



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Talviaikainen happitilanne eräissä Pohjois-Savon järvissä vuosina 1997-2008

12/2010

Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne ja
ympäristökeskuksen julkaisu

Talviaikainen happitilanne eräissä Pohjois-Savon järvissä vuosina 1997-2008

Taina Hammar ja Antti Kanninen

12/2010

Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne ja
ympäristökeskuksen julkaisuja

ISSN 1798-8063 (verkkojulkaisu)
ISBN 978-952-257-194-6 (verkkojulkaisu)

Taitto Hilikka Koivisto

Kuopio 2010

Sisältö

Alkusanat	5
1 Yleistä järvien talviaikaisesta happitilanteesta	6
2 Seurannan kohteet ja ohjelma	10
3 Seurantavuosien sääolosuhteet	13
4 Tulokset	16
4.1. Happitilanteen kehitys eri vuosina	16
4.2. Happitilanne ja lämpötila eri vuosina maaliskuun lopussa	19
4.3. Hapenkulutusnopeuden vaihtelu eri järvien ja eri vuosien välillä	23
4.4. Muu vedenlaatu pohjanläheisessä vesikerroksessa	27
4.5. Maaliskuun lopun happitilanteen yhteys sääolosuhteisiin	31
5 Tulosten tarkastelu	33
5.1. Hapenkulutusnopeus	33
5.2. Sääolosuhteiden vaikutus	34
5.3. Happitilanteen vaikutus veden laatuun	34
Yhteenveto	36

Alkusanat

Pohjois-Savon ympäristökeskuksen alueellisen seurannan ohjelmaan kuulunut happiseuranta aloitettiin syksyllä 1997 kuvaamaan järvien alttiutta happiongelmiille eri vuosina. Kohteiksi valittiin neljä pienehköä järveä (Iso-Valkeinen, Kevätön, Kolmisoppi ja Vehmasjärvi), jotka ovat erityyppisiä syvyydeltään, rehevyystasoltaan ja humuspitoisuudeltaan. Järvet sijaitsevat maksimissaan noin 50 kilometrin etäisyydellä toisistaan Siilinjärven ja Kuopion alueella, Vehmasjärvi aivan Karttulan rajalla. Näiden esimerkkijärvien oli tarkoitus antaa yleisemminkin viitteitä happitilanteesta, sen kehityksestä talven aikana ja siihen liittyvistä vedenlaatumuutoksista. Alkutilan tulosten perusteella annettiin vuosittain tiedote, jossa arvioitiin happikatojen mahdollisuutta kevättalven kuluessa. Yleisöllä oli myös mahdollisuus seurata happi- ja lämpötilatuloksia Pohjois-Savon ympäristökeskuksen verkkopalvelun kautta. Happiseurantanettisivu <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=10541&lan=fi>

Tässä raportissa on esitetty yhteenveto happiseurannan tuloksista. Seuranta päättyi kevättalvella 2008. Seuranta toteuttivat kentällä Pirjo Punju, Reijo Heikkinen, Matti Jaakkonen, Hannu Partanen ja Jukka Pohtila. Vesinäytteet määritettiin aluksi Pohjois-Savon ympäristökeskuksen ja vuodesta 2004 alkaen Pohjois-Karjalan ympäristökeskuksen laboratorioissa. Leena Kuikka vei tulokset Pohjois-Savon ympäristökeskuksen verkkopalveluun.

1 Yleistä järvien talviaikaisesta happitilanteesta

Talvella järvet ovat pääosin sen hapen varassa, joka vesimassassa on jääpeitteen muodostuessa. Jääpeitteisenä kautena happea ei pääse liukenemaan ilmakehästä veteen ja yhteyttäminen tuottaa happea olemattoman vähän varsinkin silloin kun jään päällä on lunta. Happitäydennystä voi tulla lähinnä järveen laskevien jokivesien mukana sekä myöhään kevättalvella sulamisvesien mukana. Sulamisvesiä voi tulla myös keskitalvella, jos esiintyy pitkiä lauhjoja jaksoja. Nämä happitäydennystä tuovat vedet ovat kylmiä ja ohjautuvat järven pintakerrokseen.

Happea kuluu talven aikana sekä vesimassassa että pohjasedimentissä. Biologinen hapenkulutus on luonteeltaan hengitystä, olipa se sitten kasvien pimeähengitystä (mikä talvella on hyvin vähäistä), eläinten - eläinplanktonin, kalojen ja pohjaeläinten - hengitystä tai eloperäistä ainesta hajottavien bakteereiden hengitystä. Kemiallista hapenkulutusta aiheutuu hapettomissa olosuhteissa pelkistyneiden yhdisteiden hapettuessa.

Järvien happitilanteessa on merkittäviä vuosien välisiä eroja. Syksyn sääolosuhteet säätelevät järvien ilmastumisen tehokkuutta ja talviaikaisen happitilanteen kehittymistä. Tuulinen syksy ja myöhäinen jäätyminen enteilevät hyvää happitilannetta. Järviveteen ehtii liueta runsaasti happea ja pitkään sekoittuessaan vesimassa viilenee niin, että happea kuluttavat toiminnot ovat talven aikana hitaita. Lisäksi valuntojen ja järvien pinnan korkeuksien vaihtelut selittävät osan vuosien välisistä eroista.

Myös järvien välillä on olennaisia eroja. Järvien happitilannetta säätelevät monet hydro-morfologiset tekijät, kuten järven syvyysuhteet ja viipymä. Syvissä järvissä happea varastoiva vesitilavuus on suuri ja happea riittää enemmän eliöstön happea kuluttaviin toimintoihin kuin muuten vastaavan kokoisessa, mutta matalammassa järvessä. Lisäksi syvissä järvissä pintakerroksessa tuotettu eloperäinen aines hajoaa suureksi osaksi jo ylemmissä vesikerroksissa eikä hajotus syvemällä enää kuluta happea kovin paljon. Matalassa järvessä isompi osa alusvedestä on kosketuksissa pohjasedimenttiin, mikä nopeuttaa happivajeen syntymistä, sillä sedimentin hapenkulutus on suurempaa kuin veden. Myös veden laatu vaikuttaa happitilanteeseen. Rehevät ja ruskeavetiset järvet ovat alttiita heikolle happitilanteelle, koska bakteerien aiheuttama hapenkulutus on sitä suurempaa mitä enemmän orgaanista ainesta syntyy järven perustuotannossa tai tulee järven ulkopuolelta, esimerkiksi jätevesien mukana tai turvemaalta humuksena. Bakteeritoiminta muodostaa merkittävimmän osuuden kokonaishapenkulutuksesta.

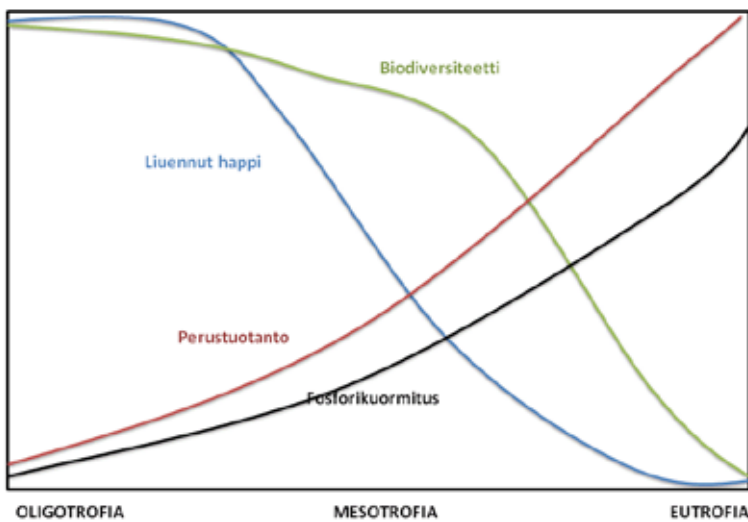
Järven happitilannetta arvioitaessa on otettava huomioon myös järven syvännepisteen muoto: pienialaiset syvänteet ilmastuvat heikommin kuin laaja-alaiset ja koska niiden vesitilavuus on pienempi, happi myös kuluu niissä nopeammin loppuun. Syvyysuuntaisten erojen lisäksi järvien happitilanteessa voi olla alueellisia eroja esimerkiksi järveen tulevien virtausten seurauksena.

Talviaikaista ja kesäaikaista happitilannetta säätelevät pääosin samat tekijät, mutta kesäaikana on lisäksi kerrostuneisuuden pysyvyydellä olennainen merkitys. Matalissa järvissä, jotka voivat tuulien vaikutuksesta sekoitua pohjaa myöten, happivarastot saattavat täydentyä monta kertaa kesän aikana. Syvissä järvissä puolestaan kerrostuneisuus on kesälläkin pysyvä. Näin ollen matalissa järvissä pohjanläheisen veden heikoimmat happitilanteet esiintyvät talvella ja syvissä järvissä kesällä. Kesällä alttius huonon happitilanteen muodostumiselle on suurempi korkeamman lämpötilan ja järven perustuotannossa syntyvän orgaanisen aineksen takia. Lämpimään veteen happea myös liukenee vähemmän kuin kylmään veteen (taulukko 1).

Taulukko 1. Esimerkkejä hapen kyllästysasteen arvoista liuenneen hapen pitoisuuksina eri lämpötiloissa (100 %:n kyllästysasteet standardin SFS-EN 25813:1993 mukaan)

Kyllästysaste	Happipitoisuus (mg/l) eri lämpötiloissa		
	4 °C	10 °C	20 °C
100 %	13,1	11,3	9,1
80%	10,5	9,0	7,3
60%	7,9	6,8	5,5
40%	5,2	4,5	3,6
20%	2,6	2,3	1,8

Pitkän aikavälin suuntaukset alusveden happitilanteessa antavat viitteitä järven rehevöitymiskehityksestä (kuva 1). Sääolosuhteet säätelevät vuosien välisiä eroja, mutta pidempiaikainen heikkenevä kehitys kertoo siitä, että hajotessaan happea kuluttavaa orgaanista ainetta on tullut lisää, joko järven ulkopuolelta tai järven omasta tuotannosta. Heikkenevä happitilanne on paitsi merkki järven tilan huononemisesta ja uhka järven eliöstölle, myös mahdollinen syy edelleen kiihtyvään rehevöitymiseen. Järven pohja ei nimittäin voi hapettomissa olosuhteissa pidättää sinne saostuneita ravinteita. Tätä ravinteiden purkautumista järven pohjasta kutsutaan sisäkuormitukseksi.



Kuva 1. Järven rehevöitymiskehitys Correllin (1998) mukaan.

Järvien hydromorfologiset ominaisuudet kuitenkin vaikuttavat siihen, miten herkkä rehevöitymisen mittari alusveden happitilanteen heikkeneminen on. Pienialaisissa syvänteissä hajotessaan happea kuluttavan aineksen lisääntyminen heikentää happitilannetta nopeasti, laaja-alaisissa syvänteissä paljon hitaammin.

Järvien happitilanteella on monia järvien ekologiseen tilaan liittyviä kytkeitä. Erilaisia happitilanteeseen perustuvia indeksejä onkin käytetty järvien tilan vertailussa. Esimerkiksi hapettomuustekijä (AF = anoxic factor) mittaa pohjanläheisen veden hapettomuuden kestoa ja laajuutta suhteessa järven pinta-alaan. AF-tekijää voidaan käyttää rehevyyden indikaattorina sekä esimerkiksi arvioitaessa sisäkuormitusta, jos tiedetään, millä nopeudella esimerkiksi fosforia vapautuu hapettomasta sedimentistä (Nürnberg 1995). Indikaattoria on käytetty denitrifikaation määrän arviointiin ja kunnostuksen vaikuttavuuden seurantaan. Myös kalaston lajimäärän on

todettu korreloituvan AF-tekijään. (Nürnberg 1995)

Happipitoisuuksille on asetettu raja-arvoja, jotta voitaisiin tunnistaa herkimmille eliöryhmille kriittiset olosuhteet (taulukko 2). Hapentarve riippuu paitsi lajista myös elinkierron vaiheesta. Vaikka happitilanne olisi riittävä tietyn lajin aikuisyksilöiden selviämiseen, niin lisääntyminen voi kuitenkin häiriintyä, jos happea ei ole riittävästi mädin ja poikasvaiheen kehitykselle.

Taulukko 2. Liuenneen hapen pitoisuudet suhteessa eliövaikutuksiin (USEPA 1986).

		raja-arvo (mg/l)		
		lohivedet	muut vedet	selkärangattomat (ei jaettu elinkierron vaiheisiin)
alkio- ja toukka-vaiheet	tuotanto ei heikenny	11	6,5	
	tuotanto heikentyy hieman	9	5,5	
	tuotanto heikentyy kohtalaisesti	8	5	
	tuotanto heikentyy vakavasti	7	4,5	
	raja-arvo akuutin kuolevuuden estämiseksi	6	4	
muut elinkierron vaiheet	tuotanto ei heikenny	8	6	8
	tuotanto heikentyy hieman	6	5	
	tuotanto heikentyy kohtalaisesti	5	4	5
	tuotanto heikentyy vakavasti	4	3,5	
	raja-arvo akuutin kuolevuuden estämiseksi	3	3	4

Kolin (1984) mukaan sisävesikalat voidaan jakaa hapentarpeensa mukaan seuraaviin ryhmiin:

-Taimen, lohi, siika, muikku, mutu, kivennuoliainen ja kivisimppu: normaali hapentarve 10-16 mg/l, alkavat kärsiä alle 7 mg/l:n pitoisuudessa.

-Harjus, turpa, törö, made, ahven ja kuha: vaativat happea yleensä vähintään 7-10 mg/l.

-Särki, kiiski ja hauki: menestyvät hyvin yli 5 mg/l:n happipitoisuudessa, alin raja 1,5-2,2 mg/l.

-Lahna, karppi, suutari, pasuri ja ruutana: kestävät hyvin pieniä happipitoisuuksia, jopa 1,2-0,6 mg/l.

Kirjallisuudesta on kerätty myös seuraavanlaisia happirajoja eri kalalajeille (Kettunen ym 2008). Kysymyksessä ovat sellaiset hapen vähimmäispitoisuudet 10-14 °C:een lämpötilassa, joissa aikuiset kalat voivat selviytyä ainakin lyhyehköjä aikoja.

kalalaji	happipitoisuusraja-arvo, mg/l
taimen	4,0
siika	3,5
muikku	3,5
hauki	2,2
kuha	2,0
ahven ja särki	1,2-1,5
lahna	1,2-1,5
ruutana	0,6

Veden lämpötila vaikuttaa hapentarpeeseen. Lämpötilan nousun myötä hapentarve kasvaa. Esimerkiksi ravun on havaittu tarvitsevan lämpimänä vuodenaikana lähes 5 mg/l:n happipitoisuuksia, mutta viileässä vedessä (11 °C) rapu sietää ainakin lyhytaikaisesti jopa 3,2 mg/l:n happipitoisuuksia (Westman ja Nylund 1985). Minimihappipitoisuudet tulee siis suhteuttaa vuodenaikaan ja lämpötilaan. Talvella kalat alkavat hakeutua avannoil-

le vasta happipitoisuuden laskettua 1-1,5 mg/l:n tienoille ja laajamittaisia kalakuolemia syntyy vasta alle 0,5-1 mg/l:n arvoilla (Ilmavirta ym 1990).

Hapen raja-arvoissa on yleensä otettu huomioon kalojen elinympäristövaatimukset. Yleisempiä järviekosysteemin toimintaa koskevia raja-arvoja on niukasti. On kuitenkin esimerkiksi todettu, että happipitoisuuden pienentyessä alle 4 mg/l:n alkaa systeemin hajotuskyky alentua jyrkästi ja happivelka kasvaa (Ilmavirta ym 1990).

