

Sisäinen fosforikuormitus ja sedimentin hapenkulutus Vesijärven Enonselällä 2011

FT Juha Niemistö
FM Petrina Köngäs
Dos. Susanna Hietanen
Prof. Jukka Horppila
Helsingin yliopisto, Ympäristötieteiden laitos

1. Johdanto

Enonselän leväkukintoja säätelee voimakkaasti fosfori, jonka vapautumiseen pohjasedimentistä pyritään vaikuttamaan vuonna 2010 aloitetulla ilmastusprojektilla. Ennen projektin aloittamista järven sisäinen fosforikuormitus selvitettiin avovesikaudella 2009. Jo käynnistettyjen kunnostustoimenpiteiden seuraamiseksi ja mahdollisesti tulevaisuudessa tehtävien toimenpiteiden suunnittelemiseksi Enonselän sisäinen fosforikuormitus selvitettiin myös vuonna 2011 samoilla menetelmillä kuin vuonna 2009. Käytetyillä menetelmillä voidaan määrittää sisäisen kuormituksen taso suhteessa ulkoiseen kuormitukseen ja arvioida fosforin kiertoa järviökosysteemissä ennen pysyvää sedimentoitumista.

Koska kunnostustoimenpiteenä käytetty ilmastus saattaa vaikuttaa järven kerrostuneisuuteen ja alusveden lämpötilaan (korkea lämpötila → hajotus ja ravinteiden vapautuminen voimistuu) (Liboriussen ym. 2009), sekä sisäiseen kuormituksen kannalta merkittävään tekijään sedimentin resuspensioon (resuspensio = jo pohjalle sedimentoituneen aineksen palaaminen vesipatsaaseen esim. tuulten aiheuttamien veden virtausten vaikutuksesta) (Niemistö ym. 2010), kiinnitettiin näihin tekijöihin erityistä huomiota vuonna 2011. Lisäksi selvitettiin sedimentin hapenkulutusta.

2. Aineisto ja menetelmät

Tässä tutkimuksessa laskettiin Vesijärven Enonselän sisäinen fosforikuormitus avovesikaudelle 2011 samoilla menetelmillä kuin vuonna 2009; (2.1) ravinnetaseyhtälö ja (2.2) sedimentin resuspensionopeuden laskemiseen perustuvaa menetelmä.

2.1 Ravinnetaseyhtälö

Enonselän sisäinen fosforikuormitus laskettiin ravinnetaseyhtälöllä

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

jossa

UK = ulkoinen kuormitus

SK = sisäinen kuormitus

LP = luusuasta poistuva ainevirta

BS = bruttosedimentaatio

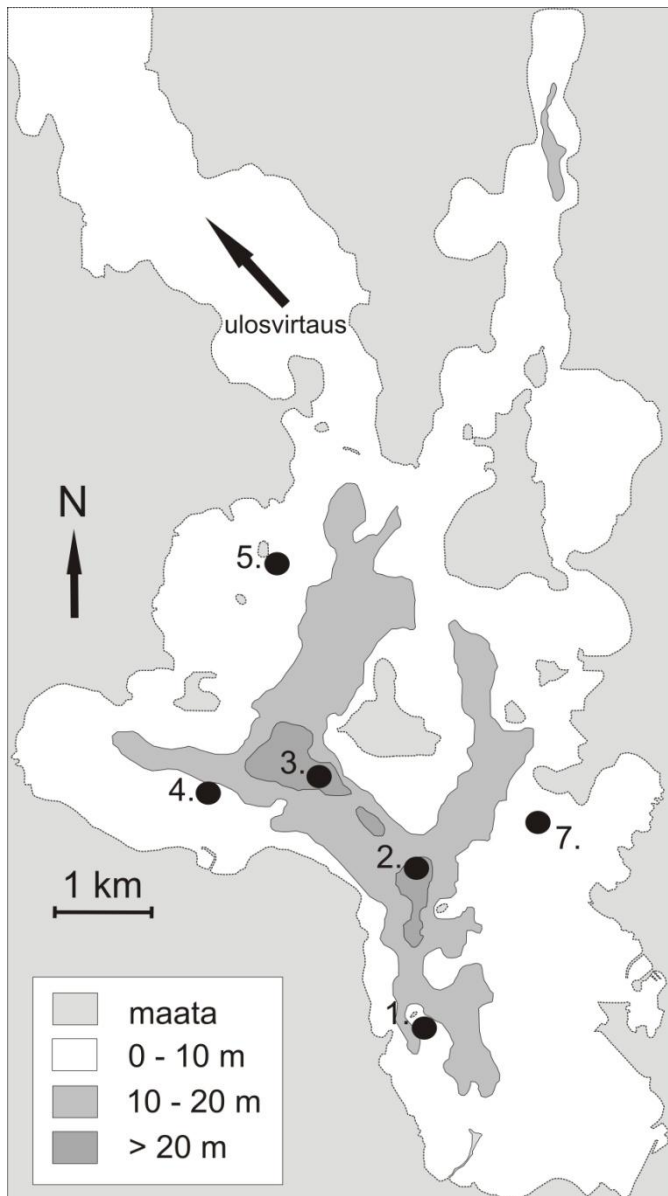
dm/dt = vesimassan ainesisällön muutos

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 kokonaisfosforimittauksen perusteella. Vesinäytteet ravinne määrityksiä varten otettiin aikavälillä 18.5.–1.11. 2011 kymmenen 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 (ammoniummolybdaattivärväjäys, mittaus aallonpituudella 700 nm).

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, 3 pistettä) että syvillä (syvyys > 10 m, 2 pistettä) alueilla (kuva 1). Jokaisessa keräimessä oli neljä rinnakkaista sedimentaatioputkea sijoitettuna kahden metrin etäisyydelle pohjasta. Keräimet olivat järvässä 18.5.–1.11. 2011 ja ne tyhjennettiin 2–3 viikon välein. Laskeutuvan aineksen kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) totaalihihajotuksen jälkeen (rikkihappo + vetyperoksidi), kuten vesinäytteidenkin pitoisuudet (vuonna 2009 määrittäminen ICP (inductively coupled plasma) massaspektrometrillä typpihappohajotuksen jälkeen).



Kuva 1. Sedimentaatiokeräinten sijainti Enonselällä vuonna 2011: 1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syväne, 3. Enonsaaren syväne, 5. Puolasaari, 7. Kaksoissaaret (vuonna 2009 pisteen 7 sijaan piste nro 4. Messilä).

