

Prof. Jukka Horppila
FT Juha Niemistö

Helsingin yliopisto
Ympäristötieteiden laitos/Akvaattiset tieteet
PL 65 (Viikinkaari 1)
00014 Helsingin yliopisto
sähköposti jukka.horppila@helsinki.fi

Raportti

Vesijärven Enonselän sisäinen ravinnekuormitus 2010

1. TUTKIMUKSEN TAUSTA JA TAVOITTEET	2
1.1. JÄRVIEN SISÄINEN RAVINNEKUORMITUS JA SEN HILLITSEMINEN ILMASTUKSELLA	2
1.2. LAHDEN VESIJÄRVI JA TUTKIMUKSEN TAVOITE	3
2. AINEISTO JA MENETELMÄT.....	3
2.1.1 SISÄINEN KUORMITUS AINETASEMENETELMÄLLÄ	3
2.1.2 SISÄINEN KUORMITUS RESUSPENSIOMENETELMÄLLÄ	5
2.1.3 ILMASTUKSEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAKERROSTUNEISUUTEEN JA HAPPIPITOISUUTEEN	6
3. TULOKSET	6
3.1 FOSFORIKUORMITUS AINETASEMENETELMÄLLÄ	6
3.2 FOSFORIKUORMITUS RESUSPENSIOMENETELMÄLLÄ	8
3.3 ILMASTUKSEN VAIKUTUS LÄMPÖTILAKERROSTUNEISUUTEEN JA HAPPIPITOISUUTEEN	9
4. TULOSTEN TARKASTELU	10
5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	10
6. KIRJALLISUUS.....	11

1. Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

1.1. Järvien sisäinen ravinnekuormitus ja sen hillitseminen ilmastuksella

Monissa järvissämme sisäinen ravinnekuormitus on nykyisin huomattavasti ulkoista kuormitusta suurempi ja ylläpitää leväkukintoja (esim. Eloranta 2005). Yksi rehevöityneissä järvissä sisäistä kuormitusta ylläpitävä tekijä on hapettomuus, joka aiheutuu kohonneen tuotannon aiheuttamasta suuresta hapen kulu- tuksesta. Hapettomuus aiheuttaa sisäistä ravinnekuormitusta, koska hapen loppuessa pohjasedimentin rauta pelkistyy ja siihen sitoutunut fosfori liukenee veteen aiheuttaen leväkukintoja (esim. Mortimer 1942, Dodds 2002). Hapettomuus on yleistä paitsi talvella jääpeitteen alla, myös kesällä lämpötilakerrostuvissa järvissä, joiden alusvesi ei loppukesällä saa happitäydennystä ilmasta. Tämä vuoksi yksi käytetyimmistä järvien kunnostusmenetelmistä on ilmastaminen tai hapettaminen (Cooke ym. 2005). Esimerkiksi Suo- messa menetelmää on käytetty n. 200 järvellä (Lappalainen & Lakso 2005).

Vuosikymmenten ajan hapen puutetta on pidetty tärkeimpänä sisäistä ravinnekuormitusta aiheuttava- na tekijänä (esim. Hupfer & Lewandowski 2008). Viime vuosina tieteellisessä kirjallisuudessa on kuiten- kin julkaistu useita artikkeleita, joissa on kyseenalaistettu hapettomuuden ylivoimaisen tärkeä merkitys järvien rehevyyden ylläpitäjänä verrattuna muihin sisäistä kuormitus aiheuttaviin tekijöihin (esim. tuulten ja virtausten aiheuttama sedimentin sekoittuminen veteen, levätuotannon aiheuttama veden korkea pH) (esim. Baldwin & Williams 2007, Hupfer & Lewandowski 2008, Holmroos ym. 2009). Niinpä myös ilmastuksen mahdollisuuksiin järvien kunnostuksessa on alettu suhtautua yhä kriittisemmin (esim. Schau- ser & Chorus 2007, Liboriussen ym. 2009). Yhä enemmän on myös alettu kiinnittää huomiota ilmastuk- sen mahdollisiin haittavaikutuksiin (Cooke ym. 2005). Yksi näistä on vesipatsaan lämpötilaolojen muut- tuminen. Monissa ilmastusmenetelmissä (esim. Suomessa yleisesti käytetty Mixox-laite), hapekasta pääl- lysvettä kierrätetään syvempiin vesikerroksiin. Tällöin lämpimän päällysveden johtamisesta alusveteen aiheutuu väistämättä vesipatsaan keskilämpötilan nousu. Tällä voi puolestaan olla vakavia seurauksia esimerkiksi kylmää vettä vaativille kalalajeille. Tuusulanjärvellä esimerkiksi kuorekannan tiheys aleni jyrkästi ilmastuksen aloittamisen jälkeen. Toiseksi ilmastuksen aiheuttamat veden virtaukset voivat lisätä pohjasedimentin sekoittumista veteen (resuspensio), mikä puolestaan lisää merkittävästi sisäistä ravinne- kuormitusta (esim. Evans 1994, Horppila & Nurminen 2005). Vaikutusta voimistaa alusveden lämpiämi- nen, mikä edesauttaa eri vesikerrosten sekoittumista. Tämä vaikutus on ongelmallinen erityisesti kesällä, jolloin kasviplanktonin kasvuolosuhteet ovat hyvät korkean lämpötilan vuoksi. Ilmastus voikin johtaa le- vätuotannon voimistumiseen (Lappalainen & Lakso 2005).

