



Ilmastonkestävä **kaupunki**

Loppuraportti

Ilmastonkestävä kaupunki (ILKKA) – työkaluja suunnitteluun

Osahanke 'Kaupunkien hiilinielut ja niiden vertailu sekä hiilinielupotentiaalin laskenta esimerkkialueille'

Hapetuksen vaikutukset Vesijärven Enonselän hiilikaasupäästöihin

Anne Ojala & Huizhong Zhang

Helsingin yliopisto, ympäristötieteiden laitos

Tausta ja työn tarkoitus

Osana Lahden kaupungin hanketta *Ilmastonkestävä kaupunki (ILKKA) – työkaluja suunnitteluun* toteutettiin vuoden 2013 avovesikauden aikana Vesijärven Enonselällä tutkimus, jossa selvitettiin käynnissä olevan, järven kunnostukseen liittyvän hapetuksen vaikutuksia vesipatsaan hiilidioksidi- ja metaanipitoisuuksiin sekä näiden kaasujen päästöihin järvestä ilmakehään. ILKKA -hankkeessa pyritään tuottamaan kunnallisten päätöksien valmistelua ja kunnallista päätöksentekoa tukevia tutkimustuloksia, ja Vesijärven kampanja kuuluu osahankeeseen *Kaupunkien hiilinielut ja niiden vertailu sekä hiilinielupotentiaalin laskenta esimerkkialueille*. Vesijärvitutkimukseen valituista kasvihuonekaasuista hiilidioksidi on yleensä selvästi metaania tärkeämpi määrällisesti ja esim. hiilenkierrossa metaanin merkitys on vähäinen. Metaanin lämmitysvaikutus (ns. Global Warming Potential) on kuitenkin noin 25-kertainen hiilidioksidiin verrattuna ja näin ollen yksi lyhyen aikavälin tehokkaimmista ilmastonmuutoksen mitigaatiomenetelmistä on metaanipäästöjen vähentäminen. Vastaavasti toimenpiteitä, jotka lisäävät metaanin tuotantoa, tulisi välttää.

Vesiekosysteemeissä sekä hiilidioksidi että metaani ovat ns. metaboliakaasuja eli niitä tuotetaan pääasiassa biologisissa aineenvaihduntaprosesseissa. Toisin kuin hiilidioksidi, metaanin tuotanto vaatii kuitenkin anaerobiset eli hapettomat olot, eli sitä tuotetaan metanogeneettisesti järvien pohjasedimenteissä, joissa on myös runsaasti tarjolla mikrobitoiminnan vaatimia substraatteja. Jos järven alusvesi on talvi- tai kesäkerrostuneisuuden aikaan hapeton, tuotettu metaani kerääntyy helposti alusveteen, josta se sitten täyskiertojen aikaan vapautuu. Vesijärven Lankiluodolla aiemmat kokemukset hapetuksesta osoittavat, että vaikka hapetuksella sinällään voi olla positiivisia vaikutuksia



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

Vipuvoimaa

EU:lta

2007-2013



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



Ilmastonkestävä **kaupunki**

järven vedenlaatuun, ei se kuitenkaan aina pysty muuttamaan vesipatsasta hapelliseksi koko avovesikauden ajaksi. Vesialtaan morfometria kuitenkin vaikuttaa hapetuksen lopputulokseen, ja esim. matalammassa Vasikkasaaren pisteessä Vesijärvellä hapetuksen vaikutukset ovat olleet Lankiluotoa selvemmat. Toisaalta hapetuksen tiedetään kohottavan järven alusveden lämpötilaa, mikä puolestaan voi kiihdyttää metanogeneesin kaltaisia mikrobiologisia prosesseja. Näin työhypoteesiksi vuoden 2013 tutkimuksissa muodostui se, että lämpötilan mahdollisesta noususta huolimatta metaanipäästöt Vesijärvestä saattavat pienentyä ilmaston seurauksena, koska tuotettu metaani kulkeutuu tehokkaammin vesipatsaassa ylöspäin, ja tällöin suuri osa siitä hapettuu biologisesti hiilidioksidiksi. Toisaalta tämän metanotrofisten bakteerien aktiivisuuden vuoksi on oletettavissa, että vastaavasti hiilidioksidipäästöt kasvavat. Verrokkina kesän 2013 mittauksille toimivat Lankiluodon vuoden 2005 mittaukset, joiden aikana hapetusta ei ollut käytössä (Lopéz Bellido ym. 2011, Lopéz Bellido 2012). Samoin kuin vuonna 2013, myös vuonna 2005 hiilidioksidin- ja metaanipäästöjen ohella tarkasteltiin vesipatsaan kaasupitoisuuksia. Analyttiset menetelmät molempina vuosina olivat pääpiirteissään samat. Verrokkivuoden käyttöä tutkimuksessa kuitenkin lopulta hankaloitti se, että vuosi 2013 oli sateinen ja tuulinen, ja alusvesi Enonselällä säilyi normaalia viileämpänä.