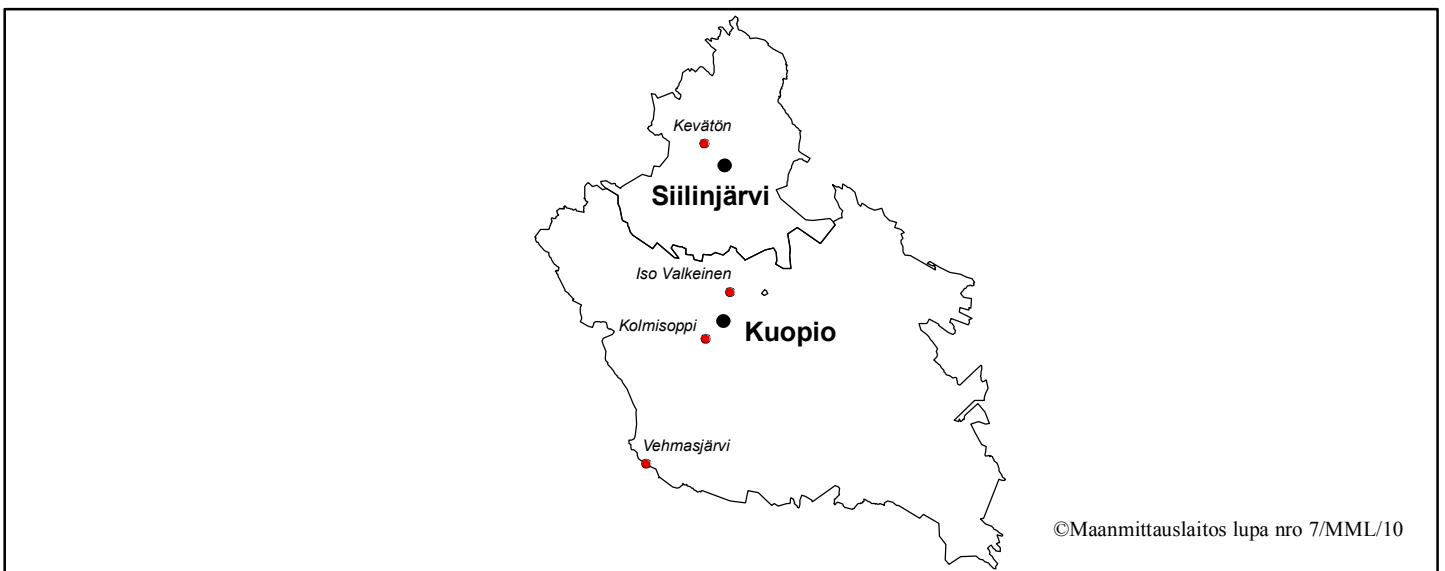
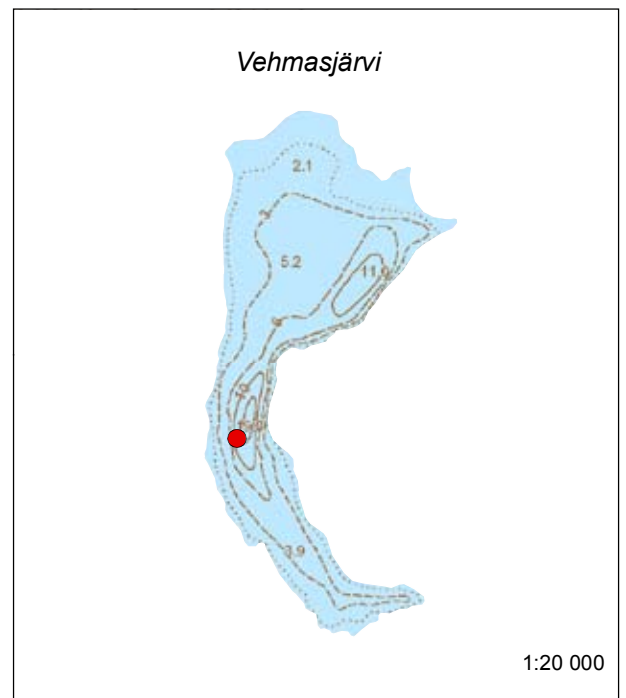
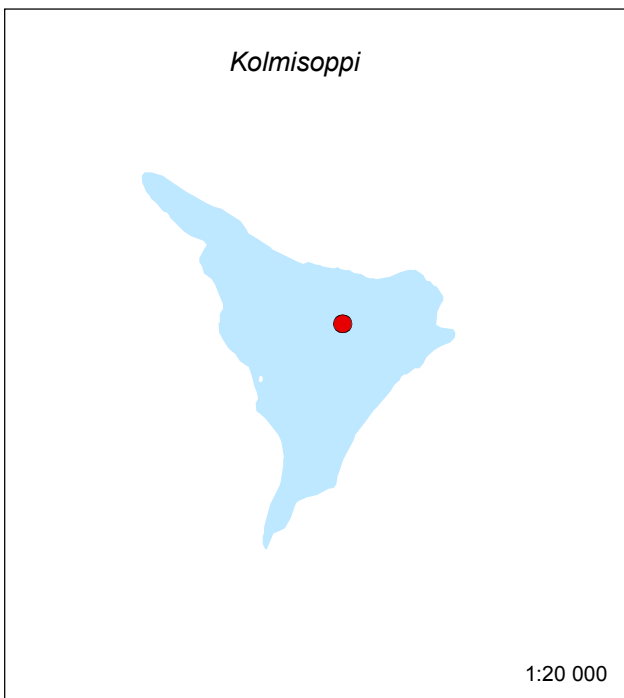
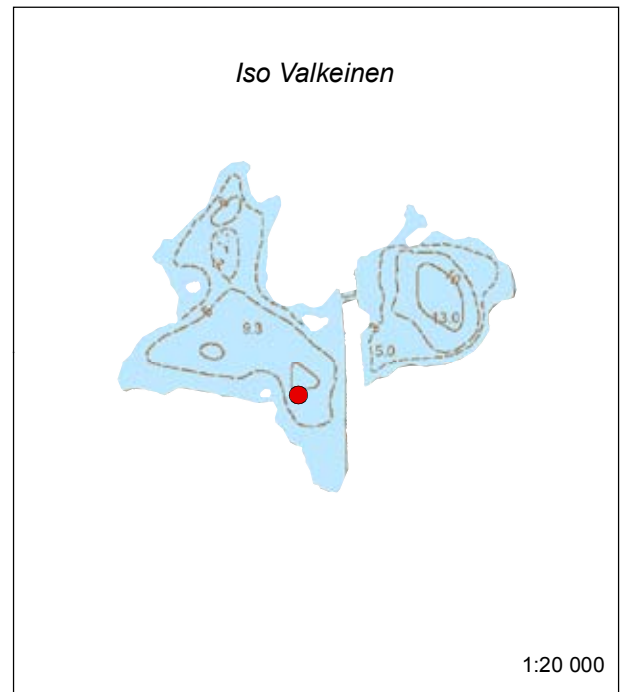
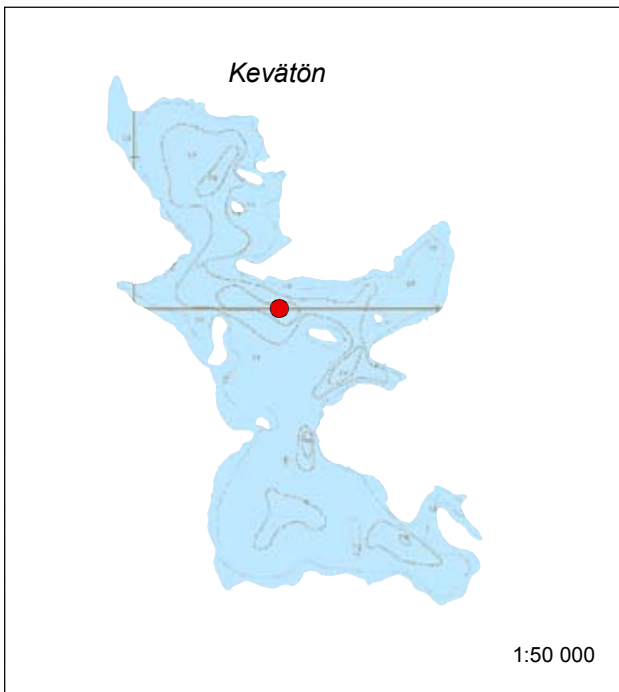
Seuraavassa tarkastelussa on erityisesti kiinnitetty huomiota 4-5 mg/l:n happipitoisuuksiin, koska tätä korkeampia voidaan pitää sekä useimpien eliöiden että ekosysteemin toiminnan kannalta hyvinä.

2 Seurannan kohteet ja ohjelma

Seurantajärvet valittiin kustannussyistä läheltä Pohjois-Savon ympäristökeskuksen toimipaikkaa Kuopiossa (kuva 2, taulukko 3). Siilinjärven Kevättömässä talviaikaiset happiongelmat olivat jo tiedossa. Järvi on matala, rehevöitynyt ja melko kirkasvetinen. Kirkasvetisessä ja karussa Iso-Valkeisessa suurin syvyys on samaa luokkaa kuin Kevättömässä. Kolmisoppi on vedenlaadultaan hyvin samankaltainen kuin Iso-Valkeinen, mutta selvästi syvempi. Kaikki kolme järveä ovat tyypiltään runsaskalkkisia järviä. Vehmasjärvi puolestaan on runsashumuksista järvityyppiä. Se on suurimmalta syvyydeltään samaa luokkaa kuin Kolmisoppi ja pinta-alaltaan vastaa sekä Kolmisoppea että Iso-Valkeista. Kevätön on kertaluokkaa suurempi kuin muut seurantajärvet. Kaikki seurantajärvet ovat käytännössä latvajärviä, vain Kolmisopen yläpuolella on yksi pieni lampi.



Kuva 2. Talviaikaista vedenlaatunäytteenottoa.



Kuva 3. Seurantajärvien sijainti.

Taulukko 3. Seurantajärvien ominaisuuksia. Vedenlaatuarvot ovat keskiarvoja vuosilta 1997-2008.

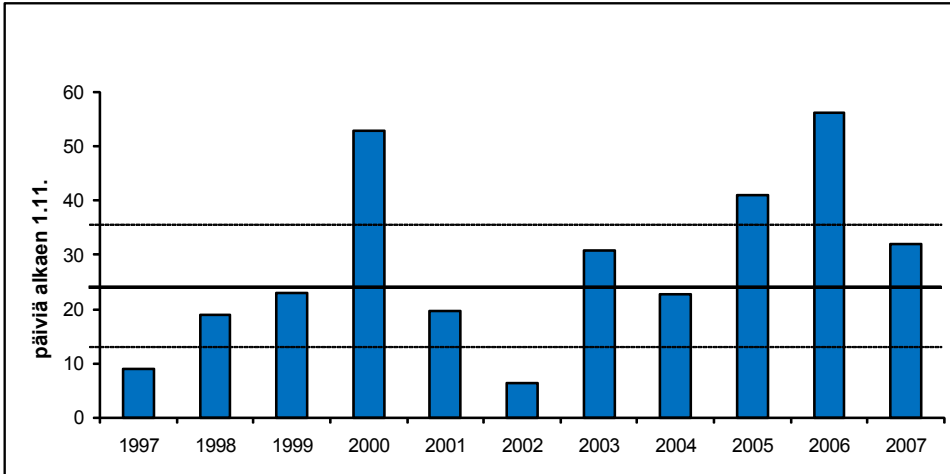
	Iso-Valkeinen	Kevätön	Kolmisoppi	Vehmasjärvi
Havaintopaikka	Iso-Valkeinen 658	Kevätön 14	Kolmisoppi 647	Vehmasjärvi 100
Vesistöalue	04.272	04.652	04.272	14.725
Kunta	Kuopio	Siilinjärvi	Kuopio	Karttula ja Kuopio
Pinta-ala, ha	37,2	369,6	27,1	40,4
Suurin syvyys, m	12,8	10,1	21	18,5
Keskisyvyys, m		2,52	6,28	3,98
Väri-luku	18	33	22	189
Kokonaisfosfori	13,1	33	10,5	26,4
Kokonaistyyppi	477	938	472	631
A-klorofylli	5,7	29,7	3,1	13,8

Seuranta alkoi syksyllä 1997 ja Vehmasjärven osalta vuotta myöhemmin. Kunkin jääpeitteisen kauden ensimmäiset näytteet otettiin mahdollisimman pian jäätymisen jälkeen. Mikäli järvet olivat jäätyneet jo marraskuussa, otettiin ensimmäisen havaintokerran jälkeen näytteitä seuraavasti: 7.-11.12., 9.-13.1., 7.-11.2., 7.-11.3., 23.-27.3. sekä huhtikuussa 1-2 kertaa jääolosuhteista riippuen. Näytteet otettiin alle 15 metrin syvyisissä järvissä (Kevätön ja Iso-Valkeinen) metrin välein ja syvemmissä (Kolmisoppi ja Vehmasjärvi) kahden metrin välein.

Jokaisella havaintokerralla kaikista näytteistä mitattiin lämpötila sekä määritettiin happipitoisuudet. Tämän lisäksi talvikauden ensimmäisellä havaintokerralla ja maaliskuun jälkimmäisellä havaintokerralla määritettiin lisäksi sameus, kiintoaine, sähkönjohtokyky, alkaliniteetti, pH, väri, kemiallinen hapenkulutus, kokonaistyyppi, nitriitti- ja nitraattitypen summa, ammoniumtyppi, kokonaisfosfori, fosfaattifosfori ja rauta kolmelta näytteenottosyvyydeltä: yhden metrin syvyydeltä, vesipatsaan puolivälistä ja metrin etäisyydellä pohjasta. Määritykset tehtiin suomalaisin standardimenetelmin.

3 Seurantavuosien sääolosuhteet

Happiseurannan yksitoista talvea olivat olosuhteiltaan varsin erilaisia. Pohjois-Savon suurilla järvillä jäätymisajankohta vaihteli näinä vuosina keskimäärin välillä 6.11. – 26.12. (kuva 4). Järvet jäätyivät selvästi keskimääräistä aikaisemmin vuosina 1997 ja 2002. Keskimääräistä myöhemmin järvet jäätyivät vuosina 2000, 2005 ja 2006.



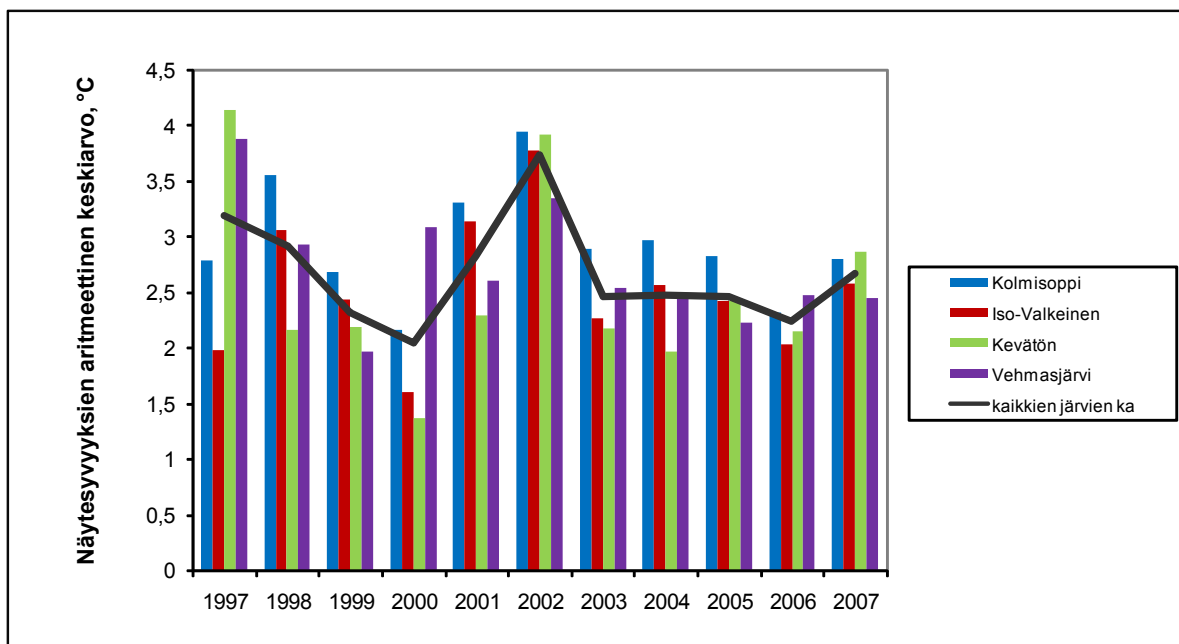
Kuva 4 . Keskimääräinen jäätymisajankohta viiden pohjoissavolaisen järven (Hankavesi, Iisvesi, Kallavesi, Pielavesi, Porovesi) keskiarvona vuosina 1997-2007. Yhtenäinen viiva kuvaa aineiston keskiarvoa ja katkoviivat keskihajontaa.

Pienet järvet jäätyvät pääsääntöisesti aikaisemmin, mutta happiseurantajärvissä ei seurattu varsinaista jäätymisajankohtaa. Näytteenottoon on kuitenkin pyritty mahdollisimman pian järvien jäädyttyä, joten ensimmäinen havaintoajankohta (taulukko 4) antaa kuvan jäätymisajankohdasta. Syksyllä 2002 näytteenottoon päästiin ennätysaikaisin, jo 5.11. Myös vuosina 1998, 2001 ja 2004 ensimmäiset näytteet saatiin marraskuun puolella. Vuonna 2000 näytteenotto siirtyi vuodenvaihteeseen. Myöhäisin ensimmäinen näytteenotto oli talvikaudella 2006-2007: tammikuun 17. päivä. Myös talvikausien 2005-2006 ja 2007-2008 ensimmäiset näytteenotot siirtyivät tammikuulle.

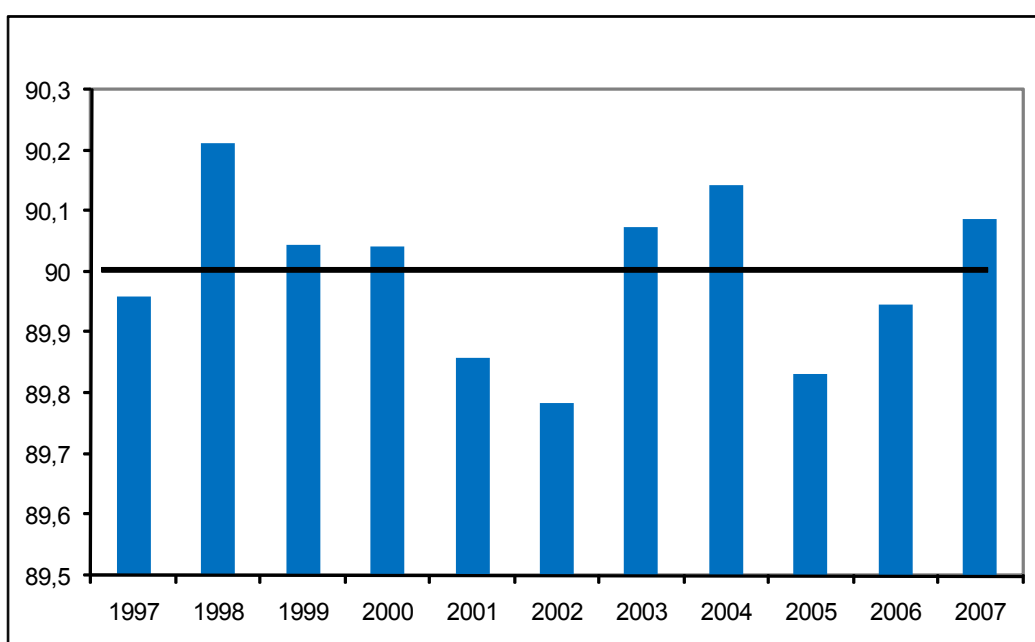
Taulukko 4. Ensimmäisen havaintokerran ajoittuminen seurantavuosina.