2.2 Resuspensionopeuteen perustava menetelmä

Koska sedimentin resuspensio muodostaa usein >80 % järven bruttosedimentaatiosta (Weyhenmeyer, 1998), sitä on syytä tarkastella suurimpana yksittäisenä sisäistä kuormitusta aiheuttavana tekijänä.

Sedimentin resuspensionopeus laskettiin regressioyhtälön avulla, jossa suspendoitunut epäorgaaninen aines (SPIM) on selittävä muuttuja ja suspendoitunut orgaaninen aines (SPOM) selitettävä muuttuja (Weyhenmeyer 1997). Jokaisesta avovesikauden sedimentaatiomittauksesta (kymmenen mittausjaksoa, viisi pistettä, neljä rinnakkaista putkea joka pisteellä) määritettiin keräimiin laskeutunut epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen määrä, jotka plotattiin toisiaan vasten. Näille pisteille laskettiin lineaarinen regressiosuora.

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

Suoran ja y-akselin leikkauspistettä a käytettiin resuspensionopeuden laskemiseen.

$$R = \text{SPM} - a, \text{ jossa}$$

R = resuspensionopeus

SPM = bruttosedimentaatio (= $\text{SPIM} + \text{SPOM}$)

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

Sedimentin resuspensoitumisen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus laskettiin resuspensionopeuden ja pintasedimentin kokonaisfosforipitoisuuden tulona (Horppila & Nurminen 2001). Pintasedimentinäytteet (0–1 cm) otettiin HTH-corer noutimella jokaisen sedimentaationäytteenottojakson lopussa ja näytteiden kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) totaalihajotuksen jälkeen (rikkihappo + vetyperoksidi), kuten vesinäytteidenkin pitoisuudet (vuonna 2009 määrittäminen ICP (inductively coupled plasma) massaspektrometrillä typpihappohajotuksen jälkeen).

2.3 Sedimentin hapenkulutus

Sedimentin hapenkulutusta Vesijärvellä tutkittiin yhteensä viideltä näytepisteeltä. Näytepisteet valittiin edustamaan olosuhteita eri etäisyyksiltä (n. 20-100 m) järveen sijoitetuista hapetinlaitteista Enonselältä Lankiluodolta (3 kpl) ja vertailualueelta järven pohjoisosasta Kajaanselältä (1 kpl). Näytteenotto tapahtui avovesikautena yhteensä viitenä eri ajankohtana, täyskiertojen aikana touko- ja syyskuussa sekä kesäkerrostuneisuuden aikana kesä-, heinä- ja elokuussa, mutta kuitenkin vain silloin kun liuenneen hapen pitoisuus näytepisteen pohjanläheisessä vedessä ylitti 1 mg O₂ l⁻¹. Sedimentin hapenkulutusta tässä tutkimuksessa käytetyllä metodilla ei voi luotettavasti määrittää, mikäli näytteiden happipitoisuus inkuboinnin alkaessa on alle kyseisen pitoisuuden. Lisäksi Kajaanselältä ja Lankiluodolta (näytepiste lähimpänä hapetinlaitetta) selvitettiin sedimentin hapenkulutusta myös jääpeitteisenä kautena, jolloin näytteenotto tapahtui maaliskuussa. Kesäkuu-syyskuun näytteenottoihin lisättiin vielä mukaan matala kerrostumaton näytepiste Puolasaaresta vertailualueeksi. Sedimentin hapenkulutustmittauksia varten jokaiselta näytepisteeltä kerättiin 11-16 rinnakkaista osanäytettä kova-

muovisiin noin 15-20 cm korkeisiin putkiin. Sedimenttinäytteet inkuboitiin kunkin näyteenpisteen pohjanläheisen veden *in situ* –lämpötilassa 0,5-6 tunnin ajan. Liuenneen hapen pitoisuus määritettiin pohjanläheisestä vedestä kultakin näyteenpisteeltä sekä sedimenttinäytteistä inkuboinnin jälkeen Winklerin menetelmällä. Sedimentin hapenkulutus neliometriä kohden tunnissa saatiin laskemalla;

$$mg\ O_2\ h^{-1} = \frac{(C-C_1)*V}{A} * t^{-1} , \text{ jossa}$$

C = näytteenottopisteen pohjanläheisen veden hapen pitoisuus näytteenottohetkellä (mg O₂ l⁻¹)

C₁ = Inkubointiputken sisältämä hapen pitoisuus inkuboinnin jälkeen (mg O₂ l⁻¹)

V = Inkubointiputken sisältämän veden tilavuus (l)

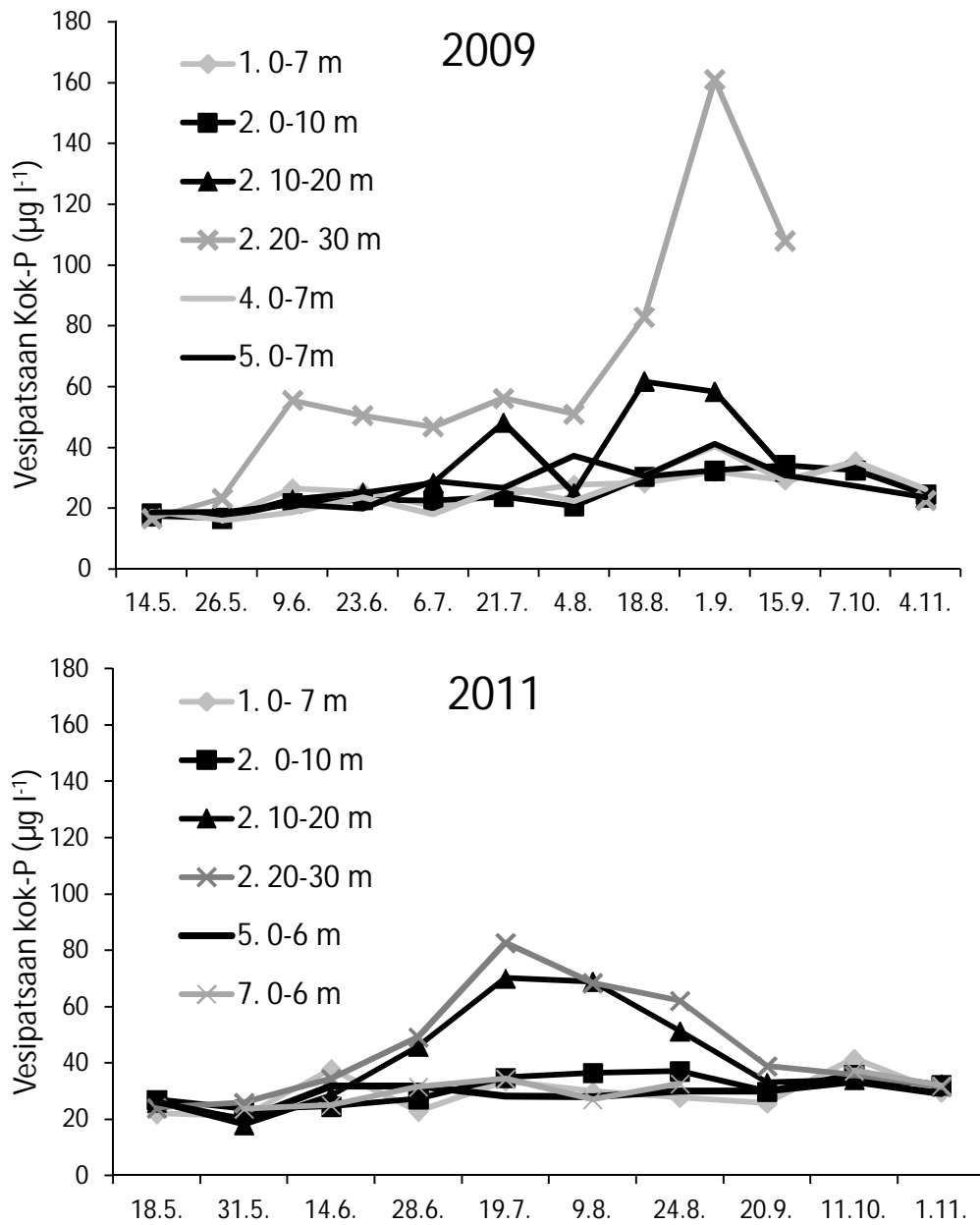
A = Inkubointiputken sisältämän sedimentin pinta-ala (m²)

