttävän matalia edustaakseen todellista nettosedimentaation orgaanisen aineksen pitoisuutta.

Vaikka vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus oli Kirkkojärvellä matala, merkkiainemenetelmä kuitenkin antoi keskimääräisesti melko matalan nettosedimentaatioarvion. Syynä tähän oli pintasedimentin ja keräinsedimentin välisen orgaanisen aineksen osuuden samankaltaisuus. Pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus oli usealla pisteellä ja sedimentaatiojaksolla korkeampi kuin keräinsedimentin orgaanisen aineksen osuus. Merkkiainemenetelmä arvioi tällöin resuspensioasteen korkeammaksi kuin kokonaissedimentaatioasteen eli toisin sanoen nettosedimentaatioaste oli negatiivinen.

Negatiivinen sedimentaatio voisi periaatteessa tarkoittaa pintasedimentin voimakasta huuhtoumista niin, että löyhän pinnan alla oleva epäorgaanisempi aines olisi myös

resuspendoitunut ja laskeutunut keräimeen. Tämä vaatisi sen, että myös pintasedimenttinäytteen orgaanisen aineksen osuus pitäisi laskea samalle tasolle. Koska näin ei ollut, syynä on todennäköisimmin keräimessä tapahtunut orgaanisen aineksen hajoaminen, jota myös Horppila ja Nurminen (2005) epäilivät syyksi menetelmien välillä ilmenneisiin eroihin. Bloeschin ja Burns (1980) arvioivat orgaanisesta aineksesta hajoavan keräimessä noin 10 % kahden viikon aikana. Tämä selittäisi keräinsedimentin orgaanisen aineksen osuuden pienentymisen pintasedimentin pitoisuutta matalammaksi. Yksittäiset sedimentaatiojaksot voivat vaikuttaa kauden keskiarvoon huomattavasti. Esimerkiksi pisteellä 4 merkkiainemenetelmän keskimääräinen negatiivinen sedimentaatioaste aiheutui pääasiassa kauden alun voimakkaasta negatiivisesta nettosedimentaatiosta, koska koko loppukauden aikana nettosedimentaatio oli positiivista.

Myös SPIM/SPOM-menetelmällä arvioitu negatiivinen sedimentaatioaste pisteellä 1 vaikuttaa epäilyttävältä. Sekin selittynee keräinaineksen hajoamisella. Huomionarvoista on ensimmäisen sedimentaatiojakson (1.6. – 14.6.) korkea sedimentaatioaste ja keräinsedimentin korkea orgaanisen aineksen pitoisuus. Ensimmäinen sedimentaatiojakso oli myös ainoa jakso, jolloin kasvillisuusvyöhykkeen sedimentaationopeus oli korkeampi kuin pelagiaalivyöhykkeellä. Keräimeen laskeutunut tai joutunut ylimääräinen orgaaninen aines selittäisi sekä kasvillisuusvyöhykkeen pelagiaalialuetta korkeamman sedimentaatioasteen että koko kauden negatiivisen nettosedimentaation.

Päinvastoin kuin Pyhäjärvellä ja Taihulla, Kirkkojärvellä pintasedimenttinäytteen orgaanisen aineksen pitoisuus oli suurempi kuin SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen orgaaninen osuus pistettä 1 lukuun ottamatta. Erot olivat tosin Pyhäjärveen ja Taihuun verrattuna lähes olemattomia, joten senkin puolesta menetelmien väliset erot Kirkkojärvellä olivat vähäisiä.

Jos pintasedimenttinäytteessä ei ole ollut mukana sinne kuulumatonta orgaanista ainesta, kuten kasvinosia, levää tai selkärangattomia, epätodennäköistä, että näytteestä määritetty orgaanisen aineksen osuus olisi korkeampi kuin potentiaalisesti resuspendoituvan sedimentin. Luultavasti SPIM/SPOM-menetelmän ennustamat matalammat pitoisuudet aiheutuivat sedimenttikeräimissä tapahtuneesta orgaanisen aineksen hajoamisesta. Vaikutus ei olisi kovin suuri, mikäli hajoaminen olisi kauden aikana tasaista, mutta voimakas vaihtelu häiritsee SPIM/SPOM-menetelmän nettosedimentaatioarviota. Myös orgaanisen aineksen ylikerruu eli sedimenttikeräimeen joutunut ylimääräinen orgaaninen aines häiritsee SPIM/SPOM-menetelmän arvioita.

Molemmat menetelmistä vaikuttavat jossain määrin sopivilta Kirkkojärvelle. Kuitenkin muutamat kyseenalaiset hajoamisesta tai ylikeruusta johtuvat keräinsedimentin orgaanisen aineksen pitoisuudet johtivat kyseenalaisiin tuloksiin. Horppila ja Nurminen (2005b) arvioivat merkkiainemenetelmän olevan alttiimpi nopealle hajoamistoiminnalle. Myös tässä tutkimuksessa käsitelty aineisto Kirkkojärveltä tukee tätä näkemystä, mutta orgaanisen aineksen pitoisuuden epäsäännölliset virheet häiritsivät myös SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarviota. Merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmien resuspensioarvioiden suhteissa eri pisteiden välillä ei ollut selkeää trendiä eikä kasvillisuudella ollut vaikutusta menetelmien välisiin eroihin.

4.1.4. Rehtijärvi

Rehtijärvellä menetelmät erosivat toisistaan ja bruttosedimentaatiosta tilastollisesti merkitsevästi pisteillä 2 ja 3, mutta pisteellä 1 tilastollista merkitsevyyttä ei ollut resuspensio- ja nettosedimentaation sekä merkkiainemenetelmän ja bruttosedimentaation välillä. Selkein ero menetelmien välillä oli matalalla pisteellä 3.

Vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus oli kaikilla pisteillä keskimäärin alle piilevien orgaanisen aineksen pitoisuuden. Joko vesipatsaassa oli jatkuvasti sekoittuneena jonkin verran resuspendoitunutta sedimenttiä tai sitten alloktionisen aineksen merkitys oli ennako-oletuksia tärkeämpi. Alloktionisen aineksen mahdollista vaikutusta tosin vähentää se, että vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus oli matalimmillaan keskikesällä, jolloin virtaamat ovat yleensä heikoimmillaan.

Syvillä pisteillä 1 ja 2 pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuus oli samaa luokkaa kuin SPIM/SPOM-menetelmän ennustaman resuspendoituneen aineksen. Matalalla pisteellä 3 SPIM/SPOM-menetelmän ennustama pitoisuus oli vain hiukan korkeampi kuin näytteen pitoisuus. Pitoisuudet olivat niin lähellä toisiaan, että ne luultavasti edustivat varsin oikeanlaisia tuloksia.

Merkkiainemenetelmällä arvioitu nettosedimentaatioaste oli pisteillä 1 ja 2 hetkittäin negatiivista. Tämä johtui siitä, että keräinsedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus oli epäorgaanisempaa kuin pintasedimenttinäytteen. Samoin kuin Kirkkojärvellä, todennäköisin selitys tälle on joko pintasedimenttinäytteeseen joutunut ylimääräinen orgaaninen aines tai sedimenttikeräimessä tapahtunut orgaanisen aineksen hajoaminen.

Pisteillä 1 ja 2 25.7. – 9.8. tapahtuneen negatiivisen nettosedimentaation on saattanut aiheuttaa myös pintasedimentin orgaanisen aineksen äkillinen muutos epäorgaanisempaan suuntaan. Koska merkkiainemenetelmän kaavan laskuissa käytettiin kahden peräkkäisen pintasedimenttinäytteen orgaanisen aineksen keskiarvoa, saattoi kyseisenä ajankohtana resuspendoituvaa ainesta edustaa liian orgaaninen aines.

SPIM/SPOM-menetelmän arvioima nettosedimentaationopeus vaikutti vaatimattomalta, mutta esimerkiksi nettosedimentaatio ei ollut pitkiä jaksoja negatiivista eikä muitakaan epäilyttäviä vaihteluita kauden aikana ollut. Todennäköisesti menetelmä arvioi nettosedimentaatioasteen jonkin verran todellisuutta pienemmäksi.