Aineisto ja menetelmät

Mittaukset vuonna 2013 tehtiin Vesijärven Enonselän Lankiluodolla ja Vasikkasaarella, joissa molemmissa oli hapettimet. Lankiluoto on syvännepaikka, jossa maksimisyyvyys on noin 31 m, kun taas Vasikkasaarella veden syvyys on noin 22 m. Erotuksena vuodesta 2005, jolloin näytteitä otettiin viikon välein kautta koko mittausjakson, vuonna 2013 mittaukset tehtiin pääsääntöisesti kampanjanomaisesti. Ensimmäiset näytteet kaasupitoisuuksista otettiin jo 24.4., jolloin järvi oli vielä jäässä. Tällä näytteenotolla haluttiin selvittää metaboliakaasujen mahdollinen kerääntyminen jään alle. Jäät lähtivät 2.5., ja avovesikautta kesti aina joulukuun alkuun. Näytteenotto järvellä lopetettiin lokakuun alussa, jolloin järvi oli jo kiertänyt jonkin aikaan ja kaasut näin ollen tuulettuneet tehokkaasti ulos. Kolme kahden viikon mittaista kampanjaa ajoittui kesä-elokuuhun, ja niiden aikana järvellä käytiin 2-3 kertaa viikossa. Tällöin kaasunäytteiden oton lisäksi mitattiin vesipatsaan lämpötila ja happipitoisuus (YSI 58, Yellow Springs Instruments). Näytteet ja mittaukset kattoivat aina koko vesipatsaan niin, että ylimmässä viidessä metrissä näytteenottoväli oli 1 metri ja 10 metristä alaspäin 5 metriä. Kulloisenkin mittausjakson aikana hapettimet sekä Lankiluodolla että Vasikkasaarella olivat joko päällä tai pois päältä sen mukaan, mikä kulloisenakin ajankohtana oli tutkimuksellisesti mielekästä.

Pääpiirteissään hapetus oli päällä molemmissa mittauspaikoissa samanaikaisesti. Mittauksia edeltävänä talvena sekä Lankiluodon että Vasikkasaaren hapettimet toimivat ajanjakson 28.12.2012-19.4.2013. Vasikkasaarella kesähapetus aloitettiin vasta 12.7., kun taas Lankiluodolla hapetin oli päällä jo kesäkuussa aikavälillä 20.-25.6. Heinäkuussa Lankiluodon hapetus aloitettiin Vasikkasaaren tavoin 12.7., mutta laitevian vuoksi se keskeytyi jo 29.7. Elokuussa molemmilla mittauspaikoilla hapetuksessa oli katkos niin elokuun alku- kuin loppupuolellakin. Kesän hapetuskausi päättyi sekä



Helsingin kaupunki



Vantaa



TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY



Vipuvoimaa
EU:lta
2007-2013



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



Ilmastokestävä **kaupunki**

Lankiluodolla että Vasikkasaarella 20.9. Näin siis hapetuspäiviä oli Lankiluodolla kesäkuussa 6, heinäkuussa 6, elokuussa 23 ja syyskuussa 20. Vasikkasaarella vastaavat päivien lukumäärät olivat 0, 21, 23 ja 20.

Kaasunäytteet (30 ml) otettiin 60 ml:n muoviruiskuihin, joihin oli liitetty kolmitiehanat. Kaasut määritettiin kaasukromatografisesti Helsingin yliopiston Lammin biologisen aseman Agilent 6890 –laitteistolla käyttäen ns. head space –tekniikkaa (kts Ojala ym. 2010). Kaasupitoisuudet määritettiin hyödyntäen tietoa metaanin ja hiilidioksidin liukoisuudesta ja sen lämpötilariippuvuudesta ja käyttäen kulloinkin tarkoituksenmukaista Henryn lain vakiota (kts Ojala ym. 2010). Kaasupäästöt ilmakehään arvioitiin pintaveden kaasupitoisuudesta ja yläpuolisen ilmakehän kaasupitoisuudesta ja näiden välisestä erotuksesta. Kaasupäästöihin suuresti vaikuttava kaasunvaihtokerroin arvioitiin tuulennopeudesta, mutta Enonselän avonaisuuden ja pitkän tuulen pyyhkäisymatkan vuoksi kerroin vakioitiin arvoon 10 cm h^{-1} (kts Heiskanen ym. 2014).

Tulokset ja tulosten tarkastelua

Lämpötila- ja happiolot

Mittauskesä 2013 osoittautui sääoloiltaan hieman aiemmista vuosista poikkeavaksi, sillä se oli sangen sateinen ja vesipatsaan lämpötilat pysyivät syvänteessäkin selvästi vuosia 2009-2012 alhaisempina, millä on väistämättä vaikutuksensa metaania ja hiilidioksidia tuottaviin ja kuluttaviin biologisiin prosesseihin. Lämpötila vaikuttaa kaasuihin myös suoraan liukoisuuden lämpötilariippuvuuden kautta. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Lankiluodon ja Vasikkasaaren lämpötilakerrostuneisuuden samanarvonkäyrät kesältä 2013.