t = Inkubointiaika (h)

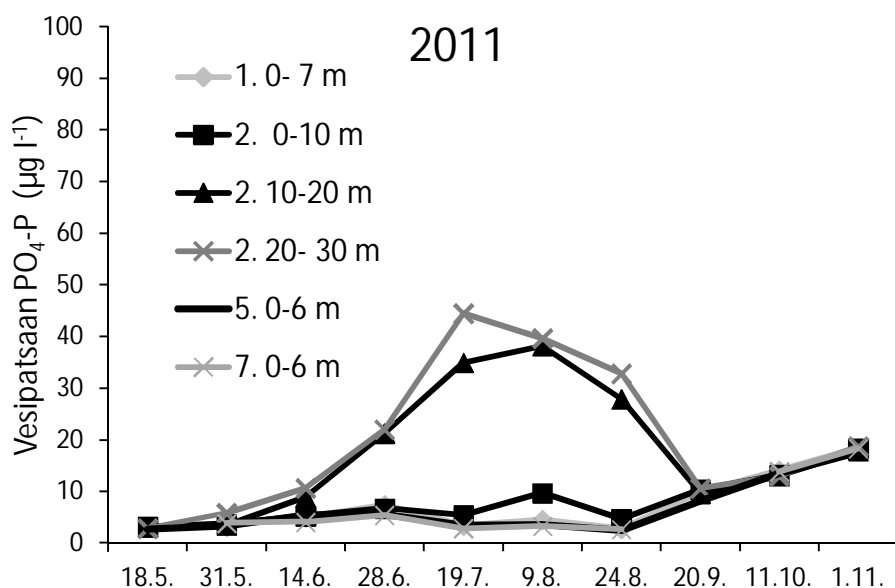
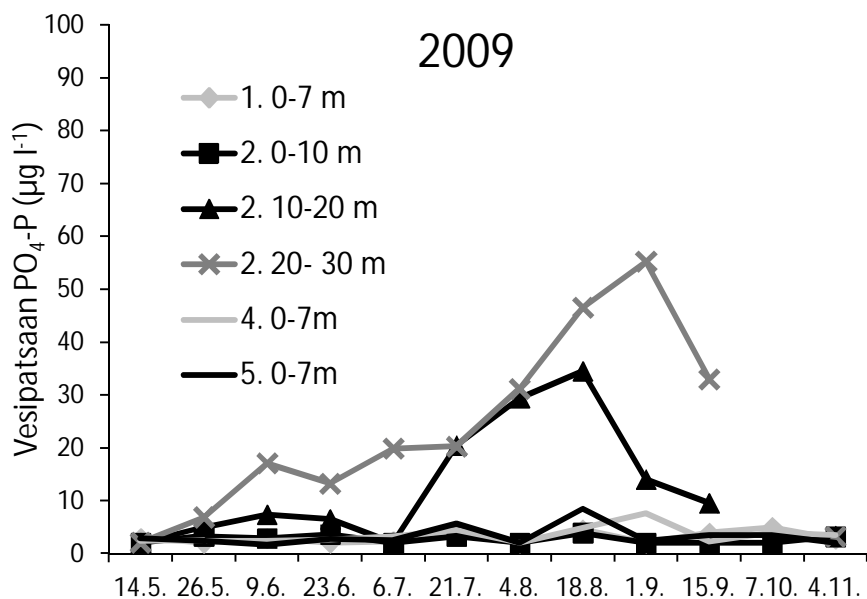
Näyteenpisteiltä määritettiin lisäksi vesipatsaan lämpötila ja liuenneen hapen pitoisuus CTD-sondilla, sekä pintasedimentin orgaanisen hiilen määrä standardin SFS 3008 mukaisesti.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Vuonna 2011 kokonaisfosforipitoisuudet (kok-P) olivat Enonselällä hieman alhaisempia kuin vuonna 2009 ja Lankiluodon syvänteen alusvedessä ei havaittu yhtä selkeää kokonaisfosforipitoisuuden nousua lämpötilakerrostuneisuuskauden loppupuolella (kuva 2). Fosfaattifosforipitoisuudet (PO₄-P) olivat vuonna 2011 samaa suuruusluokkaa kuin vuonna 2009, mutta Lankiluodon syvänteen pohjanläheiset (20–30 m) arvot olivat alhaisempia (kuva 3). Syvänteen alusveden tasaiset fosforipitoisuudet (kok-P ja PO₄-P) johtuivat mahdollisesti ilmastimien sekoitusvaikutuksesta.