Molemmat menetelmistä vaikuttivat soveltuvan melko hyvin Rehtijärven eri osien resuspensiotutkimukseen. Luultavasti hajoaminen kuitenkin heikentää hieman menetelmien luotettavuutta. Vesipatsaan matala orgaanisen aineksen pitoisuus oli osittain syynä Pyhäjärven ja Taihun korkeaan merkkiainemenetelmän nettosedimentaatioarvioon. Rehtijärvellä tällä ei ollut yhtä voimakasta vaikutusta, koska pintasedimentin orgaanisen aineksen osuus vastasi todennäköisesti todellisen resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen pitoisuutta. Keräimessä mahdollisesti hajonnut orgaaninen aines edelleen pienensi keräin- ja pintasedimentin orgaanisen aineksen välistä eroa.

Rehtijärvellä matalan pisteen keräinsedimentin orgaanisen aineksen pitoisuus oli korkeampi kuin syvempien alueiden. Molempien menetelmien nettosedimentaatioarviot olivat myös matalassa korkeampia kuin syvemmillä alueilla, merkkiainemenetelmän jopa moninkertainen. Vaikka tilastollinen merkitsevyysero löytyi vain pisteiden 1 ja 3 välillä, vaikutti merkkiaine- ja SPIM/SPOM-menetelmän suhde olevan pienempi pisteellä 3 kuin syvemmillä pisteillä eli syvyydellä vaikutti olevan vaikutusta menetelmien toimivuuteen.

4.1.5. Enonselkä

Enonselällä menetelmät erosivat merkitsevästi toisistaan syvintä pistettä lukuun ottamatta kaikkialla. Resuspensioarviot erosivat myös kolmea poikkeusta lukuun ottamatta bruttosedimentaatiosta merkitsevästi. Resuspensioasteiden tai kummankaan resuspensioasteen ja bruttosedimentaation välinen ero oli kuitenkin samaa luokkaa kuin Rehtijärvellä eli melko pieni. Menetelmien nettosedimentaatioarviot olivat myös pieniä, mutta menetelmien välillä niiden ero oli suhteellisesti melko suuri.

Matalilla pisteillä 1, 4 ja 5 vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus oli keskimäärin selkeästi korkeampi kuin syvillä alueilla 2 ja 3. Erityisesti syvillä alueilla vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus oli niin matala, että piilevät eivät voi sitä selittää. Kuten kaikilla muillakin järvillä, myös Enonselällä vaikutti olleen resuspendoitunutta sedimenttiä sekoittuneena vesipatsaaseen. Keräin- ja pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuuden maltillinen ero selittää osittain merkkiainemenetelmän arvioiman kohtuullisen matalan nettosedimentaatioarvion, vaikka vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus teoriassa yliarvioi nettosedimentaationopeutta.

Myös Enonselällä syvien pisteiden pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuudet olivat lähes SPIM/SPOM-menetelmän ennustusten mukaisia. Matalammilla alueilla SPIM/SPOM-menetelmän ennustamat pitoisuudet olivat korkeampia mutta silti suhteellisen lähellä mitattua pitoisuutta.

SPIM/SPOM-menetelmä aliarvioi nettosedimentaatiota myös Enonselällä, ja usealla jaksolla nettosedimentaatioarviot olivat negatiivisia. Kyse on todennäköisesti Enonselälläkin hajonneesta orgaanisesta keräinsedimentistä tai muusta epäorgaanisesta nettosedimentaatiosta. Merkkiainemenetelmän muutaman jakson negatiivinen nettosedimentaatioarvio johtui pintasedimentin keräinsedimenttiä korkeammasta orgaanisesta pitoisuudesta, johon on syynä todennäköisesti keräinsedimentin hajoaminen.

Sekä merkkiaine- että SPIM/SPOM-menetelmät vaikuttivat tulosten perusteella toimivan kohtuullisesti Enonselällä. Selkeitä ja toistuvia virheitä ei kummankaan menetelmän antamissa tuloksissa ollut. Syvyydellä vaikutti olevan vaikutusta merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän resuspensioarvion suhteeseen. Enonselälläkin menetelmien väliset erot olivat pienimpiä syvillä pisteillä, kun taas matalilla pisteillä merkkiainemenetelmän osuus SPIM/SPOM-menetelmän arviosta oli pienimmillään.

4.2. Järvien välinen vertailu

Menetelmien antamat resuspensioarviot erosivat merkitsevästi toisistaan lähes kaikkialla. Niillä pisteillä, joilla eroa ei ollut, vähintään toinen menetelmästä ei eronnut myöskään bruttosedimentaatiosta eli menetelmät antoivat samankaltaisia tuloksia ainoastaan resuspensioarvioiden lähestyessä bruttosedimentaatioastetta.

Menetelmien väliset erot olivat suurimpia suurimmilla järvillä. Menetelmien väliset erot olivat suurimpia myös matalimmilla alueilla saman järven alueella. Kirkkojärveä lukuun ottamatta kaikilla muilla järvillä merkkiainemenetelmän arvioima resuspensioaste oli SPIM/SPOM-menetelmän arvioimaa resuspensioastetta pienempi. Merkkiainemenetelmä aliarvioi resuspensioastetta erityisesti suurimmilla järvillä ja matalimmilla alueilla. SPIM/SPOM-menetelmä päinvastoin vaikuttaisi hiukan yliarvioivan resuspensioastetta kaikilla järvillä. Kasvillisuudella ei tulosten perusteella ollut vaikutusta menetelmien välisiin eroihin.

Merkkiainemenetelmä vaikutti olevan erittäin altis vesi- ja pintasedimenttinäytteenotossa tapahtuville virheille. Resuspendoitunutta sedimenttiä sisältävät vesinäytteet olivat ongelma kaikilla järvillä. Kaikkien järvien avoimilla ja syvillä pisteillä vesipatsaan orgaanisen aineksen osuus oli keskimäärin selkeästi pienempi kuin teoreettisen primäärituotannon. Mikäli vesipatsaasta otetussa vesinäytteessä oli näytteenottohetkellä resuspendoitunutta epäorgaanista ainesta, kaava luokitteli sen primääriseksi sedimentaatioksi, josta seurasi resuspensioasteen aliarvioiminen. Matalan primäärituotannon aikana allohtoninen aines on voinut vaikuttaa vesipatsaan orgaanisen aineksen osuuden pienenemiseen. On kuitenkin epätodennäköistä, että alloktonisella aineksella olisi ollut havaittavaa vaikutusta resuspensiotuloksiin, sillä alloktonisen aineksen vaikutus oli arvioitu kaikilla järvillä merkityksettömäksi.

Vielä suuremman ongelman aiheuttivat pintasedimenttinäytteet, joiden orgaanisen aineksen osuus ei vastannut kaikilla järvillä todellista resuspendoituneen sedimentin orgaanista pitoisuutta. Pintasedimenttinäytteenotossa käytettiin Pyhäjärvellä ja Taihulla kouranoudinta. Kouramaiset sedimenttinäytteenottimet kuitenkin aiheuttavat sedimenttinäytteen sekoittumista, resuspensiota sekä näytteen valumista veden mukana pois (Blomqvist 1991). Orgaanisen aineksen resuspendoituessa herkemmin (Bengtsson & Hellström 1992), kouramaisella noutimella otetut näytteet helposti aliarvioivat pintasedimentin orgaanisen aineksen pitoisuutta. Blomqvist (1991) onkin suositellut kvantitatiivista sedimenttinäytteenottoa varten noudinta, jolla pohjasta saa nostettua häiriintymättömän sedimenttinäytteen.

Orgaaninen aines saattaa lisäksi resuspendoitua herkemmin kuin lujittunut epäorgaaninen sedimentti (Bengtsson & Hellström 1992, Huttula 1994a, Niemistö ym. 2008). Tällöin ei

häiriintymätönkään näyte vastaa todellista resuspendoitunutta sedimenttiä. On lisäksi erittäin epätodennäköistä, että resuspensio kohdistuisi nimenomaan mitattuun 1 cm:n sedimenttikerrokseen. Onkin todennäköisempää, että pintasedimenttiä resuspendoituu sitä syvemmältä mitä voimakkaampi resuspensiotapahtuma. Voimakkaan resuspension myötä hiljattain sedimentoituneen ja löyhän orgaanisen aineksen (Bengtsson & Hellström 1992) lisäksi myös suurempi osa lujittunutta epäorgaanista ainesta saattaa vapautua takaisin vesipatsaaseen (Huttula 1994a).