1.2. Lahden Vesijärvi ja tutkimuksen tavoite

Menetelmään kohdistuneesta kasvavasta kritiikistä huolimatta Lahden Vesijärvellä on aloitettu suuri ilmastusprojekti. Vesijärven Enonselälle (26 km²) on sijoitettu 9 Mixox-laitetta, jotka ilmastavat järveä kierrättämällä hapekasta päällysvettä syvempiin kerroksiin.

Järven kunnostusta suunniteltaessa yksi tärkeimmistä tehtävistä on selvittää sisäisen ravinnekuormituksen taso (esim. Saarijärvi & Sammalkorpi 2005). Vasta kun tiedetään sisäisen kuormituksen taso suhteessa ulkoiseen kuormitukseen, voidaan kunnostustoimenpiteet suunnata oikein. Samaten kunnostustoimien vaikutuksia sisäiseen kuormitukseen on seurattava, jotta toimenpiteiden mitoitusta voidaan tarvittaessa muuttaa. Niinpä Lahden Vesijärven Enonselän kunnostusprojektissakin sisäinen kuormitus on yksi keskeisimmistä tutkimusaiheista. Vuonna 2009 selvitettiin Vesijärvisäätiön rahoituksella sisäisen ravinnekuormituksen taso ja sen jakautuminen eri syvyysvyöhykkeille. Sisäinen fosforikuormitus laskettiin ravinnetaseyhtälöä käyttäen sekä lisäksi sedimentin resuspensionopeuden mittaamiseen perustuvalla menetelmällä. Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus oli monikymmenkertainen suhteessa ulkoiseen kuormitukseen. Sisäisestä fosforikuormituksesta n. 90 % aiheutui sedimentin resuspensiosta, eli jo pohjalle laskeutuneen sedimentin palaamisesta takaisin vesipatsaaseen (Niemistö ym. 2010). Resuspensio vaikutti selkeästi alusveden kokonaisfosforipitoisuuden nousuun syvännealueilla lämpötilakerrostuneisuuden aikana. Myös matalilla hapellisilla alueilla resuspensio oli pääasiallinen sisäisen kuormituksen aiheuttaja.

Enonselän ilmastus aloitettiin talvella 2010. Ilmastuksen vaikutusten selvittämiseksi toteutettiin avovesikaudella 2010 Maa- ja Vesitekniikan tuen ja Vesijärvisäätiön rahoituksen turvin tutkimus, jossa selvitettiin ilmastuksen vaikutuksia (1) sisäiseen fosforikuormitukseen ja (2) vesipatsaan lämpötilakerrostuneisuuteen. Lisäksi tämän tutkimuksen tuloksia verrattiin vuonna 2009 suoritettuun samankaltaiseen tutkimukseen. Tutkimuksessa keskityttiin avovesikauteen, joka on ilmastuksen mahdollisten haitallisten vaikutusten kannalta ongelmallisin.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1.1 Sisäinen kuormitus ainetasemenetelmällä

Vesijärven Enonselän sisäinen kuormitus ilmastuksen aloittamisen jälkeen avovesikaudella laskettiin kahdella eri menetelmällä. Ravinnetaseyhtälöllä fosforikuormitus laskettiin seuraavasti,