Kuva 2. Kokonaisfosforipitoisuus Enonselän eri syvyyssyöhykkeissä avovesikaudella 2009 ja 2011 (1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syväne, 4. Messilä, 5. Puolasaari, 7. Kaksoissaaret, ks. kuva 1).



Kuva 3. Fosfaattifosforipitoisuus Enonselän eri syvyysvyöhykkeissä avovesikaudella 2009 ja 2011 (1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syvänte, 3. Enonsaaren syvänte, 4. Messilä, 5. Puolasaari, 7. Kaksoissaaret ks. kuva 1).

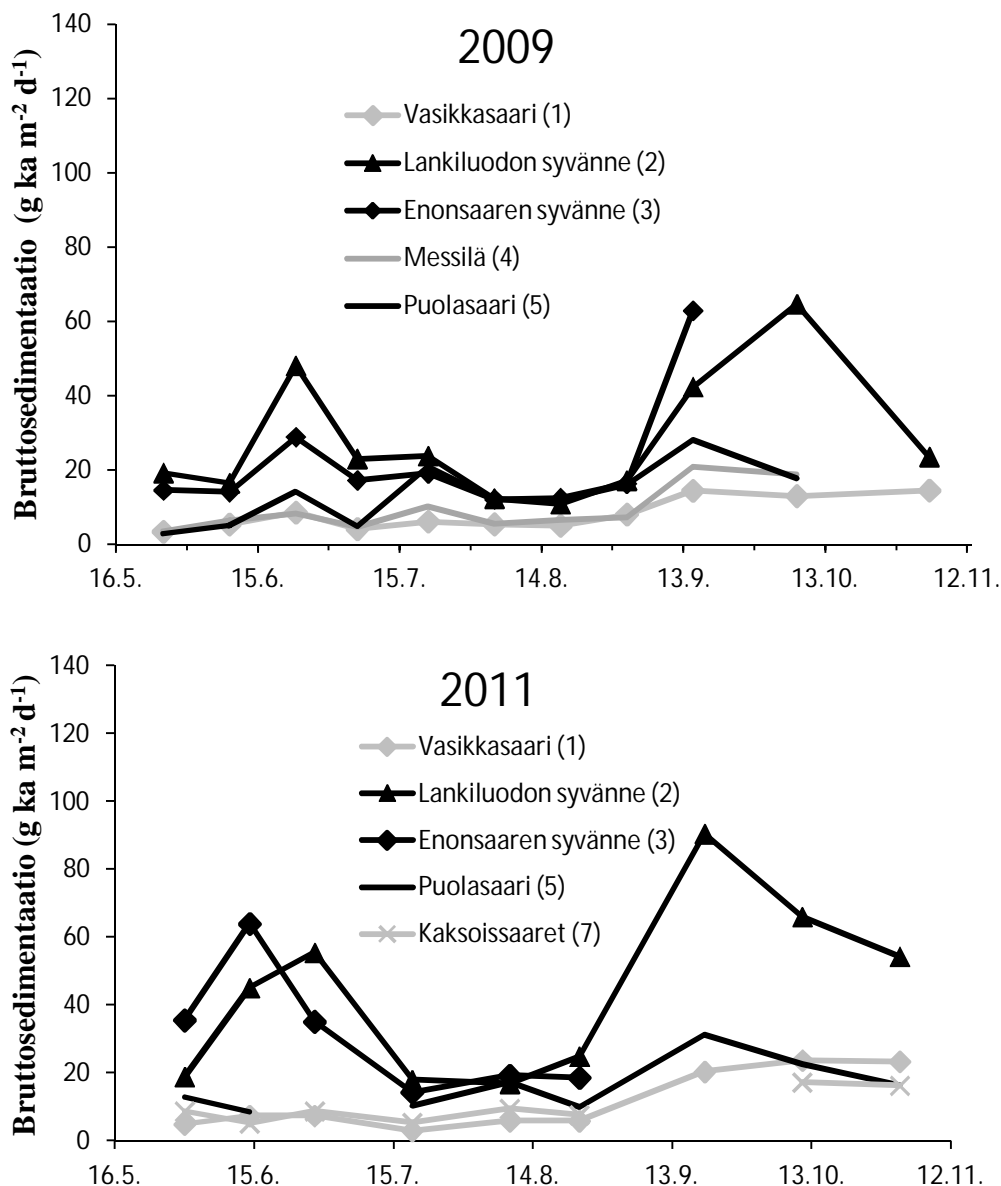
3.1 Ravinnetaseyhtälö

3.1.1 Fosforin bruttosedimentaatio, BS

Enonselän bruttosedimentaatio vaihteli voimakkaasti avovesikauden 2011 (alueellinen keskiarvo $16,6 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) aikana ja tulokset olivat hieman korkeampia kuin vuonna 2009 (alueellinen keskiarvo $13,8 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Niemistö ym. 2010). Sedimentaation ajallinen vaihtelu oli samankaltaista kuin vuonna 2009 (kuva 4). Alhaisimmat arvot ($3\text{--}5 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) mitattiin matalilta alueilta touko-kesäkuun vaihteessa ja heinäkuun alussa. Suurimmat tulokset ($45\text{--}90 \text{ g ka m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) saatiin kesäkuun sekä syys-lokakuun mittausjaksoilta syvännepisteiltä (kuva 4). Eri mittausjaksoista lasketut koko avovesikauden keskiarvot