Poikkeuksellisen hankalaa sedimenttinäytteenotto on Håkansonin (1982) mainitsevilla eroosio- ja kulkeutumisyvyöhykkeillä. Näistä alueista erityisesti eroosiovyöhykkeellä resuspensiota voi tapahtua käytännössä koko ajan, jolloin pintasedimentistä puuttuu kokonaan resuspendoituva aines ja pohjamateriaali voi koostua lähes 100 %:sti epäorgaanisesta karkeasta materiaalista. Jos tällaiselta alueelta otettua pintasedimenttinäytettä käyttää merkkiainemenetelmän kaavassa kuvaamaan resuspendoituvan sedimentin SPIM/SPOM-suhdetta, alhaisen orgaanisen pitoisuuden vuoksi menetelmä aliarvioi resuspensiasteen osuuden. Tämä on virhepäätelmä, koska eroosioalueiden resuspensioaste pitäisi olla suuri (Håkanson 1982). Håkanson ym. (1989) toteavatkin, että eroosioalueiden pintasedimenttiä ei tulisi käyttää kuvaamaan resuspendoituvaa sedimenttiä.

Tutkimuksessa mukana olleista pisteistä eroosiovyöhykkeiksi voi lukea ainakin kaikki Taihu-järven pisteet ja Pyhäjärven matalimmat pisteet. Rajanveto on kuitenkin vaikeaa, sillä varsinkin kulkeutumisyvyöhykkeeseen saattaa kuulua suuri osa järven pohjapinta-alasta.

Edustavien ja häiriintymättömien vesi- ja pintasedimenttinäytteiden ottaminen on hankalinta suurilta, avoimilta ja matalilta järviltä. Nämä molemmat näytteenotoissa tapahtuvat virheet aliarvioivat merkkiainemenetelmällä arvioitua resuspensioastetta ja yliarvioivat nettosedimentaatioastetta. Havaintoa tukee myös se, että menetelmien väliset erot korreloivat voimakkaasti pintasedimentin orgaanisen aineksen kanssa ja kohtalaisesti vesipatsaan orgaanisen aineksen kanssa. Pintasedimenttinäytteiden orgaanisen aineksen pitoisuus vaikutti enemmän merkkiainemenetelmän resuspensioarvioon ja siten myös menetelmien välisiin eroihin kuin vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuus.

SPIM/SPOM-menetelmä vaikutti kaikilla järvillä yliarvioivan hiukan sedimentin resuspensiota. Todennäköisesti merkittävin syy siihen on oletus siitä, että

primäärituotannon orgaanisen aineksen osuus on 100 %. Kaikilla järvilla, joilta oli kasviplanktondataa tutkimusjakson ajalta, esiintyi koko kauden ajan vähintään pieniä pitoisuuksia piilevää. Alloktoninen aines on myös voinut paikoin vaikuttaa vesipatsaan orgaanisen aineksen pitoisuuteen. Lisäksi Wolnomiejski ja Witek (2013) arvioivat kasviplanktonin orgaanisen osuuden olevan 93 % muiden kuin piilevien osalta, joten Weyhenmeyerin (1995) esittämä primäärituotannon 100 %:n orgaaninen osuus vaikutti olleen kaikilla tutkimusjärvilla liian suuri.

Horppila ja Nurminen (2005b) havaitsivat merkkiainemenetelmän olevan SPIM/SPOM-menetelmää herkempi keräinaineiden SPIM/SPOM -virheille, jotka saattavat johtua orgaanisen aineksen hajoamisesta tai orgaanisen aineksen ylikeruusta. Ylikeruu voi johtua esimerkiksi keräimeen kiinnittyneestä perifytonista tai sinne ajautuneista eläimistä tai kasvosista (Bloesch & Burns 1980, Horppila & Nurminen 2005b). Kahden viikon sedimentaatioajanjakson aikana orgaanisen aineksen hajoamisen arvioidaan olevan 10 %:n luokkaa (Bloesch & Burns 1980). Hajoamisnopeus kuitenkin vaihtelee ja on todennäköisesti nopeinta lämpimässä vedessä bakteeritoiminnan ollessa voimakasta (Bloesch & Burns 1980). Tämän tutkimuksen tulokset tukivat tätä havaintoa. On vaikeaa arvioida kuinka paljon keskimääräinen vaikutus oli, mutta osa kyseenalaisista resuspensiotuloksista on selitettävissä parhaiten keräinsedimentin orgaanisen aineksen muutoksilla erityisesti Kirkkojärvellä.

Keräinsedimentin orgaanisen aineksen hajoaminen ja ylikeruu vaikuttivat kuitenkin myös SPIM/SPOM-menetelmän tuloksiin. Koska suurimmalla osalla pisteistä SPIM/SPOM-menetelmän arvioima nettosedimentaatio oli sangen vaatimatonta, pienetkin poikkeamat todellisen primäärituotannon orgaanisen aineksen osuudessa saattoivat aiheuttaa jopa moninkertaisen virhearvion nettosedimentaatioarvioon. Joidenkin pisteiden kaudenaikaiset tai yksittäiset negatiiviset nettosedimentaatioarviot selittyvätkin mitä todennäköisimmin keräinmateriaalin hajoamisella tai ylikeruulla. Yksittäiset poikkeavat tulokset voivat aiheuttaa positiivisen tai negatiivisen muutoksen keskimääräiseen nettosedimentaatioarvioon riippuen senhetkisestä bruttosedimentaatioasteesta. SPIM/SPOM-menetelmän nettosedimentaatioarvio vaikuttaa olevan siis yhtä lailla altis myös yksittäisille voimakkaasti poikkeaville kaudenaikaisille tuloksille, koska arvio perustuu koko kauden tuloksiin, ja voimakkaat poikkeamat vääristävät herkästi kauden keskiarvoa. Pelkkää resuspensioastetta arvioitaessa nettosedimentaatioissa tapahtuneet mahdolliset virheet olivat käytännössä merkityksettömiä.

Horppila ja Nurminen (2005) esittävät SPIM/SPOM-menetelmän olevan merkkiainemenetelmää herkempi planktonkukintojen hallitsemisessa vesistöissä. Tutkimuksessa virhettä yritettiin paikata residuaalien avulla. Primäärituotannon vaihtelun kuvaaminen residuaalien avulla on kuitenkin osittain harhaanjohtavaa, sillä residuaalit kuvaavat todellisuudessa yhtä lailla myös resuspendoituneen sedimentin orgaanisen aineksen muutoksia.

Vaikka merkkiainemenetelmä ei ole niin tarkka allohtonisen aineksen eikä piilevien esiintymisestä kuin SPIM/SPOM-menetelmä, voivat ne runsaina esiintyessään vääristää yksittäisiä tuloksia. Vaikka Horppila ja Nurminen (2005b) arvioivatkin merkkiainemenetelmän SPIM/SPOM-menetelmää luotettavammaksi menetelmäksi kasviplanktonkukintojen hallitsemisessa järvissä, löysi Floderus (1989) ongelman, että nopean nettosedimentaation aikaan on käytännössä mahdotonta erottaa laskeutuva aines jo pohjalle laskeutuneesta aineksesta. Merkkiainemenetelmä tulkitsee tämän aineksen primääriseksi sedimentaatioksi ja tätä kautta yliarvioi nettosedimentaatiota. Orgaanisen aineksen pitoisuus onkin jatkuvassa muutostilassa sekä vesipatsaassa että pintasedimentissä (Häkanson ym. 1989). Voimakkaita kasviplanktonkukintoja ei kuitenkaan esiintynyt muilla järvilla kuin Taihulla, jossa toisaalta ei seurattu lainkaan pintasedimentin laadun vaihtelua kauden aikana.

SPIM/SPOM-menetelmä oli kaikkiaan vähemmän herkkä virheille, mutta sen antamat resuspensioarviot olivat poikkeuksetta hiukan liian korkeita eikä menetelmä huomion monia yhtä monia muuttujia kuin merkkiainemenetelmä. Merkkiainemenetelmä onkin periaatteessa joustavampi ja SPIM/SPOM-menetelmää tarkempi menetelmä ja soveltuu vaikkapa ainoastaan yhden sedimentaatiojakson pituiseen mittaukseen, kun SPIM/SPOM-menetelmä tarvitsee useita sedimentaatiojaksoja erilaisilla kokonaissedimentaatioasteilla, jotta havaittujen SPIM:n ja SPOM:n suhteen saadaan piirrettyä luotettava regressiosuora.