Vuosi	Ensimmäinen havaintokerta				Jäänpaksuus ensimmäisellä havaintokerralla			
	Iso-Valkeinen	Kevätön	Kolmisoppi	Vehmasjärvi	Iso-Valkeinen	Kevätön	Kolmisoppi	Vehmasjärvi
1997-1998	10.12.1997	8.12.1997	9.12.1997	10.12.1997	0,18	0,25	0,18	0,2
1998-1999	17.11.1998	17.11.1998	17.11.1998	8.12.1998	0,14	0,17	0,14	0,2
1999-2000	14.12.1999	15.12.1999	14.12.1999	15.12.1999	0,13	0,15	0,13	0,21
2000-2001	28.12.2000	27.12.2000	25.1.2001	28.12.2000	0,07	0,06	0,2	0,06
2001-2002	19.11.2001	19.11.2001	20.11.2001	20.11.2001	0,12	0,12	0,12	0,08
2002-2003	5.11.2002	5.11.2002	5.11.2002	5.11.2002	0,14	0,14	0,14	0,13
2003-2004	15.12.2003	15.12.2003	16.12.2003	15.12.2003	0,14	0,15	0,17	0,16
2004-2005	29.11.2004	29.11.2004	23.11.2004	23.11.2004	0,15	0,15	0,06	0,09
2005-2006	12.1.2006	12.1.2006	12.1.2006	12.1.2006	0,3	0,3	0,26	0,18
2006-2007	17.1.2007	17.1.2007	17.1.2007	17.1.2007	0,2	0,19	0,22	0,18
2007-2008	3.1.2008	3.1.2008	3.1.2008	3.1.2008	0,18	0,18	0,17	0,14

Jäätymisajankohdan lisäksi syystäyskierron tehokkuus vaikuttaa siihen, minkälaiset edellytykset järvissä on hyvän happitilanteen kehittymiselle. Toisistaan riippumattomia nämä tekijät eivät tietenkään ole, sillä jos järvet jäätyvät aikaisin, syystäyskierto jää puutteelliseksi. Toisaalta on mahdollista että syksy on pitkään lämmin ja tyyni ja tämän jälkeen säät kylmenevät nopeasti. Silloin jäätymisajankohta ei yksin kerro ilmastumisen astetta. Syystäyskierron tehokkuuden mittarina voidaan käyttää vesimassan lämpötilaa. Syksyllä 2000 järvet ehtivät ilmastua pitkään ja järvien jäädyttyä vesipatsaan keskimääräinen lämpötila oli seurantapaikoilla vain 2 astetta, matalimmissa seurantajärvissä, Kevättömässä ja Iso-Valkeisessa, vain noin puolitoista astetta (kuva 5). Vastavasti syksyllä 2002 vedet jäätivät hyvin lämpiminä, keskimäärin 3,7- asteisina. Useana vuonna järvien väliset erot lämpötiloissa olivat kuitenkin suuret.



Kuva 5. Vesimassan lämpötila (näytesyvyyksien aritmeettinen keskiarvo) pian jäätymisen jälkeen seurantavuosina.



Kuva 6. Vedenkorkeus Kevättömässä happiseurantavuosina ja vaakaviivana keskiarvo vuodelta 1962-2008. Kaikki havainnot ovat esimerkinomaisesti alkutalven päivämäärältä 1.12.

Myös järven tilavuus vaikuttaa happitilanteeseen, sillä suurempaan vesimassaan happea voi varastoitua enemmän kuin pienempään. Keskimääräistä suurempi vedenkorkeus oli talvikaudella 1998-1999 ja 2004-2005 (kuva 6). Talvella 2002-2003 vedet olivat hyvin alhaalla. Vedenkorkeus oli matala myös talvella 2001-2002 ja 2005-2006.

4 Tulokset

4.1. Happitilanteen kehitys eri vuosina

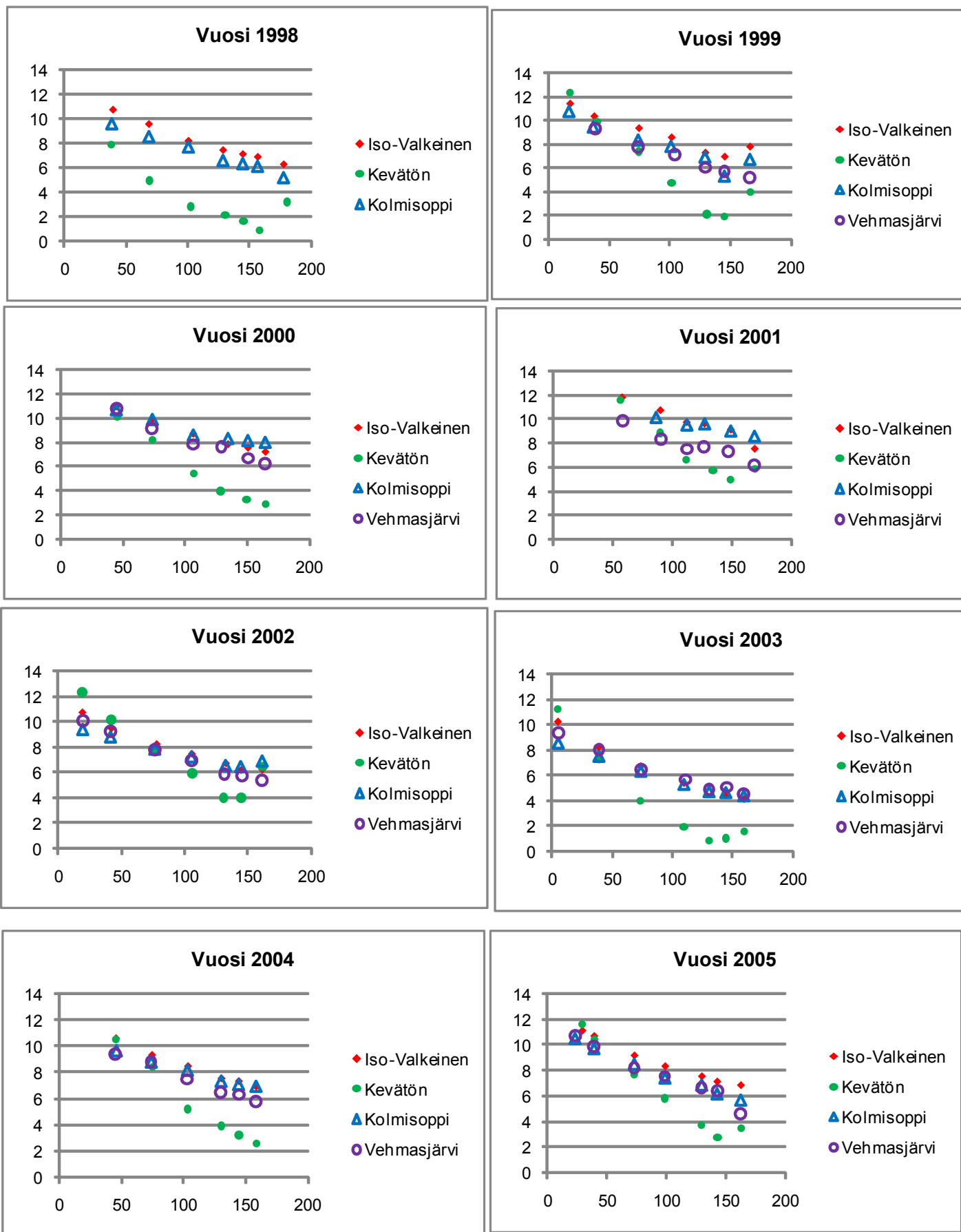
Seurantajärvien happitilanteen kehitystä eri vuosina voidaan kuvata syvänpisteeltä laskettujen tilavuuspainotettujen happipitoisuuskeskiarvojen avulla (kuva 7). Tilavuuspainotetut keskiarvot laskettiin syvänpisteeltä kartiomallilla, joten järvien todellista morfologiaa ei ole otettu huomioon. Kaikkein yhtenäisin happitilanteen kehitys oli vuonna 2002, tällöin ei edes Kevätön poikennut olennaisesti muista järvistä eikä tilavuuspainotettu happipitoisuuskeskiarvo laskenut alle 4 mg/l:n. Myös kevättalvella 2001 ja 2007 tilavuuspainotettu happipitoisuus pysyi Kevättömässäkin yli 4 mg/l:n, mutta se oli kuitenkin selvästi huonompi kuin muissa järvissä.

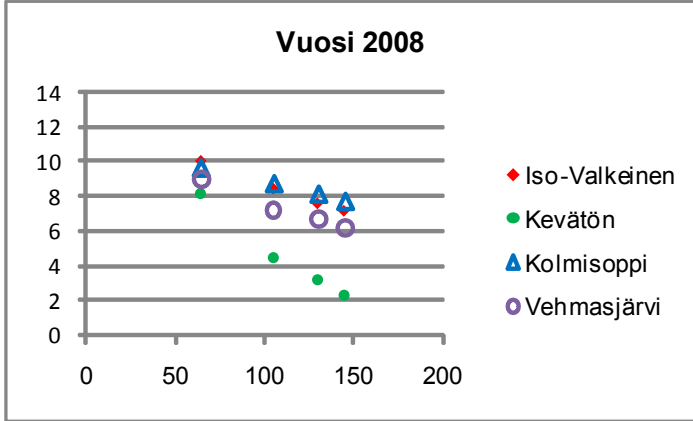
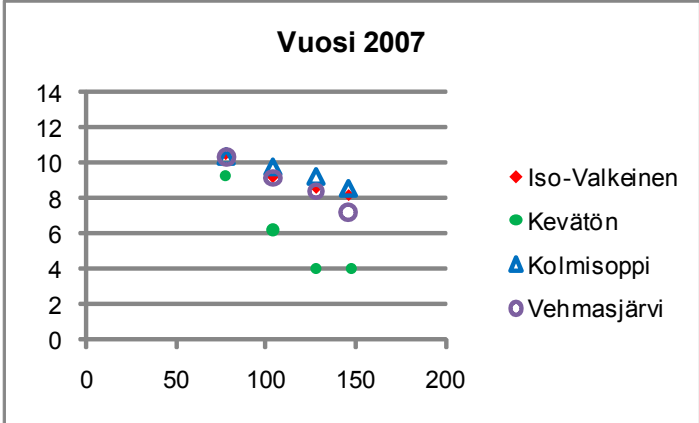
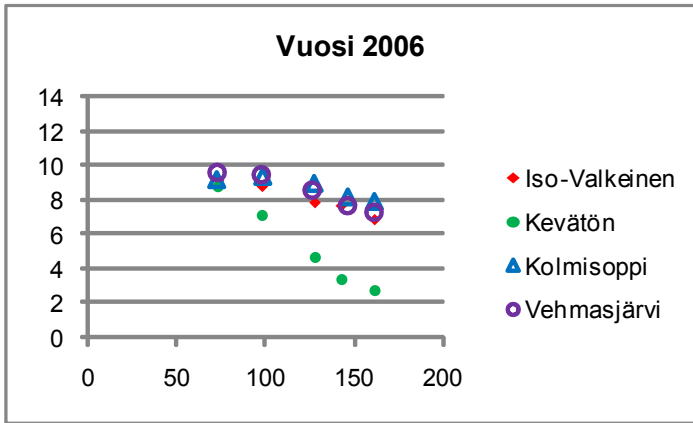
Muissa seurantajärvissä tilavuuspainotetun happipitoisuuden kehitys oli useina vuosina keskenään hyvin samanlainen. Tällaisia vuosia olivat erityisesti jo mainitut 2002 ja 2007 sekä myös 2003, 2004 ja 2006. Iso-Valkeisessa oli muita järviä korkeammat tilavuuspainotetut happipitoisuudet vuosina 1998, 1999 ja 2005. Vehmasjärven syvänpisteen tilavuuspainotettu happipitoisuuskeskiarvo vastasi yleensä Iso-Valkeisen ja Kolmisopen tilannetta, mutta oli sitä huonompi erityisesti vuosina 2001 ja 2008.

Happipitoisuus ei talven aikana alene yhtäjaksoisesti vaan havaintosarjoissa oli havaittavissa tilanteita, jolloin happipitoisuus nousi tai säilyi ennallaan. Esimerkiksi vuonna 1999 muissa seurantajärvissä paitsi Vehmasjärvessä happipitoisuus tasaantui tai nousi hieman noin viiden metrin syvyyteen saakka maaliskuun lopun ja huhtikuun puolivälin välisenä aikana. Vuonna 2001 tällaista tapahtui Iso-Valkeisen, Kolmisopen ja Vehmasjärven päällysvedessä sekä kahden viimeksi mainitun kohdalla myös joissakin alemmissa vesisyvyyksissä helmi-maaliskuun vaihteessa. Seuraavana vuonna happipitoisuuden tasaantuminen tapahtui noin kuukautta myöhemmin, tällä kertaa myös Kevättömässä. Vuonna 2005 happitilanteen kohenemista tapahtui pääsääntöisesti maaliskuun lopun tienoilla, mutta Vehmasjärven pintaveteen tuli happitäydennystä jo tammikuun loppupuolella tai helmikuun alussa. Talvella 2005-2006 järvet jäättyivät myöhään ja happitilanne koheni vielä jääpeitekauden alussa (12.1. ja 7.2. näytteenottojen välillä) muissa järvissä paitsi Kevättömässä. Vehmasjärvessä happipitoisuus nousi vain metrin syvyydessä, Kolmisopessa happitilanne täydentyi 12 metrin syvyydelle saakka (6 metrin syvyyttä lukuunottamatta) ja Iso-Valkeisessa 1m sekä 3-4 metrin syvyyksissä. Vuonna 2007 happipitoisuus koheni Kevättömän useimmissa vesisyvyyksissä maaliskuun puolivälin tienoilla. Myös kevättalvella 2008 oli havaittavissa happitilanteen heikkenemisen pysähtymistä tai happitilanteen paranemista kaikissa tutkimusjärvissä ainakin yhdessä syvyydessä. Kevättömässä tätä tapahtui vähemmässä määrin kuin muissa tutkimusjärvissä, esimerkiksi vuosina 2004 ja 2006 tätä ei todettu missään syvyydessä.

On mahdollista, että havainnot talviaikaisen happitilanteen täydennyksestä johtuvat osittain mittausepävarmuudesta ja tämän lisäksi tuloksissa on myös näytteenotosta aiheutunutta vaihtelua. Havainnot olivat kuitenkin pääosin aika yhdensuuntaisia eri järvissä, joten myös todellista happitäydennystä on tapahtunut. Jääpeitteisen kauden happitäydennykset voivat aiheutua kolmesta syystä: Sulamisjaksojen aikana järviin voi virrata hapekasta vettä. Myös perustuotanto voi tuottaa happea talvellakin etenkin silloin kun jää on teräsjäätä ja sen päällä ei ole lunta. Tästä johtuen järvissä voi olla suuriakin horisontaalisia eroja pintaveden happipitoisuudessa, jos tuulien myötä lumipeite on hyvin laikuttainen (Wetzel 2001). Kolmas happitäydennysmuoto ei merkitse järven happivarannon kasvua, vaan paikallista happitilanteen paranemista alusvedessä. Tätä voi tapahtua kun jään läpi tunkeutuva valo lämmittää litoraalialueiden vettä, jolloin se lämpimämpänä vajoaa pohjalle ja kulkeutuu pohjanmyötäisesti syvemmille alueille (Wetzel 2001). Kulkeutuessaan sen happivarasto tosin samalla pienenee.

Happiseurannan aikana tulokset esitettiin verkkopalvelussa syvyyssuuntaisina lämpötila- ja happipitoisuusjakaumina talven eri havaintoajankohdilta. Esimerkki verkkopalvelusivusta on liitteenä 1.

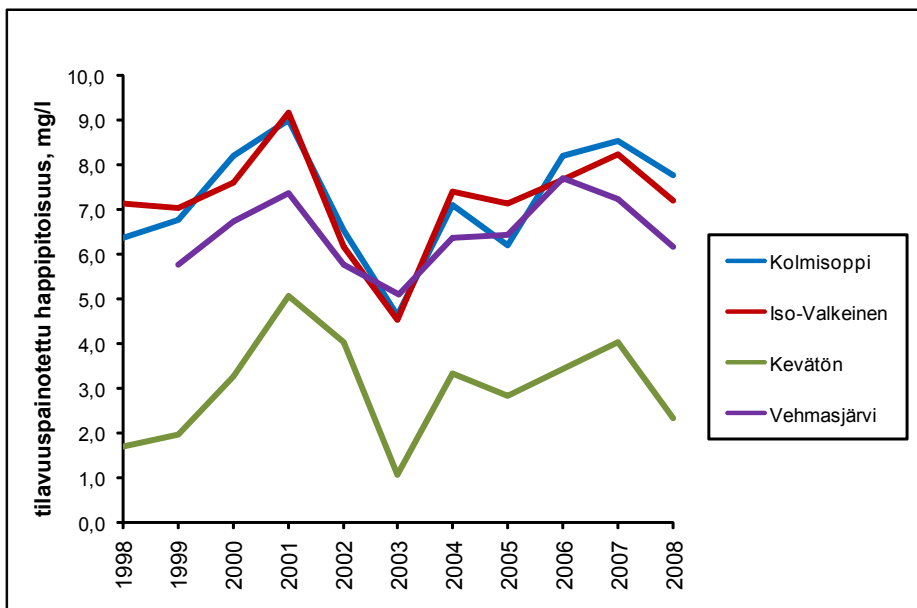




Kuva 7. Syvännepisteeltä lasketun tilavuuspainotetun happitilanteen kehitys. Pystyakselilla happipitoisuus (mg/l) ja vaakakselilla päivien lukumäärä alkaen 1.11.