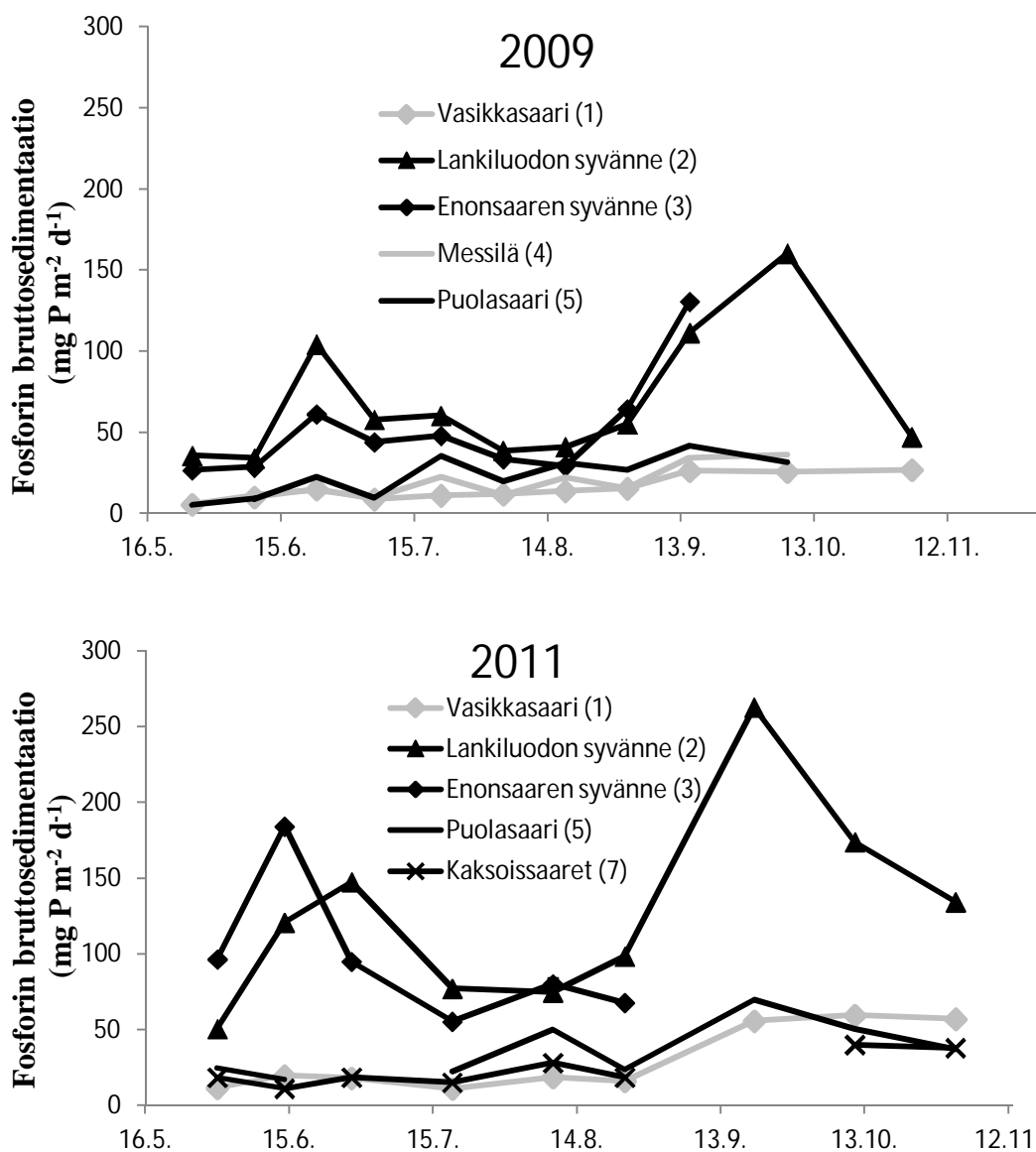
vaihtelivat välillä 10–43 g ka m⁻² d⁻¹. Syksyn 2011 korkeat sedimentaatiotulokset johtuivat loppukesän kasviplanktonmaksimien sedimentoitumisesta sekä sedimentin resuspension voimistumista kerrostuneisuuden purkautuessa.

Sedimentoituvan aineksen fosforipitoisuus eri näytteenottopisteillä vaihteli välillä 2,28–3,32 mg g⁻¹ (vuonna 2009: 1,75–2,57 mg g⁻¹) ja suurimmat pitoisuudet mitattiin syvänpisteiltä kuten vuonna 2009.



Kuva 4. Bruttosedimentaatio (g kuiva-ainetta m⁻² d⁻¹) Enonselällä näytteenottopisteillä 1–5 ja 7 avovesikaudella 2009 ja 2011.

Fosforin bruttosedimentaatio vaihteli vuonna 2011 välillä 11,30–262,72 mg P m⁻² d⁻¹ (kuva 5). Suurinta P:n bruttosedimentaatio oli syvännepisteillä, koska näillä alueilla myös sedimentaatio sekä laskeutuvan aineksen P-pitoisuus olivat suurimmat. Vuoden 2011 fosforin bruttosedimentaatioluvut olivat selvästi vuoden 2009 lukuja korkeammat (kuva 5), koska sekä sedimentaationopeus kuiva-aineena että etenkin kuiva-aineen fosforipitoisuudet olivat korkeampia. 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 = 44,05 mg P m⁻² d⁻¹, käytettiin sisäistä kuormitusta laskettaessa. Tämä arvo oli lähes kaksinkertainen vuoden 2009 arvoon (27,14 mg P m⁻² d⁻¹) verrattuna.



Kuva 5. Fosforin bruttosedimentaatio (mg m⁻² d⁻¹) Enoselällä näytteenotuspisteillä 1–5 ja 7 avovesikaudella 2009 ja 2011.

3.1.2 Ravinnetaseyhtälön termit UK, LP ja dm/dt

Vuonna 2011 Enonselän ravinnebudjetissa käytettiin samoja ulkoisen fosforikuormituksen (UK) ja luusuasta poistuvan ravinnevirran (LP) arvoja kuin vuonna 2009, koska uusia ei ollut vielä saatavilla: UK = 0,45 mg P m⁻² d⁻¹ ja LP = 0,09 mg P m⁻² d⁻¹ (hoitokalastus 0,03 mg P m⁻² d⁻¹ otettu huomioon) (taulukko 1). Enonselän vesimassan fosforisisällön muutos aikavälille 18.5.–1.11. 2011 oli 0,12 mg P m⁻² d⁻¹ (taulukko 1).