Kuitenkin merkkiainemenetelmä paljastui paljon herkemäksi näytteenotossa tapahtuville virheille kuin SPIM/SPOM-menetelmä, ja toimiakseen hyvin menetelmä vaatii tarkat olosuhteet. Näitä ovat tyyni ja resuspendoituneesta sedimentistä vapaa vesipatsas, jonka sisältämä aines kuvaa ainoastaan primääristä sedimentaatiota. Erityisesti avoimella sekä suurella ja matalalla järvellä tällaiset olosuhteet voivat olla harvinaisia. Lisäksi järvien

syvännealueiden vesipatsaassa vaikuttaa jatkuvasti olevan resuspendoitunutta sedimenttiä, alloktionista ainesta tai osittain hajonnutta primäärituotantoa.

Resuspendoituvaa sedimenttiä kuvaavan pintasedimenttinäytteen ottaminen on haastavaa erityisesti eroosioalueilta. Koska partikkelimaisen aineksen horisontaalinen liikkuminen on nopeampaa kuin alaspäin vajoaminen (Hargrove 1979, Huttula 1994b) ja suunta on lopulta kohti akkumulaatiovyöhykettä (Håkanson ym. 1982), saattaa akkumulaatiovyöhykkeen pintasedimentti kuvata myös eroosioalueilta resuspendoituvaa sedimenttiä paremmin kuin eroosioalueen pintasedimentti. Tällaisilla alueilla onkin mahdollisesti kuvaavampaa käyttää akkumulaatiovyöhykkeen pintasedimentin orgaanista ainesta merkkiainemenetelmän kaavassa. Tosin esimerkiksi Taihun kaltaisilla suurilla ja kauttaaltaan matalilla järvillä selkeää akkumulaatiovyöhykettä ei välttämättä ole pintasedimentin resuspendoituessa toistuvasti kaikkialla järvessä.

Håkanson ym. (1989) ovat esitelleet myös vaihtoehdon, jossa resuspendoitunutta sedimenttiä edustaisi kauden aikana SPIM/SPOM-suhteeltaan suurin keräinsaaalis. Tämä saattaa kenties toimia eroosioalueilla pintasedimenttinäytteitä paremmin, mutta muita edellä mainittuja ongelmia se ei poista. Lisäksi vaihtoehto mitätöi paitsi sen hetkisen primäärisen sedimentaation, myös aliarvioi kauden muiden jaksojen primäärisedimentaatiota. Lisäksi resuspendoituvan sedimentin SPIM/SPOM-suhde pysyisi tällä menetelmällä vakiona, joka heikentäisi menetelmän luotettavuutta erityisesti voimakkaiden leväkukintojen aikana.

Vaikka SPIM/SPOM-menetelmän resuspensiolaskukaavassa ei tarvita pintasedimentin orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen suhteita, kertovat pintasedimenttinäytteet kaudenaikaisista SPIM/SPOM-suhteiden muutoksista. Koska resuspendoituneen sedimentin orgaanisen ja epäorgaanisen aineksen osuus pitäisi vastata pintasedimentin vastaavaa suhdetta, toimivat pintasedimenttinäytteet myös kontrollina vertailtaessa kaavan avulla ennustettua pintasedimentin SPIM/SPOM-suhdetta pintasedimentin todelliseen suhteeseen (Weyhenmeyer 1997). Vertailu paljastaa myös mahdollisen virhelähteen merkkiainemenetelmän ja SPIM/SPOM-menetelmän välillä. Toisaalta ne mittaavat hiukan eri asioita. Pintasedimenttinäyte kuvaa alueelta resuspendoituvan sedimentin pitoisuutta, kun taas SPIM/SPOM-menetelmällä arvioidaan keräimeen jo laskeutuneen, mahdollisesti muualla resuspendoituneen sedimentin osuus nettosedimentaatiosta.

Bruttosedimentaation ollessa korkea ($> 50 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) resuspendoituneen sedimentin osuus on yleensä lähellä sataa prosenttia (Weyhenmeyer 1995, Koski-Vähälä ym. 2000, Horppila & Nurminen 2005b). Tällöin bruttosedimentaatio saattaa epävarmojen resuspensioarvioiden rinnalla tarjota mielekkäimmän arvion todellisesta resuspensioasteen suuruusluokasta, vaikka mitätöikin primäärisen sedimentaation. Sedimentti- ja ravinnevirtoja tutkiessa ei toisaalta välttämättä ole edes tärkeää saada erotettua toisistaan primääristä ja sekundääristä sedimentaatiota, varsinkaan silloin kun primäärisen sedimentaation osuus on suhteellisesti merkityksetöntä. Sedimenttikeräimien avulla mitattu bruttosedimentaatio kuvaa joka tapauksessa silloista sedimentaationopeutta ja keräimiin laskeutunut aines todellista vesipatsaassa ollutta ainesta.

5. Johtopäätökset

Vaikka sekä merkkiainemenetelmän että SPIM/SPOM-menetelmän sedimentin resuspensiota mittaavat menetelmät ovat osoittautuneet toimiviksi erityisesti matalissa järvissä (Gasith 1975, Bloesch 1994, Weyhenmeyer 1995), molemmissa menetelmissä on omat puutteensa ja vajavaisuutensa (Horppila & Nurminen 2005b). Tämän tutkimuksen perusteella näiden menetelmien arvioimiin tuloksiin kannattaa suhtautua kriittisesti.

Merkkiainemenetelmä soveltuu menetelmistä paremmin suojaisiin ja pieniin järviin sekä syville alueille, joissa pintasedimentti ei ole jatkuvasti resuspendoituneena, vaan pysyy pääasiassa pohjalla. Jos tällaisella järvellä esiintyy lisäksi voimakkaita kasviplanktonkukintoja tai maltillisiakin piileväkukintoja tai jos alloktoninen aines vaikuttaa vähääkään vesipatsaan SPIM/SPOM -suhteeseen, merkkiainemenetelmän luotettavuus kasvaa SPIM/SPOM-menetelmään nähden.

Suurilla, avoimilla ja matalilla järvillä sekä pienempienkin järvien eroosiovyöhykkeillä merkkiainemenetelmää varten otettavien näytteiden kanssa täytyy olla huolellinen, että ne todella vastaisivat teoreettista primäärituotantoa ja resuspendoituvaa sedimenttiä. Merkkiainemenetelmä helposti aliarvioi sedimentin resuspensiota tällaisissa olosuhteissa. Tällaisilla järvillä tai eroosiovyöhykkeillä SPIM/SPOM-menetelmä toimii todennäköisesti paremmin, koska siitä puuttuvat merkkiainemenetelmän mahdolliset virhelähteet. SPIM/SPOM-menetelmä ei kuitenkaan ota kaikkia sedimentaatioon vaikuttavia muuttujia huomioon ja yliarvioi sedimentin resuspensioastetta jonkin verran.

On suositeltavaa, että arvioitaessa sedimentin resuspensiota jommallakummalla menetelmällä, kannattaa laskea resuspensoarvio myös toisella. Menetelmissä tarvittava kenttätöskentely, tutkimusvälineet sekä sedimentti- että vesinäytteiden jatkokäsittely laboratoriossa sisältävät käytännössä samat toimet, joten ainoa lisätö tulee laskutavasta. Työn määrässä mitaten lisä on mitätön verrattuna vertailussa saatavaan varmuuteen. Menetelmien tuloksia on syytä tarkastella aina rinnakkain sekä bruttosedimentaation että ennustetun nettosedimentaation kanssa.

6. Kiitokset

Haluan kiittää kaikkia niitä lukuisia henkilöitä, jotka ovat auttaneet minua työni eri vaiheissa. Maininnan ansaitsee erityisesti Leena Nurminen, joka on jaksanut ohjata gradutyötäni läpi synkimpien vaiheiden. Kiitän myös Juha Niemistöä, Mengyuan Zhuta, Guangwei Zhuta sekä koko Pyhäjärvi-instituutin henkilökuntaa, jotka ovat kaikki antaneet käyttööni valtavan määrän tutkimusaineistoa. Lisäksi haluan kiittää Tero Forsmania sekä kaikkia muita näytteenotossa mukana olleita henkilöitä.

7. Kirjallisuus

Bengtsson L., Hellström T. & Rakoczi L. 1990. Redistribution sediments in three Swedish lakes. *Hydrobiologia*, **192**, 167-181.

Bengtsson, L. & Hellström, T. 1992. Wind-induced resuspension in a small shallow lake. *Hydrobiologia*, **241**, 163–172.