$$UK + SK = LP + BS + dm/dt \text{ (Lappalainen \& Matinvesi 1990),}$$

jossa

UK = ulkoinen kuormitus

SK = sisäinen kuormitus

LP = Luusuasta poistuva ainevirta

BS = bruttosedimentaatio

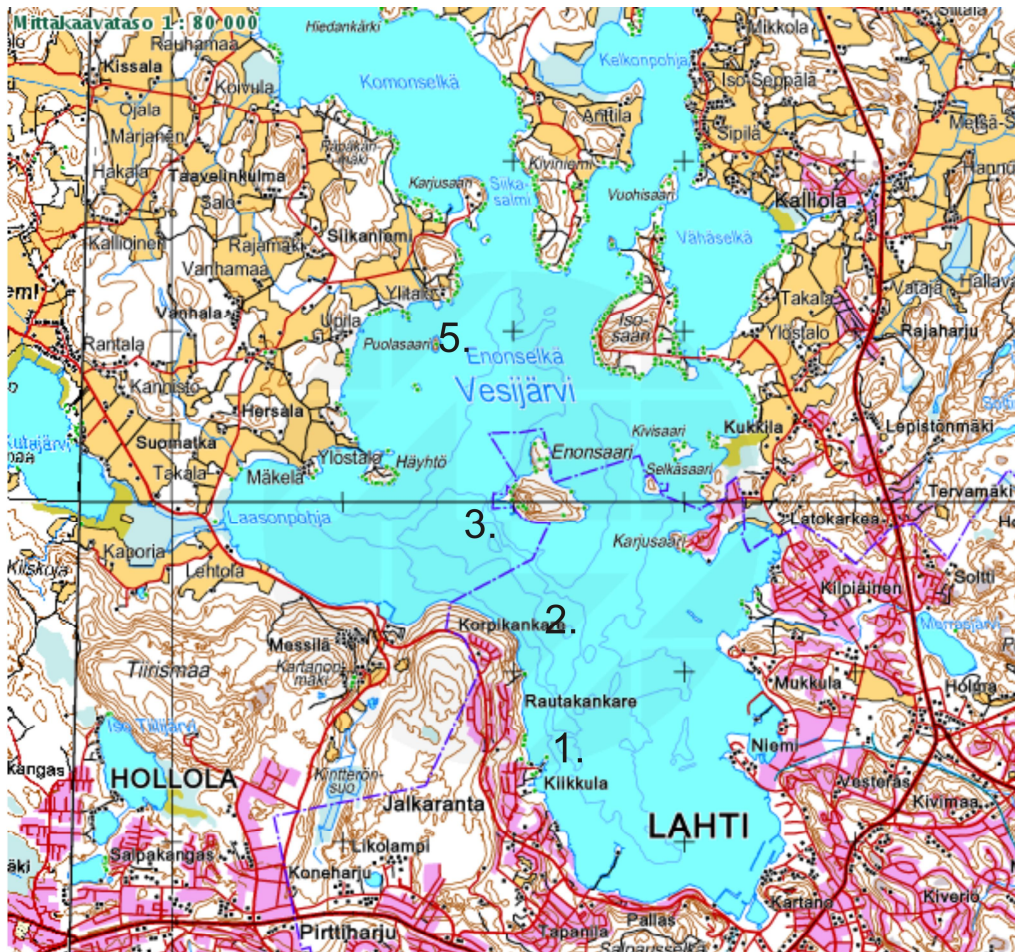
dm/dt = vesimassan ainesisällön muutos

Yhtälöstä voidaan laskea sisäinen kuormitus jäännösterminä

$$SK = LP + BS + dm/dt - UK$$

Ulkoisen kuormituksen arvot ja luusuasta poistuva ainevirta saatiin Lahden seudun ympäristöpalveluilta. Luusuasta poistuvaan ravinnevirtaan yhdistettiin myös hoitokalastuksen mukana poistuvat ravinteet. Vesimassan fosforisisällön muutos laskettiin avovesikauden aikana tehtyjen kokonaisfosforimittausten perusteella. Vesinäytteet ravinnemäärittäystä varten otettiin aikavälillä 11.5.–31.10. 2010 kaksitoista kertaa. Matalilla alueilla näytteet otettiin kokoomanäytteestä pinta-pohja ja syvillä alueilla kokoomanäytteistä 0–10 m, 10–20 m ja 20 m-pohja (Limnos putkinoudin, korkeus 1 m, V=7,1 litraa). Fosforipitoisuudet määritettiin Lachat autoanalysointilaitteella standardin SFS 3025 mukaisesti (ammoniummolybdaattivärjäys, mitaus aallonpituudella 700 nm). Vesipatsaan fosforisisällön muutos laskettiin aikavälille 11.5.–31.10. 2010 tilavuuspainotettuna keskiarvona.