4.2 Happitilanne ja lämpötila eri vuosina maaliskuun lopussa

Tarkasteltaessa koko vesipatsaan tilavuuspainotettuja happipitoisuuskeskiarvoja maaliskuun lopun havaintokerroilta (kuva 8) kaikkien järvien tilanne osoittautui heikoimmaksi vuonna 2003. Toiseksi huonoin happitilanne puolestaan osui eri vuosiin: Iso-Valkeisessa vuoteen 2002, Kevättömässä vuoteen 1998, Kolmisopessa vuoteen 2005 ja Vehmasjärvessä vuosiin 1999 ja 2002 (vuonna 1998 ei seuranta vielä ollut). Happitilanteeltaan parhaina vuosina erottuivat ennen kaikkea vuodet 2001 ja 2007, tosin Vehmasjärvessä oli paras happitilanne vuonna 2006.

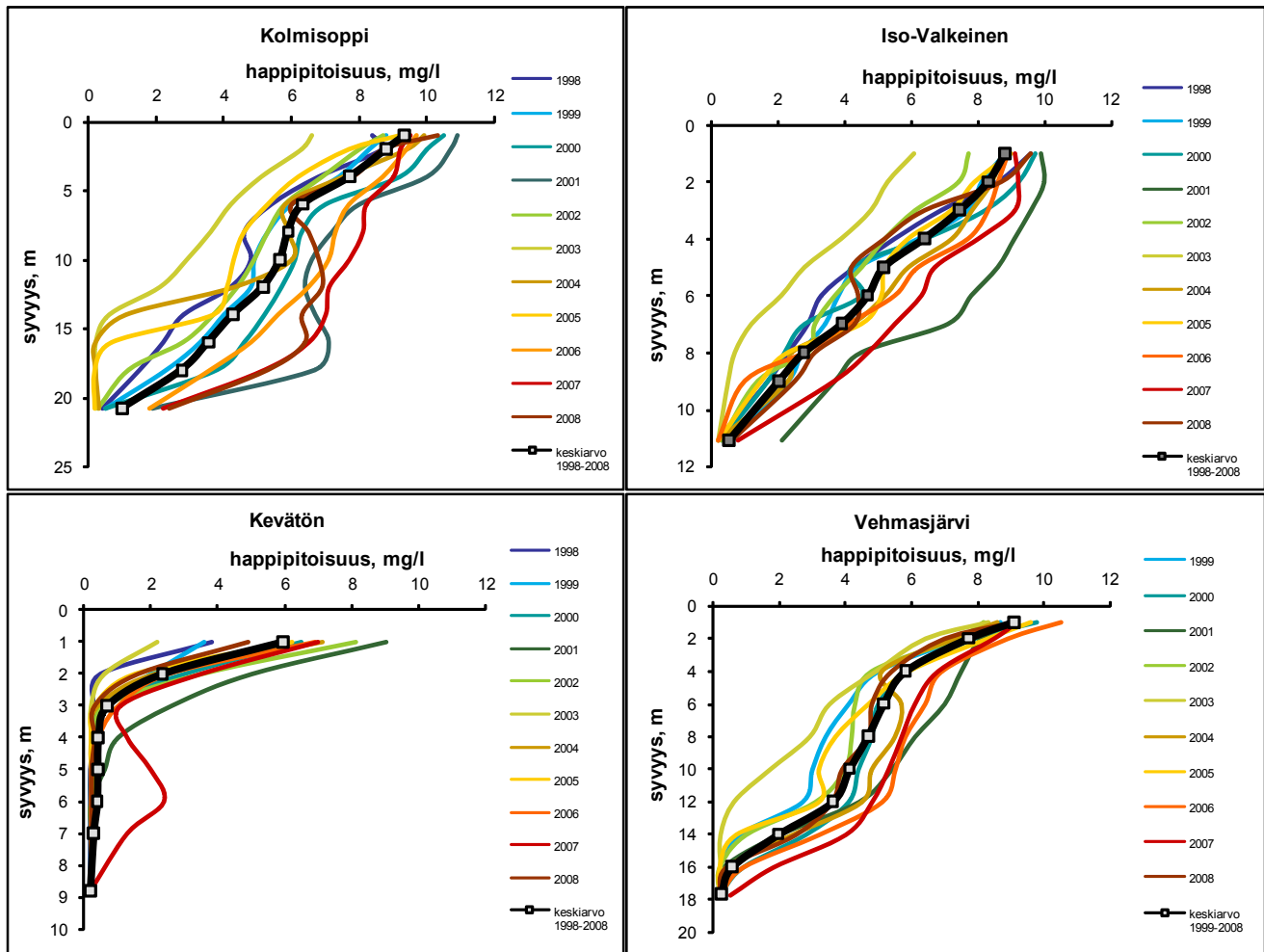


Kuva 8. Tilavuuspainotettu happipitoisuuskeskiarvo eri järvissä maaliskuun lopussa.

Kevättömän päällysvedessä maaliskuun lopun happitilanne on vaihdellut paljon enemmän kuin muissa seurantajärvissä, mutta syvemmällä happitilanne on ollut lähes aina niin huono, että vuosien väliset erot ovat jääneet pieniksi (kuva 9). Kolmisopessa taas seurantavuosien välinen ero on ollut suuri varsinkin alusvedessä.

Happipitoisuutta 5 mg/l voidaan pitää vesieliöstön kannalta riittävänä. Näin hyvin hapettunutta vettä oli Iso-Valkeisessa maaliskuun lopussa keskimäärin noin 5,5 metrin syvyyteen asti eli noin vesipatsaan puoliväliin syvännepisteellä (kuva 9). Huonoimmassa happitilanteessa vuonna 2003 tämänlaatuista vettä oli vain noin 2,5 metrin syvyydelle asti ja parhaimmillaan, vuosina 2001 ja 2007, lähes kahdeksan metrin syvyydelle asti. Iso-Valkeisessa hapettomuutta on esiintynyt korkeintaan pohjanläheisessä vesikerroksessa (11,1m). Hapettomuutta todettiin maaliskuun lopussa vuosina 1998, 2003, 2004, 2005 ja 2006.

Kevättömässä hyväksi luokiteltavaa 5 mg/l:n happipitoisuutta ei kaikkina vuosina ole maaliskuun lopussa mitattu edes pintavedestä (yhden metrin syvyydestä). Tällaisia olivat vuodet 1998, 1999, 2003 ja 2008. Keskimäärin 5 mg/l:n happipitoisuus on ulottunut maaliskuun lopussa reilun metrin syvyydelle asti, eli noin kymmenesosaan vesipatsaasta syvännepisteellä, ja parhaimmillaan, vuonna 2001, kahden metrin syvyyteen. Hapettomuus alkoi useimpina vuosina noin neljän metrin syvyydeltä, mutta vuonna 2001 vasta kuuden metrin syvyydeltä ja vuonna 2007 vain pohjanläheinen vesi (8,8 m) oli hapetonta maaliskuun lopussa.



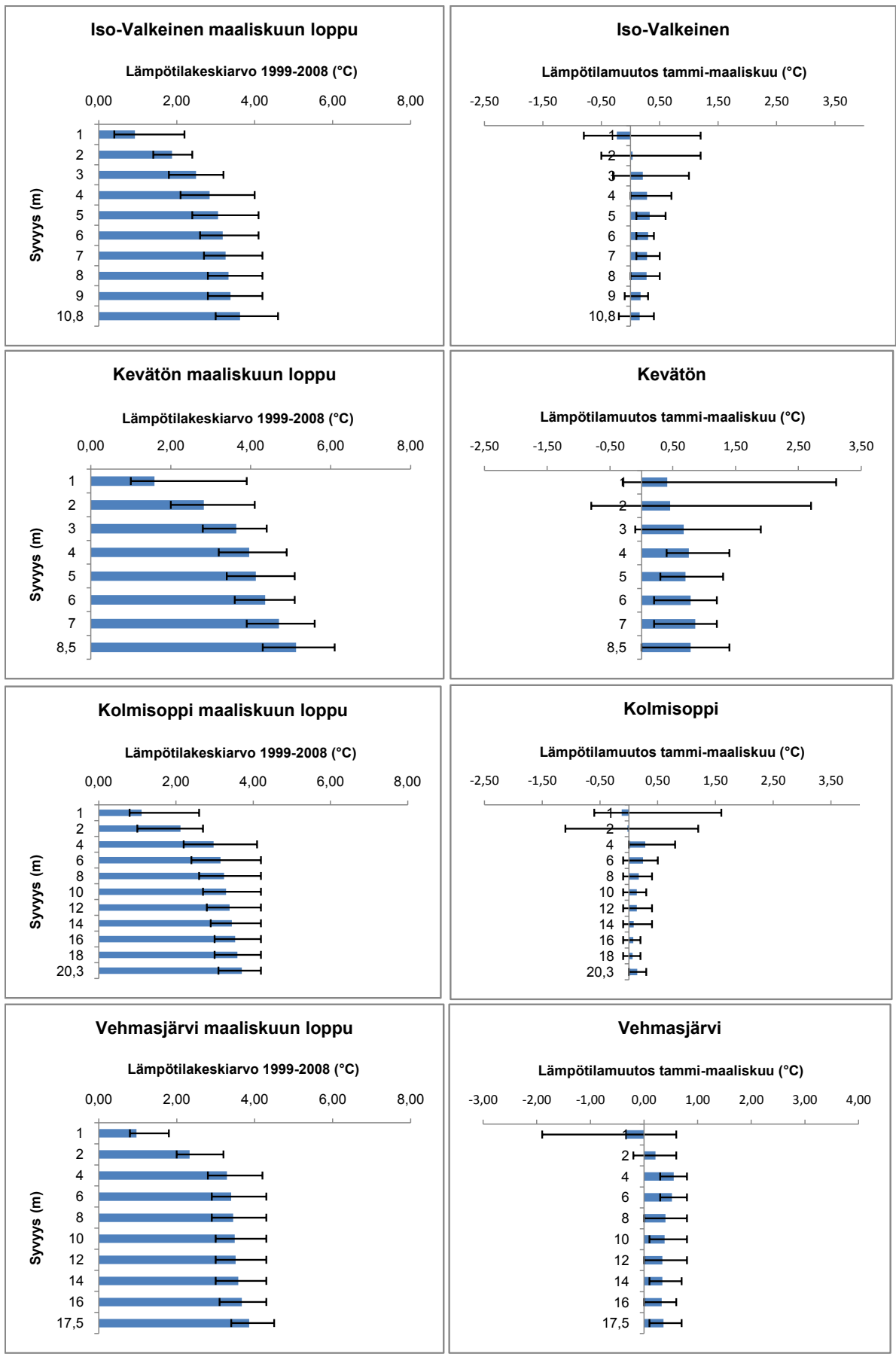
Kuva 9. Happipitoisuuden syvyysuuntainen jakauma seurantajärvissä eri vuosina maaliskuun lopussa.

Kolmisopessa yli 5 mg/l:n happipitoisuus on ulottunut maaliskuun lopussa keskimäärin 12 metrin syvyyteen eli yli vesipatsaan puolivälin syvännepisteellä. Vuonna 2003 vesi oli säilynyt näin hyvin hapettuneena vain noin neljän metrin syvyydelle asti. Toisaalta taas vuosina 2001, 2007 ja 2008 yli 5 mg/l:n happipitoisuutta esiintyi ainakin 18 metrin syvyydelle saakka. Kolmisopessa hapettomuutta esiintyi yleensä vain pohjanläheisessä vesisyvytydessä (20,8 m), mutta vuosina 2003, 2004 ja 2005 hapettomuutta oli noin 16 metrin syvyydeltä pohjaan.

Vehmasjärvessä hyväksi luokiteltavaa 5 mg/l:n happipitoisuutta on ollut keskimäärin seitsemän metrin syvyydelle saakka eli noin kolmannekseen vesipatsaasta syvännepisteellä. Vuosina 1999, 2002 ja 2003 kyseinen happipitoisuus ulottui vain neljän metrin syvyyteen ja parhaimpana vuotena (2006) yli 12 metrin syvyyteen. Hapettomuutta oli yleensä vain pohjanläheisessä vesisyvytydessä (17,7 m) tai 16 metrin syvyydestä pohjaan. Vuonna 2003 hapettomuus alkoi 14 metrin syvyydestä.

Happiseurantajärvisissä veden lämpötila oli maaliskuun lopun havaintokertoilla yhden metrin syvytydessä keskimäärin noin asteen verran ja alimassa vesisyvytydessä keskimäärin noin 3,6-3,9 °C (kuva 10). Kevättömässä vesi oli lämpimämpää: pinnassa keskimäärin 1,6 °C ja pohjan lähellä keskimäärin 5,1 °C. Vuosien välinen hajonta oli yleensä suurimmillaan pintavedessä. Lämpimintä vesi oli kevättalvella 2007, jolloin jään päällä ei ollut lainkaan lunta ja auringonsäteily pääsi näin lämmittämään päällysvettä. Lämpötilamaksimit olivat tällöin noin kahdesta asteesta Kevättömän lähes neljään asteeseen.

Tammikuun havaintokerran ja maaliskuun lopun havaintokerran välillä vesi keskimäärin lämpenee, selvimmin Kevättömässä ja vähiten Kolmisopessa. Päällysvesikerros taas keskimäärin viilenee muissa seurantajärvisissä paitsi Kevättömässä. Lämpötilamuutoksen vuosien välinen vaihtelu on suurin Kevättömässä: päällysvedessä jopa noin 3,5 astetta. Myös muissa seurantajärvisissä lämpötilamuutoksen vaihteluväli on suurimmillaan päällysvedessä, noin 2-2,5 °C.

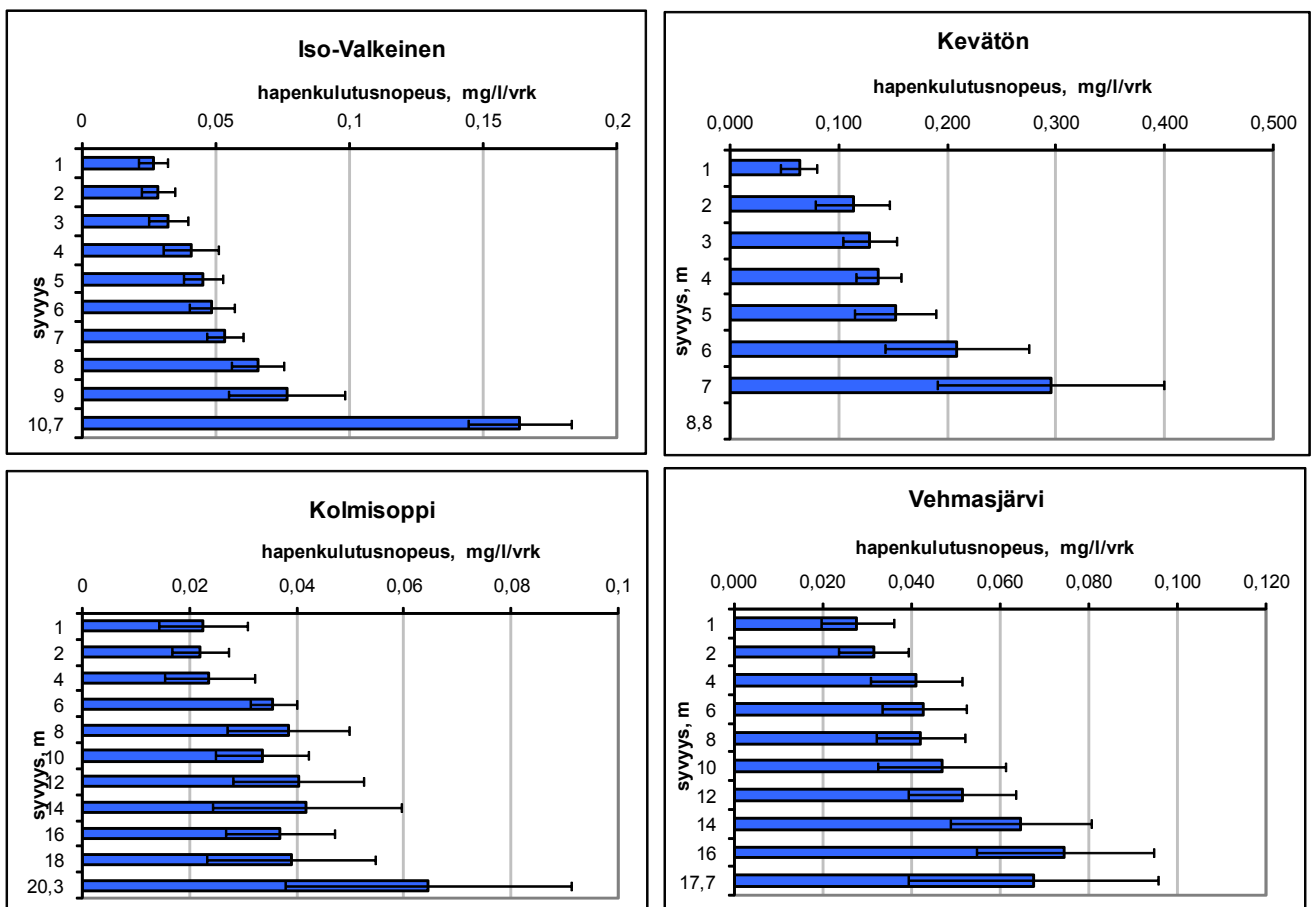


Kuva 10. Keskimääräinen lämpötila eri järvissä maaliskuun lopussa (vasen sarake) ja muutokset tammikuun tilanteesta (oikea sarake). Hajontapalkit kuvaavat havaintosarjan minimien ja maksimien välistä eroa.