Bloesch, J. & Burns, N. M. 1980. A critical review of sedimentation trap technique. *Schweizerische Zeitschrift fuer Hydrologie*, **42**, 15-55.

Bloesch, J. 1982. Inshore-off shore sedimentation differences resulting from resuspension in the Eastern basin of Lake Erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **39**, 748–759.

Bloesch, J. 1994. A Review of Methods used to Measure Sediment Resuspension. *Hydrobiologia*, **284**, 13-18.

- Blomqvist S. 1991. Quantitative sampling of bottom sediments: problems and solutions. *Marine Ecology Progress Series*, **72**, 295 – 304.
- Carper, G. L. & Bachmann, R. W. 1984. Wind resuspension of sediments in a prairie lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **41**, 1763–1767.
- Cornett, R. J., Chant, L. A., Risto, B. A. & Bonvin E., 1994. Identifying resuspended particles using isotope ratios. *Hydrobiologia*, **284**, 69-77.
- Davis, W. R. 1993. The role of bioturbation in sediment resuspension and its interaction with physical shearing. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **171**, 187-200.
- de Vicente, I., Cruz-Pizarro, L. & Rueda, F. 2010. Sediment resuspension in two adjacent shallow coastal lakes: controlling factors and consequences on phosphate dynamics. *Aquatic Science*, **72**, 21-31.
- Evans, D. & Håkanson L., 1992. Measurement and prediction of sedimentation in small Swedish lakes. *Hydrobiologia*, **235**, 143-152.
- Floderus, S. 1989. The effect of sediment resuspension on nitrogen cycling in the Kattegat variability in organic matter transport. PhD Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Flower, R. J. 1991. Field calibration and performance of sediment traps in a eutrophic holomictic lake. *Journal of Paleolimnology*, **5**, 175-188.
- Gasith, A. 1975. Tripton sedimentation in eutrophic lakes - simple correction for the resuspended matter. *International Association of Theoretical and Applied Limnology*, **19**, 116–122.
- Hamilton, D. & Mitchell S. 1997. Wave-induced shear stresses, plant nutrients and chlorophyll in seven shallow lakes. *Freshwater Biology*, **38**, 159-168.

- Hargrave, B. & Burns, N. 1979. Assessment of sediment trap collection efficiency. *Limnology and Oceanography*, **24**, 1124-1136.
- Horppila J. & Nurminen, L. 2005a. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake. *Hydrobiologia*, **545**, 167–175.
- Horppila, J. & Nurminen, L. 2005b. Effects of calculation procedure and sampling site on trap method estimates of sediment resuspension in a shallow lake. *Sedimentology*, **52**, 903–913.
- Horppila J. & Niemistö J. 2008. Horizontal and vertical variations in sedimentation and resuspension rates in a stratifying lake – effects of internal seiches. *Sedimentology*, **55**, 1135–1144.
- Huttula T. 1994a. Modelling the transport of suspended sediment in shallow lakes. PhD Thesis, University of Helsinki, Helsinki, Finland.
- Huttula T. 1994b. Suspended sediment transport in Lake Säkylän Pyhäjärvi. *Aqua Fennica*, **24**, 171-185.
- Håkanson, L. 1982. Lake Bottom Dynamics and Morphometry: The Dynamic Ratio. *Water Resources Research Volume*, **18**, 1444–1450.
- Håkanson, L., Floderus, S. & Wallin M. 1989. Sediment trap assemblages – a methodological description. *Hydrobiologia*, **176**, 481-490.
- Katz T., Yahal G., Reidenbach M., Tunnicliffe V., Herut B., Crusius J., Whitney F., Snelgrove P. V. R. & Lazar B. 2012. Resuspension by fish facilitates the transport and redistribution of coastal sediments. *Limnology and Oceanography*, **57**, 945-958.
- Kelderman, P., Ang'weya, R.O., De Rozari, P. & Vijverberg, T. 2012. Sediment characteristics and wind-induced sediment dynamics in shallow Lake Markermeer, the Netherlands. *Aquatic Sciences*, **74**, 301-313.
- Koski-Vähälä, J., Hartikainen, H. & Kairesalo, T. 2000. Resuspension in regulating sedimentation dynamics in Lake Vesijärvi. *Archiv für Hydrobiologie*, **148**, 357-381.

- Kozerski, H. 1994. Possibilities and limitations of sediment traps to measure sedimentation and resuspension. *Hydrobiologia*, **284**, 93-100.
- Lau, Y. Laboratory Study of Cylindrical Sedimentation Traps. 1979. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, **36**, 1288-1291.
- Lemmin, U. & Imboden, D. M. 1987. Dynamics of bottom currents in a small lake. *Limnology and Oceanography*, **32**, 62-75.
- Murase, J. & Sakamoto, M. 2000. Horizontal distribution of carbon and nitrogen and their isotopic compositions in the surface sediment of Lake Biwa. *Limnology*, **1**, 177-184.
- Niemistö, J., Holmroos H., Pekcan-Hekim Z., & Horppila J. 2008. Interactions between sediment resuspension and sediment quality decrease the TN:TP ratio in a shallow lake. *Limnology and Oceanography*, **53**, 2407–2415.
- Niemistö, J. Holmroos, H., Nurminen L. & Horppila J. 2009. Resuspension-Mediated Temporal Variation in Phosphorus Concentrations and Internal Loading. *Journal of environmental quality*, **38**, 560-566.
- Niemistö, J., Tamminen, P., Ekholm, P. & Horppila, J. 2012. Sediment resuspension: rescue or downfall of a thermally stratified eutrophic lake? *Hydrobiologia*, **686**, 267-276.
- Peterson, E. L. 1999. Benthic shear stress and sediment condition. *Aquacultural Engineering*, **21**, 85-111.
- Sakai, Y., Murase, J., Sugimoto, A., Okubo, K. & Nakayama, E. 2002. Resuspension of bottom sediment by an internal wave in Lake Biva. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, **7**, 339-344.
- Scheffer, M., Portielje, R. & Zambrano, L. 2003. Fish facilitate wave resuspension of sediment. *Limnology and Oceanography*, **48**, 2003, 1920–1926.

- Smith, V. H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, **10**, 126-139.
- Søndergaard, M., Jensen, J. P., Jeppesen, E. 1999. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiologia*, **408**, 145-152.
- Tammeorg, O., Niemistö, J., Horppila, J., Haldna, M. & Kangur K. 2013. Sedimentation and resuspension dynamics in Lake Vesijärvi (Finland): comparison of temporal and spatial variations of sediment fluxes in deep and shallow areas. *Fundamental and Applied Limnology*, **182**, 297-307.
- Tatrai, I., Breukelaar, A., Lammens, E. & Breteler, J. 1994. Effects of benthivorous bream (*Abramis brama*) and carp (*Cyprinus carpio*) on sediment resuspension and concentrations of nutrients and chlorophyll-a. *Freshwater Biology*, **32**, 113–121.
- Ventelä, A., Amsinck, S., Kauppila, T., Johansson, L., Jeppesen, E., Kirkkala, T., Søndergaard, M., Weckström, J., Sarvala, J. 2015. Ecosystem change in the large and shallow Lake Säkylän Pyhäjärvi, Finland, during the past ~400 years: implications for management. *Hydrobiologia*, **778**, 273–294.
- Weyhenmeyer, G., Meili, M. & Pierson, D. 1995. A simple method to quantify sources of settling particles in lakes: resuspension versus new sedimentation of material from planktonic production. *Marine Freshwater Research*, **46**, 223-231.
- Weyhenmeyer, G. 1997. Quantification of resuspended particles in sedimentation traps. *International Association of Theoretical and Applied Limnology meeting*, **26**, 271-276.
- Weyhenmeyer, G. 1998. Resuspension in lakes and its ecological impact – a review. *Archiv für Hydrobiologie*, **51**, 185-200.
- Zhu, G., Wang, F., Gao, G., Zhang, Y. 2008. Variability of Phosphorus Concentration in Large, Shallow and Eutrophic Lake Taihu, China. *Water Environment Research*, **80**, 832-839.

Zhu, M., Zhu, G., Nurminen, L., Wu, T., Deng, J., Zhang, Y., Qin, B., Ventelä, A. 2015. The Influence of Macrophytes on Sediment Resuspension and the Effect of Associated Nutrients in a Shallow and Large Lake (Lake Taihu, China). *Plos One*, **10**, 1-20.