Fosforin bruttosedimentaatio laskettiin sedimentaatiokeräimillä mitatun laskeutuvan aineksen määrän ja aineksen fosforipitoisuuden tulona. Kattavien ja alueellisesti luotettavien bruttosedimentaatiotulosten saamiseksi sedimentaatiokeräimiä oli sekä matalilla (syvyys < 10 m, 2 pistettä; Vasikkasaari; n. 8 m, Puolasaari n. 7 m) että syvillä (syvyys > 10 m, 2 pistettä; Lankiluoto; n. 30 m, Enonsaari n. 28 m) alueilla (kuva 1). Jokaisessa keräimessä oli neljä rinnakkaista sedimentaatioputkea sijoitettuna kahden metrin etäisyydelle pohjasta. Keräimet olivat järvessä 11.5.–31.10. 2010 ja ne tyhjennettiin 2–4 viikon välein. Laskeutuvan aineksen kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) ICP (inductively coupled plasma) massaspektrometrillä typpihappohajotuksen jälkeen.



Kuva 1. Näytteenottopisteet: Vasikkasaari 1., Lankiluoto 2., Enonsaari 3. ja Puolasaari 5.

2.1.2 Sisäinen kuormitus resuspensiomenetelmällä

Pelkkä ravinnetasetarkastelu ei kerro siitä, miltä alueilta sisäinen kuormitus on peräisin. Siksi sisäistä kuormitusta tarkastellaan myös laskemalla sedimentin resuspensionopeus. Vuoden 2009 tutkimukset osoittivat, että ennen ilmaston aloittamista valtaosa sisäisestä kuormituksesta aiheutui resuspensiosta. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, onko ilmasto tuonut tähän muutosta. Resuspensionopeuden laskemiseksi on olemassa useita menetelmiä. Kesän 2009 tutkimukset osoittivat, että Vesijärvelle parhaiten soveltuva on Weyhenmeyerin (1997) menetelmä. Siinä resuspensionopeus lasketaan regressioyhtälön avulla, jossa veteen suspendoitunut epäorgaaninen aines (SPIM) on selittävä muuttuja ja suspendoitunut orgaaninen aines (SPOM) selitettävä muuttuja. Jokaisesta avovesikauden sedimentaatiomittauksesta määritetään keräimiin laskeutunut epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen määrä, jotka plotataan toisiaan vastaan. Näille pisteille lasketaan lineaarinen regressiosuora.

$$y = kx + a \Leftrightarrow \text{SPOM} = k * \text{SPIM} + a$$

Suoran ja y-akselin leikkauspistettä a käytetään resuspensionopeuden laskemiseen.

$R = SPM - a$, jossa

R = resuspensionopeus

SPM = bruttosedimentaatio (= SPIM + SPOM)

Bruttosedimentaatio mitattiin edellä mainituilla sedimentaatiokeräimillä. Sedimentoituneen aineksen orgaaninen aines (SPOM) määritettiin standardin SFS 3008 mukaisesti.

Sedimentin resuspendoitumisen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus laskettiin resuspensionopeuden ja pintasedimentin kokonaisfosforipitoisuuden tulona (Horppila & Nurminen 2001). Pintasedimenttinäytteet (0–1 cm) otettiin HTH-corer noutimella jokaisen sedimentaationäytteenottojaksojen lopussa ja näytteiden kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) optisella ICP (inductively coupled plasma) laitteella typpihappohajotuksen jälkeen.

2.1.3 Ilmastuksen vaikutus lämpötilakerrostuneisuuden ja happipitoisuuden

Ilmastuksen vaikutusta lämpötilakerrostuneisuuden ja vesipatsaan happipitoisuuden tutkittiin Lankiluodon syvänteellä (piste 2, kuva 1) mittaamalla lämpötila- ja happiprofiili jokaisen sedimentaationäytteenoton yhteydessä (YSI 6600 sondi). Lämpötilamittausten avulla vesipatsaalle laskettiin kerrostuneisuuden stabiiliteetti S seuraavasti,