4.3 Hapenkulutusnopeuden vaihtelu eri järvien ja eri vuosien välillä

Hapenkulutusnopeus laskettiin syvyyksittäin yksittäisten havaintoajankohtien välille vuosittaisen seurannan alusta siihen asti kun happipitoisuus alkoi nousta, oli sama kuin edellisen havaintokerran tulos tai laski alle 3 mg/l:n. Mikäli havaintosarjojen keskellä oli yksittäinen happipitoisuuskasvu, tämä tulos poistettiin tarkastelusta. Tällaisia tuloksia oli kolme kappaletta. Havaintokertojen rajaamisella haluttiin sulkea pois ne olosuhteet, jolloin happea kuluttaville toiminnoille ei enää ollut hyviä edellytyksiä tai hapenkulutusnopeutta ei voinut happipitoisuuden muutoksina arvioida happitäydennysten vuoksi.

Hapenkulutusnopeus oli samaa luokkaa Kolmisopen ja Iso-Valkeisen päällysvedessä: se oli noin 3-4 metrin syvyydelle saakka keskimäärin 0,02-0,03 mg/l/vrk (kuva 11). Kolmisopessa hapenkulutusnopeus oli syvemmällä hyvin tasainen, keskimäärin 0,03-0,04 mg/l/vrk 18 metrin syvyydelle saakka. Pohjanläheisessä näytesyvyudessa hapenkulutusnopeus oli keskimäärin 0,064 mg/l/vrk. Iso-Valkeisessa sen sijaan hapenkulutusnopeus kasvoi melko tasaisesti syvyyden myötä. Neljän metrin syvyydessä se oli keskimäärin 0,04 mg/l/vrk ja yhdeksän metrin syvyydelle tultaessa hapenkulutusnopeus oli noussut 0,076 mg/l/vrk:aan. Pohjanläheisessä vesikerroksessa hapenkulutusnopeus oli edelliseen näytesyvyyteen verrattuna yli kaksinkertainen, 0,164 mg/l/vrk.



Kuva 11. Keskimääräinen hapenkulutusnopeus ja vuosikeskiarvojen keskihajonta seurantajärvien eri syvyyksissä.

Humuspitoisessa Vehmasjärvessä päällysveden hapenkulutusnopeus oli hieman suurempi kuin edellä mainituissa karuissa kirkasvetisissä seurantajärvisissä. Vehmasjärven keskimääräinen hapenkulutusnopeus 1-2 metrin syvyydessä oli noin 0,03 mg/l/vrk. Syvyyksissä 4-8 m hapenkulutus oli noin 0,04 mg/l/vrk ja suuremmissa syvyyksissä hapenkulutus lisääntyi niin että 16 metrin syvyydessä arvo oli keskimäärin 0,075 mg/l/vrk. Tämä oli itse asiassa hieman korkeampi kuin pohjanläheisen vesikerroksen (noin 17,5 m) keskimääräinen hapenkulutusnopeus.

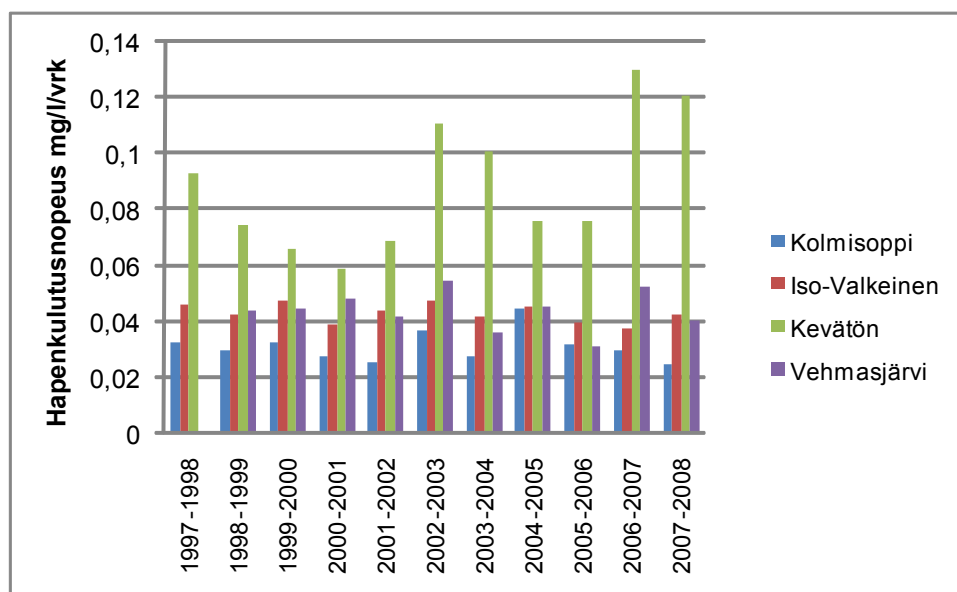
Kevättömän hapenkulutusnopeudet olivat edellisiin verrattuna vähintään kaksinkertaiset. Päällysvedessä hapenkulutusnopeus oli keskimäärin 0,064 mg/l/vrk, 2-5 metrin syvyydessä noin 0,11-0,15 mg/l/vrk ja 6-7 metrin syvyydellä keskimäärin 0,21-0,3 mg/l/vrk. Tulosaineisto oli tosin vesipatsaan alaosassa vähäinen heikkojen happitilanteiden vuoksi eikä syvimmästä vesikerroksesta voitu laskea hapenkulutusnopeutta kertaakaan.

Hapenkulutusnopeudessa oli suuria vuosien välisiä eroja, mutta vaihtelu ei ollut samanlaista eri järvisissä. Hapenkulutusnopeus oli selvästi keskimääräistä korkeampi talvikaudella 2002-2003 muissa järvisissä paitsi Kevättömässä. Hapenkulutusmaksimia ei kuitenkaan todettu tällöin kuin Vehmasjärvessä. Hapenkulutusnopeuksien minimiarvot ajoittuivat eri järvisissä eri vuosiin (kuva 12).

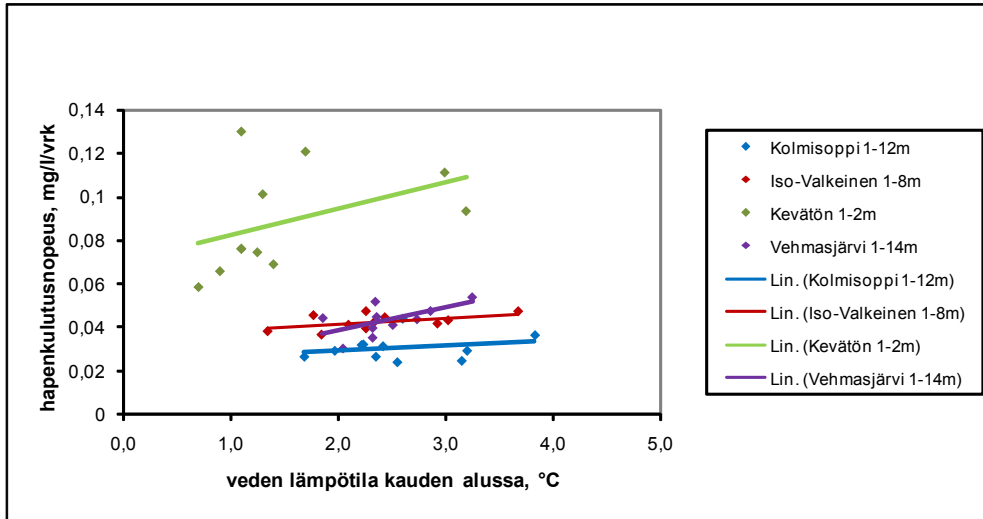
Vuosien välistä vaihtelua mahdollisesti selittävinä tekijöinä tarkasteltiin veden lämpötilaa jääpeitteisen kauden alussa, joka oletuksen mukaan säätelee hengitystoimintojen nopeutta. Muina ympäristötekijöinä tarkasteltiin vedenlaatua (kokonaisfosfori, kokonaistyyppi ja väriluku), joka voi vaikuttaa hajoavan orgaanisen aineen määrään.

Tarkasteltaessa hapenkulutusnopeuden suhdetta veden lämpötilaan tarkastelun pohjana oli ensimmäisen havaintokerran näytesyvyyksien lämpötiloista laskettu keskiarvo. Hapenkulutusnopeuden ja veden lämpötilan välillä ei ollut selvää yhteyttä (kuva 13). Varsinkaan karuissa kirkasvetisissä järvisissä hapenkulutusnopeus ei näyttänyt nousevan veden lämpötilan myötä tällä lämpötila-alueella.

Tarkasteltaessa eri syvyyksyöhykkeitä hapenkulutusnopeuden riippuvuus lämpötilasta oli selkeämpi (kuva 14). Kolmisopessa ja Vehmasjärvessä tilanne oli keskenään hyvin samanlainen: vesimassan yläosassa yhden asteen nousu lämpötilassa nopeutti hapenkulutusta noin 15% ja vesimassan alaosassa noin 40%. Iso-Valkeisessa lämpötilan ja hapenkulutusnopeuden välinen yhteys oli samansuuntainen molemmilla syvyyksyöhykkeillä:

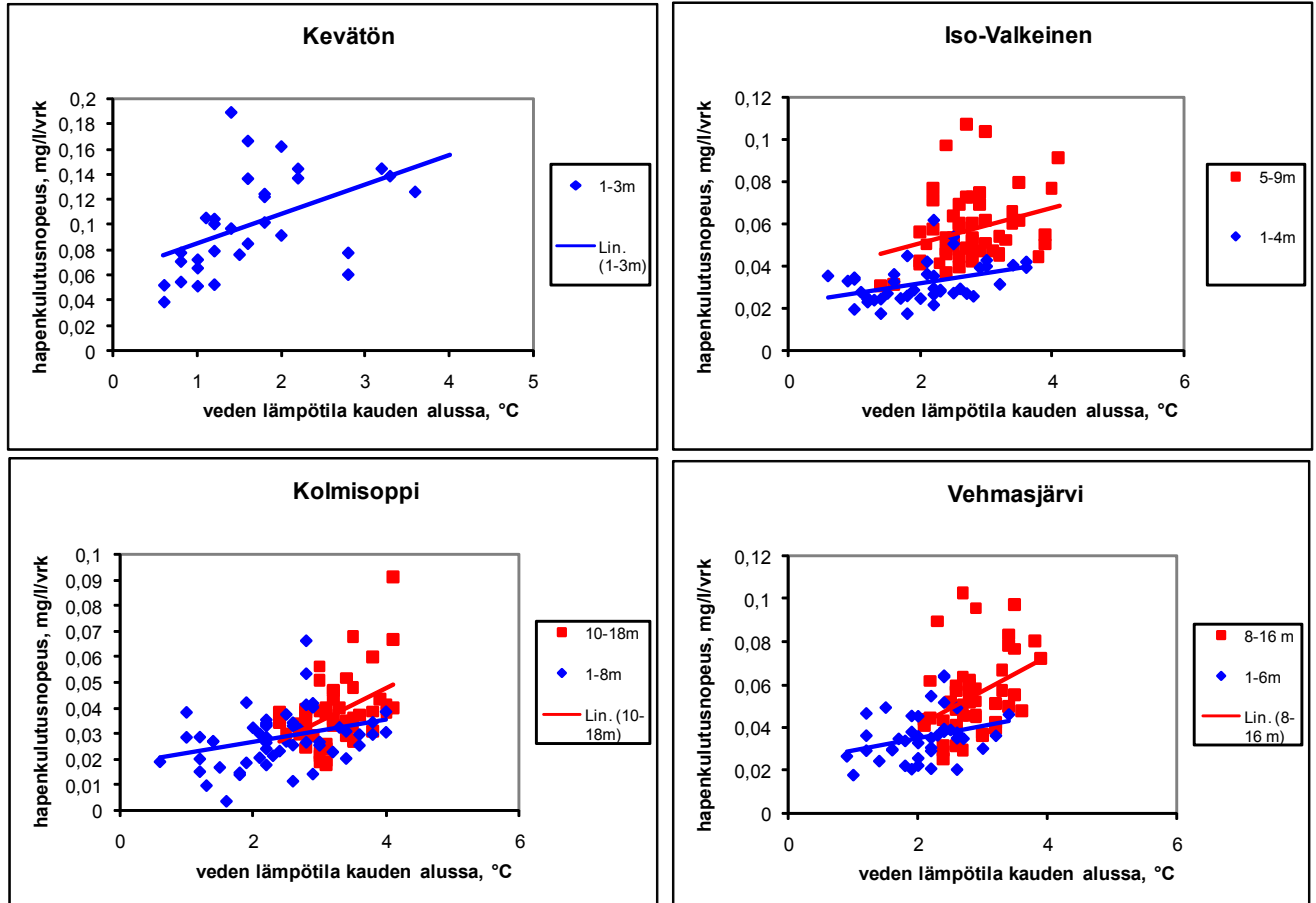


Kuva 12. Koko vesipatsaan keskimääräinen hapenkulutusnopeus eri vuosina.



Kuva 13. Hapenkulutusnopeuden vuosikeskiarvojen suhde jääpeitteisen kauden alussa mitattuun lämpötilaan. Keskiarvot on laskettu niiltä näytesyvyyksiltä, joista oli määritettävissä hapenkulutusarvo joka vuodelle.

yhden asteen lämpötilanousu lisäsi hapenkulutusnopeutta noin 15%. Kevättömässä ei ollut mahdollista arvioida lämpötilan ja hapenkulutusnopeuden välistä yhteyttä kuin vesimassan yläosasta. Siellä yhden asteen lämpötilanousu johti hapenkulutusnopeuden kasvuun runsaalla viidenneksellä. Hajonta oli kuitenkin kaikkien järvien osalta suurta.



Kuva 14. Hapenkulutusnopeuden suhde veden lämpötilaan eri syvyyksissä.

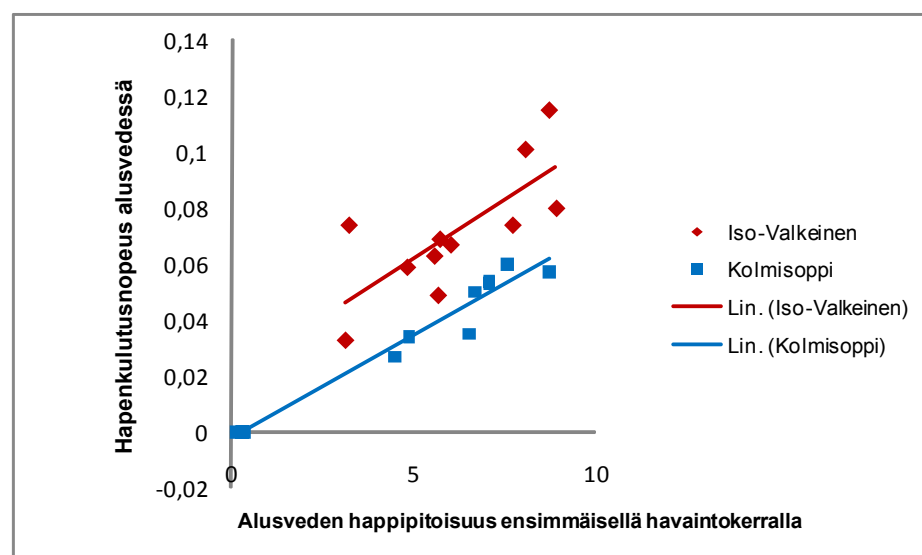
Vedenlaadun vaihteluilla ei näyttänyt olevan yhteyttä hapenkulutusnopeuden vuosien välisiin eroihin. Hapenkulutusnopeuden suhdetta kokonaisfosfori- ja kokonaistyyppipitoisuuteen sekä värilukuun selvitettiin kaikilta tutkimusjärveltä. Vedenlaatuarvot olivat päällysvedestä (1m) talvikauden ensimmäiseltä havaintokerralta ja hapenkulutusnopeudet olivat vuosikeskiarvoja koko vesimassasta (siltä osin kuin hapenkulutusnopeuksia oli voitu määrittää kaikkina seurantavuosina). Useimmissa tapauksissa yhteyksiä vedenlaadun ja hapenkulutusnopeuden välillä ei ollut havaittavissa (taulukko 5). Kokonaisfosforipitoisuuden ja hapenkulutusnopeuden välillä oli havaittavissa yhteys ainoastaan Kevättömässä. Iso-Valkeisessa kokonaistyyppien ja hapenkulutuksen välillä oli havaittavissa negatiivinen korrelaatio.

Taulukko 5. Ensimmäisen havaintokerran vedenlaadun yhteys koko vesipatsaan keskimääräiseen hapenkulutusnopeuteen talven aikana. Vedenlaatumuuttujien ja hapenkulutusnopeuden väliset korrelaatiokertoimen arvot. Merkitsevät korrelaatiot tummennettu.