Tietokannat: Vedenlaatu / Lähde: SYKE ja ELY-keskukset/Hertta-tietokanta. Huhtikuu 2016.

8. Liitteet

Liite 1. Tutkimusjärviä kokonaissedimentaatio- ja resuspensiotulokset pisteittäin ja ajankohdittain 95 % luottamusväleillä. S = sedimentaatio, R = resuspensio.

	(g ka m ⁻² d ⁻¹)	5.6.	19.6.	3.7.	17.7.	31.7.	14.8.	28.8.	19.9.	10.10.
Pyhäjärvi 1	Brutto S	44,7 ± 2,1	17,6 ± 0,5	43,0 ± 6,0	34,4 ± 1,1	26,2 ± 1,5	27,2 ± 1,4	8,8 ± 0,6	36,7 ± 4,6	23,1 ± 2,7
	Merkkiaine R	28,9 ± 1,4	7,5 ± 0,7	25,8 ± 3,7	17,3 ± 0,8	15,5 ± 0,9	18,3 ± 0,9	6,0 ± 0,4	29,4 ± 4,0	16,8 ± 1,1
	SPIM/SPOMR	43,1 ± 2,0	15,3 ± 0,5	40,6 ± 5,7	28,9 ± 1,0	22,1 ± 1,3	23,8 ± 1,2	7,4 ± 0,5	35,3 ± 4,7	21,6 ± 1,8
Pyhäjärvi 2	Brutto S	59,9 ± 3,8	12,8 ± 1,0	38,3 ± 6,6	19,2 ± 1,0	23,8 ± 1,9	24,3 ± 2,0	7,3 ± 0,2	43,4 ± 1,7	21,6 ± 3,9
	Merkkiaine R	40,6 ± 3,3	6,2 ± 0,5	24,5 ± 3,8	11,0 ± 0,5	14,6 ± 1,1	16,9 ± 1,4	5,0 ± 0,1	32,3 ± 1,3	14,8 ± 2,5
	SPIM/SPOMR	57,9 ± 4,1	10,8 ± 0,9	36,3 ± 6,2	17,2 ± 0,9	21,8 ± 1,6	22,4 ± 1,8	5,4 ± 0,2	41,5 ± 1,6	19,6 ± 3,4
Pyhäjärvi 3	Brutto S	65,5 ± 6,2	28,6 ± 2,6	49,5 ± 7,5	12,7 ± 2,8	13,5 ± 0,8	19,5 ± 2,0	10,5 ± 1,0	61,2 ± 8,9	42,6 ± 3,7
	Merkkiaine R	49,0 ± 4,4	21,4 ± 2,4	38,1 ± 5,5	9,1 ± 2,1	10,5 ± 0,8	16,4 ± 1,8	8,4 ± 0,8	52,7 ± 7,3	34,4 ± 2,7
	SPIM/SPOMR	65,1 ± 6,0	28,2 ± 2,8	49,1 ± 7,5	12,3 ± 2,7	13,1 ± 0,9	19,1 ± 2,1	10,1 ± 0,9	60,8 ± 8,5	42,2 ± 3,3
Pyhäjärvi 4	Brutto S	36,3 ± 1,5	8,1 ± 2,8	48,0 ± 3,2	9,9 ± 0,3	17,1 ± 0,7	17,5 ± 0,3	23,6 ± 1,5	37,6 ± 5,7	51,5 ± 3,4
	Merkkiaine R	32,5 ± 1,3	5,3 ± 0,8	44,8 ± 3,0	8,7 ± 0,4	15,7 ± 0,6	16,0 ± 0,2	21,6 ± 1,2	35,1 ± 5,1	48,8 ± 3,2
	SPIM/SPOMR	36,0 ± 1,5	7,8 ± 2,3	47,7 ± 3,2	9,6 ± 0,4	16,8 ± 0,7	17,2 ± 0,3	23,3 ± 1,4	37,3 ± 5,6	51,2 ± 3,3
Pyhäjärvi 5	Brutto S	117 ± 19,0	9,3 ± 0,4	54,6 ± 2,3	9,4 ± 0,4	11,1 ± 0,4	19,0 ± 0,3	8,9 ± 0,3	30,6 ± 0,4	13,0 ± 0,5
	Merkkiaine R	102 ± 17,2	7,2 ± 0,4	48,2 ± 1,9	7,4 ± 0,2	9,2 ± 0,3	17,3 ± 0,3	7,4 ± 0,2	26,5 ± 0,5	10,5 ± 0,4
	SPIM/SPOMR	116 ± 19,1	8,7 ± 0,4	54,0 ± 2,3	8,8 ± 0,3	10,4 ± 0,4	18,4 ± 0,4	8,2 ± 0,2	30,0 ± 0,5	12,4 ± 0,5
	(g ka m ⁻² d ⁻¹)	14.6.	28.6.	12.7.	26.7.	9.8.	23.8.	6.9.	20.9.	
Kirkkojärvi 1	Brutto S	66,6 ± 12,1	33,5 ± 4,7	25,8 ± 4,7	40,0 ± 9,0	28,5 ± 6,8	36,9 ± 6,4	30,5 ± 2,9	23,4 ± 4,5	
	Merkkiaine R	57,5 ± 12,0	30,9 ± 4,9	25,0 ± 5,1	40,3 ± 8,7	34,4 ± 8,7	38,2 ± 6,8	28,9 ± 3,5	22,1 ± 4,7	
	SPIM/SPOMR	67,6 ± 12,7	33,9 ± 4,9	27,1 ± 5,2	41,8 ± 9,2	29,7 ± 7,2	38,5 ± 6,6	32,3 ± 3,3	24,5 ± 4,9	
Kirkkojärvi 2	Brutto S	40,5 ± 4,5	40,3 ± 3,3	55,0 ± 10,1	55,1 ± 9,0	53,6 ± 9,6	52,4 ± 8,1	41,6 ± 3,6	24,3 ± 4,0	
	Merkkiaine R	41,4 ± 4,8	38,9 ± 4,9	54,9 ± 10,6	56,3 ± 9,8	57,6 ± 9,4	48,4 ± 8,5	37,2 ± 3,8	22,4 ± 3,6	
	SPIM/SPOMR	39,4 ± 4,5	39,1 ± 3,4	53,8 ± 10,2	53,9 ± 9,1	52,4 ± 9,3	51,3 ± 7,8	40,5 ± 3,4	23,1 ± 3,8	
Kirkkojärvi 3	Brutto S	12,3 ± 2,9	18,3 ± 3,8	11,9 ± 3,1	4,5 ± 0,5	3,5 ± 1,1	3,1 ± 1,0			
	Merkkiaine R	14,8 ± 3,5	20,5 ± 4,7	11,8 ± 3,4	3,9 ± 0,6	3,1 ± 0,5	2,3 ± 0,8			
	SPIM/SPOMR	11,7 ± 2,8	17,3 ± 3,8	10,6 ± 3,0	3,4 ± 0,5	2,7 ± 0,4	2,1 ± 1,3			
Kirkkojärvi 4	Brutto S	17,8 ± 1,7	20,6 ± 3,3	25,6 ± 6,4	24,1 ± 3,5	15,5 ± 2,6	15,7 ± 6,8	13,0 ± 8,7	3,0 ± 1,1	
	Merkkiaine R	23,0 ± 2,5	21,9 ± 3,5	25,1 ± 7,0	23,0 ± 3,7	14,1 ± 3,1	15,7 ± 7,1	10,9 ± 9,2	2,3 ± 0,6	
	SPIM/SPOMR	17,5 ± 1,7	20,2 ± 3,2	24,3 ± 6,4	22,8 ± 3,5	14,4 ± 2,8	15,1 ± 6,7	10,9 ± 8,7	2,3 ± 0,6	
	(g ka m ⁻² d ⁻¹)	9.6.	23.6.	6.7.	21.7.	4.8.	18.8.	1.9.	15.9.	
Enonselkä 1	Brutto S	5,4 ± 0,3	8,6 ± 0,6	4,2 ± 0,2	6,2 ± 0,6	5,4 ± 0,7	5,1 ± 0,4	8,1 ± 0,3	14,5 ± 0,5	
	Merkkiaine R	4,9 ± 0,3	7,8 ± 0,6	3,5 ± 0,1	5,6 ± 0,5	4,9 ± 0,6	4,3 ± 0,3	7,1 ± 0,2	13,0 ± 0,5	
	SPIM/SPOMR	5,5 ± 0,3	8,8 ± 0,6	4,1 ± 0,2	6,4 ± 0,6	5,4 ± 0,7	4,7 ± 0,3	7,8 ± 0,3	14,4 ± 0,5	
Enonselkä 2	Brutto S	16,5 ± 0,3	48,1 ± 3,1	23,0 ± 0,3	23,8 ± 0,5	12,4 ± 0,1	10,9 ± 0,3	17,2 ± 0,3	42,4 ± 0,9	
	Merkkiaine R	16,5 ± 0,5	49,6 ± 3,1	22,4 ± 0,2	22,7 ± 0,4	11,7 ± 0,1	9,6 ± 0,3	15,8 ± 0,2	39,5 ± 0,7	
	SPIM/SPOMR	16,0 ± 0,0	48,1 ± 3,1	23,1 ± 0,3	23,6 ± 0,4	12,2 ± 0,1	10,3 ± 0,3	16,7 ± 0,2	41,3 ± 0,8	
Enonselkä 3	Brutto S	14,1 ± 0,1	28,9 ± 0,9	17,3 ± 0,3	19,2 ± 0,3	12,2 ± 0,1	12,5 ± 0,3	16,4 ± 0,4	62,9 ± 1,9	
	Merkkiaine R	13,5 ± 0,1	29,1 ± 1,1	16,7 ± 0,3	18,6 ± 0,3	11,9 ± 0,2	11,4 ± 0,3	15,4 ± 0,5	59,1 ± 1,5	
	SPIM/SPOMR	13,9 ± 0,1	29,1 ± 0,9	17,3 ± 0,3	19,2 ± 0,3	12,2 ± 0,1	11,9 ± 0,3	16,1 ± 0,4	62,6 ± 1,7	
Enonselkä 4	Brutto S	6,5 ± 0,2	8,3 ± 0,4	4,7 ± 1,0	10,3 ± 1,4	5,6 ± 1,1	6,7 ± 0,3	7,3 ± 0,4	20,9 ± 1,1	
	Merkkiaine R	6,1 ± 0,2	7,8 ± 0,4	4,1 ± 0,9	9,3 ± 1,1	5,3 ± 1,0	5,8 ± 0,2	6,6 ± 0,3	19,5 ± 1,0	
	SPIM/SPOMR	6,5 ± 0,2	8,3 ± 0,4	4,6 ± 1,0	10,2 ± 1,4	5,6 ± 1,1	6,2 ± 0,3	7,0 ± 0,4	20,7 ± 1,1	
Enonselkä 5	Brutto S	5,1 ± 0,2	14,3 ± 1,3	4,9 ± 0,5	21,0 ± 0,9	12,2 ± 0,6	11,9 ± 0,7	16,1 ± 0,2	28,1 ± 0,8	
	Merkkiaine R	4,7 ± 0,2	13,7 ± 1,3	4,2 ± 0,4	19,9 ± 1,1	11,8 ± 0,6	10,6 ± 0,6	14,9 ± 0,2	26,0 ± 1,0	
	SPIM/SPOMR	4,9 ± 0,2	14,3 ± 1,4	4,7 ± 0,4	21,3 ± 1,0	12,4 ± 0,6	11,4 ± 0,6	15,9 ± 0,2	27,7 ± 1,0	