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

Vipuvoimaa

EU:lta

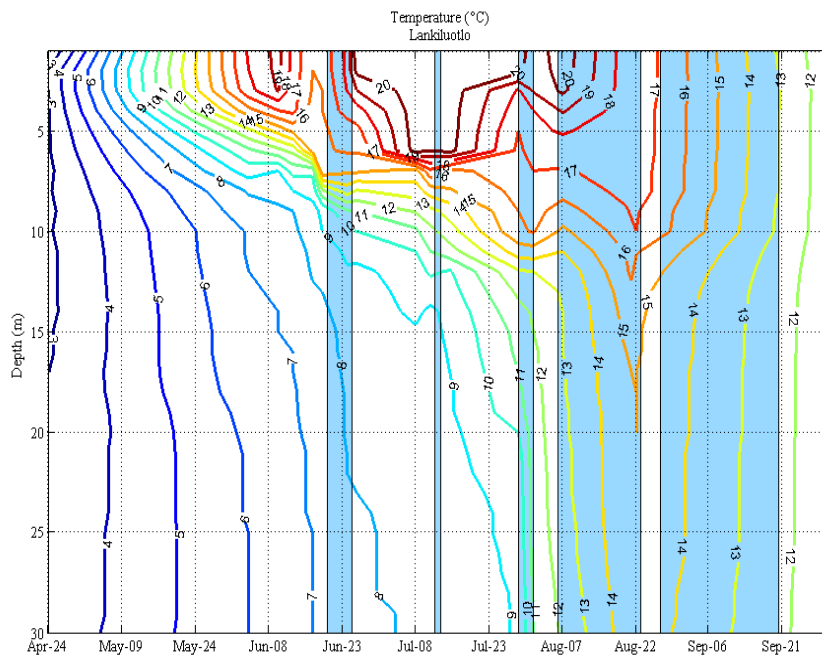
2007-2013



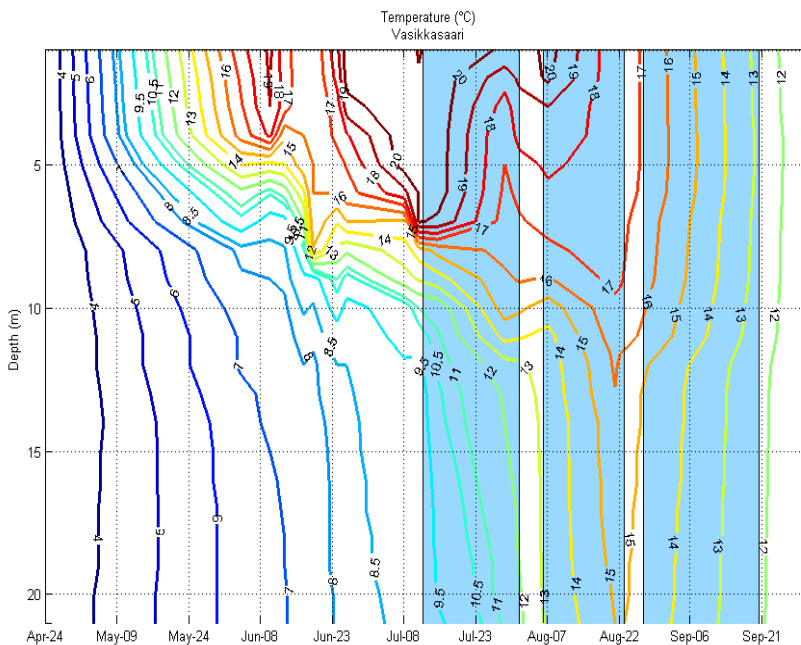
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



Ilmastonkestävä kaupunki



Kuva 1. Lankiluodon lämpötilakerrostuneisuus (°C) kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.



Kuva 2. Vasikkasaaren lämpötilakerrostuneisuus (°C) kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

Vipuvoimaa
EU:lta
2007-2013



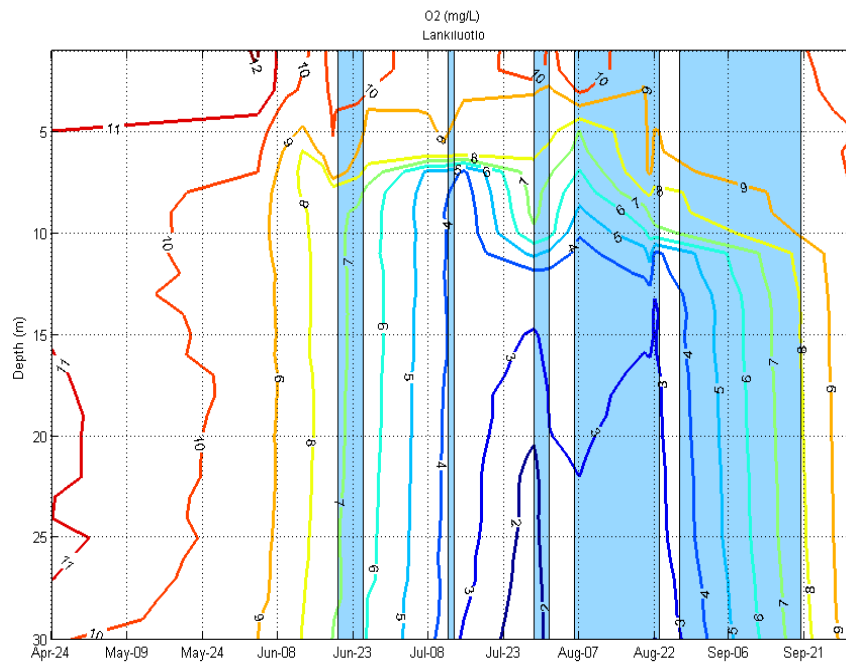
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



Ilmastonkestävä **kaupunki**

Molemmissa mittauskohteissa vesipatsaaseen muodostui alkukesän kuluessa selvä lämpötilakerrostuneisuus. Sekä Lankiluodolla että Vasikkasaassa termokliini painui syvemmälle hapetuksen seurauksena eli hapetuksessa oli nähtävissä selvä lämpötilavaikutus. Vasikkasaassa, jossa hapetus onnistui teknisesti paremmin, alusvesi oli hiukan lämpimämpää kuin Lankiluodolla. Molemmissa pisteissä vesipatsas oli täyskierrossa syyskuun loppupuolelle tultaessa.