Vedenlaatumuuttuja			
Järvi	Kokonaisfosfori	Kokonaistyyppi	Väriluku
Kevätön	-0,733*	-0,137	-0,359
Kolmisoppi	0,441	-0,31	-0,125
Vehmasjärvi	-0,277	-0,105	-0,409
Iso-Valkeinen	0,129	-0,819**	-0,361

Iso-Valkeisessa ja Kolmisopessa alusveden hapenkulutusnopeus oli sitä suurempi mitä enemmän alusvedessä oli happea ensimmäisellä havaintokerralla (kuva 15). Yhteys oli selvä myös tilastollisesti (Iso-Valkeinen, Pearsonin korrelaatio $r=0,745$, $p=0,009$ ja Kolmisoppi, Spearmanin korrelaatio $r=0,979$, $p<0,001$). Kevättömässä ja Vehmasjärvessä ei alusveden hapettomuuden vuoksi voinut tehdä vastaavaa selvitystä. Jos tarkastellaan koko vesipatsaan happipitoisuuksia ja hapenkulutusarvoja, ei vastaavaa yhteyttä ole havaittavissa.

Järvessä syntyneen orgaanisen aineen määrä on keskeinen hapenkulutukseen vaikuttava tekijä, mutta happi-seurantajärivistä ei ole systemaattista kesäajan seuranta, joten arvioita perustuotannon merkityksestä talviaikaisessa happitaloudessa eri järvissä ja eri vuosina ei voitu tehdä.



Kuva 15. Esimerkkinä Iso-Valkeinen ja Kolmisoppi: hapenkulutusnopeus alusvedessä hapettomuuden alkuun saakka suhteessa alkupe- räiseen happipitoisuuteen.

4.4 Muu vedenlaatu pohjanläheisessä vesikerroksessa

Pohjanläheisen vesikerroksen kokonaisfosforipitoisuudet vaihtelivat Kevättömässä maaliskuun lopun havaintokertoilla välillä 93-1100 µg/l ollen keskimäärin 563 µg/l (kuva 16). Myös Kolmisopessa ja Iso-Valkeisessa todettiin kevättalven 2003 poikkeuksellisen huonossa happitilanteessa korkeat fosforipitoisuudet (edellisessä 550 µg/l ja jälkimmäisessä 310 µg/l) vaikka alusveden pitoisuudet yleensä olivat selvästi alle 100 µg/l. Vehmasjärvessä pohjanläheisessä kerroksessa todettu fosforin maksimipitoisuus oli 240 µg/l ja keskimääräinen pitoisuus oli 129 µg/l.

Fosfaattifosforin osuus kokonaisfosforipitoisuudesta oli Kevättömässä keskimäärin 76%. Muutamana havaintokertana se oli jopa yli 95%. Myös Kolmisopessa ja Iso-Valkeisessa pohjanläheisen veden fosfori oli heikoimman happitilanteen aikaan 94–98%:sti fosfaattifosforina. Paremmissa happitilanteissa Iso-Valkeisen alusveden fosforista epäorgaanisessa muodossa oli keskimäärin vain 36% ja Kolmisopessa 53%. Vehmasjärvessä fosfaattifosforina oli keskimäärin 58% kokonaisfosforipitoisuudesta.

Korkeimmat alusveden typpipitoisuudet määritettiin lopputalvisin Kevättömästä: kokonaistyyppipitoisuudet olivat 3200-8100 µg/l ja ammoniumtyppipitoisuudet 1800-7100 µg/l (kuva 16). Alusvesi oli kaikilla havaintokertoilla hapeton. Ammoniumtyypin osuus kokonaistypestä oli yhtä havaintokertaa lukuunottamatta yli 70%. Muissa järvissä kokonaistyyppipitoisuudet hapettomassa alusvedessä olivat 1100-1900 µg/l ja ammoniumtyppipitoisuudet 240-820 µg/l. Ammoniumtyypin osuus hapettoman alusveden kokonaistyyppipitoisuudesta oli sekin selvästi pienempi kuin Kevättömässä, 22-66%. Pienimmillään ammoniumtyypin osuus oli Vehmasjärvessä.

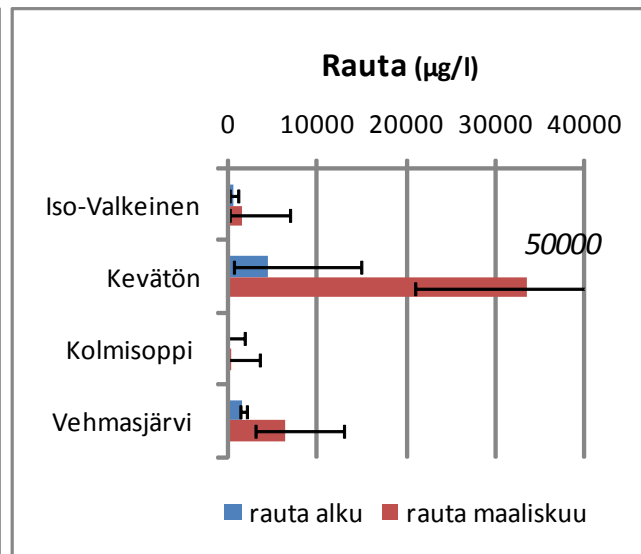
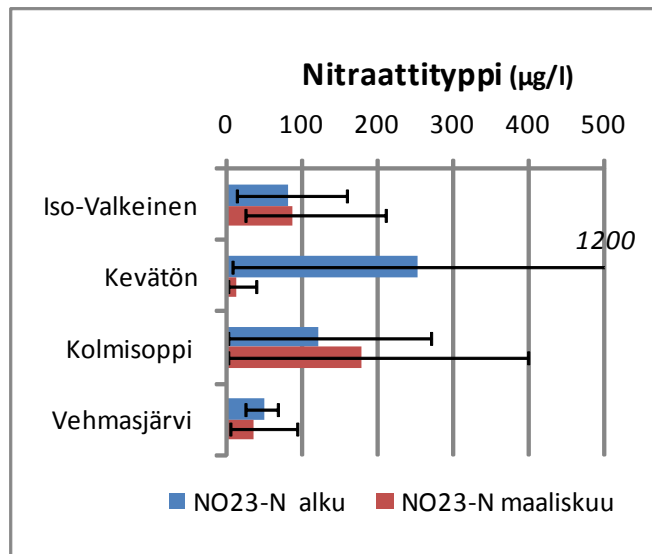
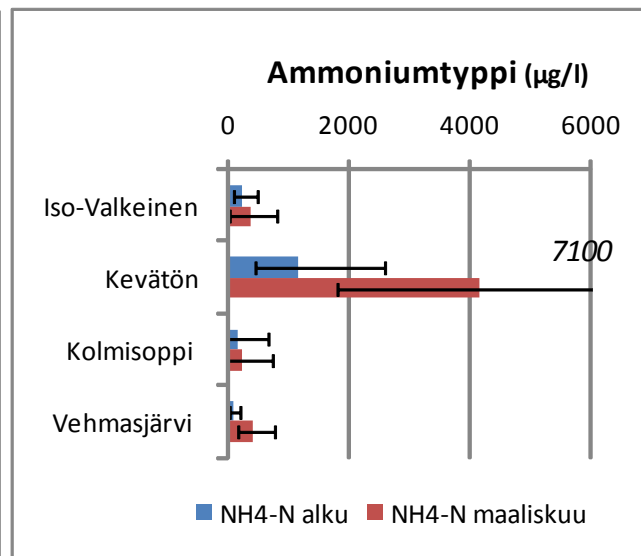
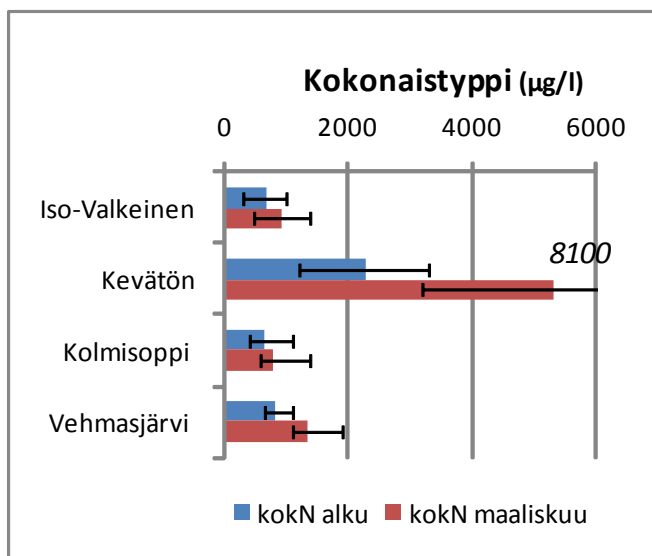
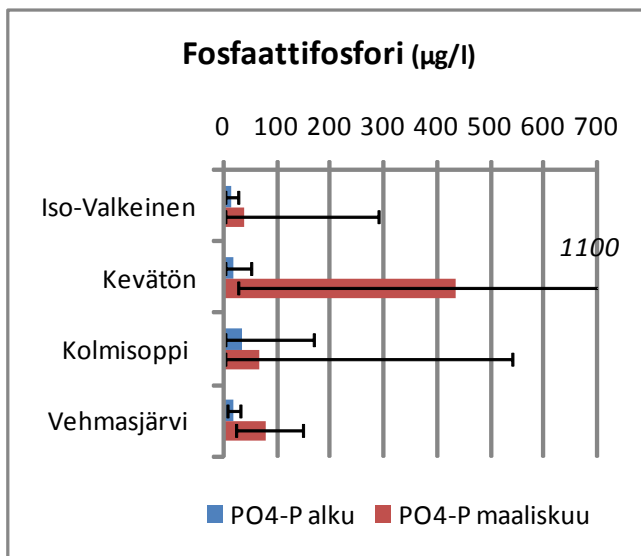
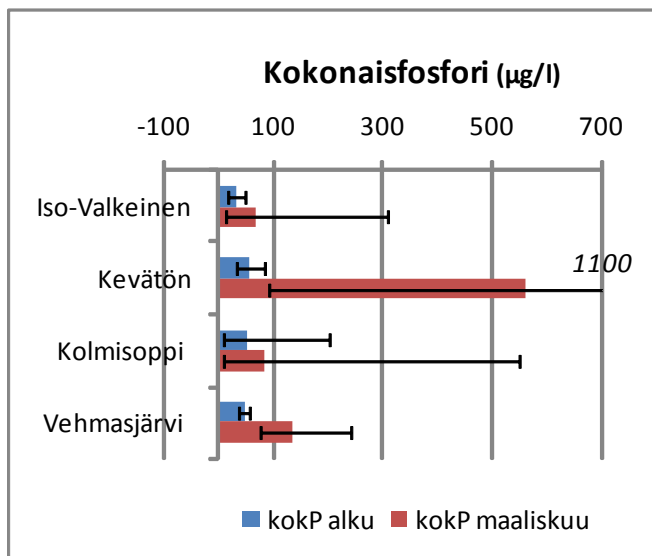
Rautapitoisuudet Kevättömän pohjanläheisessä vesikerroksessa olivat 21-50 mg/l. Myös Vehmasjärvessä rautapitoisuudet nousivat hapettomassa alusvedessä voimakkaasti, 3,5-13 mg/l:aan. Iso-Valkeisessa pohjanläheinen hapettomuus nosti rautapitoisuudet 1,3-7,0 mg/l:aan. Kolmisopessa pohjanläheistä hapettomuutta todettiin vain kahdella maaliskuun lopun havaintokerralla ja silloin rautapitoisuus oli 0,47 ja 3,5 mg/l. Alimmillaan alusveden rautapitoisuudet olivat Kolmisopessa 10-54 µg/l ja Iso-Valkeisessa noin 200 µg/l.

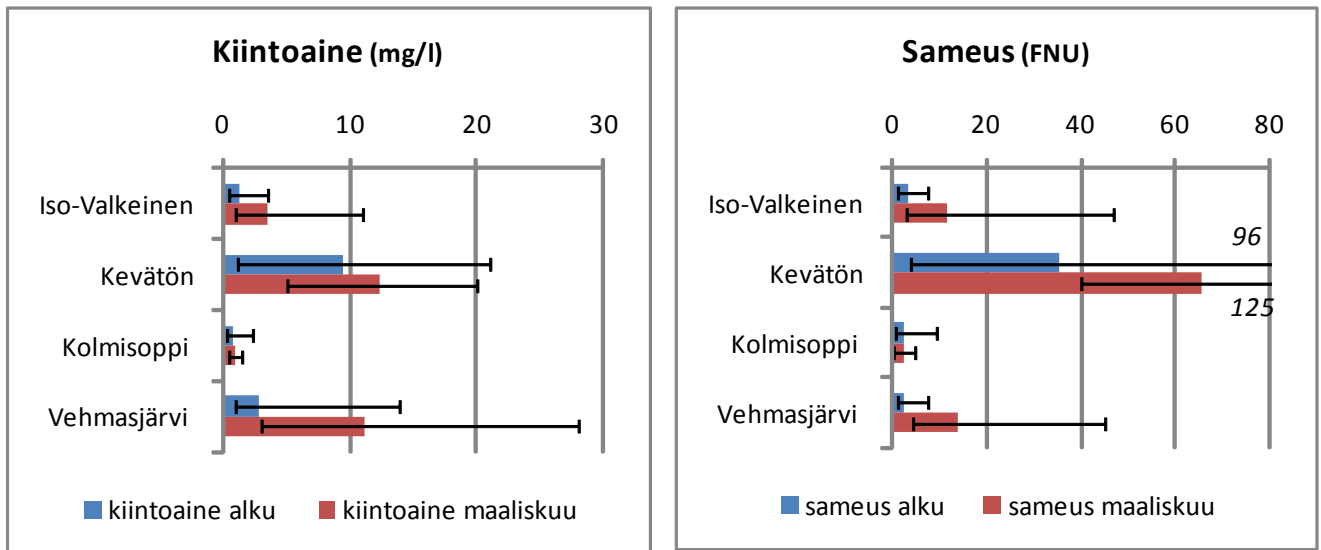
Kevättömän pohjanläheissä vedessä kiintoainetta oli 5-20 mg/l (keskimäärin 12,4 mg/l) ja Vehmasjärvessä 3,1-28 mg/l (keskimäärin 10,8 mg/l). Iso-Valkeisen alusveden kiintoainepitoisuus vaihteli välillä 1-11 mg/l (keskimäärin 3,6 mg/l) ja Kolmisopen välillä 0,5-1,5 mg/l.

Vaikka pohjanläheisen veden kiintoainepitoisuus oli maaliskuun havaintokerralla samaa luokkaa Kevättömässä ja Vehmasjärvessä, niin sameudessa järvien välinen ero oli aika suuri. Kevättömän alusvedessä sameus oli keskimäärin 66 FNU ja Vehmasjärvessä keskimäärin 14 FNU. Iso-Valkeisessa sameus oli pohjanläheisessä vedessä maaliskuun lopussa keskimäärin 12 FNU. Kolmisopessa sameuskeskiarvo oli vastaavasti vain 2,5 FNU.

Talvikauden ensimmäisen havaintokerran ja maaliskuun lopun havaintokerran välisenä aikana vedenlaatumuutokset olivat suurimmat Kevättömässä ja ennen kaikkea fosfori- ja rautapitoisuuksien osalta. Kokonaisfosforipitoisuudet keskimäärin kymmenkertaistuivat talven aikana, fosfaattifosforipitoisuudet kasvoivat keskimäärin 20-kertaisiksi ja rautapitoisuudet yli seitsenkertaisiksi. Vehmasjärvessä kyseiset pitoisuudet kasvoivat 3-4-kertaisiksi, Iso-Valkeisessa hieman vähemmän ja Kolmisopessa muutokset olivat hyvin vähäiset.

Tyyppipitoisuuksissa talven aikana tapahtuneista muutoksista suhteellisesti suurin oli nitraattityppipitoisuuksien pieneneminen Kevättömässä hapettomuuden seurauksena. Myös kokonaistyyppipitoisuuden muutos oli selvin Kevättömässä, jossa se kaksinkertaistui. Ammoniumtyppipitoisuus nousi Vehmasjärvessä suhteellisesti hieman enemmän kuin Kevättömässä, lähes nelinkertaiseksi.





Kuva 16. Vedenlaatuarvojen keskiarvot ja vaihteluvälit eri järvissä talven alussa ja lopussa pohjanläheisessä vesikerroksessa. Virhepalkit edustavat havaintosarjojen minimi- ja maksimiarvoja. Kuvateknisistä syistä osa havaintopalkeista on katkaistu ja maksimiarvot merkitty lukuina.

Alusveden sameudessa muutokset olivat suurimmat Vehmasjärvessä, jossa sameusarvot olivat lopputalvella keskimäärin lähes viisinkertaiset alkutalveen verrattuna, ja Iso-Valkeisessa, jossa sameusarvot keskimäärin kolminkertaistuivat. Kevättömän pohjanläheisessä vedessä sameusarvot olivat huomattavasti suuremmat kuin muissa järvissä, mutta talven aikana suhteellinen muutos ei ollut kovin suuri: sameusarvot keskimäärin kaksinkertaistuivat. Kolmisopessa ei muutosta tapahtunut lainkaan.

Kiintoainepitoisuudessa tapahtui talven aikana suurimmat muutokset Iso-Valkeisessa ja Vehmasjärvessä, näissä järvissä pohjanläheisen veden kiintoainepitoisuus keskimäärin nelinkertaistui. Kevättömässä ja Kolmisopessa muutosta ei tapahtunut juuri lainkaan.