Liite 2. Tutkimusjärvien kokonaissedimentaatio- ja resuspensiotulokset pisteittäin ja ajankohdittain 95 % luottamusväleillä. S = sedimentaatio, R = resuspensio

	20.8.	4.9.	19.9.	4.10.	19.10.	2.11.	18.11.	3.12.	18.12.	2.1.	16.1.	31.1.
(g ka m ⁻² d ⁻¹)												
Taihu 1	420 ± 4,8	435 ± 60,5	340 ± 38,7	149 ± 16,6	205 ± 3,6	268 ± 0,9	2416 ± 174	479 ± 30,8	375 ± 101	1481 ± 151	69,8 ± 5,2	148 ± 1,4
Brutto S												
Merkkiaine R	352 ± 1,1	360 ± 48,3	281 ± 32,4	124 ± 12,6	172 ± 5,7	205 ± 2,7	1832 ± 140	324 ± 23,9	171 ± 47,0	991 ± 116	25,0 ± 2,8	96,7 ± 4,9
SPIM/SPOMR	417 ± 3,7	430 ± 59,2	329 ± 37,7	139 ± 14,7	195 ± 4,6	259 ± 1,5	2405 ± 175	477 ± 31,2	367 ± 99,2	1480 ± 153	64,4 ± 4,9	140 ± 1,7
Taihu 2	1577 ± 102	246 ± 160	313 ± 75,7	209 ± 36,5	358 ± 57,5	264 ± 19,8	772 ± 364	720 ± 61,0	564 ± 99,4		875 ± 38,2	254 ± 37,6
Brutto S												
Merkkiaine R	1394 ± 97,2	212 ± 137	255 ± 65,8	174 ± 32,9	306 ± 47,1	205 ± 15,9	581 ± 275	570 ± 51,7	425 ± 89,4		600 ± 26,3	389,1 ± 33,5
SPIM/SPOMR	1565 ± 104	234 ± 157	301 ± 74,5	197 ± 35,9	346 ± 53,4	252 ± 19,1	760 ± 358	708 ± 61,1	552 ± 101		863 ± 37,4	242 ± 38,1
Taihu 3	1388 ± 322	523 ± 171	454 ± 269	298 ± 205	329 ± 217	282 ± 191	1351 ± 159	566 ± 234	498 ± 36,4		975 ± 200	295 ± 32,9
Brutto S												
Merkkiaine R	1205 ± 282	449 ± 146	378 ± 235	258 ± 185	269 ± 178	202 ± 147	980 ± 125	426 ± 187	375 ± 30,2		660 ± 166	34 ± 55,1
SPIM/SPOMR	1375 ± 320	516 ± 168	442 ± 266	290 ± 203	312 ± 206	271 ± 186	1335 ± 159	558 ± 233	492 ± 36,4		974 ± 203	280 ± 35,4
Taihu 4	10,3 ± 1,2	6,3 ± 1,1	18,7 ± 4,1	8,2 ± 0,2	5,1 ± 0,6	1,3 ± 0,6	27,9 ± 1,7	3,4 ± 0,3	3,5 ± 0,4	16,1 ± 1,3	2,7 ± 0,3	2,8 ± 0,3
Brutto S												
Merkkiaine R	7,2 ± 0,7	4,9 ± 0,8	9,7 ± 4,0	6,1 ± 0,2	3,6 ± 0,4	0,9 ± 0,4	23,7 ± 1,7	2,6 ± 0,3	2,7 ± 0,3	12,8 ± 1,2	1,7 ± 0,3	1,3 ± 0,2
SPIM/SPOMR	8,2 ± 0,8	5,7 ± 0,9	12,2 ± 4,6	7,0 ± 0,2	4,2 ± 0,5	1,1 ± 0,5	28,6 ± 2,0	3,3 ± 0,4	3,4 ± 0,4	16,6 ± 1,4	2,7 ± 0,4	2,5 ± 0,3
Taihu 5	70,0 ± 6,2	7,1 ± 2,8	13,3 ± 3,2	3,0 ± 0,9	3,4 ± 0,8	7,1 ± 2,7	79,3 ± 10,8	15,3 ± 2,5	22,1 ± 4,1	194 ± 26,0	5,5 ± 0,7	16,6 ± 0,4
Brutto S												
Merkkiaine R	61,8 ± 5,5	5,3 ± 2,4	3,0 ± 1,7	1,7 ± 0,7	2,0 ± 0,7	4,2 ± 1,7	63,4 ± 8,7	11,2 ± 2,0	18,2 ± 3,8	153 ± 21,3	3,0 ± 0,5	9,5 ± 0,3
SPIM/SPOMR	68,6 ± 6,1	5,8 ± 2,7	11,9 ± 2,4	1,6 ± 0,9	2,1 ± 0,8	5,8 ± 2,3	77,9 ± 10,7	13,9 ± 2,5	20,7 ± 4,3	192 ± 26,1	4,1 ± 0,7	15,3 ± 0,4
Taihu 6	1860 ± 330	493 ± 27,1	275 ± 34,1	188 ± 12,5	194 ± 13,2	239 ± 15,4	572 ± 71,9	227 ± 24,2	230 ± 14,8	480 ± 39,9	78,3 ± 29,0	66,8 ± 9,1
Brutto S												
Merkkiaine R	1609 ± 318	419 ± 19,9	209 ± 31,5	145 ± 12,6	160 ± 10,5	178 ± 14,3	447 ± 62,2	161 ± 12,0	177 ± 20,7	383 ± 38,8	45,6 ± 20,5	33,1 ± 6,0
SPIM/SPOMR	1854 ± 339	487 ± 25,2	269 ± 34,5	182 ± 13,0	188 ± 12,7	233 ± 15,6	567 ± 72,2	221 ± 22,9	224 ± 16,1	475 ± 41,2	27,3 ± 28,6	60,8 ± 8,8
Rehtijärvi 1	6,4 ± 0,1	9,4 ± 0,5	13,0 ± 0,8	12,7 ± 1,2	45,9 ± 4,0	41,5 ± 2,2	15,7 ± 3,0	12,0 ± 0,3	13,0 ± 0,4			
Brutto S												
Merkkiaine R	5,5 ± 0,0	9,0 ± 0,4	12,0 ± 0,8	11,5 ± 1,1	44,7 ± 3,8	44,2 ± 2,4	15,2 ± 3,0	12,3 ± 0,3	12,6 ± 0,4			
SPIM/SPOMR	6,2 ± 0,1	9,3 ± 0,5	12,8 ± 0,8	12,6 ± 1,2	45,4 ± 4,0	41,6 ± 2,2	15,3 ± 2,9	12,0 ± 0,3	12,8 ± 0,4			
Rehtijärvi 2	6,4 ± 0,8	10,0 ± 0,2	13,1 ± 0,5	18,7 ± 0,6	15,9 ± 0,1	39,4 ± 2,1	14,0 ± 0,9	8,4 ± 1,6	13,4 ± 0,3			
Brutto S												
Merkkiaine R	5,2 ± 0,8	9,2 ± 0,1	12,0 ± 0,4	17,6 ± 0,8	14,1 ± 0,2	39,8 ± 2,3	13,3 ± 0,8	8,2 ± 1,8	13,0 ± 0,3			
SPIM/SPOMR	6,1 ± 0,8	9,7 ± 0,2	12,8 ± 0,4	18,5 ± 0,7	15,6 ± 0,1	39,1 ± 2,2	13,7 ± 0,8	8,1 ± 1,7	13,1 ± 0,3			
Rehtijärvi 3	12,0 ± 0,9	9,9 ± 2,1	14,2 ± 2,9	14,3 ± 2,5	26,7 ± 2,2	21,0 ± 1,7	19,8 ± 3,2	9,1 ± 3,5	5,9 ± 1,1			
Brutto S												
Merkkiaine R	9,4 ± 1,1	7,0 ± 2,4	12,1 ± 3,0	12,0 ± 2,2	24,7 ± 1,9	20,1 ± 1,9	18,2 ± 3,0	8,0 ± 3,5	4,9 ± 1,0			
SPIM/SPOMR	11,6 ± 0,9	9,5 ± 2,2	13,8 ± 3,0	13,9 ± 2,5	26,3 ± 2,1	20,6 ± 1,9	19,4 ± 3,1	8,7 ± 3,6	5,5 ± 1,1			