$S = 10^3 * (D_2 - D_1) (h - z) * z/2$ (kg m⁻¹), jossa

D_2 = alusveden tiheys

D_1 = päällysveden tiheys

h = vesipatsaan korkeus

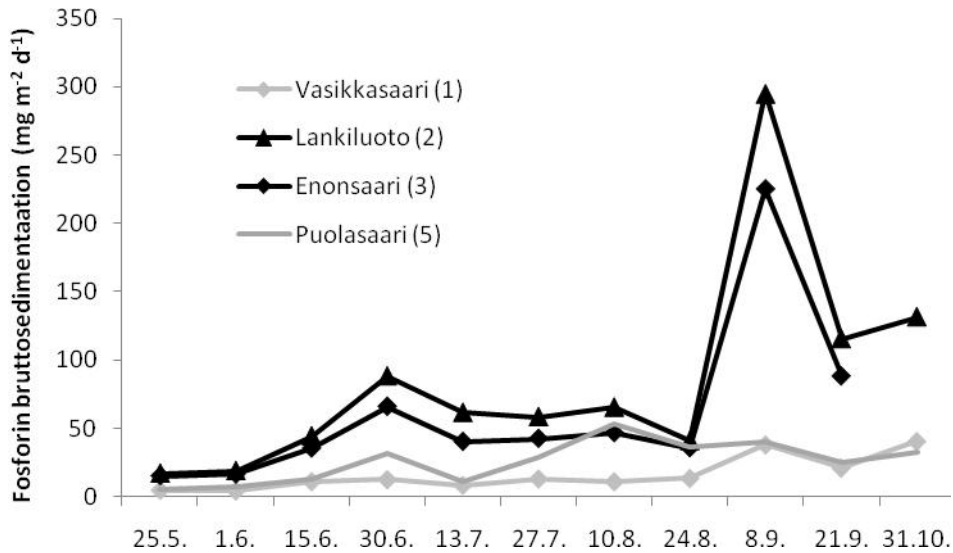
z = harppauskerroksen sijainti

3. Tulokset

3.1 Fosforikuormitus ainetasemenetelmällä

Fosforin bruttosedimentaatio vaihteli välillä 4,3–295 mg m⁻² d⁻¹ (kuva 2). Vuonna 2009 vastaavat luvut olivat 5,11–166,30 mg m⁻² d⁻¹ (taulukko 1). Suurinta P:n bruttosedimentaatio oli syvännepisteillä, koska näillä alueilla myös sedimentaatio sekä laskeutuvan aineksen P-pitoisuus olivat suurimmat. Jotta ravinnetaseyhtälön termi BS olisi luotettava, laskettiin sille alueellisesti kattava keskiarvo, josta matalilta alueilta

(< 10 m) mitatun P:n bruttosedimentaation osuus oli 83 % ja syviltä (> 10 m) mitatun 17 %. Alueellisesti painotettua keskiarvoa, $BS = 29,86 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, käytettiin sisäistä kuormitusta laskettaessa. Vuonna 2009 P:n bruttosedimentaatio, BS, oli $27,14 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (taulukko 1).



Kuva 2. Fosforin bruttosedimentaatio ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) Enonselällä näytteenottopisteillä 1–3 ja 5 avovesikaudella 2010.

Ravinnetaseytälön termit UK, LP ja dm/dt ja SK

Vuodelle 2010 käytettiin samoja ulkoisen fosforikuormituksen ja luusuasta poistuvan ravinnevirran arvoja kuin vuodelle 2009, koska uusia ei ollut vielä saatavilla (Niemistö ym. 2010). Ulkoinen kuorma vaihteli välillä $0,38\text{--}0,45 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ käytetystä hulevesikuormasta riippuen, luusuasta poistuvan ravinnevirran ollessa $0,09 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (hoitokalastus $0,03 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ otettu huomioon) (taulukko 1). Enonselän vesimassan fosforisisällön muutos aikavälille 11.5.–30.10. 2010 oli $0,24 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (taulukko 1).

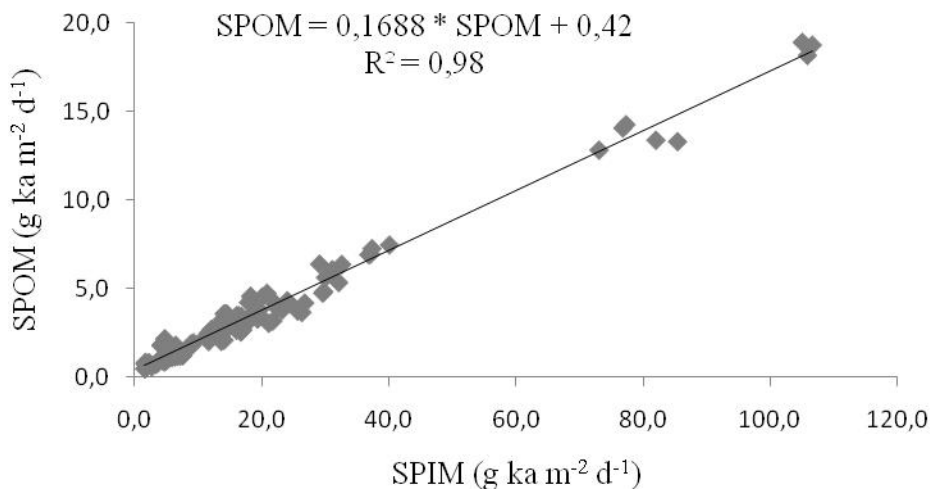
Ravinnetaseytälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus (SK) Enonselällä, $29,73 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, oli vuoden 2009 tulokseen verrattuna samaa tasoa (taulukko 1). Samoin samaa tasoa olivat myös sisäisen ja ulkoisen fosforikuormituksen suhde, jonka vaihteluväli vuonna 2010 oli 66–78 ja vuonna 2009 60–72 laskuissa käytetystä ulkoisen kuorman arvoista riippuen (taulukko 1).