Tarkasteltaessa koko järvijoukon maaliskuun lopun alusvesituloksia, voidaan todeta vesipatsaan happitilanteen sekä ravinne- ja rautapitoisuuksien välillä vahvat tilastollisesti erittäin merkitsevät korrelaatiot (taulukko 6). Voimakkaimmillaan yhteys oli koko vesipatsaan tilavuuspainotetun happipitoisuuden ja kokonaistyyppi-, ammoniumtyppi- kokonaisfosfori- sekä rautapitoisuuksien välillä (Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin -0,82- -0,85). Jokseenkin samaa luokkaa oli happitilanteen sekä ammoniumtyypin, kokonaisfosforin ja raudan rikastumisen (eli ensimmäisen havaintokerran jälkeen tapahtuneen pitoisuusnousun) välinen yhteys. Myös fosfaattifosforipitoisuus, kokonaistyyppirikastuminen ja ammoniumtyypin osuus olivat yhteydessä happitilanteeseen. Yhtä vahva korrelaatio on happitilanteen ja nitraattityypipitoisuuden välillä, mutta korrelaatio oli luonnollisesti muista poiketen positiivinen. Yhteys alusveden sameuteen ja kiintoainepitoisuuteen oli heikompi eikä varsinkaan talven aikana tapahtuneilla muutoksilla ollut kovin selvää yhteyttä happitilanteeseen. Happitilanteella ei myöskään ollut selvää yhteyttä fosfaattifosforin osuuteen kokonaisfosforipitoisuudesta.

Taulukko 6. Maaliskuun lopussa alusvedestä mitattujen vedenlaatutekijöiden ja vesipatsaan tilavuuspainotetun happipitoisuuskeskiarvojen väliset Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimen arvot ja korrelaation merkitsevyytasot (p-arvot). Merkitsevät korrelaatiot on esitetty lihavoituina.

		Koko aineisto (n=43)	Kevätön (n=11)	Iso-Valkeinen (n=11)	Kolmisoppi (n=11)	Vehmasjärvi (n=10)
NH ₄ -N-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,83 <0,001	-0,51 0,108	-0,39 0,233	-0,51 0,113	-0,58 0,082
NH ₄ -N-osuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,77 <0,001	-0,35 0,296	-0,30 0,377	-0,85 0,001	-0,64 0,048
NH ₄ -N-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,84 <0,001	-0,75 0,008	-0,21 0,535	-0,90 <0,001	-0,55 0,102
NO ₃ -N-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	0,76 <0,001	0,16 0,637	0,59 0,055	0,84 0,001	0,69 0,028
kokN-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,82 <0,001	-0,70 0,017	-0,19 0,571	-0,35 0,29	-0,39 0,26
kokN-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,77 <0,001	-0,50 0,115	-0,36 0,277	-0,80 0,003	-0,30 0,405
PO ₄ -P-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,73 <0,001	-0,64 0,033	-0,69 0,019	-0,72 0,013	-0,39 0,265
PO ₄ -P-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,79 <0,001	-0,64 0,033	-0,37 0,263	-0,63 0,04	-0,21 0,554
PO ₄ -P-osuus kokP:stä	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,56 <0,001	-0,28 0,407	-0,11 0,753	-0,36 0,273	-0,22 0,542
kokP-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,85 <0,001	-0,64 0,033	-0,42 0,205	-0,43 0,189	-0,37 0,291
kokP-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,81 <0,001	-0,64 0,033	-0,70 0,017	-0,29 0,391	-0,39 0,265
kiintoaine-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,66 <0,001	0,42 0,203	-0,46 0,157	-0,54 0,089	0,02 0,96
kiintoaine-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,29 0,063	0,51 0,112	-0,59 0,057	-0,41 0,217	-0,12 0,738
rauta-pitoisuus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,85 <0,001	-0,82 0,002	-0,36 0,27	-0,87 0,001	-0,59 0,074
raudan rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,81 <0,001	-0,60 0,068	-0,50 0,115	-0,40 0,228	-0,59 0,074
sameus	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,73 <0,001	-0,24 0,473	-0,17 0,619	-0,57 0,069	-0,29 0,425
sameus-rikastuminen	korrelaatiokerroin p-arvo	-0,47 0,001	-0,11 0,738	-0,21 0,527	-0,04 0,905	-0,15 0,676

Koko tulosaineistosta lasketut korrelaatiot (taulukko 6) olivat pääsääntöisesti järvikohtaisia selvästi voimakkaampia. Tosin Kolmisopessa tilavuuspainotetun happikeskiarvon yhteys ammoniumtyyppi- ja rautapitoisuuteen sekä ammoniumtyypin osuuteen oli jopa selkeämpi kuin koko aineistossa. Kolmisopessa happitilanteella oli selvä yhteys myös fosfaattifosfori- ja kokonaistyyppirikastumiseen. Myös Kevättömässä happitilanteen ja alusveden vedenlaadun välillä oli havaittavissa yhteyksiä useiden muuttujien osalta. Iso-Valkeisessa tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot olivat havaittavissa happitilanteen suhteessa kokonaisfosfori- ja fosfaattifosforirikastumiseen ja Vehmasjärvessä suhteessa nitraattityypipitoisuuteen ja ammoniumtyypin osuuteen kokonaistyyppipitoisuudesta.

4.5 Maaliskuun lopun happitilanteen yhteys sääolosuhteisiin

Talviaikaisen happitilanteen kannalta periaatteessa suotuisaa on järvien pitkä ja tehokas syyskierto, myöhäinen jäätyminen ja suuri vedenkorkeus. Happiongelmille järvet taas altistuvat helpoimmin silloin kun järvet jäätyvät varhain, epätäydellisesti ilmastuneina ja lämpiminä ja kun järvien vedenpinnat ovat alhaalla.

Talvi 2003 oli selvästi happiseurannan huonoin, kaikissa järvissä todettiin silloin happiminimi (taulukko 7). Vuonna 2003 heikkoa happitilannetta enteileviä tekijöitä oli useita: varhainen jäätyminen, veden lämpimyyden ja alhainen vedenkorkeus.

Useimmissa järvissä oli keskimääräistä huonompi happitilanne myös kevättalvella 2002. Muuten keskimääräistä huonoimmat happitilanteet eivät osuneet esimerkkijärvissä samoihin vuosiin vaan näitä esiintyi useina vuosina (1998, 1999, 2005 ja 2008).

Parhaimmat happitilanteet ajoittuivat talvikausiin 2000-2001 ja 2006-2007, jolloin vedet olivat ilmastuneet tehokkaasti, viilenneet hyvin ja jäätyneet myöhään. Vehmasjärvessäkin oli näinä vuosina keskimääräistä parempi happitilanne, mutta paras happitilanne mitattiin vuonna 2006, joka oli happitilanteen kannalta hyvä vuosi myös Iso-Valkeisessa ja Kolmisopessa. Kolmisopessa vuosien väliset erot ovat melko suuret, joten siellä keskimääräisestä selvästi poikkeavia happitilanteita oli enemmän kuin muissa järvissä.

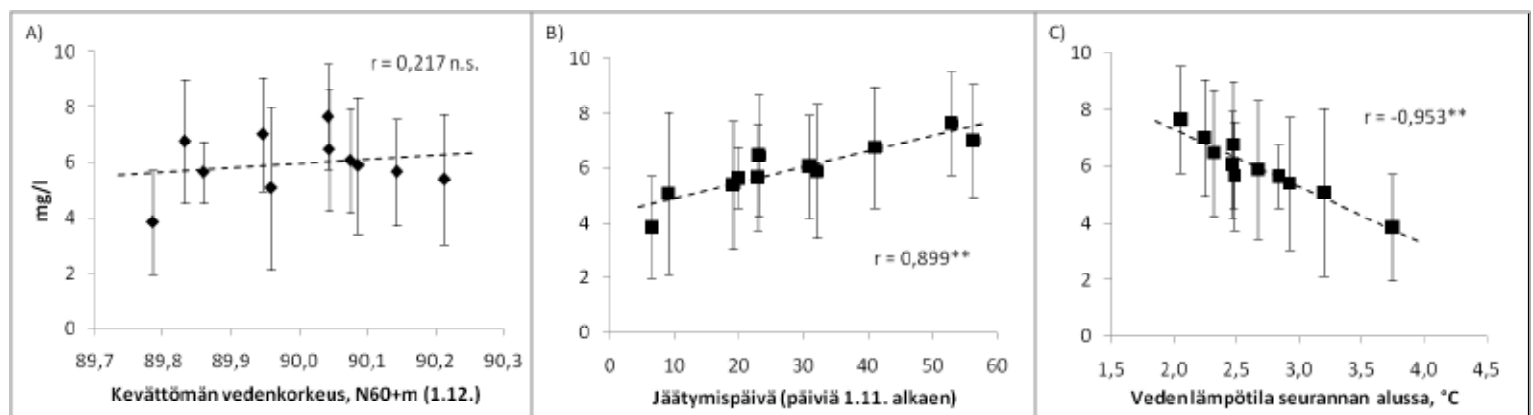
Poikkeuksena happitilanteen ennustettavuudesta sääolosuhteiden perusteella on kuitenkin Kevättömässä todettu keskimääräistä parempi happitilanne vuonna 2002, sillä vedenpinnat olivat silloin alhaalla ja järvet olivat myös jäätyneet keskimääräistä aikaisemmin. Lisäksi talvikaudella 2007-2008 järvet jäätyivät myöhään, mutta tämä johti tavallista parempaan happitilanteeseen vain Kolmisopessa.

Taulukko 7. Happiseurantajärvien keskimääräistä paremmat ja huonommat happitilanteet, eniten poikkeavat lihavoitu.

	Keskimääräistä huonompi happitilanne	Keskimääräistä parempi happitilanne
Iso-Valkeinen	2002, 2003	2001 , 2006, 2007
Kevätön	1998, 1999, 2003 , 2008	2001 , 2002, 2007
Kolmisoppi	1998, 2002, 2003 , 2005	2000, 2001 , 2006, 2007, 2008
Vehmasjärvi	1999, 2002, 2003 , 2008	2001, 2006 , 2007

Sääolosuhteiden ja talviaikaisen happitilanteen välistä yhteyttä testattiin myös tilastollisesti. Talvikausien alussa mitatun veden keskimääräisen lämpötilan ja tilavuuspainotetun happipitoisuuden välillä oli hyvin voimakas yhteys, joka oli myös tilastollisesti merkitsevä (kuva 18). Jäätymisajankohdan ja happipitoisuuden välillä oli lähes yhtä voimakas tilastollisesti merkitsevä korrelaatio. Sen sijaan vedenkorkeuden ja happitilanteen välillä ei ollut merkitsevää korrelaatiota.

Aineistoon sovitetun lineaarisen regression avulla voidaan arvioida, että järvien jäätymisen tapahtuessa kuukauden keskimääräistä myöhemmin, vesipatsaan keskimääräinen happitilanne on kevättalvella noin kolmanneksen (35%) keskimääräistä parempi. Vastaavasti veden viilentyessä syksyllä keskimäärin asteen tavallista kylmemmäksi, vesipatsaan tilavuuspainotettu happipitoisuus on loppupalvella noin 38% keskimääräistä korkeampi.



Kuva 18. Seurantajärvien maaliskuun happitilanteen (tilavuuspainotettu keskiarvo; järvien väliset keskiarvot ja keskihajonnat) yhteys A) vedenkorkeuteen, B) jäätymispäivään ja C) veden keskimääräiseen lämpötilaan ensimmäisellä havaintokerralla. Kuvissa esitetty aineistoon sovitettu lineaarinen regressio sekä Pearsonin korrelaatiokertoimen arvo ja merkitsevyys (n.s.= ei merkitsevä, **= $p < 0,01$).

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Hapenkulutusnopeus

Päällysveden hapenkulutusnopeus oli alhaisin happiseurannan karuimmissa kohdejärvissä, Iso-Valkeisessa ja Kolmisopessa, keskimäärin 0,02-0,03 mg/l/vrk. Humuspitoisessa Vehmasjärvessä se oli hiukan edellisiä korkeampi ja Kevättömässä vähintään kaksinkertainen, keskimäärin 0,064 mg/l/vrk. Pohjanläheisessä vesikerroksessa vaihtelu oli vielä suurempaa: Kolmisopessa pohjanläheisessä vedessä hapenkulutusnopeus oli keskimäärin 0,064, Iso-Valkeisessa 0,164, Vehmasjärvessä 0,075 ja Kevättömässä vähintään 0,3 mg/l/vrk (syvyydellä noin kolme metriä pohjasta). Kevättömästä ei ihan syvimmistä kerroksista voitu laskea hapenkulutusnopeutta huonon happitilanteiden takia.

Kevättömän hapenkulutusnopeudet ovat varsin samaa luokkaa kuin useissa muissa rehevissä järvissä. Pinta-alayksikköä kohti laskettuna hapenkulutusnopeus oli kaikkien seurantavuosien keskiarvona 223 mg/m²/vrk. Tuusulanjärvessä keskimääräinen hapenkulutus jääpeitteisinä kausina vuosina 1970-2000 oli 301 ± 105 mg/m²/vrk (Malve ym 2005). Eutrofisissa kanadalaisissa järvissä samoilla leveysasteilla talviaikainen hapenkulutus oli 131-306 mg/m²/vrk (Welch & Bergmann (1985) Malven ym (2005) mukaan). Kanadalaisessa hypertrofisessa järvessä, jonka jääpeitteinen kausi oli yleensä marraskuun alusta toukokuun puoliväliin, hapenkulutusnopeus oli esimerkiksi syksystä 1989 maaliskuuhun 1990 keskimäärin 440 mg/m²/vrk (Robarts ym 2005).

Kevättömän hapenkulutusnopeuden voidaan arvioida olevan hieman aliarvio, sillä syvimmistä vesikerroksista sitä ei voitu laskea, koska happi oli ehtinyt loppua jo ennen ensimmäistä havaintokertaa. Hapenkulutus on voimakkainta alusvedessä. Bakteerihengitystä tapahtuu koko vesimassassa, mutta suurimmillaan se on sedimentti-vesi –rajapinnassa, jonne kertyy orgaanista ainetta eniten. Hiukkasmaisen kuolleen orgaanisen aineen mikrobiologinen hajotus on suurin happea kuluttava prosessi alusvedessä. Myös kasvien ja eläinten hengitys kuluttaa happea ja näiden lisäksi myös kemialliset hapettumisreaktiot ennen kaikkea humusvesissä. (Wetzel 2001).

Alusveden hapenkulutusnopeus riippuu siitä, paljonko sinne tulee orgaanista ainetta ja millainen on järven morfologia. Nürnbergin (1995) mukaan liuenneella orgaanisella aineella on tosin pienempi merkitys kuin järven rehevyytasolla ja morfologialla. Tässäkään tutkimuksessa liuenneella orgaanisella aineella ei ollut kovin suurta vaikutusta hapenkulutusnopeuteen, sillä kirkasvetisen Iso-Valkeisen ja runsashumuksisen Vehmasjärven välinen ero oli vähäinen.

Toteutetun happiseurannan tulosten avulla voidaan karkealla tasolla helpottaa eri vuosien happitulosten vertailua silloin kun näytteet on otettu talven eri vaiheissa. Kolmisopen ja Iso-Valkeisen päällysvedessä 1 mg/l:n happipitoisuus kuluu keskimäärin noin 40 päivässä, Vehmasjärvessä noin 33 päivässä ja Kevättömässä noin 16 päivässä. Pohjanläheisessä vesikerroksessa hapenkuluminen on huomattavasti nopeampaa: Kolmisopessa 1 mg happea kuluu litran vesitilavuudesta keskimäärin 16 päivässä, Vehmasjärvessä 13 päivässä, Iso-Valkeisessa kuudessa päivässä ja Kevättömässä noin kolmessa päivässä. Järvien ja näytesyvyyksien välillä on siis suuria eroja ja myös vuosien välinen vaihtelu on merkittävää.

Tarkasteltaessa hapenkulutusnopeuden yhteyttä eri ympäristökijöihin tulokset vaikuttivat monessa suhteessa ristiriitaisilta. Tämä voi osittain selittyä aineiston puutteilla: sekä sen pienuudella että havaintoajankohtien vähäisyydellä. Vaikka ensimmäiset näytteet pyrittiinkin ottamaan aina mahdollisimman nopeasti järvien jäätyamisen jälkeen, niin ensimmäisen jääriitteen muodostumisesta kantavan jään olosuhteisiin kuluva aika vaihteli eri vuosina ja hapenkulutusta ehti näin ollen tapahtua vaihtelevasti eri vuosina. Esimerkiksi Iso-Valkeisessa ja Kolmisopessa alusveden hapenkulutusnopeuden todettiin olevan sitä suurempi mitä enemmän alusvedessä oli happea ensimmäisellä havaintokerralla. Tämä korrelaatio saattoi ainakin osaksi johtua siitä, että helpommin hajoavat orgaaniset yhdisteet olivat saattaneet hajota ja kuluttaa hajotessaan happea jo ennen ensimmäistä havaintoker-

taa. Samoin havaintokauden lopussa havaintokertoja olisi pitänyt olla tiheämmin, jotta olisi saatu tarkasti selville hapettomuuden tai tietyn hapelle asetetun rajapitoisuuden alkamishetki.

Lisäksi olosuhteet eivät tämänkaltaisissa seurannoissa voi olla minkään tekijän osalta vakioituneet niin että muutosten voitaisiin arvioida aiheutuneen pelkästään kyseisestä tekijästä. Vaikuttavia tekijöitä oli aina monia ja vaikutukset saattoivat olla erisuuntaisia.

Lämpötilan nousu näytti tämän tutkimuksen perusteella lisäävän hapenkulutusnopeutta noin 15-40% astetta kohden ja enemmän vesimassan alaosassa kuin vesimassan yläosassa. Tuusulanjärvessä hapenkulutusnopeus nousi noin 75% kun järven pohjasedimenttiä inkuboitettiin asteen verran korkeammassa lämpötilassa (Lehtoranta ja Malve (2001) siteerattu Malve ym 2005): hapenkulutus oli +3 °C:n lämpötilassa 130 mg /m²/vrk ja +4°C:ssa 230 mg m²/vrk.