Happiolot Lankiluodolla ja Vasikkasaassa muistuttivat kesällä 2013 suuresti toisiaan: molemmissa pisteissä alusveden keskimääräinen happipitoisuus oli $5,7 \text{ mg l}^{-1}$. Myös hapen suhteen molemmat kohteet kerrostuivat, mutta kaiken kaikkiaan happiolot aiempaan verrattuna säilyivät suhteellisen hyvinä ja pitkiä täydellisen hapettomuuden kausia ei esiintynyt kummassakaan paikassa (kuvat 3 ja 4). Sekä Lankiluodolla että Vasikkasaassa hapetus paransi alusveden happioloja.



Kuva 3. Lankiluodon vesipatsaan happipitoisuus (mg l^{-1}) kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

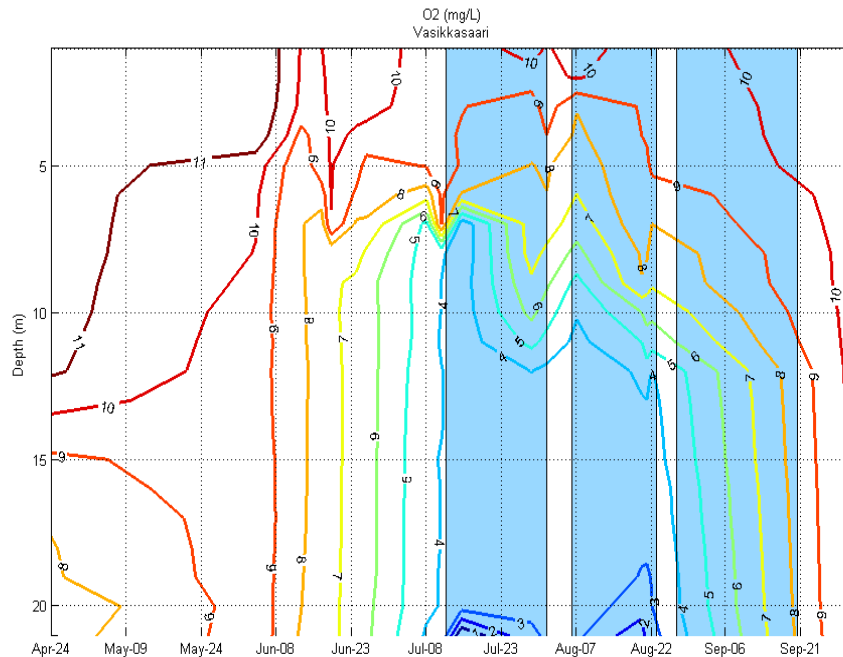
Vipuvoimaa

EU:lta

2007-2013



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



Kuva 4. Vasikkasaaren vesipatsaan happipitoisuus (mg l^{-1}) kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.

Kaasupitoisuudet

Hiilidioksidi

Samoin kuin lämpötilassa ja happipitoisuudessa, myös kasvihuonekaasujen pitoisuuksissa oli havaittavissa kerrostuneisuutta (Taulukko 1). Varsinkin hiilidioksidia kerääntyi alusveteen niin Lankiluodossa kuin Vasikkasaaressakin, ja alusveden pitoisuudet ylittivät pintaveden pitoisuuden keskimäärin 4-5 -kertaisesti. Hiilidioksidin kertymä kehittyi samanaikaisesti, kun happipitoisuus laski, so. hiilidioksidin ja hapen välillä oli selvä negatiivinen korrelaatio. Tämä indikoi sitä, että molemmilla on sama biologinen alkuperä eli kun happea kuluttavat prosessit voimistuvat, lisääntyy hiilidioksidin tuotto, ja hiilidioksidin pitoisuus kasvaa.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty hiilidioksidi pitoisuuden kehitys niin Lankiluodolla kuin Vasikkasaarella. Lankiluodolla on nähtävissä keväinen pintaveden hiilidioksidipiikki, joka usein indikoi ns. lateraalista kuljetusta sulavesien ja veden virtausten mukana maalta tai litoraalista. Vasikkasaarella vastaavaa ilmiötä ei ollut havaittavissa. Hapetuksen seurauksena alusveden hiilidioksidipitoisuuksissa oli molemmissa mittauspisteissä nähtävissä laskua. Hiilidioksidin suhteen sekä Lankiluoto että Vasikkasaari olivat enimmäkseen ylikyllästettyjä niin, että Lankiluodolla pintaveden hiilidioksidipitoisuus oli keskimäärin kaksinkertainen verrattuna tasapainopitoisuuteen. Vastaavasti