Taulukko 1. Erot ravinnetase- ja resuspensiomenetelmällä lasketuissa fosforin sisäkuormissa vuosien 2009 ja 2010 välillä.

	RAVINNETASEMENETELMÄ		RESUSPENSIOMENETELMÄ	
	2009	2010	2009	2010
	mg P m ⁻² d ⁻¹	mg P m ⁻² d ⁻¹	mg P m ⁻² d ⁻¹	mg P m ⁻² d ⁻¹
UK	0,38-0,45	0,38-0,45		
LP (+hoitokal.)	0,09	0,09	min.	3,5
dm/dt	0,13	0,24	maks.	138
BS	27,14	29,86	keskiarvo	
SK	27,06	29,73	=SK	24,36
SK/UK	60-72	66-78		26,38

3.2 Fosforikuormitus resuspensiomenetelmällä

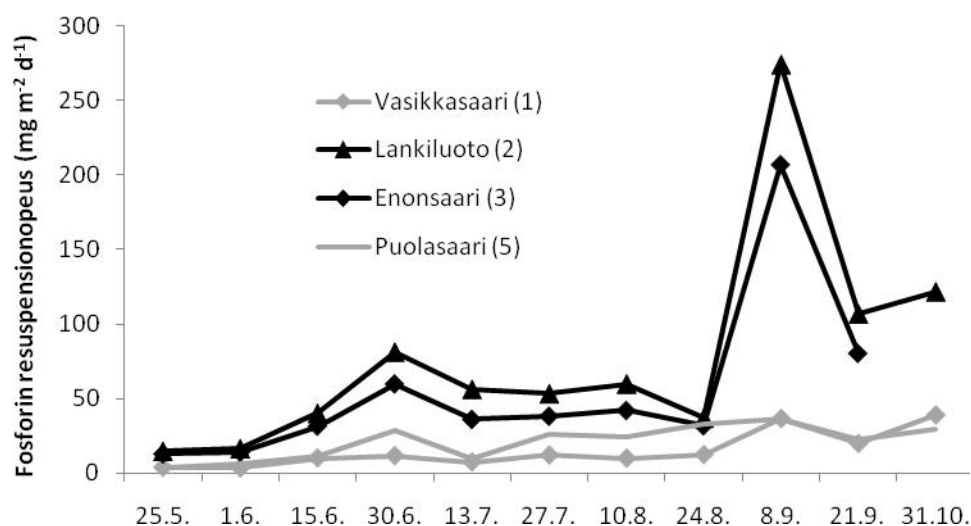
Avovesikaudelta 2010 kerätty sedimentaatioaineisto muodosti tilastollisesti merkittävän regression ($p < 0,001$) sedimentoituvan epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen välille. Regression selitysaste oli korkea ($R^2 = 0,98$) ja regressiosuoran ja y-akselin leikkauspiste $a = 0,42$ (kuva 3). Laskeutuvan aineksen sekä regressiosuoran ja y-akselin leikkauspisteen avulla laskettu sedimentin resuspendoituminen muodosti avovesikauden aikana 81,0–99,6 % bruttosedimentaatiosta.



Kuva 3. Epäorgaanisen (SPIM) ja orgaanisen (SPOM) sedimentoituneen aineksen välinen regressio.

Sedimentin resuspensio vaikutti voimakkaasti Enonselän sisäiseen fosforin kiertoon avovesikaudella 2010, sillä sen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus oli 89 % ravinnetaseyhtälöllä lasketusta sisäisestä kuormituksesta. Alueellisesti kattava keskiarvo kuormitukselle oli 26,38 mg P m⁻² d⁻¹ eli 8 % korkeampi kuin vuonna 2009 jolloin kuormitus oli 24,36 mg P m⁻² d⁻¹ (taulukko 1). Kun jokaiselta näytteenottopis-