3.1.3 Sisäinen kuormitus, SK

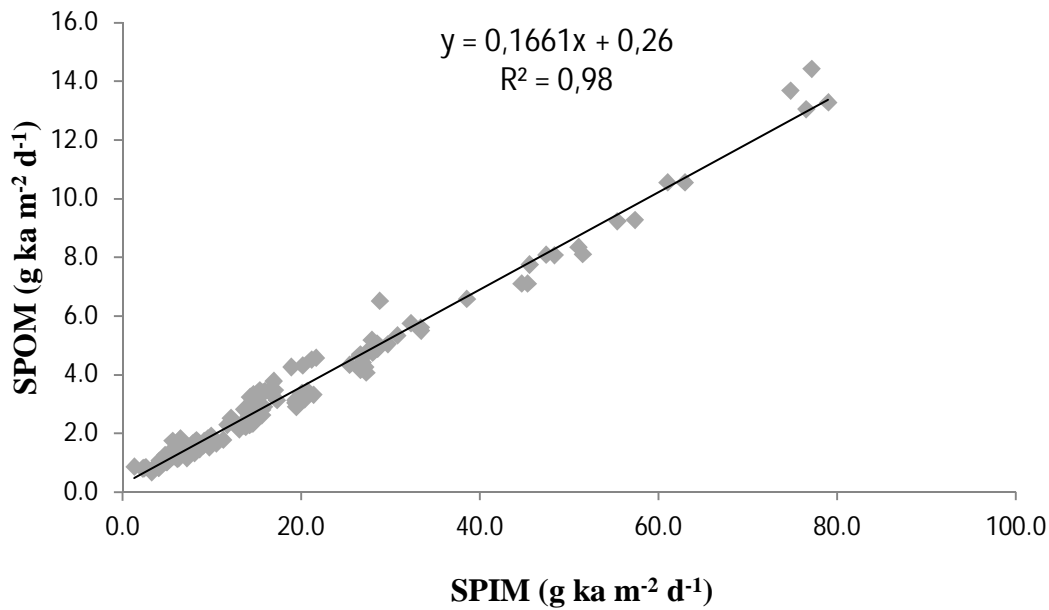
Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen kokonaisfosforikuormitus Enonselällä vuonna 2011 oli 43,81 mg P m⁻² d⁻¹ ja näin ollen 61 % suurempi kuin vuonna 2009 (27,06 mg P m⁻² d⁻¹). Sisäisen ja ulkoisen fosforikuormituksen suhde oli 97 (taulukko 1). Sisäisten prosessien, SK ja BS, hallitseva merkitys ainetaseissa on reheville järville tyypillistä ja vastaava tilanne on havaittu Enonselällä aikaisemminkin (Lappalainen & Matinvesi 1990).

Taulukko1. Ravinnetaseyhtälön osatermit Enonselällä 18.5.–1.11. 2011 ja vuonna 2009 (vuoden 2009 tulokset raportista Niemistö ym. 2010). UK = ulkoinen fosforikuormitus, LP = luusuasta poistuva ravinnevirta, BS = fosforin bruttosedimentaatio, dm/dt = vesimassan fosforisisällön muutos, SK = sisäinen fosforikuormitus. Resuspensiomenetelmällä laskettu sisäinen kuormitus.

RAVINNETASEMENETELMÄ	2009		2011		
	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	0,45	0,45			
LP (+hoitokal.)	0,09	0,09	min.	3,5	3,4
dm/dt	0,13	0,12	maks.	138	274
BS	27,14	44,05	keskiarvo		
SK	27,06	43,81	=SK	24,36	48,51
SK/UK	60	97			

3.2 Sedimentin resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus

Avovesikaudelta 2011 kerätty sedimentaatioaineisto muodosti tilastollisesti merkittävän regression (p<0,001) sedimentoituvan epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen välille. Regression selitysaste oli korkea (R² = 0,98) ja regressiosuoran ja y-akselin leikkauspiste a = 0,26 (kuva 6). Laskeutuvan aineksen sekä regressiosuoran ja y-akselin leikkauspisteen avulla laskettu sedimentin resuspendoituminen muodosti avovesikauden aikana 87,9 - 99,7 % bruttosedimentaatiosta.

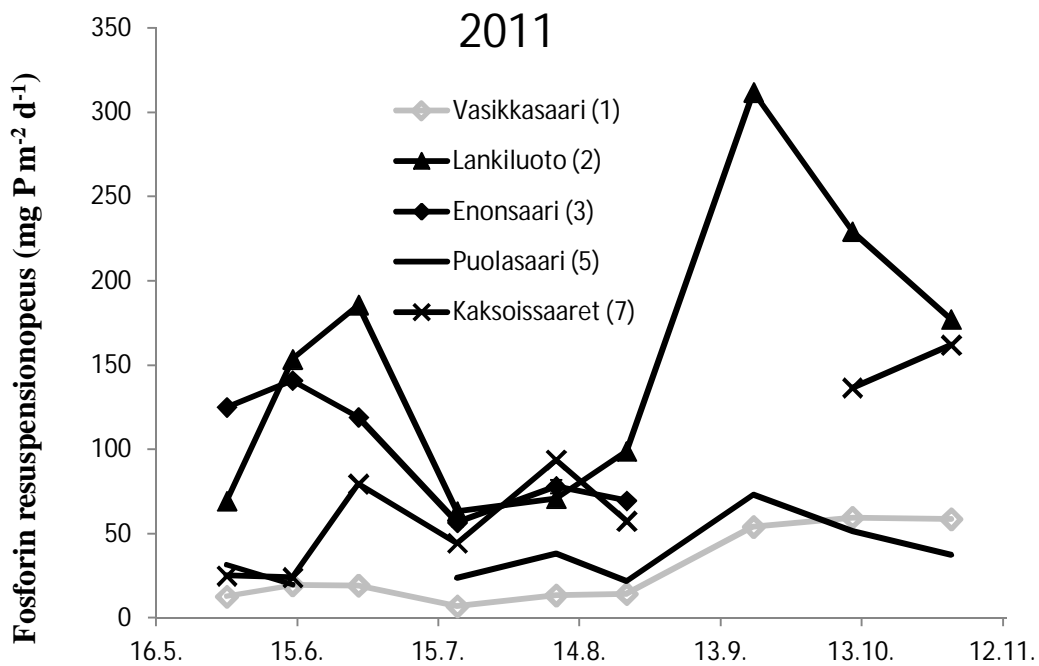
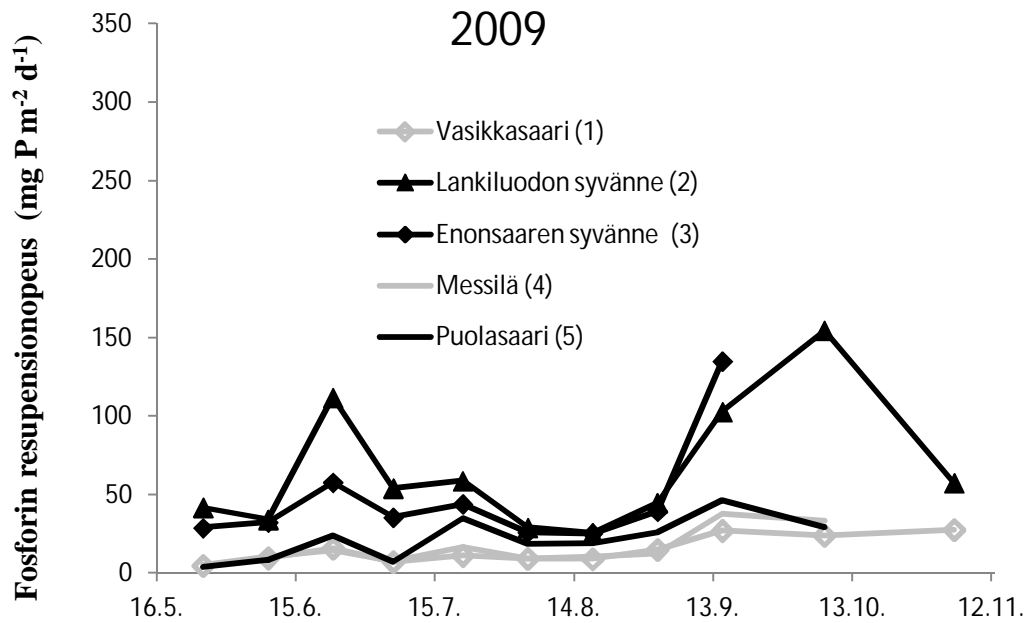