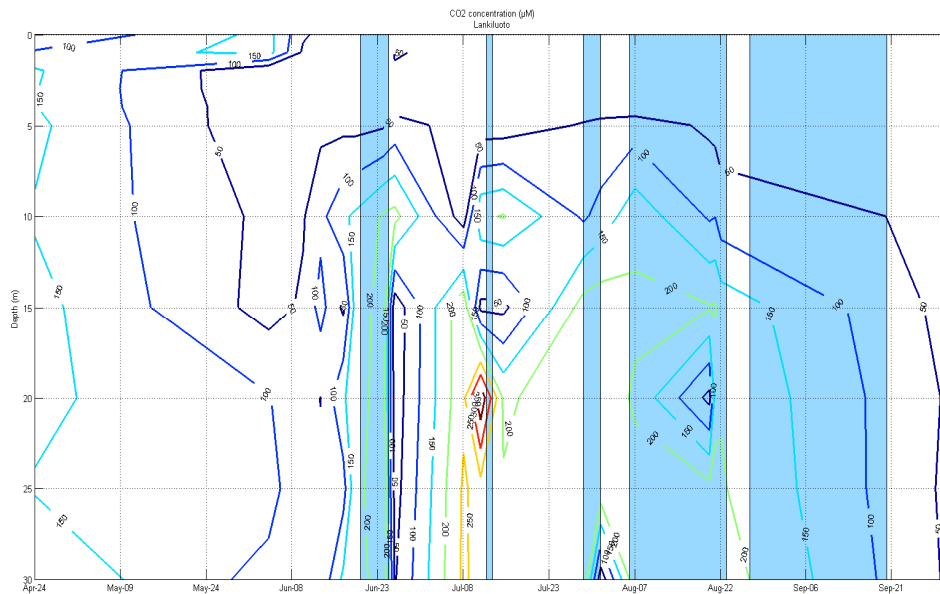
Vasikkasaarella pitoisuus oli 1,5 –kertainen. Muutamina mittauspäivinä kesä-elokuussa pitoisuudet olivat kuitenkin tasapainopitoisuutta alhaisempia. Nämä olivat ajankohtia, jolloin klorofyllipitoisuudet olivat korkeimmillaan eli todennäköisesti tällöin fotosynteesi oli niin voimakasta, että se pystyi kuluttamaan hiilidioksidin alle tasapainopitoisuuden (vrt Huotari ym. 2011).

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen keskimääräiset pitoisuudet (μM) Lankiluodon ja Vasikkasaaren pintavedessä (surface), päällysvedessä (epilimnion) ja alusvedessä (hypolimnion). Myös mittauspaikkojen kaasupäästöt ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) on esitetty.

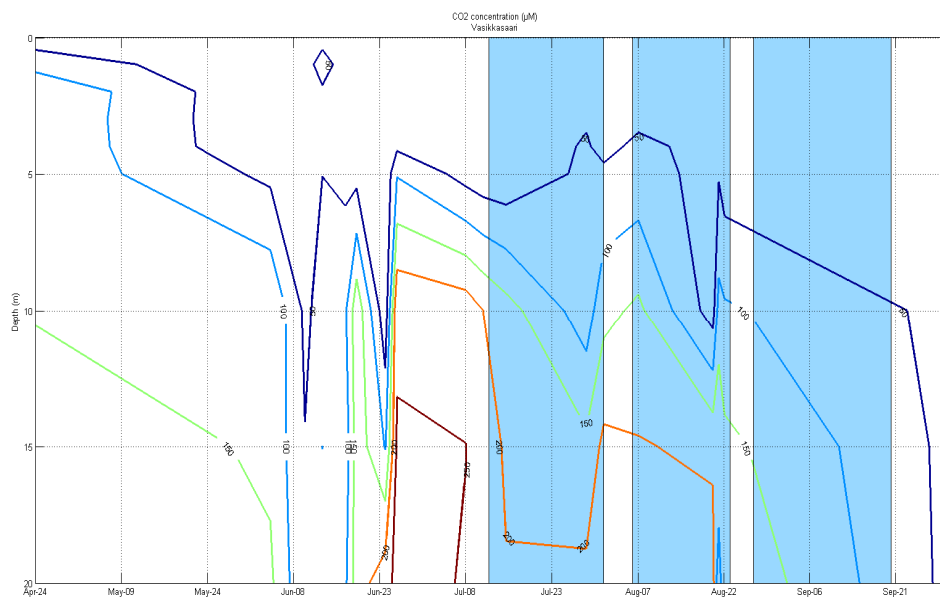
	Location	Gas concentrations (μM)			Gas fluxes ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
		Surface (0-30 cm)	Epilimnion (0-5 m)	Hypolimnion (10-30m/10-20 m)	
CO ₂	Lankiluoto	36.53 ± 9.75 (4.18 – 191.82)	36.68 ± 3.44 (3.09 – 215.65)	146.82 ± 8.50 (23.32 – 389.42)	46.53 ± 23.3 (-27.28 – 422.01)
	Vasikkasaari	25.63 ± 3.42 (3.39 – 54.79)	34.08 ± 2.56 (2.98 – 135.45)	152.68 ± 10.02 (12.97 – 263.92)	20.19 ± 8.16 (-29.38 – 89.12)
CH ₄	Lankiluoto	0.10 ± 0.01 (0.05 – 0.26)	0.10 ± 0.007 (0.03 – 0.70)	0.15 ± 0.016 (0.01 – 0.91)	0.23 ± 0.03 (0.11 – 0.63)
	Vasikkasaari	0.09 ± 0.01 (0.02 – 0.16)	0.09 ± 0.003 (0.02 – 0.17)	0.12 ± 0.012 (0.03 – 0.65)	0.22 ± 0.02 (0.05 – 0.38)



Ilmastonkestävä **kaupunki**



Kuva 5. Hiilidioksin pitoisuus (μM) Lankiluodon vesipatsaassa kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.



Kuva 6. Hiilidioksidin pitoisuus (μM) Vasikkasaaren vesipatsaassa kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.