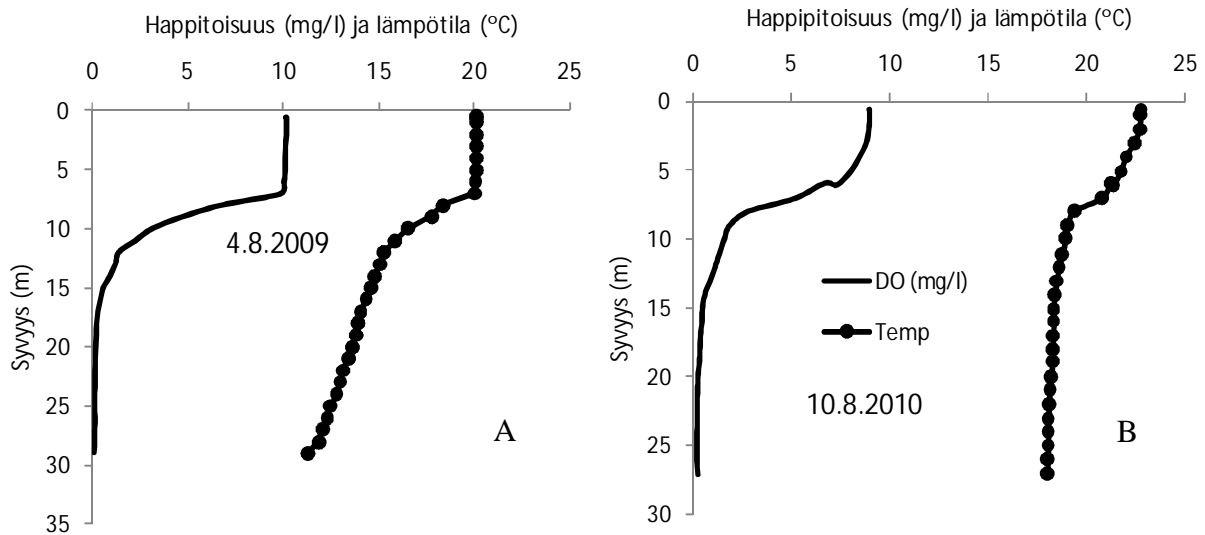
teeltä ja sedimentaatiomittausjaksolta saadut resuspensiotulokset kerrottiin näytteenottopisteiden pintasedimenttien fosforipitoisuudella, resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus vaihteli välillä 3,4–274 mg m⁻² d⁻¹ (vuonna 2009: 3,5–138 mg m⁻² d⁻¹) (kuva 4, taulukko 1). Voimakkainta kuormitus oli syvänpisteillä (pintasedimentin fosforipitoisuus suurin) syyskuussa, jolloin fosforin bruttosedimentaatiokin oli suurinta.



Kuva 4. Fosforin resuspensionopeus (mg P m⁻² d⁻¹) Enonselällä näytteenottopisteillä 1-3 ja 5 avovesikaudella 2010.

3.3 Ilmastuksen vaikutus lämpötilakerrostuneisuuden ja happipitoisuuden

Kesällä 2010 hapettomuuskausi alkoi noin kuukautta myöhemmin kuin 2009, mikä todennäköisesti johtui ilmastuksen positiivisesta vaikutuksesta alusveden happipitoisuuteen. Toisaalta loppukesän tilanne oli 2010 huonompi kuin 2009. Elokuussa 2009 veden happipitoisuus oli >10 m syvyydessä alle 2 mg/l ja veden lämpötila syvänteen pohjalla (30 m) oli 12 °C. Elokuussa 2010 happipitoisuus laski alle 1 mg/l jo 8 metrin syvyydessä ja lämpötila syvänteen pohjalla oli 18 °C (kuva 5). Elokuussa 2010 kerrostuneisuuden stabiiliteetti oli 31 kg m⁻¹ eli 32 % vuoden 2009 elokuun stabiiliteetista 98 kg m⁻¹.



Kuva 5. Happipitoisuus ja lämpötila eri syvyyksissä Lankiluodon syvänteellä (piste 2) elokuussa 2009 (A) ja 2010 (B).

4. Tulosten tarkastelu

Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus oli korkea etenkin suhteessa ulkoiseen kuormitukseen (66–78 –kertainen). Sisäisten prosessien, SK ja BS, hallitseva merkitys ainetaseissa on reheville järville tyypillistä (Lappalainen & Matinvesi 1990). Vuoteen 2009 verrattaessa nämä sisäiset prosessit olivat samaa tasoa.

Kuten vuonna 2009, suurin sisäistä fosforikuormitusta aiheuttava tekijä Vesijärven Enonselällä vuonna 2010 oli sedimentin resuspendoituminen, joka muodosti 89 % ravinnetaseyhtälöllä lasketusta sisäisestä kuormituksesta. Kuormitusluvut olivat samaa luokkaa kuin vuonna 2009.

Ilmastimien toiminta heikensi vesipatsaan kerrostuneisuutta. Tämä saattoi johtaa havaittuun hie-man suurempaan sedimentin resuspendoitumiseen. Alusveden lämpeneminen johti todennäköisesti myös hajotuksen tehostumiseen lisäten hapenkulutusta, ja näin ollen ilmastuksen positiivisia vaikutuksia ei kerrostuneisuuskauden loppupuolella havaittu. Kyse on kuitenkin vain yhden, poikkeuksellisen lämpimän vuoden tuloksista, eikä niiden perusteella voi tehdä johtopäätöksiä ilmastuksen pitkäaikaisista vaikutuksista.

5. Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

Sedimentin resuspensio oli suurin sisäistä fosforikuormitusta kuormitusta aiheuttava tekijä Vesijärven Enonselällä 2010.

Kuormituksen lievä nousu vuoteen 2009 verrattuna saattoi olla seurausta kerrostuneisuusajan vesipatsaan stabiliteetin heikkenemisestä ja resuspension voimistumisesta sekä vesipatsaan lämpenemisen tehostamasta ravinnekierrosta ja hapenkulutuksesta.

On mahdollista, että ilmastuksesta johtuva alusveden lämpötilan nousu on nostanut sedimentin hapenkulutusta niin paljon, että se osittain kumoo ilmastuksen positiivisen vaikutuksen happipitoisuuteen (Thamdrup ym. 1998). Tämän vuoksi tutkimukseen sisällytetään jatkossa sedimentin hapenkulutuksen mittaukset. Mittausten avulla voidaan arvioida, onko esimerkiksi ilmastimien sijoitusyvyvyyttä syytä muuttaa (syvyys vaikuttaa pumpattavan veden lämpötilaan ja siten hapenkulutukseen).

6. Kirjallisuus

- Baldwin, D. S. & Williams, J. (2007). Differential release of nitrogen and phosphorus from anoxic sediments. *Chemistry and Ecology* 23: 243-249.
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. & Nichols, S. A. (2005). *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. 3rd edition. Taylor & Francis, Boca Raton, London. ISBN 1-56670-625-4.
- Dodds, W. K. (2002). *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications*. Academic Press. San Diego, San Francisco.
- Eloranta, P. (2005). Järvien kunnostuksen limnologiset perusteet. Teoksessa T. Ulvi & E. Lakso (toim.): *Järvien Kunnostus*. Edita, Suomen Ympäristökeskus. ISBN 951-37-4337-3, s. 13-168. 28.
- Evans, R. D., 1994. Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes. *Hydrobiologia* 284: 5-12.
- Holmroos, H., Niemistö, J., Weckström, K. & Horppila, J. (2009). Field experiment on the seasonal variation of resuspension-mediated aerobic release of phosphorus. *Boreal Environment Research* (painossa).
- Horppila, J. & Nurminen, L. (2001). The effect of an emergent macrophyte (*Typha angustifolia*) on sediment resuspension in a shallow north temperate lake. *Freshwater Biology* 46: 1447-1455.
- Horppila, J. & Nurminen, L. (2005). The effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake. *Hydrobiologia* 545: 167-175.
- Hupfer, M. & Lewandowski, J. (2008). Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long lasting paradigm in Limnology. *International Review of Hydrobiology* 93: 4-5: 415-432.
- Lappalainen, K. M. & Lakso, E. (2005). Järven hapetus. Teoksessa T. Ulvi & E. Lakso (toim.): *Järvien Kunnostus*. Edita, Suomen Ympäristökeskus. ISBN 951-37-4337-3, s. 151-168.
- Lappalainen, K. M., & Matinvesi, J. (1990). Järven fysikaalis-kemialliset prosessit ja ainetaset. Teoksessa V. Ilmavirta (toim.): *Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet*. Yliopistopaino, Helsinki, s. 54-84.
- Liboriussen, L., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Thorsgaard, I., Grünfield, S., Jakobsen, T. S., & Hansen, K. (2009). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes. *Aquatic Ecology* (in press).
- Mortimer, C. H. (1942). The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *Journal of Ecology* 30: 147-201.
- Niemistö, J., Horppila, J. & P. Tamminen (2010). Sisäinen ravinnekuormitus Vesijärven enonselällä 2009. Raportti Lahden Vesijärvisäätiölle. Helsingin yliopisto, Ympäristötieteiden laitos.
- Saarijärvi, E. & Sammalkorpi, I. (2005). Kunnostustarpeen määrittäminen. Teoksessa V. Ilmavirta (toim.): *Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet*. Yliopistopaino, Helsinki, s. 61-74.
- Schauser, I. & Chorus, I. (2007). Assessment of internal and external lake restoration measures for two Berlin lakes. *Lake and Reservoir Management* 23: 366-376.
- Thamdrup & Fleischer (1998) Temperature dependence of O₂ respiration, N mineralization, and nitrification in Arctic sediments. *Aquat Microb Ecol* 15:191-199.
- Weyhenmeyer, G.A. (1997). Quantification of resuspended particles in sedimentation traps. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 271-276.