5.2 Sääolosuhteiden vaikutus

Happiseurannan yhtätoista seurantavuotta voidaan pitää läpileikkauksena kohdejärvien nykyisestä tilasta, sillä millään kohdejärvellä ei ole havaittavissa erityisiä muutossuuntauksia. Vuosien välinen happipitoisuuden vaihtelu oli seurannan aikana huomattavaa: syvänpisteen tilavuuspainotetyn happikeskiarvon vaihteluväli oli Vehmasjärvessä 2,6 mg/l ja muissa seurantajärvisä 4-4,6 mg/l. Talviaikaisten näytteenottojen happituloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon tämä suuri vuosien välinen vaihtelu, joka tässä seurantahankkeessa tuli esille sekä rehevän että karujen järvien kohdalla. Olosuhteiden, etenkin jäätymisajankohdan ja veden lämpötilan, huomioon otto tuloksia tulkittaessa on välttämätöntä. Järvien ja niiden valuma-alueiden ominaisuuksista riippumattomien säätekijöiden merkitystä talviaikaisen happitilanteen säätelijänä kuvaa vuosien välisen vaihtelun samansuuntaisuus happiseurannan kohdejärvisä (vrt kuva 8). Säätekijöiden vaikutusta ei aivan suoraviivaisesti arvioida. Tässäkin seurantahankkeessa hyvät ja huonot happitilanteet eivät osuneet kaikissa järvisä samoihin vuosiin, vaikka järvet olivat maantieteellisesti samalta alueelta, kooltaan pääosin samaa luokkaa ja kaikki olivat myös latvajärviä.

Veden jäätymisajankohdalla ja veden lämpötilalla on merkittävä vaikutus siihen, millainen happitilanteesta muodostui. Karkeasti arvioiden kuukauden viivästyminen jääpeitteen muodostumisessa ja vesimassan jäähtyminen astetta viileämmäksi vaikuttavat happitilanteeseen jokseenkin saman verran: loppupalvella vesimassan keskimääräinen happitilanne oli näissä olosuhteissa yli kolmanneksen keskimääräistä parempi.

Lämpötila vaikuttaa hapen riittävyyteen myös välillisesti. Paitsi että kylmemmässä vedessä hapenkulutusnopeudet ovat pienemmät kuin lämpimämmässä, happea myös liukenee viileämpään veteen enemmän. Alle neljäasteisessä vedessä hapen liukenevuuden lisäys on astetta kohti 0,353 -0,405 mg/l (Wetzel 2001).

5.3 Happitilanteen vaikutus veden laatuun

Vesipatsaan happitilanteen heikentymisen sekä ravinne- ja rautapitoisuuksien välillä todettiin vahvat tilastollisesti erittäin merkitsevät yhteydet. Kaikkien järvien aineistossa happitilanteen heikkeneminen johti voimakkaimmin alusveden ammoniumtyppi-, kokonaisfosfori- ja rautapitoisuuksien kasvuun. Pitoisuusmuutokset olivat talven aikana suurimmat Kevättömässä ja ennen kaikkea fosfori- ja rautapitoisuuksien osalta. Kokonaisfosforipitoisuudet keskimäärin kymmenkertaistuivat, fosfaattifosforipitoisuudet kasvoivat keskimäärin 20-kertaisiksi ja rautapitoisuudet yli seitsenkertaisiksi. Vehmasjärvessä fosfori- ja rautapitoisuudet kasvoivat 3-4 -kertaisiksi, Iso-

Valkeisessa hieman vähemmän ja Kolmisopessa muutokset olivat hyvin vähäiset.

Järven pohjasedimentissä vapautuu pelkistysreaktioissa ja orgaanisen aineksen mineralisaation yhteydessä suuria määriä fosforia liukoisessa muodossa Jos sedimentin pinta on hapellinen, se pysäyttää tehokkaasti raudan, mangaanin ja fosfaattifosforin kulun sedimentistä veteen. Alumiinihydroksidit säilyttävät fosforin sitomiskykynsä myös hapettomassa ympäristössä (Lehtoranta ja Gran 2002), mutta yleisesti ottaen pohjanläheisen veden happipitoisuuden pienentyessä sedimentin ohuen hapellisen pintakerroksen kyky estää ravinteiden pääsyn veteen heikkenee. Anaerobit prosessit etenevät tietyssä järjestyksessä: ensin pelkistyy nitraatti, sitten mangaani, rauta, sulfaatti ja hiilidioksidi ja pelkistyneiden lopputuotteiden muodostuessa sedimentin redox-potentiaali laskee (taulukko 8) (Wetzel 2001). Näin ollen esimerkiksi rautaan sitoutunutta fosforia ei vapaudu hapettomaan alusveteen niin kauan kuin nitraattityppeä on vedessä riittävästi. Nitraatin vaikutus ei kuitenkaan ole näin yksioikoinen, sillä nitraattipitoisuuksien kasvu voi lisätä mineralisaationopeutta, jolloin se samalla edistää fosforin siirtymistä orgaaniseen ainekseen sitoutuneesta fosforista epäorgaaniseksi fosforiksi. Lisäksi jos nitraattia on paljon, on paljon myös nitraattia pelkistäviä bakteereita ja nitraatin vähetessä ne voivat käyttää kolmenarvoista rautaa vaihtoehtoisena elektronin vastaanottajana ja näin rautaan sitoutunutta fosforia voisi vapautua veteen. (Boström ym 1988).

Taulukko 8. Tapahtumat sedimentissä hapettomuuden edetessä (lähde: Wetzel 2001).

Prosessi	Substraatit	Lopputuotteet	Redox-potentiaali
Hapen loppuminen	$O_2 + H_2$	$2H_2O$	+ 330 mV
Nitraatin loppuminen	$2NO_3^- + 5 H_2 + 2 H^+$ $NO_3^- + 4 H_2 + 2 H^+$	$N^2 + 6 H_2O$ $NH_4^+ + 3 H_2O$	+ 220 mV
Mangaani-ionien vapautuminen veteen	$MnO_2 + H_2 + 2H^+$	$Mn^{2+} + 2 H_2O$	+ 200 mV
Rauta-ionien vapautuminen veteen	$2 Fe(OH)_3 + H_2 + 4H^+$	$2 Fe^{2+} + 6 H_2O$	+ 120 mV
Sulfaatin loppuminen	$SO_4^{2-} + 4 H_2$	$S^{2-} + 4 H_2O$	- 150 mV
Metaanin vapautuminen veteen	$CO_2 + 4H_2$	$CH_4 + 2H_2O$	- 250 mV

Typipitoisuuden muutokset talven aikana olivat selvästi pienemmät kuin fosforipitoisuuksien. Kevättömässä typipitoisuudet olivat selvästi suuremmat kuin muissa seurantajärvissä ja myös ammoniumtypen osuus kokonaistypipitoisuudesta oli selvästi suurempi, yleensä yli 70%. Ammoniumtypipitoisuus ja ammoniumtypen osuus olivat kaikki järvet kattavassa aineistossa hyvin korreloituneet happitilanteen kanssa maaliskuun lopun havaintokerroilla ja myös osassa yksittäisten järvien aineistoja yhteys oli tilastollisesti merkitsevä. Kun alusvesi menee hapettomaksi, ammoniumtypen pitoisuus nousee nopeasti ammoniumtypen nitrifikaation nitriitti- ja edelleen nitraattitypeksi loppuessa. Lisäksi kun hapellinen vyöhyke sedimentin ja veden rajapinnalta katoaa, sedimentin kyky pidättää ammoniumtyppeä heikkenee merkittävästi.

Yhteenveto

Happiseurannan 11 seurantavuoteen osui sääolosuhteiltaan hyvin erilaisia olosuhteita. Pitkän ja tehokkaan syystäyskierron ja myöhäisen jäätyminen suotuisuus näkyi hyvin seuranta-aineiston tilastollisessa tarkastelussa. Talvikausien alussa mitatun keskimääräisen veden lämpötilan ja tilavuuspainotetun happipitoisuuden välillä oli voimakas yhteys, samoin jäätymisajankohdan ja happipitoisuuden välillä. Seurantajärvien aineiston perusteella voidaan karkeasti arvioida, että kuukauden viivästyminen jäätymisessä tai vesipatsaan viilentyminen ennen jäätymistä asteen verran kylmemmäksi merkitsevät noin kolmanneksen korkeampaa happipitoisuutta kevättälvella.

Happea kuitenkin kuluu hyvin erilaisella nopeudella riippuen järven ominaisuuksista, ennen muuta rehevyydestä ja morfologiasta. Esimerkiksi tämän seurannan kohdejärvissä 1 mg/l:n happipitoisuuden kulumiseen meni karuissa järvissä noin kuusi viikkoa ja rehevimmässä järvessä noin kaksi viikkoa kun tarkastellaan päällysvettä. Alusvedessä hapenkulumisnopeus oli huomattavasti edellistä suurempi, noin kolmin-viisinkertainen.

Seurantajärvissä havaittiin hyvin suuri vuosien välinen vaihtelu sekä rehevien että karujen järvien kohdalla. Talviaikaisten näytteenottojen happituloksia tarkasteltaessa tämä on otettava huomioon.

Vedenlaatumuutokset hapettomuuden aikana olivat huomattavan suuret happitilanteeltaan huonoimmassa seurantajärvessä, Kevättömässä. Esimerkiksi kokonaisfosforipitoisuudet kymmenkertaistuivat ja fosfaattifosforipitoisuudet kasvoivat 20-kertaisiksi. Vehmasjärvessä ja Iso-Valkeisessakin tapahtui vastaavissa pitoisuuksissa noin kolminkertaistumista, mutta Kolmisopessa muutokset olivat pienet. Koko seurantajärvijoukon yhteisessä aineistossa todettiin vesipatsaan happitilanteen sekä ravinne- ja rautapitoisuuksien välillä vahvat korrelaatiot. Happitilanteen yhteys alusveden sameuteen ja kiintoainepitoisuuteen oli heikompi.

Kirjallisuus

- Boström, B., Andersen, J.M., Fleischer, S. & Jansson, M. 1988. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hydrobiologia* 170: 229-244.
- Fang, X. & Stefan, H.G. 1997. Simulated climate change effects on dissolved oxygen characteristics in ice-covered lakes. *Ecological Modelling* 103:209-229.
- Correll, D.L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.* 27:261-266.
- Ilmavirta, V. (toim.) 1990. Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet. Yliopistopaino. Helsinki.
- Kettunen, I., Mäkelä, A. & Heinonen, P. 2008. Vesistötietoa näytteenottajille. Ympäristöopas. Suomen ympäristökeskus. Edita Publishing Oy.
- Koli, L. 1984. Kalat ja ympäristö. Teoksessa: Kangasniemi, K. (toim.). Suomen eläimet 3: 22-31.
- Lehtoranta, J. & Gran, V. 2002. Sedimentistä veteen vapautuvat ravinteet Säkylän Pyhäjärvellä. Suomen ympäristökeskuksen moniste 247. Helsinki.
- Malve, O., Laine, M. & Haario, H. 2005. Estimation of winter respiration rates and prediction of oxygen regime in a lake using Bayesian inference. *Ecological Modelling* 182:183-197.
- Nürnberg, G.K. 1995. Quantifying anoxia in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 40(6):1100-1111.
- Robarts, R.D., Waiser, M.J., Arts, M.T & Evans, M.S. 2005. Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 10:167-177.
- SFS-EN 25813:1993 Veden laatu. Liuenneen hapen määrittäminen. Jodometrinen menetelmä (ISO 5813:1983).
- USEPA 1986. Quality criteria for water.
- Chapman, G., 1986. Ambient aquatic life criteria for dissolved oxygen. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA-440/5-86-003
- Westman, K. & Nylund, V. 1985. Rapu ja ravustus. Espoo, WEILIN+GÖÖS. 173 s.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems.* Academic Press.

Julkaisusarjan nimi ja numero Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 12/2010				
Vastuualue Ympäristö ja luonnonvarat				
Tekijät Taina Hammar ja Antti Kanninen		Julkaisuaika Joulukuu 2010		
		Julkaisija Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus		
		Hankkeen rahoittaja/toimeksiantaja		
Julkaisun nimi Talviaikainen happitilanne eräissä Pohjois-Savon järvissä vuosina 1997-2008				
Tiivistelmä Pohjois-Savossa seurattiin talviaikaista happitilannetta vuosina 1997-2008. Seurannan kohteena oli neljä pienehköä järveä (Iso-Valkeinen, Kevätön, Kolmisoppi ja Vehmasjärvi), jotka ovat erityyppisiä syvyydeltään, rehevyytasoltaan ja humuspitoisuudeltaan. Näiden esimerkijärvien oli tarkoitus antaa yleisemminkin viitteitä happitilanteen kehityksestä talven aikana. Alkutilan tulosten perusteella annettiin vuosittain tiedote, jossa arvioitiin happikatojen mahdollisuutta kevättalven kuluessa. Yleisöllä oli myös mahdollisuus seurata happi- ja lämpötilatuloksia Pohjois-Savon ympäristökeskuksen verkkopalvelun kautta. Hapenkulutusnopeus oli rehevimmässä seurantajärvessä kaksinkertainen verrattuna karumpiin ja syvyyden myötä ero vain korostui. Pohjanläheisessä vesikerroksessa 1 mg/l:n happipitoisuus kului karuissa järvissä noin kahdessa viikossa ja reheväsä noin kolmessa päivässä. Vuosien välinen vaihtelu oli kuitenkin hyvin suurta. Vaihtelu oli suurta myös karuissa järvissä. Veden jäätymisajankohdalla ja veden lämpötilalla on merkittävä vaikutus siihen, millainen kevättalven happitilanteesta muodostui. Seurantajärvien aineiston perusteella voidaan karkeasti arvioida, että kuukauden viivästyminen jäätymisessä tai vesipatsaan viilentyminen ennen jäätymistä asteen verran kylmemmäksi merkitsevät noin kolmanneksen korkeampaa happipitoisuutta kevättalvella. Vesipatsaan happitilanteen heikentymisen sekä ravinne- ja rautapitoisuuksien välillä todettiin vahvat yhteydet. Kaikkien järvien aineistossa happitilanteen heikkeneminen johti voimakkaimmin alusveden ammoniumtyppi-, kokonaisfosfori- ja rautapitoisuuksien kasvuun. Pitoisuusmuutokset olivat talven aikana suurimmat rehevimmässä kohdejärvessä, Kevättömässä, jossa kokonaisfosforipitoisuudet keskimäärin kymmenkertaistuivat, fosfaattifosforipitoisuudet kasvoivat keskimäärin 20-kertaisiksi ja rautapitoisuudet yli seitsenkertaisiksi.				
Asiasanat Järvet, happi, ravinteet, talvikerrostuneisuus				
ISBN (painettu)	ISBN (PDF) 978-952-257-194-6	ISSN-L 1798-8055	ISSN (painettu)	ISSN (verkojulkaisu) 1798-8063
Kokonaissivumäärä 39		Kieli Suomi	Hinta (sis. alv 8%)	
Julkaisun myynti/jakaja Julkaisu on saatavana vain verkossa: www.ely-keskus.fi/Pohjois-Savo/julkaisut				
Julkaisun kustantaja				
Painopaikka ja -aika				

DOCUMENTATION PAGE

Publication series and numbers Centre for Economic Development, Transport and the Environment for North Savo, Publications 12/2010				
Area(s) of responsibility Environment and Natural Resources				
Author(s) Taina Hammar, Antti Kanninen		Date December 2010		
		Publisher Centre for Economic Development, Transport and the Environment for North Savo		
		Financier/commissioner		
Title of publication Talviaikainen happitilanne eräissä Pohjois-Savon järvissä vuosina 1997-2008 (Wintertime oxygen regime in some North Savo lakes during the years 1997-2008.)				
Abstract The oxygen regime of ice-covered lakes was monitored in North Savo during the years 1997-2008. The four relatively small target lakes (Iso-Valkeinen, Kevätön, Kolmisoppi and Vehmasjärvi) varied with regard to their depth, trophy and humic content. The data of the monitoring programme was used to predict the possibility of oxygen depletion during the late winter. Some graphs of the data were also published in the internet several times during winter. The oxygen consumption rate of the most eutrophic target lake was twofold compared to the more oligotrophic lakes and in deeper water depths the difference was amplified. In the hypolimnion near the bottom sediment an oxygen concentration of 1 mg/l was consumed on an average in two weeks in the oligotrophic lakes and in three days in the eutrophic lake. However, there was considerable annual variation in the oligotrophic lakes as well. The date of freezing over and the water temperature of ice-covered lakes have a significant impact on the late winter oxygen regime. On the basis of our monitoring data it may be roughly estimated that a delay of one month in the freezing over date or a water mass temperature of one degree Celsius below average will improve the late winter oxygen regime by over 30%. There were strong negative correlations between the oxygen regime and the concentrations of nutrients and iron. The oxygen depletion had a most significant impact on the concentrations of hypolimnetic ammonia, total phosphorus and iron. The water quality changes were most prominent in the eutrophic target lake, where the concentration of phosphorus increased tenfold on an average and the concentration of phosphate even more.				
Keywords Lakes, oxygen, nutrients, winter stratification				
ISBN (print)	ISBN (PDF)	ISSN-L	ISSN (print)	ISSN (online)
	978-952-257-194-6	1798-8055		1798-8063
Number of pages		Language		Price (incl. tax 8 %)
39		Finnish		
For sale at/distributor Publication is only available in internet: www.ely-keskus.fi/Pohjois-Savo/jukaisut				
Financier of publication				
Printing place and date				

Pohjois-Savon elinkeino-, liikenne-
ja ympäristökeskus
PL 2000, 70101 Kuopio
puh. 020 636 0080
www.ely-keskus.fi/pohjois-savo

ISBN (PDF) 978-952-257-194-6

ISSN-L 1798-8055

ISSN (verkkajulkaisu) 1798-8063