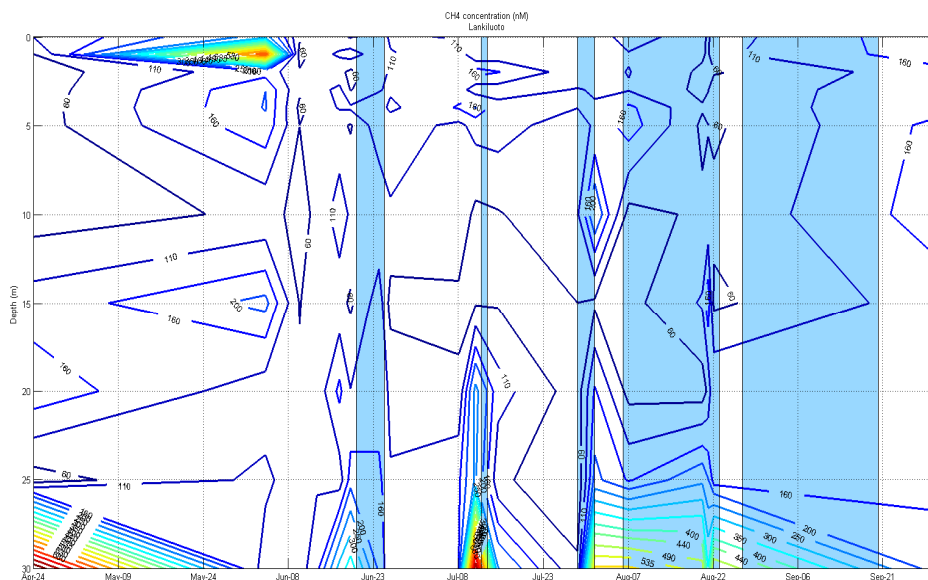


Metaani

Kaiken kaikkiaan metaanipitoisuudet olivat Enonselällä kesällä 2013 alhaiset (Kuvat 7 ja 8). Kohonneita pitoisuuksia mitattiin lyhytaikaisesti silloin, kun alusveden happipitoisuudet olivat alhaisimmillaan. Lankiluodolla, jossa hapetuksessa oli teknisiä ongelmia, pitoisuudet olivat hiukan Vasikkasaarta korkeampia (Taulukko 1). Samoin kuin hiilidioksidissa, myös metaanissa alusveden pitoisuudet olivat pintaveden pitoisuuksia korkeammat, mutta keskimäärin alusveden pitoisuudet ylittivät pintaveden vastaavat ainoastaan 1,5 –kertaisesti. Samoin kuin hiilidioksilla, myös metaanilla oli selvä negatiivinen korrelaatio hapen kanssa. Hiilidioksidi- ja metaanipitoisuuksien välillä oli vastaavasti positiivinen korrelaatio. Korrelaatiot viittaavat siihen, että näillä kaikilla kolmella kaasulla on sama biologinen alkuperä.

Metaanissa on Lankiluodolla nähtävissä selvä alusveden kertymä jääpeitteisenä aikana niin, että pohjanläheinen pitoisuus ennen jäiden lähtöä oli 914 nM (Kuva 7). Kesäkuun alussa pisteen metaanipitoisuus pintavedessä kohosi, ja samaan aikaan lievää nousua oli havaittavissa myös hiilidioksidipitoisuudessa. Kaasujen alkuperä on toistaiseksi tuntematon, mutta voi indikoida terrestristä vaikutusta ja kaasujen horisontaalista kulkeutumista. Hapetuksen aikana pohjanläheiset metaanipitoisuudet usein nousivat, todennäköisesti kohonneen lämpötilan ja siten suuremman metanogeneettisen aktiivisuuden seurauksena.

Molempien Enonselän mittauspisteiden pintavesi oli metaanin suhteen selvästi ylikyllästynyt koko mittausjakson ajan. Keskimäärin pintavedessä oli 30 –kertaa tasapainopitoisuutta suurempi määrä metaania.

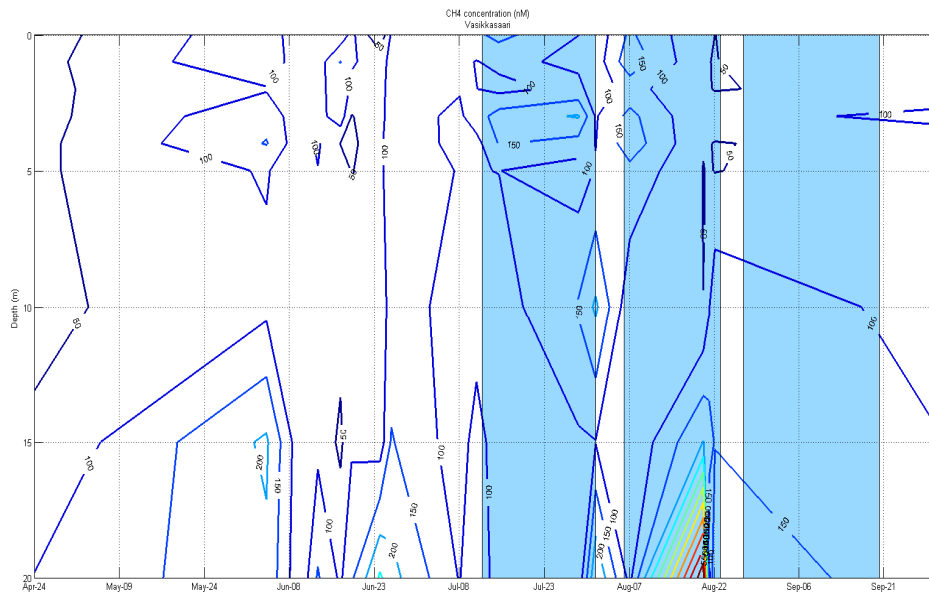


Kuva 7. Metaanin pitoisuus (μM) Lankiluodon vesipatsaassa kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.