Liite 3. Tutkimusjärvien eri pisteiden pintasedimentin, vesipatsaan ja keräinaineksen keskimääräinen orgaanisen aineksen osuus sekä keskimääräinen sedimentaationopeus ja näiden pohjalta arvioidut keskimääräiset resuspensioasteet 95 % luottamusväleineen. PJ = Pyhäjärvi, T = Taihu, KJ = Kirkkojärvi, RJ = Rehtijärvi, EN = Enonselkä, PS = pintasedimentti, VP = vesipatsas, TS = keräinsedimentti, org = orgaanisen aineksen pitoisuus, Ma = merkkiainemenetelmä, S/S = SPIM/SPOM-menetelmä, Sed = sedimentaatio, R = resuspensio.

Järvi	PS org. (%)	VP org. (%)	TS org. (%)	Sedimentaatio (g m ⁻² d ⁻¹)	MaR (g m ⁻² d ⁻¹)	S/SR (g m ⁻² d ⁻¹)	MaR/ Sed (%)	S/SR/ Sed (%)	MaR/ S/SR (%)	Ma Sed (g m ⁻² d ⁻¹)	S/S Sed (g m ⁻² d ⁻¹)
PJ1	0,9±0,1	63,6±10,7	23,0±3,0	29,1±7,7	18,4±5,5	26,4±7,7	63	90	70	10,7±3,3	2,6±0,9
PJ2	1,7±0,4	62,4±9,3	22,7±2,3	27,9±10,8	18,4±7,8	25,9±10,7	64	91	71	9,4±3,2	2,0±0,6
PJ3	5,6±0,7	60,9±8,6	17,0±1,4	33,7±14,1	26,7±11,3	33,3±14,1	79	98	80	7,1±3,1	0,4±0,4
PJ4	13,8±0,2	56,6±8,5	18,0±1,3	27,7±10,5	25,4±10,2	27,4±10,5	89	98	90	2,3±0,6	0,3±0,2
PJ5	10,9±0,2	59,6±7,9	18,5±1,5	30,3±23,3	26,2±20,6	29,7±23,3	84	96	88	4,1±2,8	0,6±0,2
T1	2,2±0	34,1±9,7	9,8±1,4	566±389	411±289	559±389	71	97	73	154±106	7,0±2,1
T2	0,7±0	33,0±8,0	7,3±1,1	559±234	437±206	547±234	76	97	78	122±45,0	11,9±2,1
T3	1,5±0	28,3±7,3	7,2±0,9	633±234	476±196	622±234	73	98	74	157±63,6	10,4±2,8
T4	8,9±0	76,0±12,6	28,6±5,1	8,9±4,6	6,4±3,7	8,0±4,5	70	89	78	2,4±1,3	0,9±1,1
T5	0,6±0	54,7±9,8	19,5±7,4	36,4±31,5	28,0±25,6	35,0±31,5	65	88	73	8,3±6,2	1,4±0,9
T6	2,4±0	28,1±4,4	8,5±1,1	409±274	331±240	403±274	75	97	76	78,2±34,5	5,9±2,5
KJ1	17,7±1,6	45,6±3,7	18,3±0,9	35,7±9,5	34,7±7,7	36,9±9,4	99	104	95	1,0±2,9	-1,3±0,3
KJ2	13,3±0,5	40,1±5,2	14,1±1,0	45,4±7,5	44,6±8,4	44,2±7,5	98	97	100	0,7±2,0	1,2±0,4
KJ3	24,7±1,5	79,6±15,7	29,4±6,7	8,9±4,3	9,4±5,2	8,0±4,3	97	83	116	-0,5±1,2	1,0±0,2
KJ4	20,3±1,0	65,6±10,3	23,4±4,3	16,9±4,9	17,0±5,4	16,0±4,9	98	92	106	-0,1±1,6	1,0±0,4
RJ1	11,8±0,5	37,6±5,2	12,6±0,8	18,9±8,9	18,6±9,3	18,7±8,9	96	98	98	0,3±0,8	0,2±0,1
RJ2	11,3±0,4	38,4±5,7	13,0±0,8	15,5±6,0	14,7±6,2	15,2±6,0	93	98	95	0,8±0,4	0,3±0,1
RJ3	11,8±0,2	49,9±8,3	16,6±0,9	14,8±4,1	12,9±4,1	14,4±4,1	85	97	88	1,9±0,5	0,4±0,1
EN1	11,9±0,1	73,5±8,8	19,1±1,8	7,2±2,3	6,4±2,1	7,1±2,3	88	99	89	0,8±0,2	0,1±0,1
EN2	14,6±1,0	56,1±7,0	16,8±1,2	24,3±9,5	23,5±9,7	23,9±9,5	95	98	97	0,8±0,9	0,4±0,3
EN3	14,4±0,4	55,6±6,4	16,3±1,0	22,9±11,8	22,0±11,1	22,8±11,8	96	99	97	1,0±0,8	0,2±0,2
EN4	12,3±0,2	75,5±8,6	17,9±1,7	8,8±3,6	8,1±3,4	8,6±3,6	91	98	93	0,7±0,2	0,1±0,1
EN5	11,6±0,3	69,1±7,0	15,9±1,4	14,2±5,4	13,2±5,1	14,1±5,4	93	99	94	1,0±0,4	0,1±0,2