Kuva 6. Epäorgaanisen (SPIM) ja orgaanisen (SPOM) sedimentoituneen aineksen välinen regressio avovesikaudella 2011.

Samoin kuin vuonna 2009 sedimentin resuspendoituminen vaikutti voimakkaasti Enonselän sisäiseen fosforin kiertoon avovesikaudella 2011. Sen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus (alueellisesti kattava keskiarvo $48,51 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) oli jopa 11 % suurempi kuin ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen kuormitus. Kun jokaiselta näytteenottopisteeltä ja sedimentaatiomittausjaksolta saadut resuspensiotulokset kerrottiin näytteenottopisteiden pintasedimenttien fosforipitoisuudella ($2,59\text{--}3,70 \text{ mg P g}^{-1}$), resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus vaihteli välillä $6,95\text{--}311,10 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 7) (piste 7 poistettu laskuista, koska pohjalla ei havaittu resuspendoituvaa materiaalia näytteenotossa ja P-pitoisuudet poikkeuksellisen korkeita $7,70 \text{ mg P g}^{-1}$). Voimakkainta kuormitus oli syvänpisteillä (pintasedimentin fosforipitoisuus suurin) kesäkuussa ja syys-lokakuussa, jolloin fosforin bruttosedimentaatiokin oli suurinta.

Korkeimman kuormituksen ajankohtina havaittiin myös vesipatsaan korkeimmat kokonais- ja fosfaattifosforipitoisuudet syvänpisteillä harppauskerroksen alapuolella (kuvat 2 ja 3). Koska resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus laskettiin kokonaisfosforipitoisuuksina, oli syys-seuraus –suhde vesipatsaan pitoisuuksiin selvä, mutta vaikutusta fosfaattifosforipitoisuuksiin oli vaikeampi arvioida. Suoraa vaikutusta liukoisen fosforin pitoisuuksiin resuspensionopeuksien perusteella on vaikea laskea, mutta sedimentin resuspensio voi siirtää huokosveden liukoista fosforia vesipatsaaseen diffuusiota voimakkaammin (Reddy ym. 1996). Toisaalta partikkeleihin sitoutunut resuspensoitunut fosfori on, vapautuessaan hajotuksen tai kemiallisten reaktioiden vuoksi (esim.

ligandinvaihto, Andersen 1975), heti vesipatsaassa planktisten levien käytössä, jos resuspendoituneet partikkelit päätyvät valaistuun vesikerrokseen.



Kuva 7. Fosforin resuspensionopeus (mg P m⁻² d⁻¹) Enonselällä näytteenottopisteillä 1–5 ja 7 avovesikaudella 2009 ja 2011.

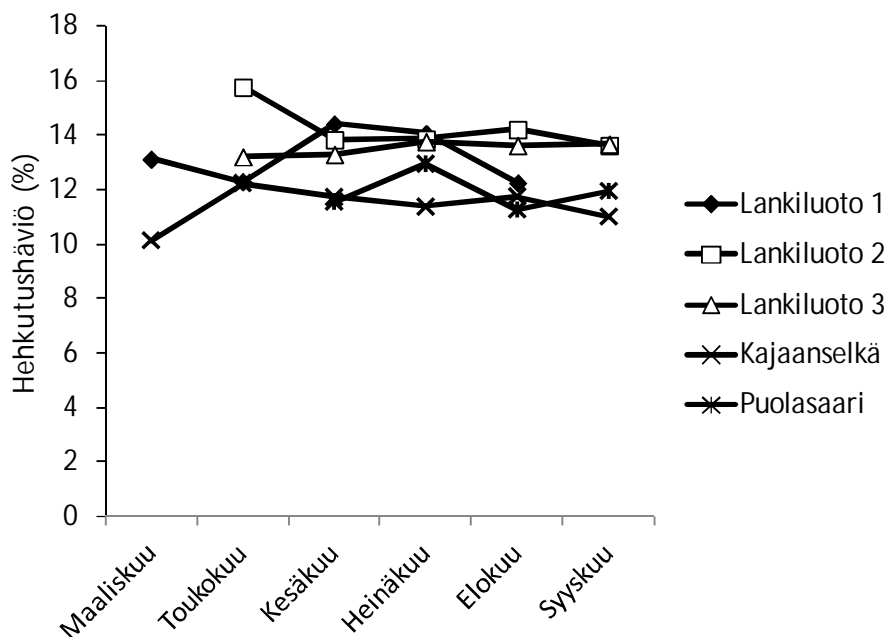
3.4 Sedimentin hapenkulutus

Sedimentin hapenkulutussarvot vaihtelivat varsin paljon näytepisteiden välillä sekä kesän mittaan. Hapenkulutus oli voimakkainta Lankiluodon ilmastimen läheisyydessä täyskiertojen aikaan ($90 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (taulukko 2). Kauempana ilmastimesta sijainneilla pisteillä kulutus oli korkeimmillaan $60\text{--}70 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Kajaanselällä kulutus oli korkeimmillaan $62 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Keskimäärin alhaisimmat lukemat mitattiin kerrostumattomalta Puolasaaren pisteeltä.

Taulukko 2. Sedimentin hapenkulutus ($\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) eri näytepisteillä kesällä 2011.

	Lankiluoto 1	Lankiluoto 2	Lankiluoto 3	Kajaanselkä	Puolasaari
Maaliskuu	5,4			24,9	
Toukokuu	90,4	65,2	64,7	40,7	
Kesäkuu	24,6	35,1	26,7	62,2	15,1
Heinäkuu				52,6	7,9
Syyskuu	89,9	52,7	73,3		37,7

Orgaanisen aineksen pitoisuus (hehikutushäviö) oli alhaisin Kajaanselän ja Puolasaaren pisteillä (10-13 %) (kuva 8). Lankiluodon pisteillä pitoisuus vaihteli välillä 12-16 %. Selkeitä kesänaikaisia trendejä ei ollut havaittavissa.



Kuva 8. Sedimentin hehikutushäviö (orgaanisen aineksen pitoisuus) eri näytepisteillä.

4. Tulosten tarkastelu

Vesijärven Enonselällä vuonna 2010 käynnistetty hapetusprojekti pyrkii vähentämään järvialtaan fosfaattifosforipitoisuuksia sisäistä ravinnekuormitusta rajoittamalla. Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää onko ilmastuksella ollut vaikutusta fosforipitoisuuksiin kunnostustoiminnan kahden ensimmäisen vuoden aikana.

Vuonna 2011 kokonais- ja fosfaattifosforia akkumuloitui alusveteen kerrostuneisuuden edetessä kuten vuonna 2009 mutta vähemmän. Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus oli korkea, 97-kertainen, suhteessa ulkoiseen kuormitukseen (72-kertainen vuonna 2009). Fosforin bruttosedimentaatio (ravinnetaseyhtälön termi BS) oli hallitseva tekijä sisäisessä kuormituksessa ja vuoden 2011 kuormitustaso oli selvästi suurempi kuin vuoden 2009 sekä korkeammasta bruttosedimentaatiosta että laskeutuvan aineksen fosforipitoisuudesta johtuen. Vaikka sisäinen kuormituksen taso oli suuri, täytyy ottaa huomioon, että ravinnetaseyhtälön tuloksissa on kyse kokonaisfosforista. Vain osa tällä tavalla lasketusta sisäisestä kuormituksesta vapautuu mahdollisesti liukoiseen muotoon ja on näin ollen leville käyttökelpoista ja esimerkiksi ilmastuskunnostuksen vaikutuksen piirissä.

Vuonna 2011 sedimentin ja sen myötä fosforin resuspendoituminen vaikutti voimakkaasti Enonselän sisäiseen fosforikuormitukseen muodostaen 110 % ravinnetaseyhtälöllä lasketusta sisäisestä kuormituksesta. Vuonna 2009 vastaava luku oli 90 %. Resuspension selvästi suurempi vaikutus sisäiseen kuormitukseen johtui todennäköisesti siitä, että ilmastus heikentää järven lämpötilakerrostuneisuutta, jolloin kerrostuneisuuskausi lyhenee ja resuspendoitumisen mahdollistava vesipatsaan sekoittuminen jatkuu pidempään. Resuspendoituvan pintasedimentin fosforipitoisuudet olivat myös suurempia vuonna 2011 kuin 2009.

Vaikka sisäinen kuormitus oli moninkertainen ulkoiseen verrattuna, ulkoisen kuormituksen merkitys järven ekologialle voi olla erittäin suuri, sillä sedimentin resuspendoituminen kierrättää järveen tulevia ravinteita takaisin vesipatsaaseen mahdollisesti useaan kertaan ennen pysyvää sedimentoitumista. Vain osa resuspendoituvien sedimenttipartikkelien fosforista vapautuu leville käyttökelpoiseen liukoiseen muotoon olosuhteista riippuen, mutta toisaalta resuspension voimistuminen voi voimistaa huokosveden liukoisen fosforin siirtymistä vesipatsaaseen.

Sedimentin hapenkulutus Vesijärvellä on huomattavan suurta, eivätkä hapetinlaitteen nykyisellä tehollaan pysty vastaamaan hapenkulutuksen vaatimaan liunneen hapen määrään. Matalalla kerrostumattomalla näytepisteellä Puolasaaressa sedimentin hapenkulutus oli suurimmillaan voimakkaimman tuotannon aikaan elokuussa, jolloin myös hajotettavaa materiaalia on eniten

saatavilla. Vertailualueella Kajaanselällä sedimentin hapenkulutus seurasi pohjanläheisen veden lämpötilaa ja orgaanisen hiilen määrää pintasedimentissä. Talvella jääpeitteisenä kautena lämpötilalla oli myös jonkin verran merkitystä Kajaanselän ja Lankiluodon väliseen eroon hapenkulutuksen tasossa. Kajaanselkää vastaavaa lämpötilariippuvuutta avovesikautena ei kuitenkaan ollut havaittavissa Lankiluodolla, jossa sedimentin hapenkulutus oli voimakkaimmillaan täyskiertojen aikana touko- ja syyskuussa. Koska Lankiluodolla etenkin syksyn täyskierto ajoittuu aikaisemmaksi kuin Kajaanselällä, on myös kiertävä vesi huomattavasti lämpimämpää. Tällöin kesäaikana sedimentoitunut orgaaninen aines hajotetaan nopeasti, kun happea on taas saatavilla. Kevään täyskierrolla voi olla vastaavanlainen vaikutus sedimentin hapenkulutuksen tasoon, sillä talviaikainen kulutus on hyvin pientä. Lämpötila ja orgaanisen hiilen määrä pintasedimentissä ei kuitenkaan täysin selitä Lankiluodon näytepisteiden välistä vaihtelua kesäaikana. Sedimentin hapenkulutukseen voivat myös vaikuttaa hapetinlaitteiden aiheuttama turbulenssi vesi-sedimentti rajapinnassa sekä erityisesti vesipatsaassa tapahtuva hapenkulutus, joka vaikuttaa merkittävästi suoraan sedimentoituvan hajotettavan materiaalin määrään.

5. Lähdeluettelo

Andersen, J.M. (1975). Influence of pH on release of phosphorus from lake sediments. *Archiv für Hydrobiologie* 76: 411–419.

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.

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., Grünfeld, S., Jakobsen, T.S. & Hansen, K. (2009). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes. *Hydrobiologia* 625: 157–172.

Niemistö, J., Horppila, J. & Tamminen, P. (2010). Sisäinen ravinnekuormitus Vesijärven Enonselällä 2009. Helsingin yliopisto, Ympäristötieteiden laitos. Raportti, Vesijärvisäätiö.

Reddy, K.R., Fisher, M.M. & Ivanoff, D. (1996). Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake. *J. Environ. Qual.* 25: 363–371.

Weyhenmeyer, G.A. (1997). Quantification of resuspended particles in sedimentation traps. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 271–276.

Weyhenmeyer, G.A. (1998). Resuspension in lakes and its ecological impact – a review. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 51: 185–200.