Ilmastonkestävä **kaupunki**



Kuva 8. Metaanin pitoisuus (μM) Vasikkasaaren vesipatsaassa kesällä 2013. Siniset varjostukset kuvaavat ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä.

Kaasupäästöt

Lankiluodolla molempien kasvihuonekaasujen päästöt olivat suurimmillaan kesäkuun alussa, jolloin pintavedestä mitattiin kohonneita kaasupitoisuuksia. Metaanissa oli päästömaksimi myös lokakuun alussa viimeisen näytteenoton aikaan. Hiilidioksidipäästö laski tasaisesti elokuun loppupuolelle asti, kun taas metaanipäästöt vaihtelivat epäsäännöllisesti. Heinäkuun puolivälistä elokuun alkupuolelle hiilidioksidin vuo kääntyi järveen päin eli lähdevaikutus muuttui nieluksi. Metaanin osalta Lankiluoto käyttäytyi koko avovesikauden selvänä lähteenä. Hypoteesin mukaisesti elokuun pitkä hapetusjakso aiheutti metaanipäästön pienenemisen ja vastaavasti hiilidioksidipäästön lievän kasvun eli hapetus toimi tältä osin odotusten mukaisesti.



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

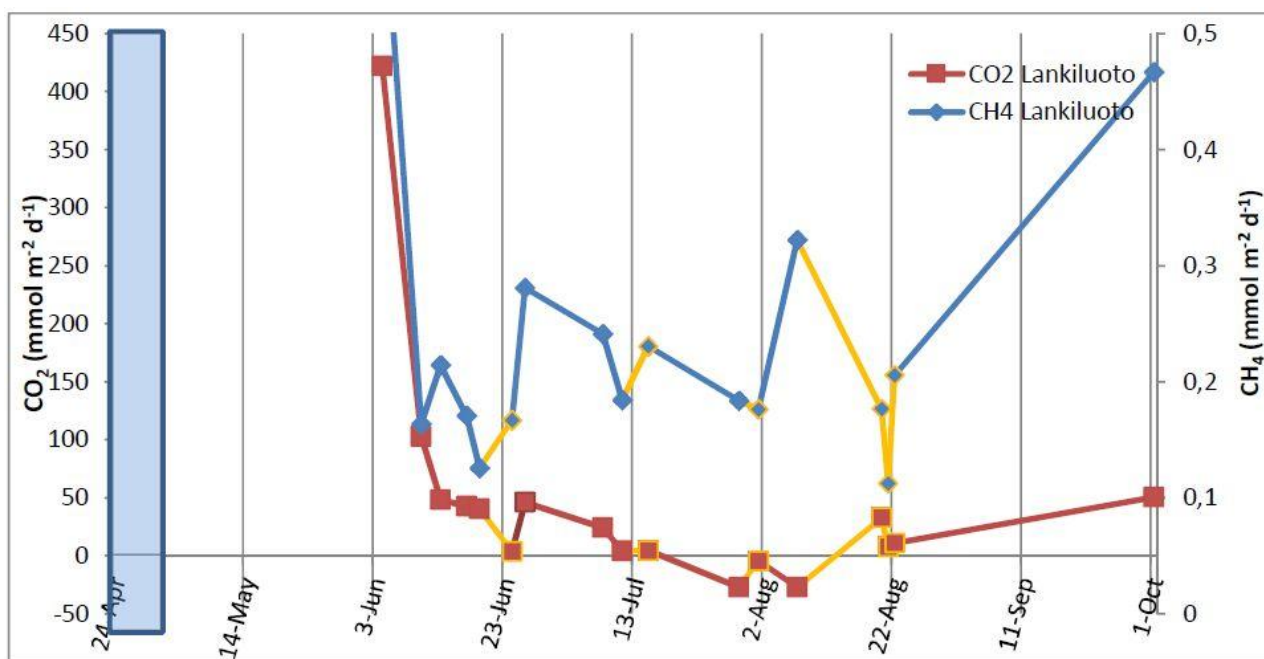
Vipuvoimaa
EU:lta
2007-2013



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

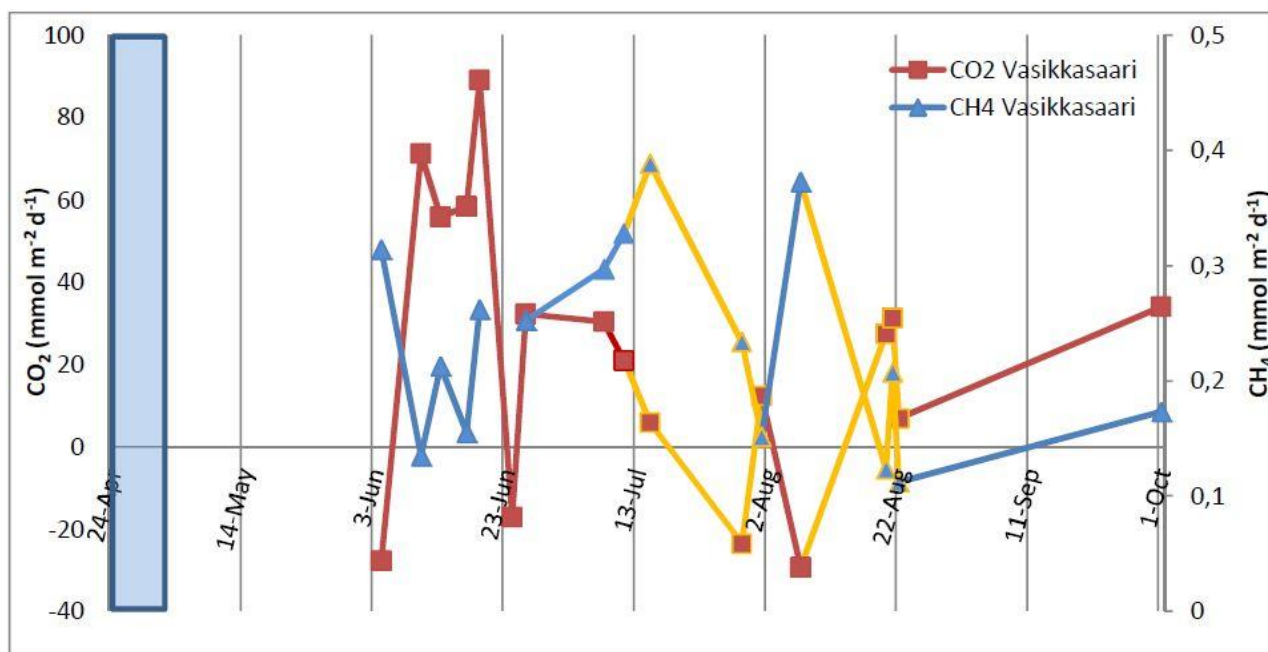


Ilmastonkestävä kaupunki



Kuva 9. Kaasupäästöt ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) kesällä 2013 Lankiluodolla. Murtoviivan keltainen osa kuvaa ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä. Huomaa, että hiilidioksidille ja metaanille on eri asteikot. Päästön positiivinen arvo kuvaa tilanne, jolloin kaasuja vapautuu ilmakehään. Negatiivinen arvo vastaavasti kuvaa tilanne, jolloin kaasua siirtyy ilmakehästä veteen.

Vasikkasaarella sekä hiilidioksidin että metaanin päästöt vaihtelivat ilman selvää trendiä. Pääsääntöisesti Vasikkasaari oli kuitenkin metaanin suhteen lähde, kun taas hiilidioksidissa oli Lankiluodon tapaan nähtävissä ajanjaksoja, jolloin paikka toimi lähteen sijaan nieluna. Heinäkuun hapetusjaksolla sekä metaanin että hiilidioksidin päästöt laskivat, kun taas elokuun jaksolla Vasikkasaari käyttäytyi Lankiluodon kaltaisesti, so. metaanipäästö pieneni ja hiilidioksidipäästö vastaavasti kasvoi.



Kuva 10. Kaasupäästöt ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) kesällä 2013 Vasikkasaarella. Murtoviivan keltainen osa kuvaa ajanjaksoja, jolloin hapetus oli käynnissä. Huomaa, että hiilidioksidille ja metaanille on eri asteikot. Päästön positiivinen arvo kuvaa tilanne, jolloin kaasuja vapautuu ilmakehään. Negatiivinen arvo vastaavasti kuvaa tilanne, jolloin kaasua siirtyy ilmakehästä veteen.

Alustavat johtopäätökset

Kesän 2013 kasvihuonekaasututkimukset viittaavat siihen, että vesipatsaan hapettamisella on vaikutusta kasvihuonekaasupäästöihin. Työhypoteesit pitivät paikkansa, so. hapetuksen seurauksena metaanipäästöt voivat laskea ja vastaavasti hiilidioksidipäästöt kasvaa eli tältä osin vaikutus olisi ilmastonmuutosta vastaan taisteltaessa positiivinen. Johtopäätösten tekoa hankaloittaa se, että mittausvuosi 2013 oli sääoloiltaan poikkeava, jolloin esim. kesän 2005 mittausten käyttö verrokkina vaikeutui. Pitemmät aikasarjat ja intensiivisempi, jopa jatkuvatoiminen mittaus olisivat tutkimuksellisesti hyvä ratkaisu, mutta kustannuksiltaan kampanjanomaista mittausta selvästi kalliimpi lähestymistapa.



Ilmastonkestävä **kaupunki**

Kirjallisuus

Heiskanen, J.J., Mammarella, I., Haapanala, S., Pumpanen, J., Vesala, T., MacIntyre, S. & Ojala, A. 2014. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake. *Tellus B* 2014, 66, 22827, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v66.22827>

Huotari, J., Ojala, A., Peltomaa, E., Nordbo, A., Launiainen, S., Pumpanen, J., Rasilo, T., Hari, P. & Vesala, T. 2011. Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. *Geophysical Research Letters* vol. 38, L18401, doi:10.1029/2011GL048753, 2011

Lopéz Bellido, J. 2012. Factors controlling carbon gas fluxes in boreal lakes. University of Helsinki. Reports from the Department of Environmental Sciences no 16. Väitöskirja. 73 s.

Lopéz Bellido, J., Ojala, A. & Peltomaa, E. 2011. An urban boreal lake basin as a source of CO₂ and CH₄. *Environmental Pollution* 159: 1649-1659.

Ojala, A., Lopéz Bellido, J., Tulonen, T., Kankaala, P. & Huotari, J. 2011. Carbon gas fluxes from a brown-water and a clear-water lake in the boreal zone during a summer with extreme rain events. *Limnology and Oceanography* 56: 61-76.



Helsingin kaupunki



Vantaa

TURKU



LAHTI



ILMATIETEEN LAITOS



Turun yliopisto
University of Turku



HSY

Vipuvoimaa

EU:lta

2007-2013



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto