



Jukka Sassi & Antton Keto

Järvien kunnostuksen menetelmät

| Hapetuslaitteiden laboratorio-
| ja kenttäkokeet

Järvien kunnostuksen menetelmät

Hapetuslaitteiden laboratorio- ja kenttäkokeet

Jukka Sassi

VTT Tuotteet ja tuotanto

Antton Keto

Suomen ympäristökeskus



ISBN 951-38-6735-8 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6736-6 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT Tuotteet ja tuotanto, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7076

VTT Industriella system, Teknikvägen 12, PB 1705, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7076

VTT Industrial Systems, Tekniikantie 12, P.O.Box 1705, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7076

Toimitus Anni Kääriäinen

Valopaino Oy, Helsinki 2005

Järvien kunnostuksen menetelmät. Hapetuslaitteiden laboratorio- ja kenttäkokeet [Methods for restoration of lakes – laboratory and field trials for aerators]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2307. 88 s. + liitt. 56 s.

Avainsanat waterways, lakes, restoration, aeration, dimensioning, equipment, costs, safety, field tests, laboratory tests

Tiivistelmä

Projektissa mukana olleet kahdeksan laitetta testattiin Suomenojan tutkimusasemalla laboratoriomittakaavan koejärjestelyillä. Kaikkien laitteiden mittaustulokset käsiteltiin yhdenmukaisesti jäteveden ilmastuksessa käytettävällä periaatteella. Laitteille määriteltiin laboratorioskokeiden tulosten perusteella ilmastusteho (OTR) eli ilmastuksen tuotto ja ominaisilmastusteho (AE) eli ilmastuksen hyötysuhde. Laitteiden tuotot vaihtelivat välillä 3 ja 110 kgO₂/d hyötysuhteiden vaihdella välillä 0,2 ja 1,5 kgO₂/kWh (T = 4 °C, lämpötilakerroin 1,024). Laitteiden mitatut ottotehot vaihtelivat välillä 0,2 ja 10 kW.

Kenttäkokeissa seurattiin kolmen laitteen toimintaa kolmella eri kohdejärvellä ja määriteltiin laitteen vaikutus veden happipitoisuuteen. Kaikkien kolmen laitteen osalta voidaan todeta, että niiden käyttö joko nosti veden happipitoisuutta tai hidasti happipitoisuuden pienenemistä. Kenttäkokeissa havainnointiin lisäksi laitteen käyttövarmuuteen liittyviä asioita sekä laitteen toiminnan vaikutusta jääolosuhteisiin.

Hapetuksen menetelmävalintaan ja laitemitoitukseen vaikuttaa merkittävästi järven kerrostuneisuus. Matalissa ja kesäkerrostumattomissa järvissä talven hapetustarve voidaan järjestää ottamalla lisähapetta ilmasta veden vaakakierrätyksellä tai siihen yhdistetyllä hapetuksella. Matalissa järvissä, joissa esiintyy epämääräistä tai vaihtelevaa kesäkerrostuneisuutta, voidaan talvella käyttää hapetusta tai kierrätyshapetusta. Kesällä voidaan säätää kerrostuneisuutta pakotetuilla välikierrroilla, estää kerroksellisuus tai hapettaa alusvettä. Syvissä järvissä, joissa esiintyy kesäinen lämpötilakerrostuneisuus, voidaan käyttää alusveden hapetusta tai kierrätyshapetusta. Hapetuksessa käytettävän laitteiston valintaan vaikuttavat laitteen riittävä tuotto suhteessa kohdejärven happitarpeeseen, käytöstä aiheutuvat sivuvaikutukset, hyötysuhde, ylläpitokustannukset sekä hankintahinta. Laitteiston riittävä tuotto on perusedellytys onnistuneelle hapetukselle.

Hapetuksen kustannukset voidaan arvioida määrittelemällä joko veteen siirrettävän happimäärän hinta tai hapetuksen vuosikustannus hapetettua pinta-alaa kohti. Yksikkökustannukset vaihtelevat ilmapuhallusta käyttävissä laitteissa välillä 0,1 ja 0,4 €/kgO₂ ja kierrätyshapetuksessa välillä 0,05 ja 0,2 €/kgO₂. Järven pinta-alaan suhteutettuna vuosittaisten kustannuksen vaihteluväli on normaalisti 40–200 €/ha. Turvamääräysten mukaisesti hyväksytysti suoritettujen sähköistyksen hinta vaihtelee 2 000 ja 3 000 euron välillä.

lä. Kokonaiskustannukset vaihtelevat merkittävästi mm. kohteen pinta-alan, ilmastustarpeen ja käytettävän laitteen hyötysuhteen mukaan ja ovat aina tapauskohtaisia.

Hapetuslaitteita käytettäessä laitteiden toimintaympäristö edellyttää erityistä huolellisuutta ja käyttöympäristön erityispiirteiden huomioimista sähköasennusten tekemisessä. Sellaisten hapetuslaitteiden kohdalla, jotka tekevät avannon tai heikentävät merkittävästi jään paksuutta laitteen vaikutusalueella, on kiinnitettävä huomiota ilmastusalueen huolelliseen merkitsemiseen. Hapetuksesta on aiheellista varoittaa järvellä liikkujia myös rannalle kiinnitettävillä varoitustauluilla. Avannon reunalle voidaan tuoda pelastusrenkaiden lisäksi myös pelastusvene hätätilanteiden varalle.

Onnistunut hapetus vaatii runsaasti tietoa ja erikoisosaamista sekä näiden yhdistämistä kyseessä olevan kunnostuskohteen tilanteeseen. Kunnostuksen suunnittelussa eri alojen ammattilaisten tietämyksen hyödyntäminen auttaa tavoitteiden saavuttamisessa. Yhdistämällä hapetus muiden rehevyyttä vähentävien keinojen kanssa ja samanaikaisesti vähentämällä järven ulkoista kuormitusta on mahdollista saavuttaa pitkäkestoisia ja järven virkistys- ja vapaa-ajankäyttöarvoja parantavia lopputuloksia.

Alkusanat

Talvella 2003 koettiin monilla järvillä poikkeuksellisen runsaita kalakuolemia, jotka olivat seurausta järvien huonosta happitilanteesta. Happikadon seurauksena kalakuolemia koettiin myös sellaisilla järvillä, joissa normaalitalvina happiongelmiä ei ole ilmennyt. Monista järvien pelastusoperaatioista havaittiin, että tiedot hapetustarpeen määrittämisestä ja järviokohtaisen hapetuksen suunnittelusta olivat puutteelliset. Tämän seurauksena pidettiin järvi-ilmastusta käsittelevä seminaari Suomen ympäristökeskuksessa marraskuussa 2003.

Seminaarin tuloksena helmikuussa 2004 käynnistyi tämä projekti, jossa testattiin laboratoriomittakaavassa yhteensä viisi kaupallisesti saatavissa olevaa hapetuslaitetta sekä omatoimihapetuksessa käytetyn lietepumpun kolme eri yhdistelmää. Alkuperäisenä tavoitteena oli saada projektiin mukaan kaikki Suomesta kaupallisesti saatavilla olevat järvien hapetukseen soveltuvat laitteet, mutta valitettavasti kaikkien yritysten resurssit eivät riittäneet hankkeeseen osallistumiseen.

Laboratoriokokeet yhteensä kahdeksalla eri laitteella suoritettiin Suomen ympäristökeskuksen Suomenojan tutkimusasemalla Espoossa touko-joulukuussa 2004. Laboratoriokokeiden lisäksi talvella 2005 seurattiin kolmen laitteen toimintaa kolmella eri järvellä. Laittekokeiden lisäksi projektin tavoitteeksi määriteltiin mittaus- ja tulostenkäsittelymenetelmien kehittäminen, suositusten laatiminen järvien hapetukseen sekä eri osapuolten yhteistyön syventäminen hapetuslaitteiden tuotekehityksessä ja testauksessa.

Projektin rahoittajat olivat ympäristöministeriö, Suomen ympäristökeskus, maa- ja metsätalousministeriö, Tekes, Turun Seudun Vesi Oy, mukana olleet laitevalmistajat sekä VTT. Projektille perustettiin johtoryhmä, johon kuuluivat Erkki Saarijärvi (Vesi-Eko Oy, puheenjohtaja), Asko Vesanto (Tekes), Jorma Rytönen ja Jukka Sassi (VTT Tuotteet ja tuotanto), Antton Keto (Suomen ympäristökeskus), Harri Sommarlund (Mik-Rip Teräs Oy), Aki Artimo (Turun Seudun Vesi Oy) sekä Jarmo Vääriskoski (Uudenmaan ympäristökeskus).

Kirjoittajat haluavat lausua parhaat kiitoksensa kaikille projektin osapuolille hyvässä ja rakentavassa hengessä sujuneesta yhteistyöstä. Erityskiitokset Jori Hellgrenille Uudenmaan ympäristökeskuksesta ja Aarre Arrajoelle Nummi-Pusulasta avustamisessa kenttämittausten suorittamisessa sekä Esko Laksolle, Markku Pelkoselle, Matti K. Lappalaiselle sekä ympäristöhallinnon kunnostusasiantuntijoille arvokkaista asiantuntija-arvioista.

Espoo, syyskuu 2005

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	8
1. Johdanto.....	9
2. Tutkimushankkeen tavoite.....	10
3. Hapetus järven kunnostusmenetelmänä.....	11
3.1 Yleistä.....	11
3.2 Hapetustarpeet Suomessa.....	11
3.3 Järven hapellisuuden biologis-kemiallinen merkitys.....	12
4. Laboratoriokokeet.....	13
4.1 Yleistä.....	13
4.2 Tavoitteet.....	13
4.3 Koejärjestelyt.....	13
4.4 Hapensiirron teoreettinen tarkastelu.....	15
4.5 Laitteiden toimintaperiaatteet ja tekniset tiedot.....	18
4.5.1 Aire-O ₂ -hapetuslaite.....	18
4.5.2 Mik-Rip Oy:n Mikrox-hapetin.....	19
4.5.3 Waterix Mini ja Micro -ilmastuslaitteet.....	19
4.5.4 Visiox-ilmastin.....	20
4.5.5 Lietepumppu.....	21
4.6 Laboratoriokokeiden tulokset.....	24
4.6.1 Aire-O ₂ -hapetuslaite.....	24
4.6.2 Mikrox-hapetin.....	25
4.6.3 Mini ja Micro -ilmastuslaitteet.....	27
4.6.4 Visiox-ilmastin.....	30
4.6.5 Lietepumppu.....	32
4.7 Virhetarkastelu.....	37
4.8 Yhteenvedo laboratorioskokeista.....	39
5. Kenttäkokeet.....	43
5.1 Yleistä.....	43
5.2 Tavoitteet.....	43
5.3 Kohdejärvet.....	43
5.3.1 Pitkäjärvi, Nummi-Pusula.....	43
5.3.2 Ahmonlampi, Siilinjärvi.....	44

5.3.3	Ruutinlampi, Nummi-Pusula.....	46
5.4	Havainnot	46
5.4.1	Yleistä	46
5.4.2	Mini-ilmastuslaite	47
5.4.3	Visiox-ilmastin.....	58
5.4.4	Lietepumppu	65
5.5	Yhteenvedo kenttäkokeiden havainnoista.....	70
5.5.1	Mini-ilmastuslaite	70
5.5.2	Visiox-ilmastin.....	72
5.5.3	Lietepumppu	73
6.	Hapetuksen menetelmävalinta ja laitemitoitus	74
6.1	Matalat ja kesäkerrostumattomat järvet.....	74
6.2	Syvät järvet.....	75
6.3	Matalahkot ja epämääräisesti kesäkerrostuvat järvet	78
7.	Laitteiston valintakriteerit ja optimaalinen käyttötapa	80
8.	Kustannukset.....	81
9.	Turvallisuusnäkökohdat.....	82
9.1	Sähköturvallisuus	82
9.2	Jääolosuhteiden muuttuminen	83
10.	Yhteenvedo ja suositukset hapetuksen käytöstä järvien kunnostuksessa.....	84
	Lähdeviitteet.....	87
 Liitteet		
Liite 1	Hapen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa, paine 760 torr	
Liite 2	Aire-O ₂ -hapetuslaitteen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta	
Liite 3	Mikrox-hapettimen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta	
Liite 4	Waterix Oy:n Mini ja Micro -ilmastuslaitteiden ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta	
Liite 5	Vesi-Eko Oy:n Visiox-ilmastuslaitteen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta	
Liite 6	Lietepumpun eri yhdistelmien ilmastustehojen ja ominaisilmastustehojen laskenta	
Liite 7	Kenttäkokeiden havaintopöytäkirja	
Liite 8	Havainnot Pitkäjärven kokeista	
Liite 9	Havainnot jään paksuuksista Ahmonlammen kokeista	
Liite 10	Lietepumppu + hajotinlevy -yhdistelmän happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Ruutinlammella	

Symboliluettelo

AE_0 = ominaisilmastusteho hapettomaan veteen [kgO_2/kWh]

Ba = mikrobiaktiivisuuden kohoamiskerroin, yleensä 1,5...2–4 siten, että kesällä alusveden lämpötilan kohotessa Ba on suuri eli 2–4 ja talvella pieni eli 1,5–2

C = kaasun pitoisuus vedessä mittaushetkellä [mg/l]

C_0 = kaasun pitoisuus nesteessä alkutilanteessa [mg/l]

C^* = kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mittauslämpötilassa [mg/l]

dO_2/dt = havaittu alusveden happipitoisuuden alenemisnopeus [mg/l/d]

HT = todellinen hapenkulutus [kgO_2]

K_{1a} = kokonaishapensiirtokerroin [$1/\text{aika}$]

$KrdO_2/dt$ = kriittinen alusveden happipitoisuuden alenemisnopeus [mg/l/d]

$m_{Na_2SO_3}$ = tarvittavan natriumsulfiitin määrä (g)

$M_{Na_2SO_3}$ = natriumsulfiitin molekyylimassa (g/mol)

M_{O_2} = hapen molekyylimassa (g/mol)

OTR_0 = ilmastusteho hapettomaan veteen [kgO_2/d]

P = käytetty teho [kW]

t = aika, jonka laite oli käynnissä [s]

V_{allas} = koealtaan vesitilavuus (m^3)

Vh = alusveden tai tarkasteltavan altaan tilavuus [$1\ 000\ \text{m}^3$]

1. Johdanto

Talvi 2003 muistetaan poikkeuksellisen runsaista kalakuolemista, jotka olivat seurausta järvien heikosta happitilanteesta. Talven happikato oli poikkeuksellisten sää- ja vesiolojen takia koetellut useita sellaisia järviä, joissa happiongelmat ovat yleensä vähäisiä. Talvi 2003 antoi paljon uutta ajateltavaa, koska kalakuolemat saattavat vahvistaa epäedullisia kehitysprosesseja, joista merkittävin on heikkokuntoisten ja epäedullisten kalastorakenteiden kehittyminen vieläkin epäedullisemmiksi. Tämä taas saattaa johtaa sinileväkukintoihin.

Talven 2003 lukuisista järvien pelastusoperaatioista voitiin havaita, että tuntemus hapetustarpeesta ja hapetuslaitteiden tehovaatimuksista sekä tarkoituksenmukaisen laitteen valinnasta oli hyvin kirjavaa, eikä mitään selkeää ohjeistusta järvien hapetuksesta ole olemassa. Lisäksi laitevalmistajien ilmoittamista ilmastustehoista ei aina ilmene, miten ja missä olosuhteissa ne oli määritelty.

Tässä julkaisussa esitetään mukana olleiden laitteiden toimintaperiaatteet ja tekniset tiedot, yhteenveto kaikkien laitteiden laboratoriotestien tuloksista sekä tulosten virhetarkastelu. Kenttäkokeita käsittelevässä osuudessa esitetään kenttäkokeisiin valittujen kolmen laitteen osalta niiden asennukseen ja käyttöön liittyviä kokemuksia sekä mittauksiin perustuvia havaintoja hapetuksen vaikutuksesta veden happipitoisuuksiin sekä jääolosuhteisiin.

2. Tutkimushankkeen tavoite

Tutkimushankkeen tavoitteena oli 1) selvittää mukana olleiden laitteiden ilmastus- ja ominaisilmastustehot (tuotto ja hyötysuhde) laboratorio-olosuhteissa, 2) kehittää laitekokeisiin soveltuvaa mittaus- ja tulostenkäsittelyjärjestelmää, 3) luoda suosituksia hapetuksen käytölle järvien kunnostusmenetelmänä sekä 4) syventää eri osapuolten yhteistyötä hapetuslaitteiden tuotekehitys- ja testaustoiminnassa.

3. Hapetus järven kunnostusmenetelmänä

3.1 Yleistä

Hapettamiselle on kaksi keskeistä syytä: 1) hapetus on tärkeä osa laajakäsitteistä biomanipulaatiota, johon ravintoketjun ohjailun ja kunnostuksen lisäksi kuuluu myös eliöiden kemiallis-fysikaalisen elinympäristön vaaliminen, ja toisaalta 2) hapetus hillitsee fosforin sisäistä kuormitusta, mikä liittyy jälleen yhteen laajakäsitteisen biomanipulaation kanssa.

Hapetus tarkoittaa järven koko vesimassan tai alusveden happipitoisuuden lisäämistä. Käytännössä tähän on muutamia perusvaihtoehtoja:

- hapen liuottaminen ilmasta (tai happisäiliöstä) veteen
- hapekkaan veden johtaminen vähähappiseen alusveteen
- hapen lisääminen veteen kemikaalina.

Hapetustapaa voidaan täsmentää tarvittavilla lisämääreillä. Johdettaessa hapekasta päällysvettä järven alusveteen, voidaan puhua alusveden kierrätyshapetuksesta. Kun kesäinen lämpötilakerrostuneisuus estetään tai puretaan, voidaan puhua täyskiertohapetuksesta.

Puhekielessä yleisesti käytetty termi ”ilmastus” on varsinkin talvella yleinen hapetustapa. Järveä ilmastettaessa happea siirtyy ilmasta veteen ja siinä ohessa muita kaasuja ilmaan tai veteen sen mukaan, onko vedessä ali- tai ylikyllästystila kyseisestä kaasusta (Lappalainen & Lakso, 2005).

3.2 Hapetustarpeet Suomessa

Suomen järvistä jopa neljänneksessä on talvella huono happitilanne pohjan lähellä. Vähähappisia järviä, joiden syvänteessä mitattu talven minimihappipitoisuus on alle 11 % kyllästysarvosta, on maassamme pari tuhatta (Lappalainen, 1990). Niiden keskikoko on noin 60 ha ja yhteispinta-ala yli 1 000 km². Jos mukaan otetaan hyvin pieniä järviä, vähähappisten järvien lukumäärä nousee voimakkaasti mutta yhteispinta-ala suhteellisesti vähemmän.

Turusen ja Äystön (2000) koko maan kattavan kunnostustarveselvityksen mukaan rehevyysoongelmista kärsiviä järviä on 945 kpl. Niiden keskikoko on 4,3 km². Karkeasti voidaan arvioida, että näistä järvistä 25 % kärsii vajaahappisuudesta, joka vaatisi jonkinlaista hapetushoitoa. Näin päädytään 1 000 km²:n tarvearvioon.

Äystön (1997) mukaan hapettamista on käytetty Suomessa vuosina 1986–95 yhteensä 153 järven kunnostuksessa. Tällä hetkellä luku lienee noin 200. Edellä esitettyjen arvioiden mukaan järvien hapetuksia on tehty siten noin 20 %:lle kaikista kohteista, joissa hapetustarvetta arvioidaan olevan (Lappalainen & Lakso, 2005). Saarisen (2003) selvityksen mukaan talvella 2002–2003 Uudellamaalla havaittiin 83 järvellä happikadosta johtuva kalakuolema.

3.3 Järven hapellisuuden biologis-kemiallinen merkitys

Vesistön hapettaminen on hiljalleen yleistynyt sekä Suomessa että muualla. Mm. Ashley (2001) pitää järvien hapettamista tulevaisuudessa yleistyvänä kunnostus- ja hoitokeinona. Kunnostusmenetelmän tarkoituksena on järven alusveteen ja pohjaan asti suunnatun hapetuksen avulla

- elvyttää alusveden ja pohjan aerobinen hajotus- ja kulutustoiminta
- turvata kalojen ja niiden ravintoeläinten elämän edellytyksiä
- estää anaerobisia prosesseja sekä haitallisten tai myrkyllisten yhdisteiden, kuten ammoniumin, rikkivedyn ja metaanin, syntymistä
- edistää ammoniumtypen hapettumista ja typen haihtumista kaasuna ilmaan eli parantaa typpikiertoa
- purkaa ylikuormitetun järven pohjalle kertyneitä haitallisia orgaanisia ylijäämiä eli lisää tervettä hiilen kiertoa järvessä
- vähentää fosforin sisäistä kuormitusta ja sen aiheuttamia rehevyshaittoja eli hillitää fosforin liukenemista pohjasedimentistä takaisin veteen
- alentaa raakavesialtaissa liukoisen raudan ja mangaanin pitoisuuksia.

Järvihapetuksen perusideana on turvata aerobisten kuluttaja- ja hajottajaorganismien hapensaanti ja hajotuskyky sekä siten mm. edistää hiilen ja typen tervettä kiertoa mutta hidastaa järvessä tapahtuvaa liiallista fosforin kiertoa.

Metaanikaasutuotannon vähentäminen pohjasedimentissä alentaa sisäistä kuormitusta pienentämällä sedimentin ravinteikkaiden pintahiukkasten flotaationousua kaasukuplien mukana päällysveteen. Huonosti veteen liukeneva metaani muodostaa helposti flotatointia kuplia toisin kuin hiilidioksidi, joka liukenee helposti veteen eikä muodosta kuplia.

Koko vesimassan tehokkaalla kierrätysvapetuksella on pyritty myös alentamaan kasviplanktonin biomassaa ja vaihtamaan sinilevät muihin leviin. Levää sisältävän vesimassan joutuessa vesikierron vaikutuksesta syvälle auringonvalon ulottumattomiin pysähtyy levän kasvu (Lappalainen & Lakso, 2005).

4. Laboratoriokokeet

4.1 Yleistä

Laboratoriokokeet suoritettiin touko-joulukuussa 2004 Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) Suomenojan tutkimusasemalla Espoossa. Kokeet suoritettiin kohdassa 4.3 esitettävien periaatteiden mukaisesti. Kokeissa tutkittiin yhteensä kahdeksan eri ilmastuslaitteen tehokkuutta laboratorio-olosuhteissa. Tutkitut laitteet olivat Claritec Oy:n maa-hantuoma Aire-O₂-hapetuslaite, Mik-Rip Teräs Oy:n Mikrox-hapetin, Vesi-Eko Oy:n Visiox-ilmastin sekä Waterix Oy:n Mini ja Micro -ilmastimet. Varsinaisten ilmastuslaitteiden lisäksi tutkimuksessa oli mukana ns. omatoimi-ilmastuksessa paljon käytetty lietepumppu, josta testattiin kolme eri yhdistelmää: lietepumppu + letku, lietepumppu + hajotinlevy sekä lietepumppu + ejektori. Laittevalmistajat osallistuivat kokeisiin mahdollisuuksien mukaan mm. määrittelemällä kokeissa käytetyn laitteiston alkuasetukset.

Tavoitteena oli saada projektiin mukaan kaikki Suomesta kaupallisesti saatavilla olevat järvi-ilmastukseen soveltuvat laitteet, mutta valitettavasti kaikkien yritysten resurssit eivät riittäneet hankkeeseen osallistumiseen. Projektissa mukana olleiden laitteiden lisäksi saatavilla ovat ainakin Lainpelto Oy:n valmistama Medusa-ilmastin (<http://www.lainpelto.fi/>), Suomen Ekokuppi Oy:n edustama Ecoxy-hapetin (<http://guns.connect.fi/innoplaza/EkoKuppi/hapetin.html>), Tamflow Oy:n markkinoima Fuchs-ilmastin (<http://www.fuchs-germany.com/>) sekä Nautikulma Oy:n markkinoima Kasco-virtauksenkehitin (<http://www.nautikulma.fi/kasco.htm>).

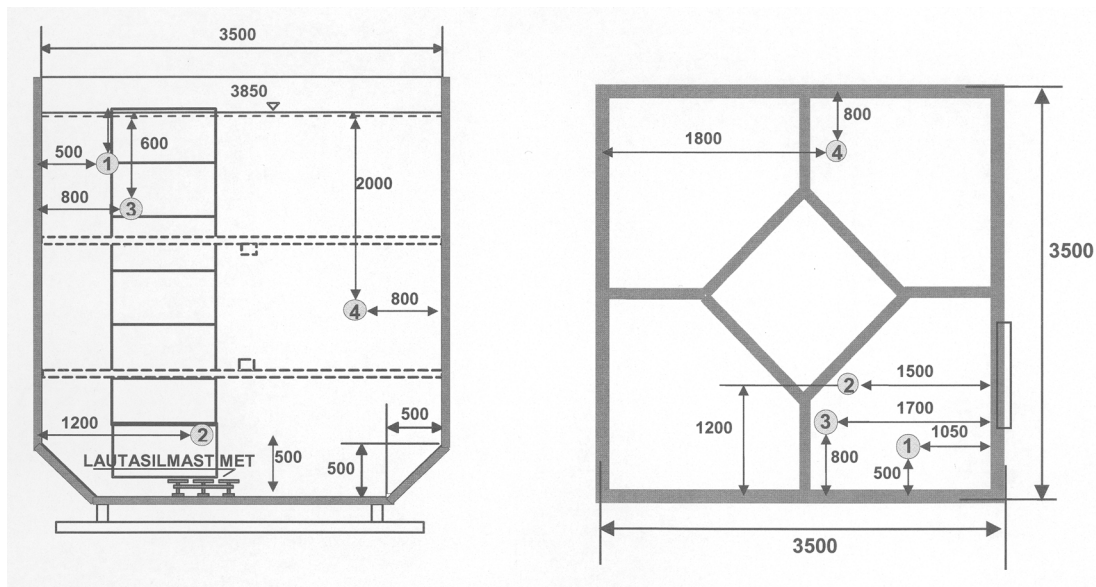
4.2 Tavoitteet

Laboratoriokokeiden tavoitteena oli selvittää laitteiden ilmastusteho eli tuotto ja ominaisteho eli hyötysuhde sekä löytää ideoita laite- ja tuotekehitykseen ja konsultointipalvelujen tuottamiseen. Lisäksi laboratoriokokeiden perusteella valittiin kolme laitetta talvella 2005 suoritettuihin kenttäkokeisiin. Laitteiden tehomääritysten lisäksi tavoitteena oli kehittää ilmastuslaitteiden testaukseen soveltuva mittaus- ja tulostenkäsittelyjärjestelmää.

4.3 Koejärjestelyt

Tilaaaja asensi laitteet puhtasvesialtaaseen, jonka tilavuus on 50 m³. Vesimäärä altaassa oli 46 m³ ja veden pinnankorkeus altaan pohjasta 3,85 m. Kaikki projektissa mukana olleet laitteet testattiin samassa altaassa.

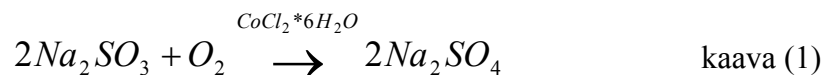
Happipitoisuuden muutosta seurattiin happimittareilla, jotka oli sijoitettu altaan eri kohtiin ja eri syvyyksiin kuvan 1 osoittamalla tavalla. Mittarit kalibroitiin ennen kokeita valmistajan ohjeiden mukaisesti. Mittarien paikat pyrittiin valitsemaan siten, että kokeen aikana voidaan havainnoida happipitoisuuden muutoksia eri puolilla allasta. Altaan tukirakenteiden ja kulkusillan sijainnin vuoksi mittareita ei ollut mahdollista sijoittaa altaan takaosaan.



Kuva 1. Antureiden sijainti koealtaassa, allas edestä (vasen kuva) ja ylhäältä (oikea kuva) katsottuna.

Altaan veden tekeminen hapettomaksi

Koealtaan vesi tehtiin hapettomaksi kemiallisesti natriumsulfiitilla. Reaktiossa natriumsulfiitti reagoi happimolekyylin kanssa ja muuttuu natriumsulfaatiksi (kaava 1). Katalyyttinä reaktiossa käytettiin kobolttikloridia.



Käytettävän natriumsulfiitin määrä riippui veden happipitoisuudesta ja altaan täyttöasteesta. Sopiva annos laskettiin jokaista koetta varten erikseen (kaava 2). Katalyyttinä toiminutta kiteistä kobolttikloridia liuotettiin 20 g 10 litraan kuumaa vettä ja kaadettiin eri puolille allasta. Jauheen muodossa oleva natriumsulfiitti lisättiin 500–1 000 g:n annoksina. Yhden liuennon happikilon poistamiseksi vedestä tarvittiin 8 kg natriumsulfiittia. Ensin jauhe liuotettiin 50 l:n saaviin lämmintä vettä ja annokset kaadettiin eri puolille koeallasta. Altaan vettä sekoitettiin uppopumpulla, tyypellä tai ilmastamia käytämällä (ilman otto pois päältä) aineen tasaisen leviämisen aikaansaamiseksi.

$$m_{Na_2SO_3} = \frac{2 * M_{Na_2SO_3}}{M_{O_2}} * c_{O_2} * V_{allas} \quad \text{kaava (2), missä}$$

$m_{Na_2SO_3}$ = tarvittavan natriumsulfiitin määrä (g)

$M_{Na_2SO_3}$ = natriumsulfiitin molekyylimassa (g/mol)

M_{O_2} = hapen molekyylimassa (g/mol)

c_{O_2} = hapen konsentraatio koealtaassa (mg/l)

V_{allas} = koealtaan vesitilavuus (m³).

Natriumsulfiitin annettiin reagoida noin puoli tuntia, minkä jälkeen tarkistettiin happimittareilla hapen riittävän alhainen taso sekä altaan pohjassa että pinnassa kokeen aloitusta varten.

4.4 Hapensiirron teoreettinen tarkastelu

Lähteissä Pelkonen (1989) ja Lappalainen (2004) käsitellään hapensiirron perusriippuvuuksia. Termit $K_L a$ (kokonaishapensiirtokerroin) ja C^* (kaasun kyllästyspitoisuus nesteessä) ovat hapensiirtojärjestelmän perustunnusluvut. Kokonaishapensiirtokertoimeen ja kyllästyspitoisuuteen vaikuttavat ilmastusjärjestelmän ja altaan vesisyvyyden ja geometrian lisäksi mm. veden laatu ja lämpötila.

Kokonaishapensiirtokerroin ja kaasun kyllästyspitoisuus ovat molemmat riippuvaisia lämpötilasta. Kokonaishapensiirtokerroin voidaan laskea seuraavasti puhdasvesikokeissa perinteisesti käytetyllä muuttuvan pitoisuuden menetelmällä:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a(C^* - C) - R \quad \text{kaava (3),}$$

joka saadaan integroimalla muotoon (oletus: hapenkulutus $R = 0$)

$$C = C^* - (C^* - C_0) \cdot e^{-K_L a t} \quad \text{kaava (4).}$$

Kaava (4) voidaan edelleen muuttaa muotoon

$$\frac{(C^* - C)}{(C^* - C_0)} = e^{-K_L a t} \quad \text{kaava (5)}$$

ja edelleen muotoon

$$\log \frac{(C^* - C)}{C^* - C_0} = -K_L a \cdot t \cdot \log e \quad \text{kaava (6).}$$

Kun $\log e = -0,4343$ (Neperin luku $e = 2,718$), saadaan kaava $K_L a$:n laskemiseksi muotoon

$$-K_L a = \frac{\log \frac{(C^* - C)}{(C^* - C_0)}}{-0,4343 \cdot t} \quad \text{kaava (7), missä}$$

- $K_L a$ = kokonaishapensiirtokerroin [1/aika]
- C^* = kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mittauslämpötilassa [mg/l]
- C = kaasun pitoisuus vedessä mittaushetkellä [mg/l]
- C_0 = kaasun pitoisuus nesteessä alkutilanteessa [mg/l]
- t = aika, jonka laite oli käynnissä [s].

Kokonaishapensiirtokerroin on koeolosuhteisiin sidottu kerroin, jonka avulla määritetään tutkittavalle ilmastuslaitteelle ominaiset tunnusluvut, ennen kaikkea ilmastusteho OTR [kgO₂/d] ja ominaisilmastusteho AE [kgO₂/kWh].

Kun kokonaishapensiirtokerroin on määritetty, voidaan määritellä mittauslämpötilassa laitteen maksimaalinen ilmastusteho OTR₀ (oxygen transfer rate) hapettomaan veteen ja maksimaalinen ominaisteho AE₀ (aeration efficiency) hapettomaan veteen seuraavasti:

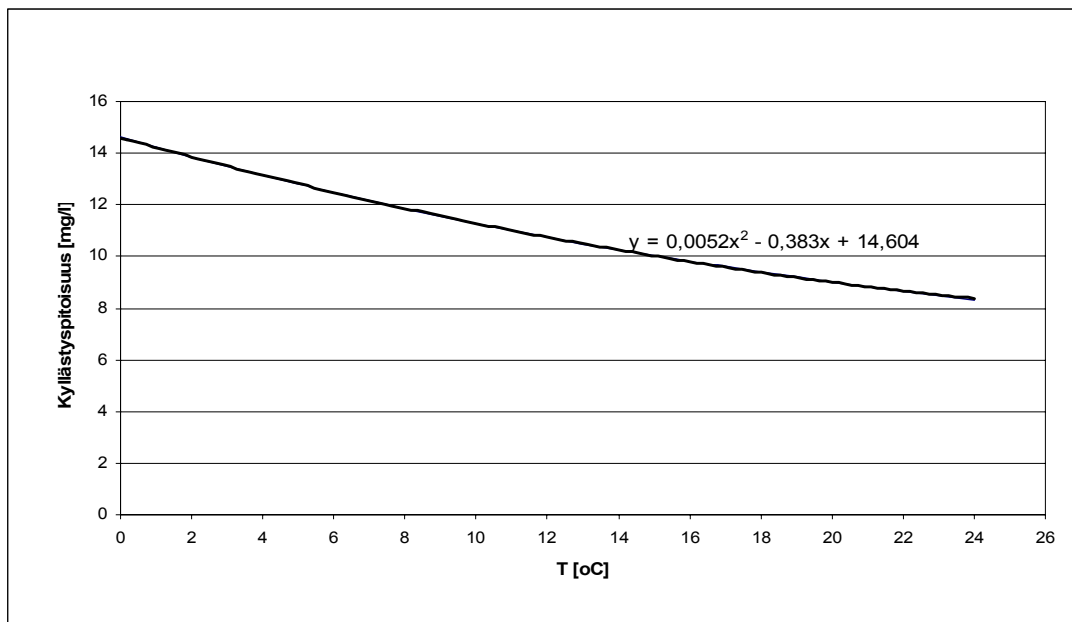
$$OTR_0 = K_L a \cdot C^* \cdot V \quad \text{kaava (8)}$$

$$AE_0 = \frac{OTR_0}{P} \quad \text{kaava (9), missä}$$

- OTR₀ = ilmastusteho hapettomaan veteen [kgO₂/d]
- AE₀ = ominaisilmastusteho hapettomaan veteen [kgO₂/kWh]
- V = altaan tilavuus [m³]
- P = käytetty teho [kW].

Käytetyn tehon määrittelyssä tulee huomioida kaikki käsittelylaitteen käyttöön vaikuttavat seikat, esim. mahdollisen paineilman tuottamiseen vaadittava teho. Lisäksi tulee mainita, onko kyseessä akseliteho vai ottoteho.

Veden kyllästyshappipitoisuus C^* pienenee veden lämmitessä, ja siten veden lämpeneminen pienentää laitteen ilmastustehoja (kuva 2).



Kuva 2. Hapen kyllästyspitoisuudet vedessä eri lämpötiloissa (FAO, 1984, liite 1).

Hapen siirtyminen ilmasta veteen on siis maksimaalinen veden ollessa hapetonta. Kun vedessä on tietty määrä happea liuenneena, ovat laitteen ilmastus- ja ominaisilmastusteho pienempiä verrattuna hapettomaan veteen.

$$OTR_C = K_L a \cdot (C^* - C) \cdot V \quad \text{kaava (10)}$$

$$AE_C = \frac{OTR_C}{P} \quad \text{kaava (11), missä}$$

- OTR_C = ilmastusteho veteen, jossa mitattu happipitoisuus C [kgO_2/d]
- C^* = kaasun kyllästyspitoisuus vedessä mitatussa mittauslämpötilassa [mg/l]
- AE_C = ominaisilmastusteho veteen, jossa happipitoisuus C [kgO_2/kWh]
- V = altaan tilavuus [m^3]
- P = käytetty teho [kW].

Lämpötila vaikuttaa mm. hapen diffuusionopeuteen, veden viskositeettiin ja pintajännitykseen. Lämpötilan vaikutusta hapensiirtokertoimeen kuvataan yleensä geometrisellä (Θ_G , kaava 12) tai aritmeettisellä korjauskertoimella (Θ_A , kaava 13):

$$K_L a_T = K_L a_{20} \Theta_G^{(T-20)} \quad \text{kaava (12)}$$

$$K_L a_T = K_L a_{20} + \Theta_A (T - 20) \quad \text{kaava (13).}$$

Yleensä käytetään geometristä lämpötilakorjausvakiota ja ASCE:n standardin mukaan sen arvona pidetään 1,024, ellei muuta ole kokeellisesti osoitettu. Sekoitustehojen mukaan on lämpötilakorjausvakiolle saatu myös arvoja 1,011–1,027 (Pelkonen, 1989).

4.5 Laitteiden toimintaperiaatteet ja tekniset tiedot

4.5.1 Aire-O₂-hapetuslaite

Aire-O₂-hapetuslaite esitellään kuvassa 3. Pyörivä potkuri (1) pakottaa veden ulospäin akselin (4) suuntaisesti suurella virtausnopeudella ja aiheuttaa näin imuvaikutuksen, jonka seurauksena vedenpinnan yläpuolella oleva ilma kulkeutuu imuaukkojen (3) kautta ontton akselin läpi veteen. Ilma sekoittuu veteen viuhkana (2), jossa ilmakuplien halkaisija on noin 2 mm. Laitteen yläosaan kiinnitetään veden yläpuolelle jäävä moottori. Laite asennetaan kellukkeiden varaan noin 45 asteen kulmaan. Pintahapettimena Aire-O₂ ei pura järven kerrostuneisuutta.

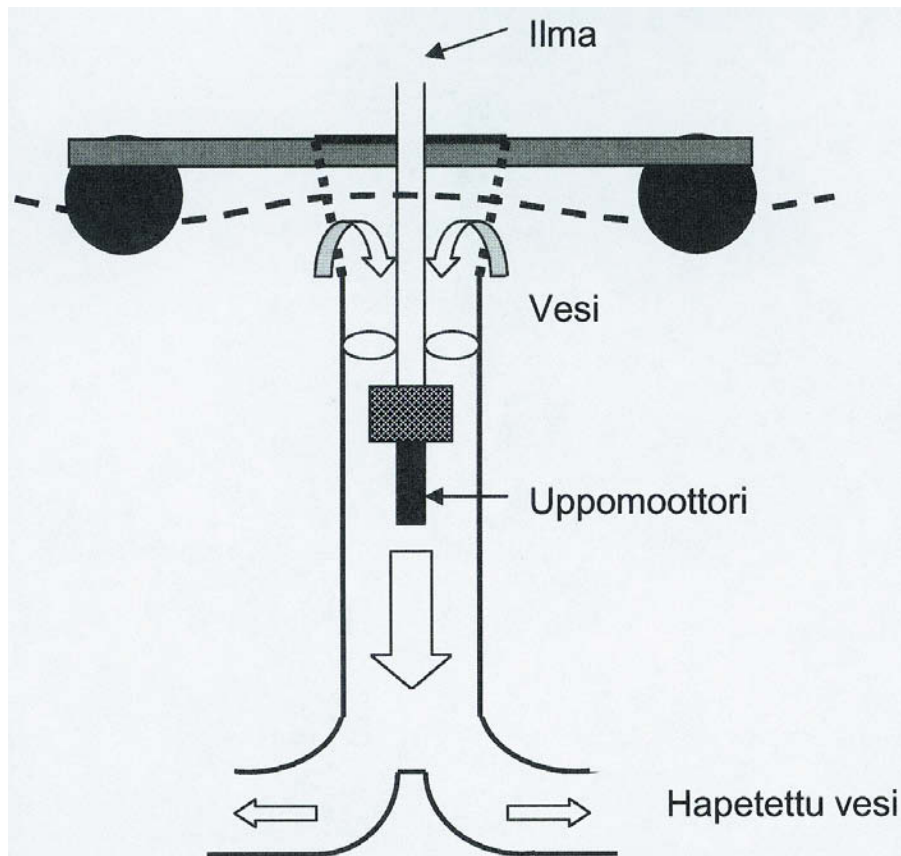


Kuva 3. Aire-O₂-hapetuslaitteen toimintaperiaate (kuva: <http://www.aireo2.com>).

Laitteen kokonaispituus on 1,14 m ja moottoriosan halkaisija 35 cm. Laitteen paino moottorin (SEW 2,5 kW) kanssa on arviolta 40–50 kg. Moottorin ja runko-osan lisäksi laitteen asentamiseen tarvitaan ponttonit sekä kiinnitysraudat, jolloin yhteispaino on arviolta 120 kg. Aire-O₂-laitteiden valmistaja on Aeration Industries International, Inc. (USA), ja laitteiden teholuokka (Aire-O₂ 275 -sarja) voidaan valita väliltä 1,5 ja 5,5 kW. Testilaitte oli varustettu 2,5 kW:n moottorilla. Laitteen maahantuoja on Claritek Oy.

4.5.2 Mik-Rip Oy:n Mikrox-hapetin

Mikrox-hapetin on kehitetty Neutrox-hapettimesta, ja se toimii pääsääntöisesti samalla periaatteella. Hapetin ottaa pintavettä, jonka se hapettaa ja johtaa pohjan lähelle. Samalla laite purkaa järven kerrostuneisuuden. Laite käsittää käsiteltävän veden yläpuolelle nousevan imuputken ja sen veteen johtavan alaosaan yhtyvän suuttimen. Suutinta pyörittää pystysuunnassa suuttimen alapuolelle sijoitettu uppomoottori (kuva 4).



Kuva 4. Mikrox -hapettimen toimintaperiaate (kuva: Mik-Rip Teräs Oy).

Hapetin soveltuu matalien ja keskisyvien järvien talvi-ilmastukseen. Hapetinta valmistetaan 4–7,5 kW:n moottorilla varustettuna. Testilaitte oli varustettu 7,5 kW:n moottorilla, ja laitteen paino oli noin 700 kg. Suutin, josta hapetettu vesi tulee ulos, ulottui noin 3 m:n syvyyteen. Laitetta valmistaa Mik-Rip Teräs Oy (<http://www.kolumbus.fi/mikrip/>).

4.5.3 Waterix Mini ja Micro -ilmastuslaitteet

Waterixin Micro- ja Mini-ilmastimet imevät sähkömoottorin avulla vettä imuputken läpi halutusta syvyydestä ja levittävät veden suutinraon kautta veden pinnalle ja säilyttävät järven kerrostuneisuuden. Micro-ilmastin on tarkoitettu käyttökohteisiin, joissa tarvitaan

pieniä määriä happea. Laite painaa 6–9 kg varustuksen mukaan, ja se mahtuu henkilöautoon. Laitetta valmistetaan sekä kellukkeilla että ilman, ja se on varustettu yksivaihemoottorilla. Testilaitte oli varustettu 0,09 kW:n moottorilla. Käyttökohteita ovat pienpuhdistamot, luonnonvedet sekä pienet kalan ja ravunkasvatusaltaat. Lisäksi Micro soveltuu radonin poistoon puhtaasta vedestä sekä kalakuolemien ehkäisyyn. Micro voidaan varustaa sopivan pituisella imuputkella, jolloin laite ottaa hapetettavaa vettä aina 14 metrin syvyydestä asti. Ilmastuksen lisäksi Micro toimii sekoittajana ja pakottaa veden liikkeeseen.



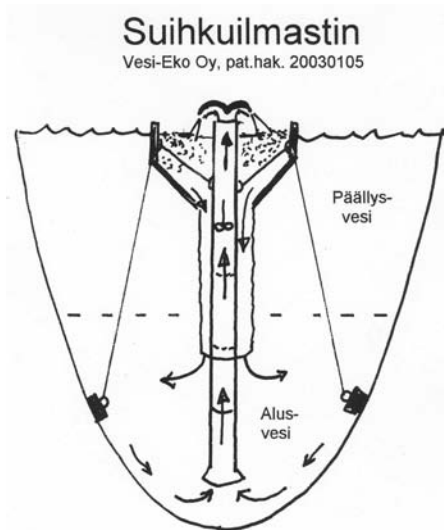
Kuva 5. Waterix Mini tutkimushallin lattialla ja järvessä talvi-ilmastuksessa.

Waterix Mini -ilmastin on suunniteltu kunnallis- ja teollisuusjäteveden sekä luonnonvesien ilmastukseen. Laite mahdollistaa sekä ilmastuksen että sekoituksen; sekoitus on myös mahdollista ilman ilmastusta. Laitteessa on 1,1 kW:n 3-vaihemoottori, suojausluokka IP65. Laitteessa liikkuvia osia ovat sähkömoottori, pumpun akseli ja potkuri. Käyttölämpötila on -20 – $+40$ °C. Laitteen maksimikäyttösyvyys on 14 m, ja syvyyttä säädellään jatkoputken pituudella. Laite kiinnitetään moottorin jaloista esim. huoltosiltaan tai laituriin tai voidaan vaihtoehtoisesti varustaa kellukkeilla. Laite voidaan varustaa taajuusmuuntajalla, jolloin kapasiteettiä voidaan säätää portaattomasti. Laitteen paino on 19 kg ilman lisäputkea. Mini- ja Micro-ilmastuslaitteita valmistaa Waterix Oy (<http://www.waterix.com/>).

4.5.4 Visiox-ilmastin

Visiox-ilmastin pumppaa vähähappista alusvettä pinnalle hapetettavaksi, ja se säilyttää veden kerroksellisuuden. Pinnalla happiköyhä vesi suihkutetaan osasuihkuina pressukehällä rajattuun ns. yläaltaaseen, josta suihkutuksen yhteydessä nopeasti hapettunut vesi

johdetaan ns. pressusukkaa pitkin hieman harppauskerroksen yläpuolelle. Sieltä vesi laskeutuu edelleen kohti pohjaa ja samalla leviää horisontaalisesti laajemmalle alueelle (kuva 6).



Kuva 6. Visiox-ilmastimen toimintaperiaate (kuvat: Vesi-Eko Oy).

Laitetta on tällä hetkellä saatavissa kahdella eri teholla: 3 kW ja 4 kW (testilaitte). Testilaitteen paino on noin 200 kg, pumppuosan halkaisija noin 1 000 mm, suihkukappaleen halkaisija noin 1 300 mm ja pumppuosan korkeus noin 1 600 mm. Laitteen minimiasennussyvyys on 2,5 m, ja imuputken pituus voidaan valita kohteen vesisyvyyden mukaan. Visiox-ilmastinta valmistaa Vesi-Eko Oy (<http://www.vesieko.fi/>).

4.5.5 Lietepumppu

Lietepumppua (kuva 7) käytetään yleisesti maataloilla lietteen pumppaukseen ja sekoitukseen tyhjennettäessä lietesäiliötä. Ilmastuskäytössä pumppu nostaa vettä nostoputkea (Uponal PVC 110 x 3,2 HT) pitkin ylös ja poistaa veden joko letkun (kuva 7) tai hajotinlevyn (kuva 8) kautta purkamatta järven kerrostuneisuutta. Hajotinlevy asennettiin lietepumpun poistoputken päähän vedenpinnan tasoon. Kokeissa käytetyssä lietepumpussa levyn halkaisija oli 34,5 cm, ja se oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Poistoletkua käytettäessä vesi johdettiin noin 1 m:n korkeudesta ja noin 45° kulmassa takaisin altaaseen. Lietepumppu oli valmistettu vuonna 1978, ja moottorin nimellisteho oli 4 kW. Todelliset ottotehot mitattiin kokeen aikana (taulukko 1).



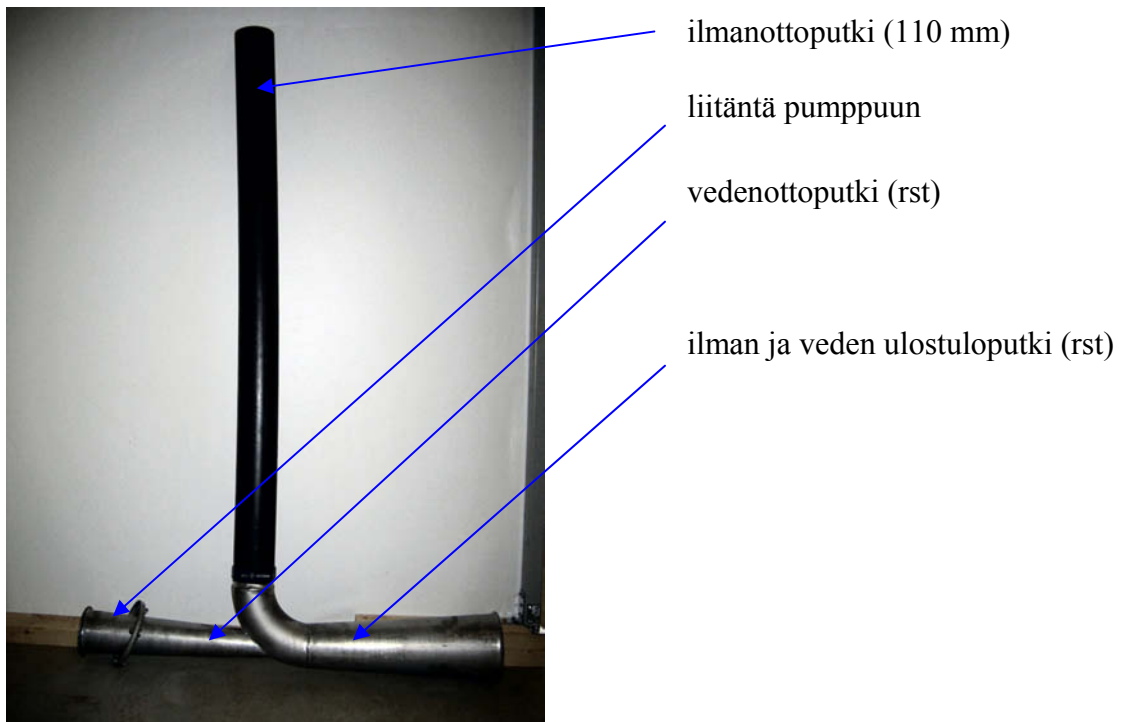
Kuva 7. Lietepumppu varustettuna hajotinlevyllä (vasen kuva) ja 4" poistoletkulla, taustalla Suomenojan koeallas.



Kuva 8. Hajotinlevy (vasen kuva) ja levyn vaikutus kokeissa.

Pumpun kokonaispituus oli 2,75 m. Käytettäessä hajotinlevyä pumpusta on pinnan alla 2,15 m. Pumpun mitattu tuotto letkulla varustettuna oli noin $1,7 \text{ m}^3/\text{min}$ (nostokorkeus noin 80 cm, letkun pituus noin 6 m, halkaisija 4"). Lietepumpun arvioitu paino eri yhdistelmillä varustettuna on noin 80 kg.

Ejektorilla varustettuna pumppu imee ilmaa vedenpinnan yläpuolelta, ilma sekoittuu veteen ejektorissa, ja veden ja ilman seos johdetaan veteen (kuvat 9 ja 10). Ejektori asennettiin noin 20° kulmaan siten, että veden ulostulopää oli 40 cm alempana (syvyydessä 140 cm) kuin vedenottopää. Ejektorin päässä ei ollut hajotinlevyä. Ejektoria käytettäessä järven kerrostuneisuus purkautuu.



Kuva 9. Lietepumppuun asennettava ejektor.



Kuva 10. Ilma ja vesi sekoittuvat ejektorissa, ja seos johdettiin 1,4 m:n syvyyteen.

Ejektorilla varustettuna pumppu asennettiin koaltaaseen kulmittain, jotta veden ja ilman seos pääsisi leviämään altaaseen mahdollisimman vapaasti. Hajotinlevyn ja letkun kautta vesi johdettiin altaan keskelle vedenpinnan yläpuolelle. Lietepumppuilla on lukuisia eri valmistajia sekä maahantuojia.

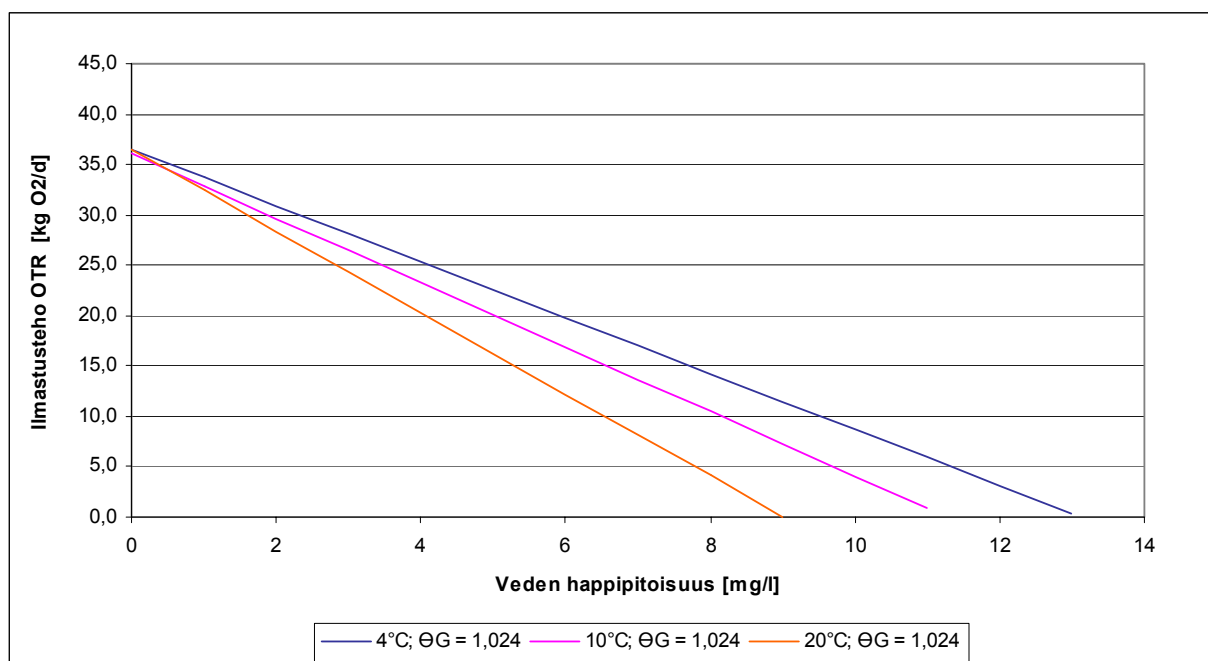
4.6 Laboratoriokokeiden tulokset

4.6.1 Aire-O₂-hapetuslaite

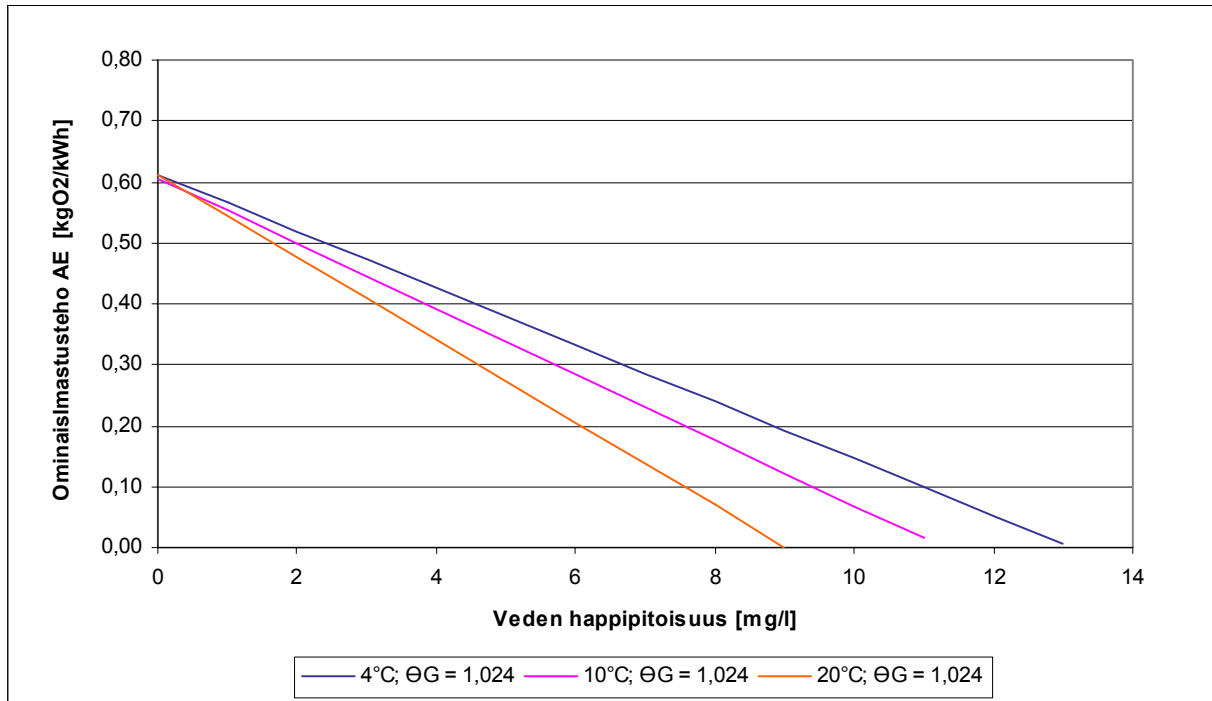
Aire-O₂-hapetuslaitteen tulosten laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

- $C^* = 9,5 \text{ mg/l}$, $T = 17,6 \text{ °C}$
- $C_0 = 0,69 \text{ mg/l}$ (kolmen mittauksen keskiarvo)
- $V = 48 \text{ m}^3$
- $P = 2,5 \text{ kW}$ (mitattu ottoteho)
- geometrinen lämpötilakorjausvakio $\Theta_G = 1,024$.

Mittaukset toistettiin kolme kertaa, ja mittausten kokonaiskestot olivat 2 580 s, 2 220 s ja 3 000 s. Ilmastusteho- ja ominaisilmastustehoarvojen laskennassa määriteltiin mittaustulosten perusteella ensin $K_L a$ -kerroin mittaustilassa. Kertoimen avulla määriteltiin ilmastusteho (OTR₀) ja ominaisilmastusteho (AE₀) hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakertoimilla. Kuvassa 11 esitetään Aire-O₂-hapetuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötilassa ja kuvassa 12 esitetään ominaisilmastusteho AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024. Kuvaajiin liittyvät mittaus- ja laskentatiedot sekä ominaisilmastustehot eri lämpötilakertoimilla esitetään liitteessä 2.



Kuva 11. Aire-O₂-hapetuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kolmen mittauksen keskiarvo.



Kuva 12. Aire-O₂-hapetuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kolmen mittauksen keskiarvo.

Aire-O₂-hapetuslaitteen ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 35 ja 43 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 2, taulukko 12). Ominaisilmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 0,6 ja 0,7 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 2, taulukko 13).

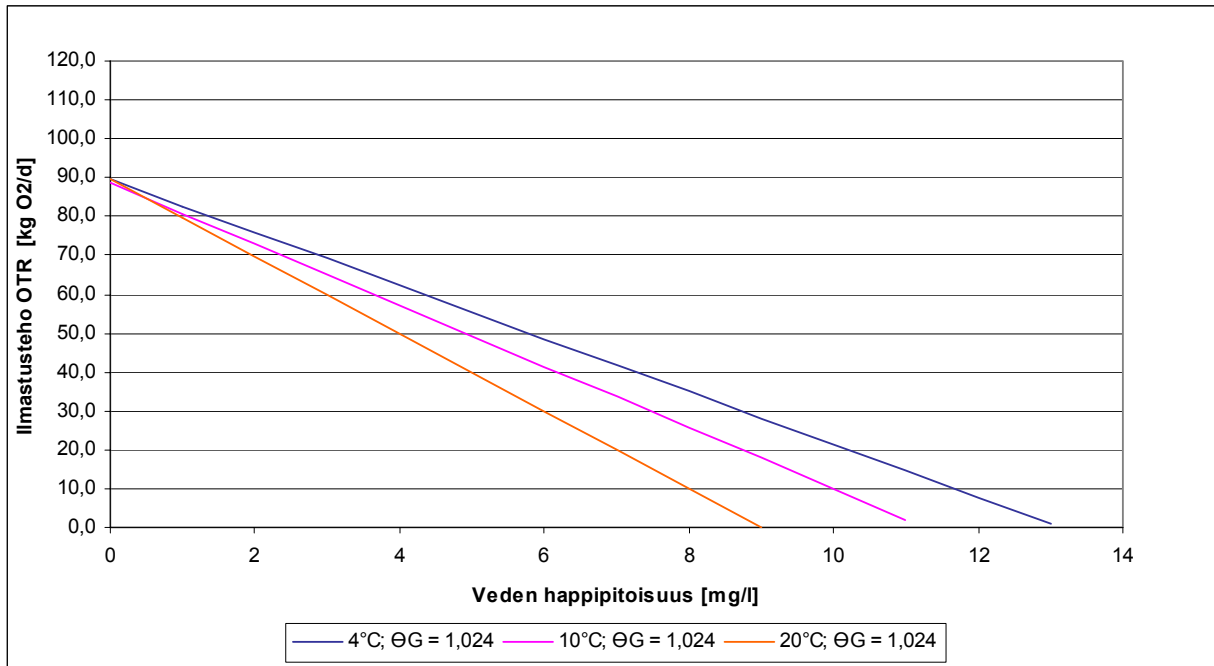
4.6.2 Mikrox-hapetin

Mikrox-hapettimen tulosten laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

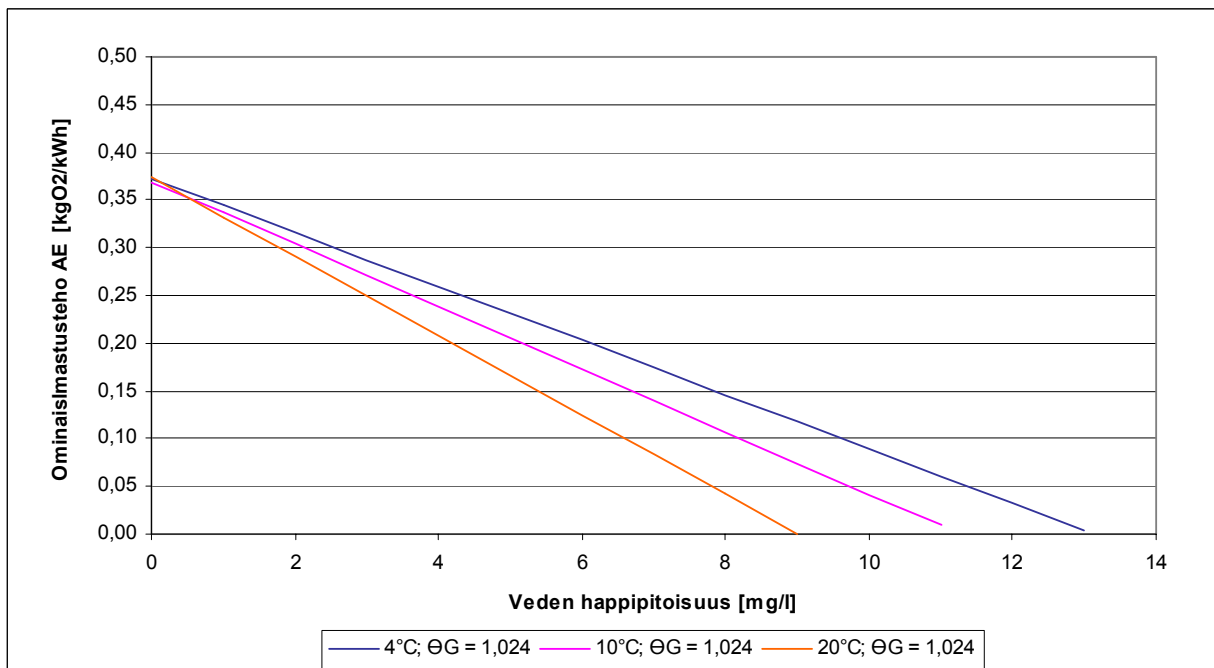
- $C^* = 9,82 \text{ mg/l}$, $T = 16,1 \text{ °C}$
- $C_0 = 1,40 \text{ mg/l}$ (kahden mittauksen keskiarvo)
- $V = 46,2 \text{ m}^3$
- $P = 10 \text{ kW}$ (mitattu ottoteho)
- geometrinen lämpötilakorjausvakio $\Theta_G = 1,024$.

Mittaukset toistettiin kaksi kertaa, ja mittausten kokonaiskestot olivat 1 230 s ja 1 500 s. Ilmastusteho- ja ominaisilmastustehoarvojen laskennassa määriteltiin mittaustulosten perusteella ensin $K_L a$ -kerroin mittaustemperatuurissa. Kertoimen avulla määriteltiin ilmastusteho (OTR₀) ja ominaisilmastusteho (AE₀) hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakertoimilla. Kuvassa 13 esitetään Mikrox-hapettimen ilmastusteho OTR hap-

pipitoisuuden funktiona eri lämpötilassa ja kuvassa 14 esitetään ominaisilmastusteho AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024. Kuvaaajiin liittyvät mittaus- ja laskentatiedot sekä ominaisilmastustehot eri lämpötilakertoimilla esitetään liitteessä 3.



Kuva 13. Mikrox-hapettimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 14. Mikrox-hapettimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.

Mikrox-hapettimen ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 85 ja 104 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjaukertoimen mukaan (liite 3, taulukko 16). Ominaisilmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 0,3 ja 0,4 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjaukertoimen mukaan (liite 3, taulukko 17).

4.6.3 Mini ja Micro -ilmastuslaitteet

Waterix Micron tulosten laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

- $C^* = 9,5 \text{ mg/l}$, $T = 17,4 \text{ °C}$
- $C_0 = 2,04 \text{ mg/l}$ (kahden mittauksen keskiarvo)
- $V = 48 \text{ m}^3$
- $P = 0,2 \text{ kW}$ (mitattu ottoteho)
- geometrinen lämpötilakorjausvakio $\Theta_G = 1,024$.

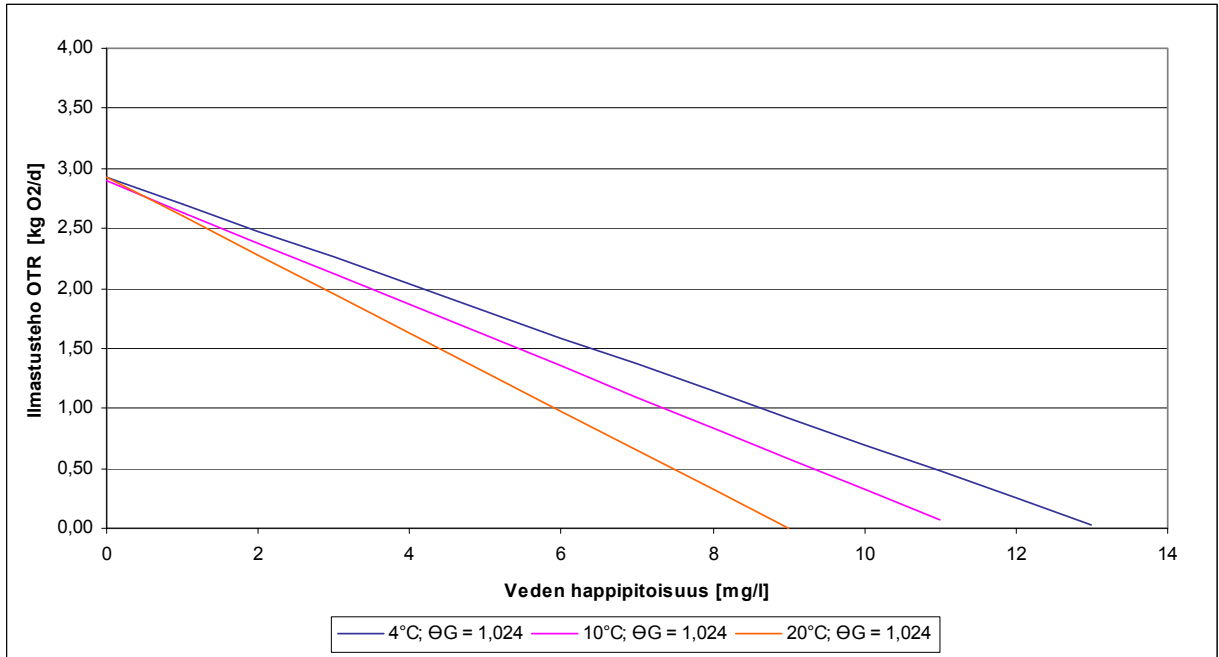
Mittausjakson kokonaiskesto oli 1 920 s, ja happimittareiden lukemat kirjattiin ylös 120 s:n välein. Laite pysäytettiin 30 minuutin käyntijakson jälkeen ja loppulukemat kirjattiin ylös kahden minuutin jälkeen. Koe toistettiin kaksi kertaa.

Waterix Minin tulosten laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

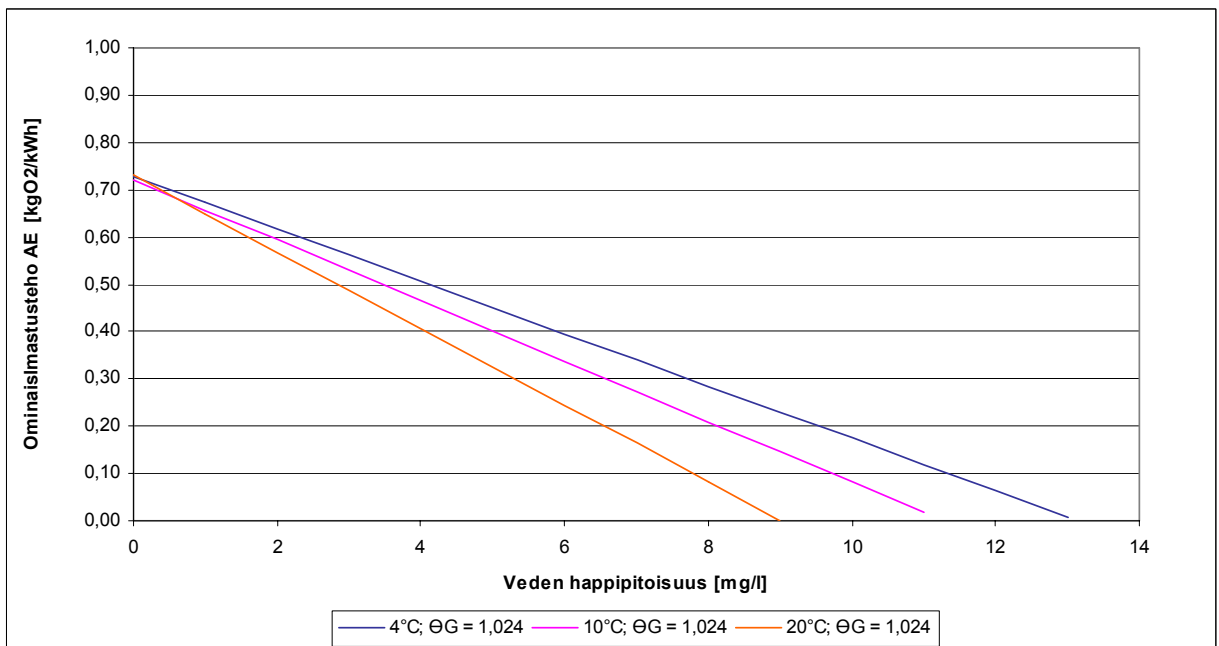
- $C^* = 9,5 \text{ mg/l}$, $T = 17,5 \text{ °C}$
- $C_0 = 1,03 \text{ mg/l}$ (kahden mittauksen keskiarvo)
- $V = 48 \text{ m}^3$
- $P = 1,3 \text{ kW}$ (mitattu ottoteho)
- geometrinen lämpötilakorjausvakio $\Theta_G = 1,024$.

Mittausjakson kokonaiskesto oli 720 s, ja happimittareiden lukemat kirjattiin ylös 30 s:n välein. Laite pysäytettiin 10 minuutin käyntijakson jälkeen ja loppulukemat kirjattiin ylös kahden minuutin jälkeen. Koe toistettiin kaksi kertaa.

Ilmastusteho- ja ominaisilmastustehoarvojen laskennassa määriteltiin mittaustulosten perusteella ensin K_L -kerroin mittaustempötilassa. Kertoimen avulla määriteltiin ilmastusteho (OTR₀) ja ominaisilmastusteho (AE₀) hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakertoimilla. Kuvassa 15 esitetään Micro-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa ja kuvassa 16 esitetään ominaisilmastusteho AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024.



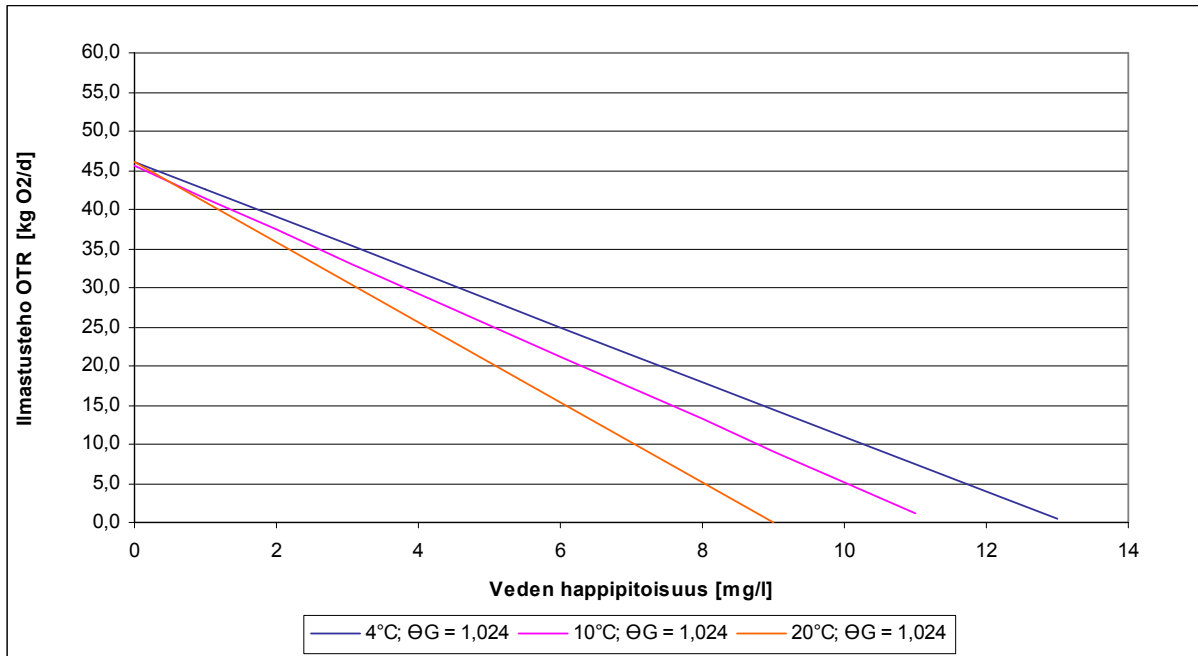
Kuva 15. Micro-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



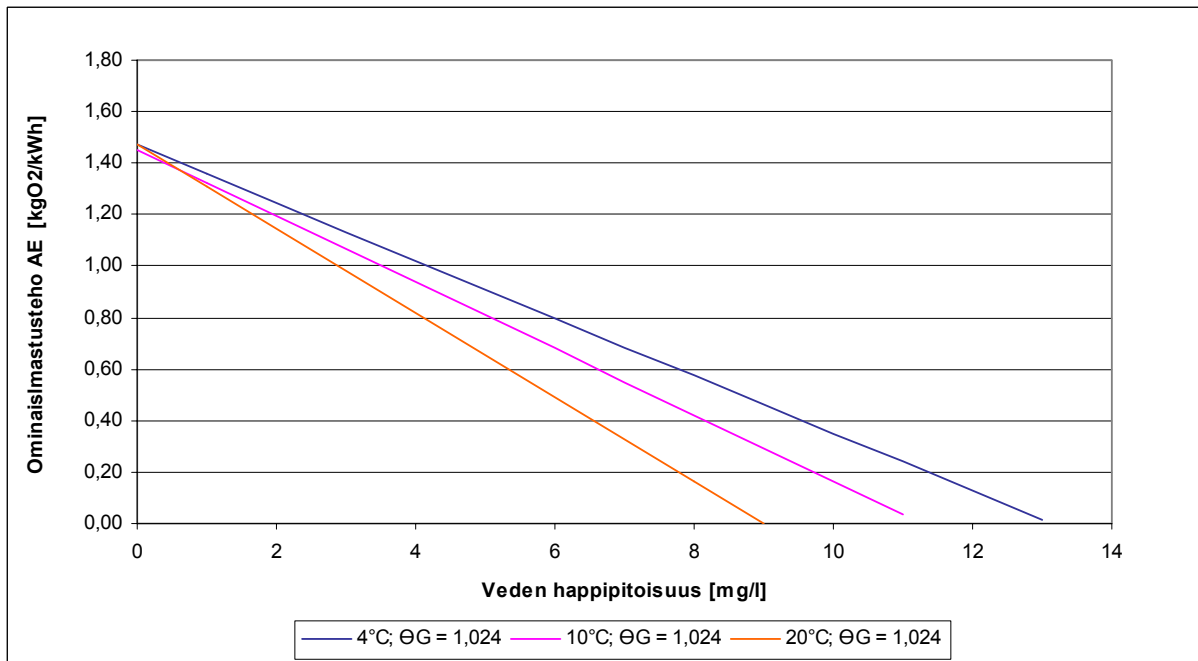
Kuva 16. Micro-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.

Waterix Micro-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 2,8 ja 3,5 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 4, taulukko 22). Micro-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 0,7 ja 0,9 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 4, taulukko 24).

Kuvassa 17 esitetään Mini-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa ja kuvassa 18 esitetään ominaisilmastusteho AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024. Kuvaaajiin 15–18 liittyvät mittaus- ja las-
 kentatiedot sekä ilmastustehot eri lämpötilakertoimilla esitetään liitteessä 4.



Kuva 17. Mini-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 18. Mini-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.

Waterix Mini-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 44 ja 55 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 4, taulukko 23). Mini-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 1,4 ja 1,7 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 4, taulukko 25).

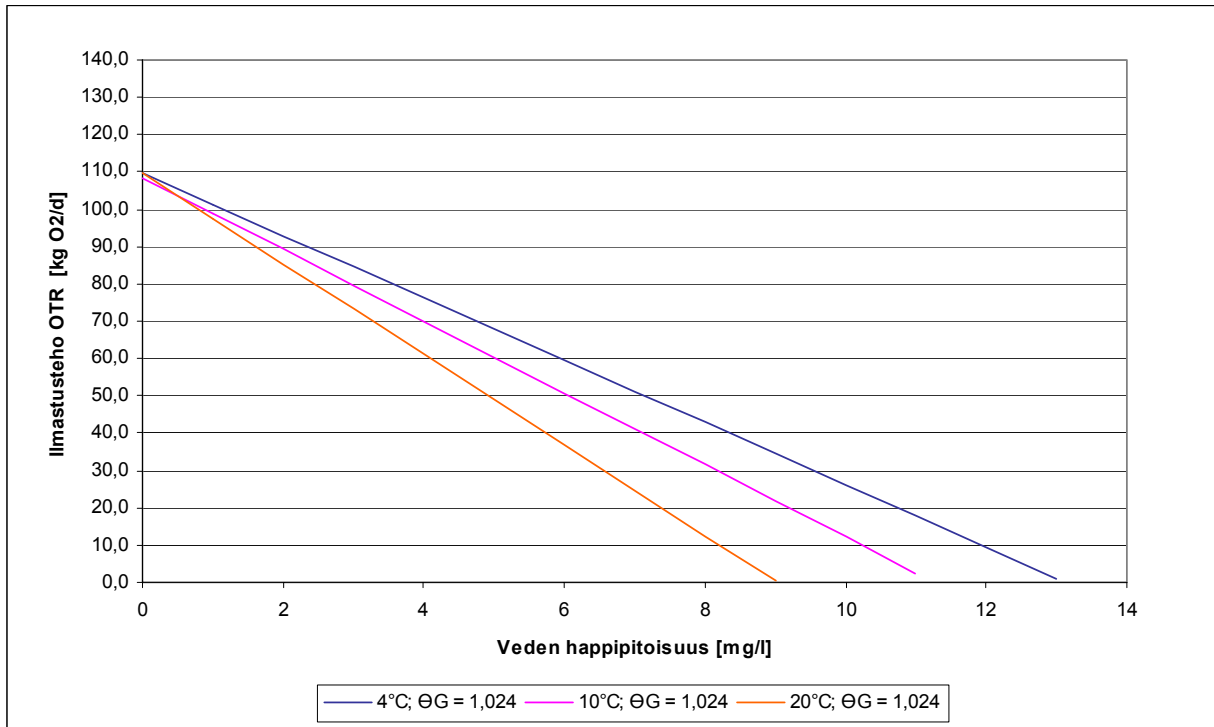
4.6.4 Visiox-ilmastin

Visiox-ilmastimen tulosten laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

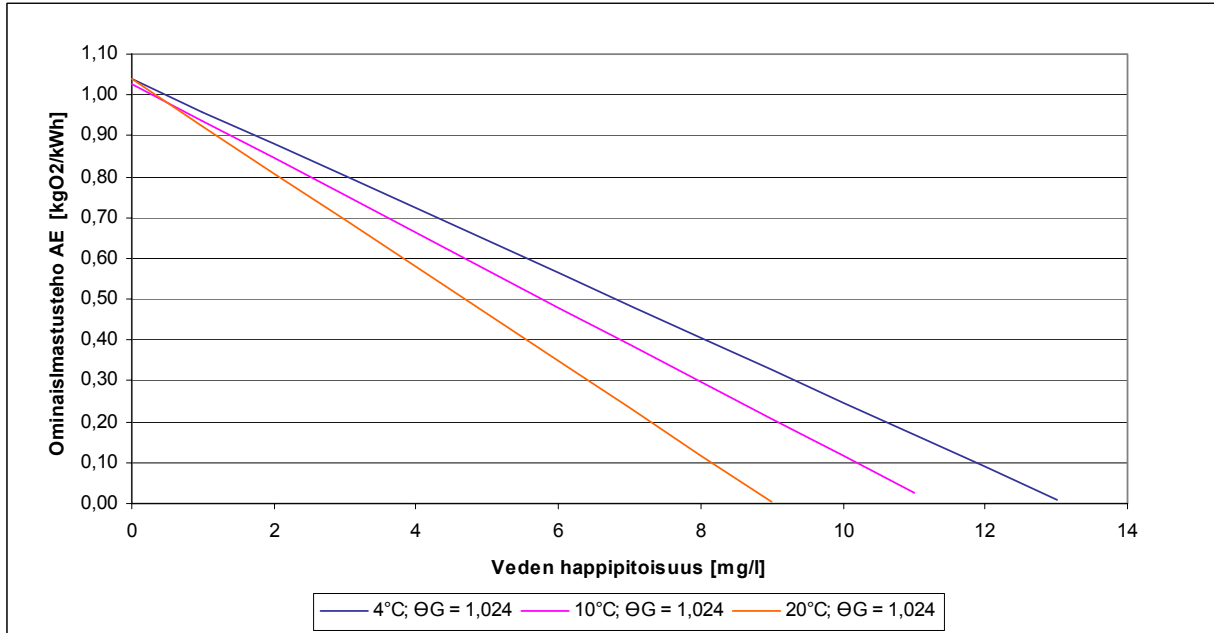
- $C^* = 10,62 \text{ mg/l}$, $T = 12,5 \text{ °C}$
- $C_0 = 1,4 \text{ mg/l}$
- $V = 46,2 \text{ m}^3$
- $P = 4,5 \text{ kW}$ (mitattu ottoteho)
- geometrinen lämpötilakorjausvakio $\Theta_G = 1,024$.

Mittausjakson kokonaiskesto oli 480 s, ja happimittareiden lukemat kirjattiin ylös 15 s:n välein. Laite pysäytettiin 6 minuutin käyntijakson jälkeen ja loppulukemat kirjattiin ylös kahden minuutin jälkeen. Mittarin nro 1 osalta todettiin, että mittarin näyttämät lukemat välillä 210 ja 300 s ovat epäluotettavia, ja mittarin lukemat jätettiin laskennasta pois. Mittarin nro 3 lukemissa oli koko mittausjakson ajan systemaattinen virhe (0,6 mg/l liian suuri), joka huomioitiin happipitoisuuksien laskennassa.

Ilmastusteho- ja ominaisilmastustehoarvojen laskennassa määriteltiin mittaustulosten perusteella ensin K_L -kerroin mittaustempätilassa. Kertoimen avulla määriteltiin ilmastusteho (OTR₀) ja ominaisilmastusteho (AE₀) hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakertoimilla. Kuvassa 19 esitetään Visiox-ilmastimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötilassa ja kuvassa 20 esitetään ominaisilmastusteho AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024. Kuvaajiin liittyvät mitaus- ja laskentatiedot sekä ominaisilmastustehot eri lämpötilakertoimilla esitetään liitteessä 5.



Kuva 19. Visiox-ilmastimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024.



Kuva 20. Visiox-ilmastimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024.

Visiox-ilmastimen ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 100 ja 122 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 5, taulukko 28). Ominai-

silmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 0,9 ja 1,2 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (liite 5, taulukko 29).

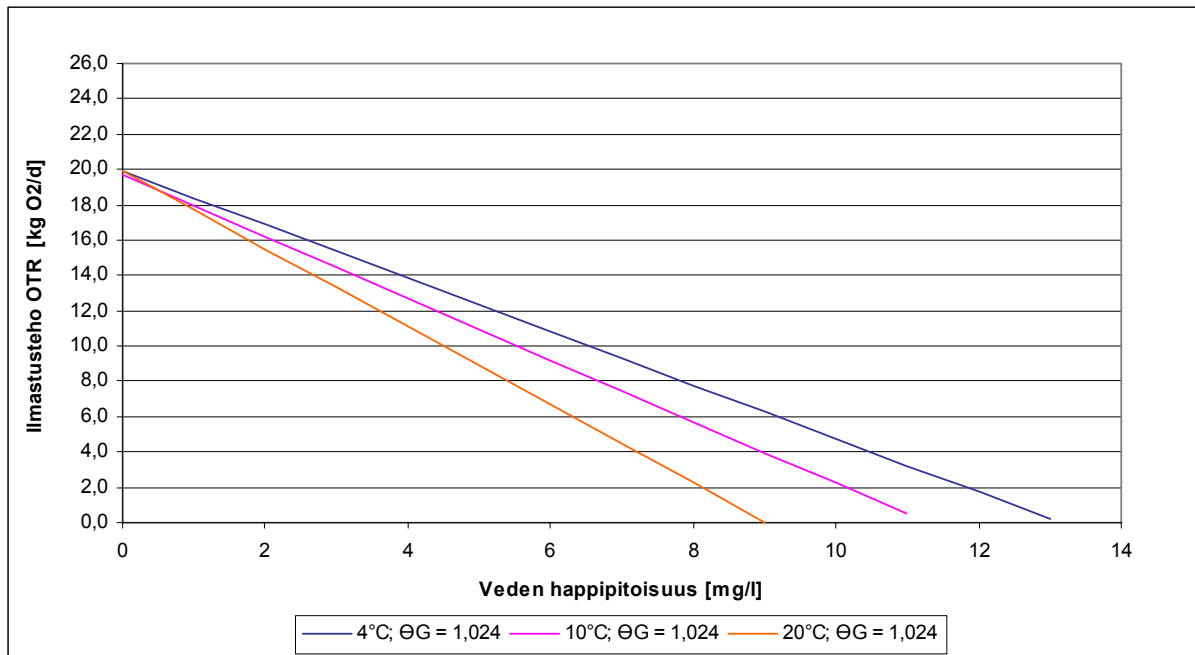
4.6.5 Lietepumppu

Lietepumpun eri yhdistelmien laskennassa käytettiin taulukossa 1 esitettyjä lähtöarvoja.

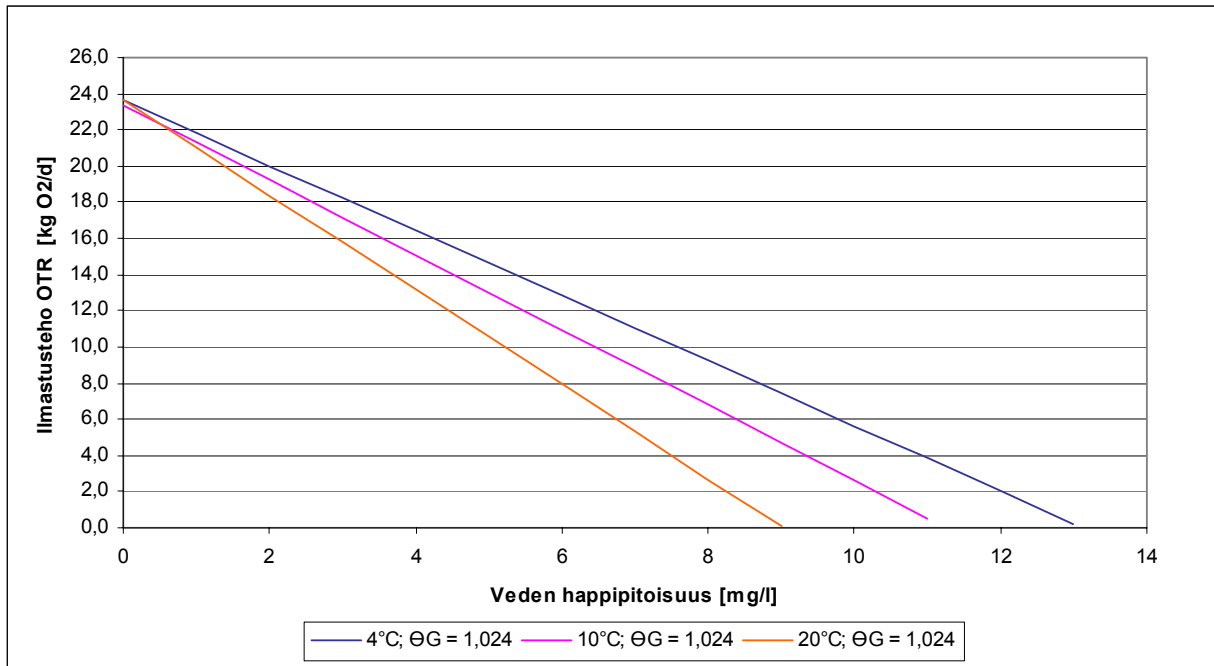
Taulukko 1. Laskennassa käytetyt lähtöarvot.

Yhdistelmä	Veden lämpötila [°C]	Kyllästyshappipitoisuus C* [mgO ₂ /l]	Happipitoisuus lähtötilanteessa C _o [mgO ₂ /l]	Koaltaan tilavuus V [m ³]	Mitattu ottoteho [kW]	Geometrinen lämpötilakorjausvakio Θ _G
Lietepumppu + hajotinlevy	6,1	12,46	0,97	48	4,3	1,024
Lietepumppu + letku	7,1	12,14	0,54	48	4,2	1,024
Lietepumppu + ejektorit	7,9	11,84	0,74	48	3,8	1,024

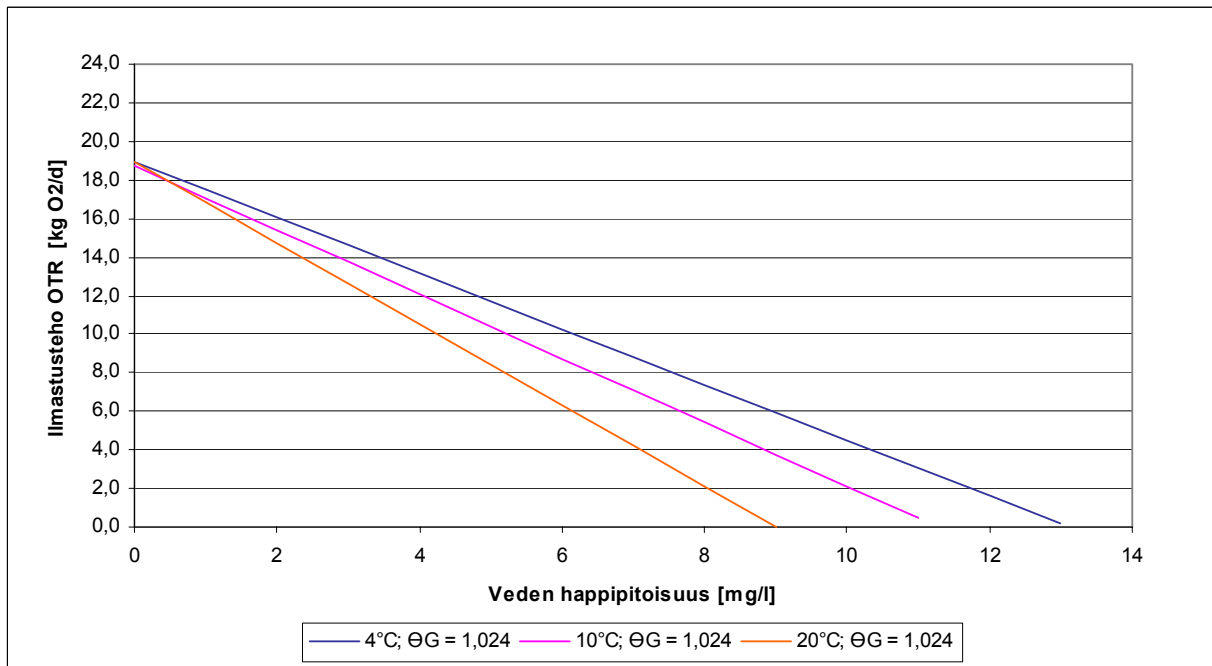
Mittaukset toistettiin kaksi kertaa, ja mittausten kokonaiskestot olivat 2 100 s. Ilmastusteho- ja ominaisilmastustehoarvojen laskennassa määriteltiin mittaustulosten perusteella ensin K_La-kerroin mittaustilassa. Kertoimen avulla määriteltiin ilmastusteho (OTR₀) ja ominaisilmastusteho (AE₀) hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakertoimilla. Kuvissa 21–23 esitetään lietepumpun eri yhdistelmien ilmastustehot OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötilassa lämpötilakertoimella 1,024.



Kuva 21. Lietepumppu + hajotinlevy: ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 22. Lietepumppu + letku: ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



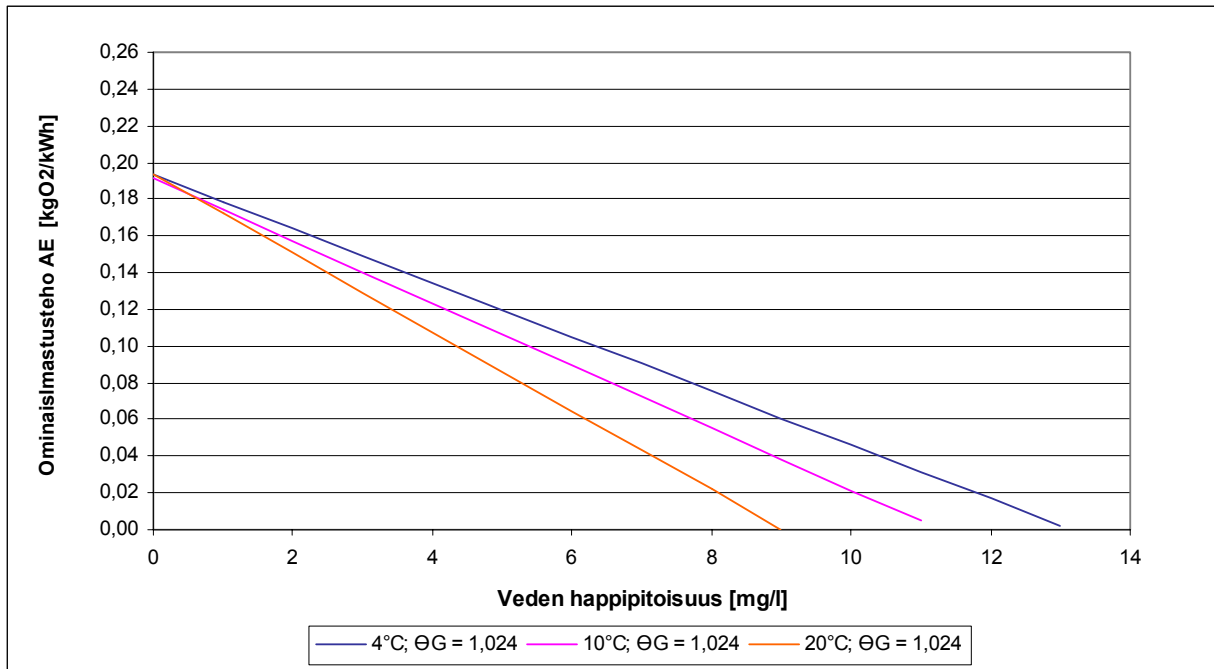
Kuva 23. Lietepumppu + ejektori: ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.

Lietepumpun eri yhdistelmien ilmastusteho OTR hapettomaan veteen vaihteli välillä 16 ja 25 kgO₂/d lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (taulukko 2).

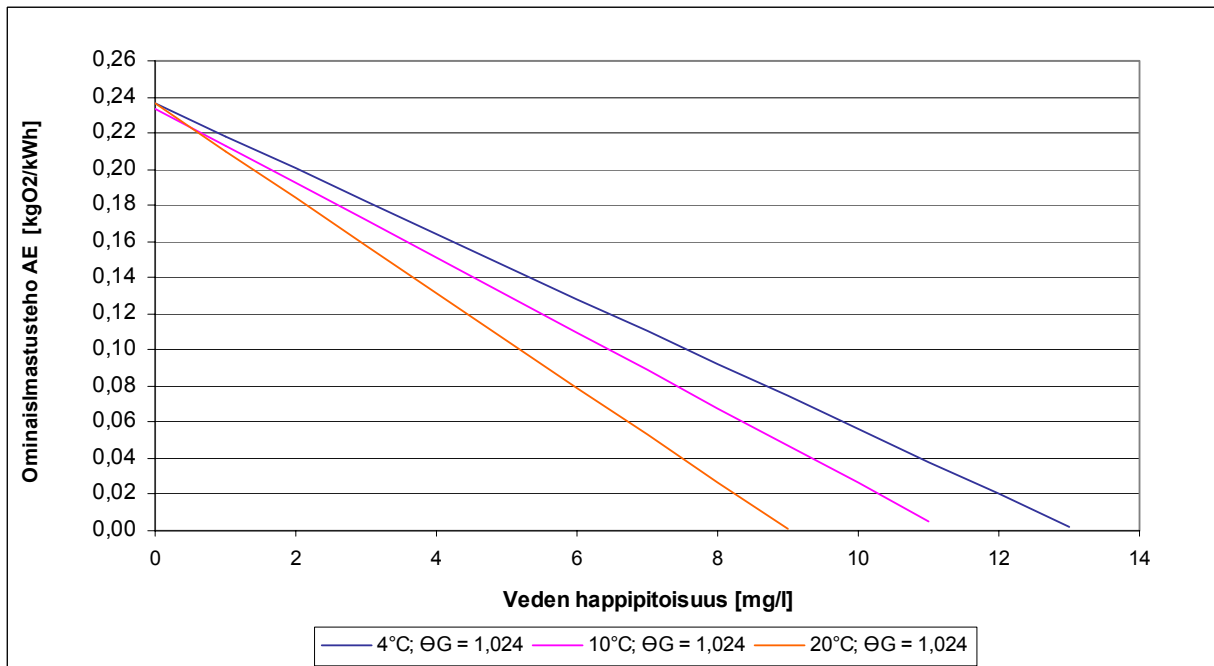
Taulukko 2. Lietepumpun eri yhdistelmien ilmastustehot OTR hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakorjauksertoimilla (kahden mittauksen keskiarvo).

Yhdistelmä	Lämpötilakerroin Θ_G	Lämpötila [°C]	Ilmastusteho OTR [kgO ₂ /d]
Lietepumppu + hajotinlevy	1,024	+4	20
		+10	20
		+20	20
	1,011	+4	20
		+10	19
		+20	17
	1,027	+4	20
		+10	20
		+20	21
Lietepumppu + letku	1,024	+4	24
		+10	23
		+20	24
	1,011	+4	24
		+10	23
		+20	20
	1,027	+4	23
		+10	24
		+20	25
Lietepumppu + ejektori	1,024	+4	19
		+10	19
		+20	19
	1,011	+4	20
		+10	18
		+20	16
	1,027	+4	19
		+10	19
		+20	20

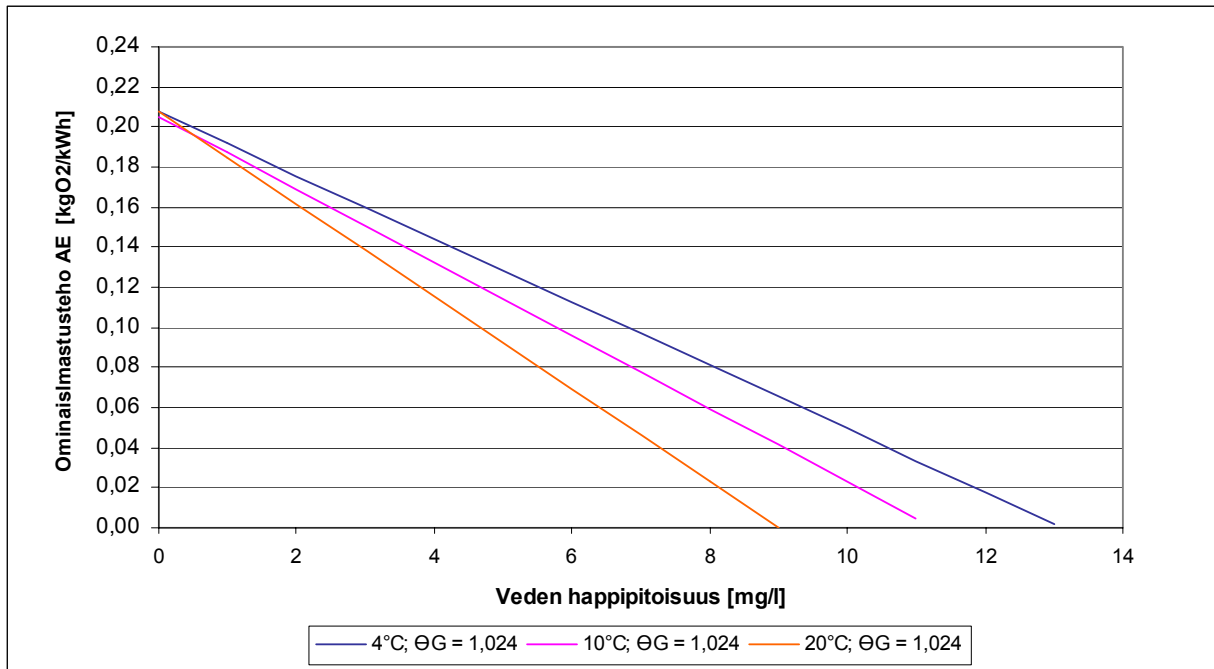
Kuvissa 24–26 esitetään ominaisilmastustehot AE eri lämpötiloissa, molemmissa lämpötilakertoimella 1,024. Kuvaajiin 21–26 liittyvät mittaus- ja laskentatiedot sekä ominaisilmastustehot eri lämpötilakertoimilla esitetään liitteessä 6.



Kuva 24. Lietepumppu + hajotinlevy: ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 25. Lietepumppu + letku: ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 26. Lietepumppu + ejektori: ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,024.

Lietepumpun eri yhdistelmien ominaisilmastusteho AE hapettomaan veteen vaihteli välillä 0,16 ja 0,25 kgO₂/kWh lämpötilan ja lämpötilakorjauskertoimen mukaan (taulukko 3).

Taulukko 3. Lietepumpun eri yhdistelmien ominaisilmastustehot AE hapettomaan veteen eri lämpötiloissa ja eri lämpötilakorjauskertoimilla (kahden mittauksen keskiarvo).

Yhdistelmä	Lämpötilakerroin Θ_G	Lämpötila [°C]	Ominaisilmastusteho AE [kgO ₂ /kWh]
Lietepumppu + hajotinlevy	1,024	+4	0,19
		+10	0,19
		+20	0,19
	1,011	+4	0,20
		+10	0,18
		+20	0,16
	1,027	+4	0,19
		+10	0,19
		+20	0,20
Lietepumppu + letku	1,024	+4	0,24
		+10	0,23
		+20	0,25
	1,011	+4	0,25
		+10	0,23
		+20	0,20
	1,027	+4	0,24
		+10	0,24
		+20	0,25
Lietepumppu + ejektori	1,024	+4	0,21
		+10	0,21
		+20	0,21
	1,011	+4	0,22
		+10	0,20
		+20	0,18
	1,027	+4	0,21
		+10	0,21
		+20	0,22

4.7 Virhetarkastelu

Kokeiden aikana esiintyneitä epävarmuustekijöitä, jotka liittyivät käytettyjen happimittareiden toimintaan, pyrittiin vähentämään käyttämällä K_L -kertoimen, ilmastustehon ja ominaisilmastustehon koealtaan keskimääräistä happipitoisuutta (happimittareiden antamien kahden mittauksen lukemien keskiarvo). Käytettyjen happimittareiden virhemarginaalit esitetään taulukossa 4.

Taulukko 4. Kokeissa käytettyjen happimittareiden valmistajien ilmoittamat virhemarginaalit.

Mittarin tyyppi	Virhemarginaali	Huom.
WTW MultiLine P4	± 0,5 % arvosta	Lukemat epäluotettavia Visioxin kokeissa, jätettiin pois tulosten käsittelystä.
Marvet Junior		Lukemat korjattiin vastaamaan laitteen kalibrointitulosta Waterixin kokeissa.
YSI 550A	± 0,3 mg/l tai ± 2 % lukemasta, kumpi on suurempi	
YSI 57	ei tiedossa	Lukemat epäluotettavia kokeiden aikana, jätettiin pois Minin tulosten käsittelystä.
YSI 52	± 0,03 mg/l	Visioxin kokeissa havaittiin noin 50 s:n viive ennen kuin reagoi happipitoisuuden nousuun.

Testilaitteiden dimensioista ja erityisesti ottotehojen suuresta vaihtelusta (0,2–10 kW) aiheutuvat mittakaavatekijät sekä koealtaan seinämien vaikutukset aiheuttavat koetuloksiin epävarmuutta, joka osaltaan vaikeuttaa tulosten vertailtavuutta. Tulosten vertailtavuuden parantamiseksi tulisi testattavien laitteiden teholuokan olla samaa suuruusluokkaa. Lähteessä Pöpel (1976) käsitellään hapettimien tehon suhdetta koealtaan tilavuuteen. Sopivia tehokkuuksia suhteessa koealtaan vesitilavuuteen ovat Pöpelin tutkimusten mukaan 60–100 W/m³. Aire-O₂-hapetuslaitteella suhdeluku oli 52, Mikroxilla 217, Microlla 4 ja Minillä 27, Visioxilla 97 ja lietepumpun eri yhdistelmillä 79–90. Siten lietepumpulla ja Visioxilla suhde oli lähes optimaalinen muiden laitteiden ollessa optimaalisen alueen ulkopuolella: Mikroxin ottoteho vaikutti altaan tilavuuden suhteen ylimitoitetulta ja Minin sekä Micron vastaavasti alimitoitetulta. Minin ja Micron tapauksissa myös mittausjaksojen kokonaiskestot olisivat voineet olla pidempiä. Lisäksi koealtaan veden lämpötilan vaihtelun eri testiajojen välillä tulisi olla mahdollisimman pientä. Suoritetuissa laboratorio-kokeissa veden lämpötila vaihteli välillä 6,1 ja 17,6 °C.

Luonnonolosuhteissa ilmastettava vesimassa pääsee leviämään huomattavasti laajemmalle alueelle kuin koealtaassa. Tämä ilmiö saattaa osaltaan näkyä lähteessä WPCF (1988) ilmoitetuissa tehokkuusluvuissa, jotka kenttäolosuhteissa olivat keskimäärin 50 % laboratorio-olosuhteissa määritellyistä tehokkuuksista. Lisäksi luonnonolosuhteissa vedessä saattaa olla happea kuluttavaa ravinnekuormaa, joka osaltaan kuluttaa ilmastuslaitteen veteen johtamaa happea ennen kuin hapen lisäys näkyy mittauksissa kohonneina happipitoisuuksina. Kenttäolosuhteissa ilmastuslaitteen säätöjen optimointi on vaikeampaa kuin laboratorio-olosuhteissa.

Koealtaan vesi tehtiin hapettomaksi lisäämällä siihen natriumsulfiittia ja käyttämällä katalyyttinä kiteistä kobolttikloridia. Vaihtoehtoisesti happi olisi voitu poistaa vedestä lisäämällä siihen typpikaasua. Menetelmä edellyttää, että typpikaasu johdetaan veteen

pohjailmastimien avulla ja että pohjailmastimet on asennettu tasaisesti koko altaan pohjan alueelle. Suomenojan koealtaassa pohjailmastimia oli asennettu ainoastaan pienelle osalle altaan pohjaa, eikä osa ilmastimista ollut täysin toimintakuntoisia. Kemiallisella hapenpoistolla saatiin koko altaan vesimassa paremmin hapettomaksi verrattuna typpikaasun käyttöön.

4.8 Yhteenveto laboratorikokeista

Lähteessä WPCF (1988) esitetyt tehokkuudet erilaisille mekaanisille, jäteveden ilmastukseen suunniteltujen ilmastuslaitteille vaihtelivat standardiolosuhteissa välillä 0,9 ja 3,0 kgO₂/kWh ja kenttäolosuhteissa välillä 0,5 ja 1,4 kgO₂/kWh (taulukko 5).

Taulukko 5. Ominaisilmastustehon AE vaihteluvälejä erityyppisille mekaanisille ilmastuslaitteille.

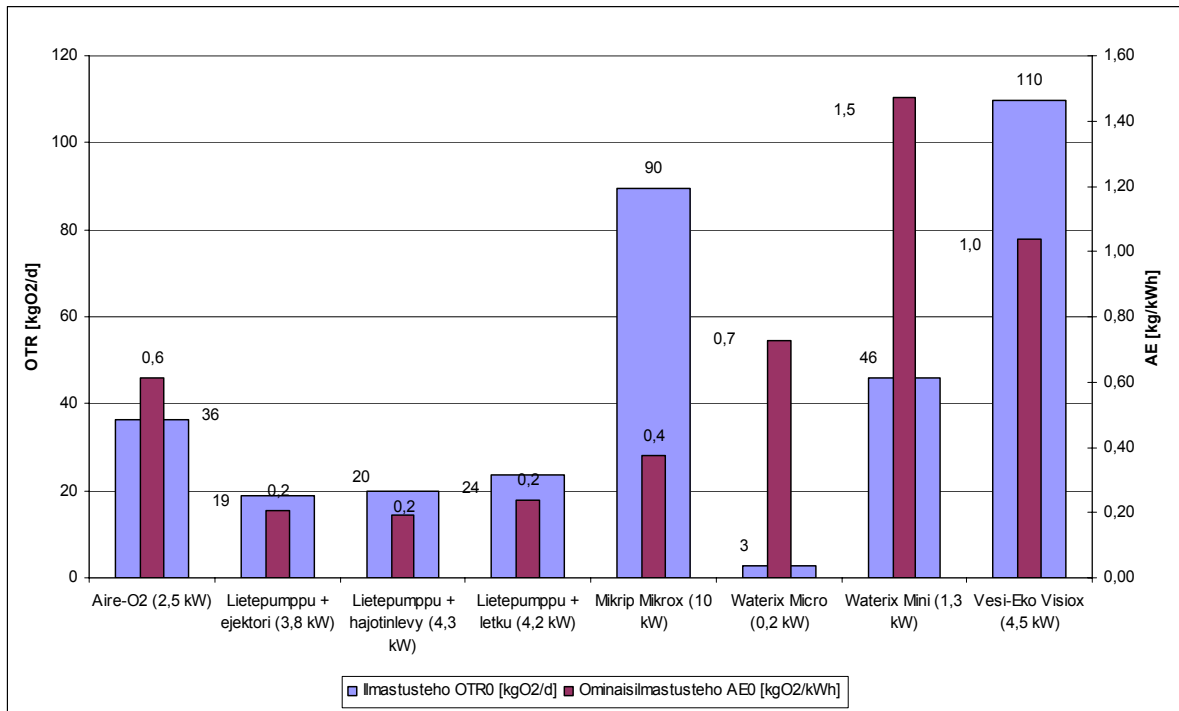
Ilmastintyyppi	Ominaisilmastusteho AE [kgO ₂ /kWh]	
	Standardiolosuhteet ¹	Kenttäolosuhteet
Keskipakoilmastin, pinnalle asennettava (surface centrifugal, low speed ²)	1,2–3,0	0,7–1,4
Keskipakoilmastin imuputkella, pinnalle asennettava (surface centrifugal with draft tube)	1,2–2,8	0,7–1,3
Pinnalle asennettava aksiaali-ilmastin (surface axial, high speed ²)	1,2–2,2	0,7–1,2
Turbiini-ilmastin, avoin, alaspäin suuntautuva (downdraft open turbine)	1,2–2,4	0,6–1,2
Turbiini-ilmastin, suljettu, alaspäin suuntautuva (downdraft closed turbine)	1,2–2,4	0,7–1,3
Turbiini-ilmastin, upotettu (submerged turbine, sparger)	1,2–2,0	0,7–1,1
Upotettu juoksupyöräilmastin (submerged impeller)	1,2–2,4	0,7–1,1
Harjailmastin (surface brush and blade)	0,9–2,2	0,5–1,1

Kenttäolosuhteissa saavutetut ominaistehot vastaavat noin 50 %:a standardiolosuhteissa määritellyistä tehoista.

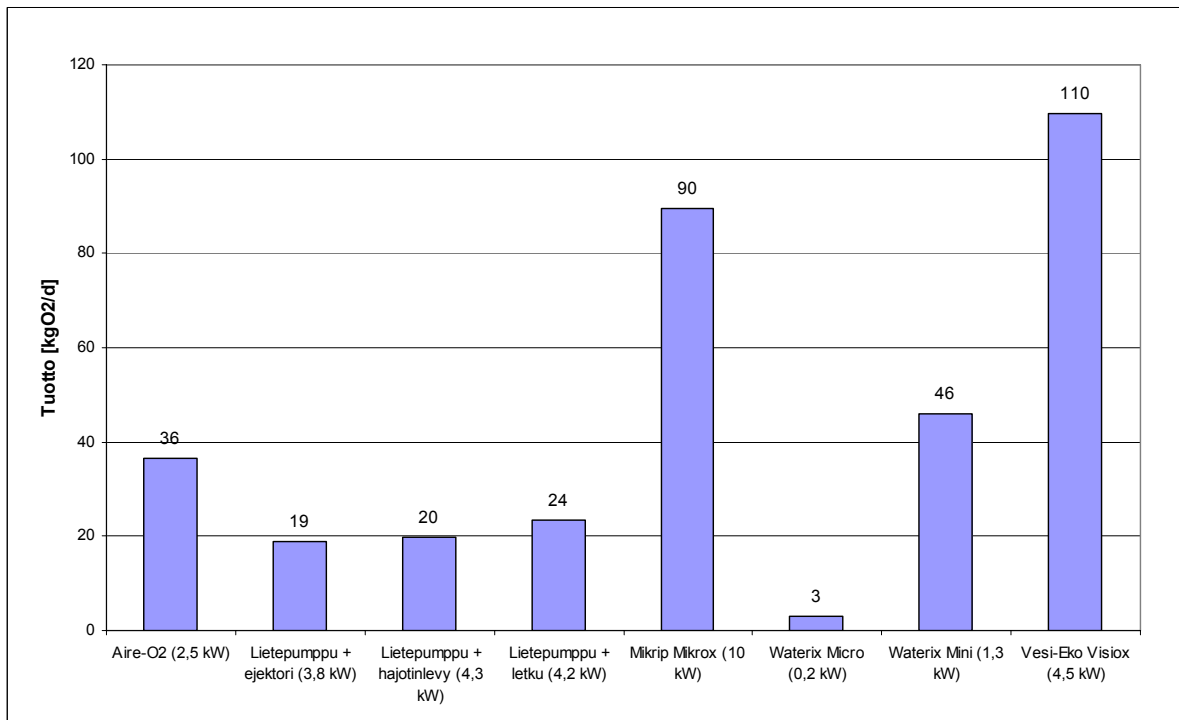
Kuvissa 27–29 sekä taulukossa 6 esitetään kaikkien laitteiden ilmastustehot sekä tuotot ja hyötysuhteet hapettomaan veteen lämpötilassa +4 °C lämpötilakertoimella 1,024. Lisäksi esitetään kaikkien laboratorikokeissa olleiden laitteiden perustiedot.

¹ Puhdas vesi, normaali ilmanpaine, lämpötila 20 °C, oletuksena täydellinen sekoittuminen.

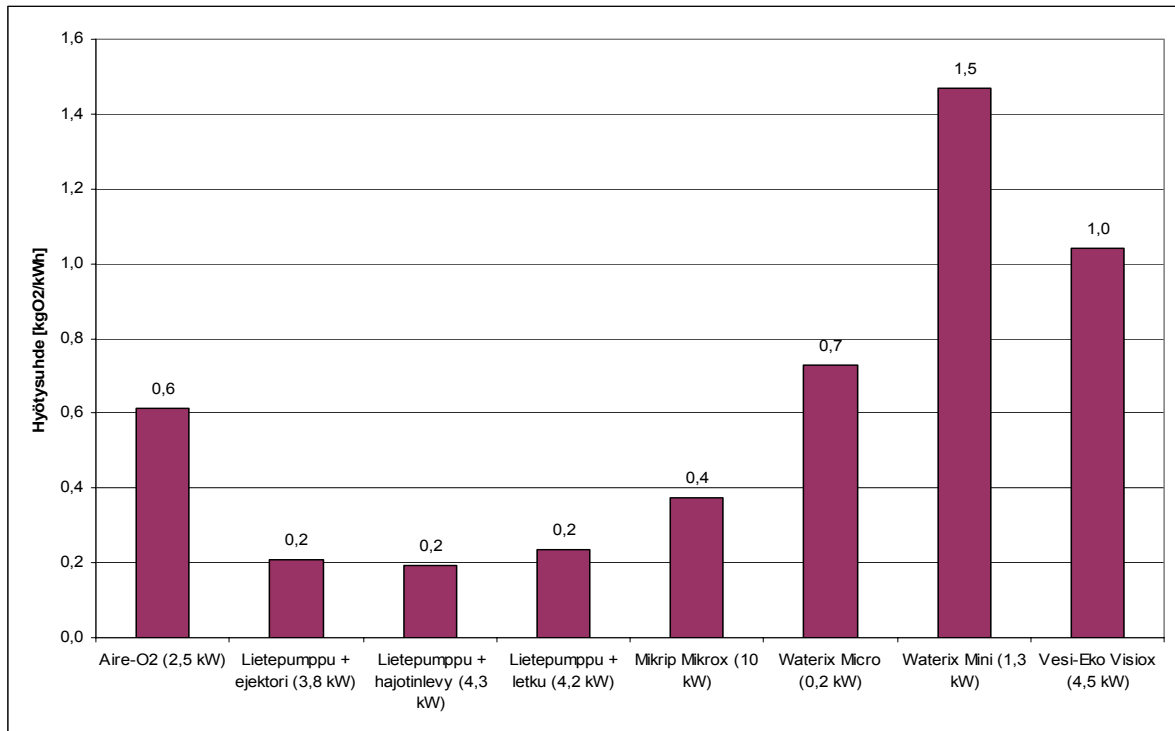
² Keskimääräinen teho, laitteen kierrosluku ei tiedossa.



Kuva 27. Kaikkien projektissa testattujen laitteiden ilmastustehot OTR ja ominaisilmastustehot AE hapettomaan veteen ($T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, lämpötilakerroin 1,024).



Kuva 28. Kaikkien projektissa testattujen laitteiden tuotot [kgO₂/d] hapettomaan veteen ($T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, lämpötilakerroin 1,024).



Kuva 29. Kaikkien projektissa testattujen laitteiden hyötysuhteet [kgO₂/kWh] hapettaamaan veteen (T = 4 °C, lämpötilakerroin 1,024).

Taulukko 6. Laitteiden perustiedot sekä ilmaston tuotto ja hyötysuhde.

Laite	Valmistaja	Paino	Moottorin nimellisteho [kW]	Mitattu ottoteho [kW]	Ilmaston tuotto [kgO ₂ /d]	Ilmaston hyötysuhde [kgO ₂ /kWh]
Aire O ₂	Claritek Oy (maahantuojaja)	40–50 kg ³	2,5	2,5	36	0,6
Lietepumppu + ejektor	Lietepumppuilla lukuisia valmistajia sekä maahantuojia	n. 80 kg	4	3,8	19	0,2
Lietepumppu + hajotinlevy		n. 80 kg	4	4,3	20	0,2
Lietepumppu + letku		n. 80 kg	4	4,2	24	0,2
Mikrox	Mik-Rip Teräs Oy	n. 700 kg	7,5	10	90	0,4
Micro	Waterix Oy	6–9 kg	0,09	0,2	3	0,7
Mini	Waterix Oy	n. 19 kg	1,1	1,3	46	1,5
Visiox	Vesi-Eko Oy	n. 200 kg	4	4,5	110	1,0

³ Kokonaispaino noin 120 kg ml. kellutusponttonit sekä kiinnitysraudat.

Suomenoajan koealtaassa suoritetuissa testissä mukana olleiden laitteiden ilmastustehot OTR vaihtelivat välillä 3 ja 110 kgO₂/d ominaisilmastustehojen AE vaihdellessa välillä 0,2 ja 1,5 kgO₂/kWh (T = 4 °C, lämpötilakerroin 1,024). Laitteiden mitatut ottotehot vaihtelivat välillä 0,2 ja 10 kW. Ilmastusteho OTR vastaa ilmastuksen tuottoa ja ominaisilmastusteho AE ilmastuksen hyötysuhdetta. Kaikkien laitteiden mittaustulokset käsitellään samalla periaatteella kohdassa 4.4 esitetyn teoriaosuuden mukaisesti.

Kaikkien laitteiden osalta voidaan todeta, että laboratorioskokeiden perusteella lämpötilakertoimen ollessa pieni (1,011) suurin ilmastus- ja ominaisilmastusteho saavutettaisiin lämpötilan lähestyessä 0:aa astetta. Lämpötilakertoimen ollessa 1,024 ja 1,027 lämpötila vaikuttaa maksimaaliseen ilmastus- ja ominaisilmastustehoon melko vähän. Ilmastettavan veden happipitoisuuden noustessa ilmastus- ja ominaisilmastusteho laskee suoraviivaisesti ja saavuttaa nollatehon veden kyllästyshappipitoisuudessa.

Reunasen selvityksessä (Reunanen, 2004) käsiteltiin Högbensjönin hätäilmastussuunnitelmaa, jossa lähtökohtana laitemitoitukselle käytettiin ilmastustarvetta 1 500 kg/d. Tarvittava konetehto mitoitettiin 15–20 %:ksi ilmastustarpeesta eli 225–300 kg/d:aan. Saatavilla olleiden pumppujen tehotiedot esitetään taulukossa 7. Kaikkien pumppujen kohdalla laitetietoja ja tehoarvoja ei ollut käytettävissä.

Taulukko 7. Eri pumpputyyppeiden tehotietoja (Vesi-Eko Oy, 2003).

Laite	Teho [kW]	Pumppausteho [l/min]	Pumppausteho [l/s]	Hapetusteho [kg/d]	Tarvittava määrä / 300 kg/d [kpl]
Uppopumppu 1	1,5	240	4	1,9	158
Uppopumppu 2	4,5	660	11	5,2	58
Palopumppu ”Esa”	?	480	8	3,8	79
Uppopumppu 3	?	300	5	2,4	125
Uppopumppu 4	?	300	5	2,4	125

Edellä mainitun ilmastustarpeen tuottamiseen olisi teoreettisesti tarkasteltuna tarvittu 7 kpl Aire-O₂-hapetuslaitetta, 3 kpl Mikrox-hapetinta, 3 kpl Visiox-ilmastinta, 13 kpl lietepumppu + letku -yhdistelmää ja 86 kpl Micro-ilmastinta tai 6 kpl Mini-ilmastinta laboratorioskokeiden tulosten perusteella. Vastaavasti taulukossa 5 mainittuja pumppuja tarvittaisiin 58–158 kpl ilmastustarpeen ollessa 300 kg/d.

5. Kenttäkokeet

5.1 Yleistä

Kenttäkokeisiin valittiin laboratoriokokeiden perusteella kolme laitetta: Vesi-Eko Oy:n Visiox-ilmastin, Waterix Oy:n Mini-ilmastuslaite sekä lietepumppu varustettuna hajotinlevyllä. Visiox asennettiin Siilinjärven Ahmonlammelle, Mini (2 kpl) Nummi-Pusulan Pitkäjärvelle ja Nummi-Pusulan Ruutinlampea hapetettiin lietepumpulla. Kohdejärvet valittiin siten, että niiden hapetuksesta oli sovittu aikaisemmin työn tilaajien ja laitetoimittajien välillä, ja kenttäkokeiden seuranta oli mahdollista toteuttaa laitteiden normaalin käytön yhteydessä. Koejakson aikana helmi-maaliskuussa ilman keskilämpötilat vaihtelivat Etelä- ja Lounais-Suomen -5 asteesta Keski-Suomen -10 asteeseen, öisin paikoitellen yli -25 asteeseen, joten laitteiden toiminnasta saatiin kokemuksia todellisissa talviolosuhteissa.

5.2 Tavoitteet

Kenttäkokeiden tavoitteena oli seurata laitteiden toiminnan vaikutusta veden happipitoisuuden sekä jääolosuhteisiin sekä havainnoida laitteen asennukseen ja toimintaan liittyviä asioita, mm. jään kertymistä laitteeseen sekä toimintavarmuutta. Lisäksi tavoitteena oli selvittää laitteiden asennukseen ja käyttöön liittyvät työturvallisuusnäkökohdat (sähköturvallisuus, koealueen merkintä).

5.3 Kohdejärvet

5.3.1 Pitkäjärvi, Nummi-Pusula

Nummen Pitkäjärvi (ks. kuva 30) on Nummi-Pusulan suurimpia järviä ja ympäristöolosuhteiltaan luonnonkaunis ja vaihteleva. Pitkäjärven vesiala on noin 327 ha ja kokonais-tilavuus noin 1 milj. m³. Järven keskisyvyys on 3,06 m syvimmän kohdan ollessa 8,82 m. Pitkäjärven vedenpinnan tasoa säätelee järven alapuolella Nummenjoessa 0,6 km:n päässä järvestä sijaitseva Nummenkosken voimalaitos. Pitkäjärven vedenlaatua on tutkittu satunnaisesti 1960-luvulta asti, säännöllisemmin 1990-luvulla. Järvi on vedenlaadultaan rehevä. Sen pohjoisosa kuuluu yleiseen käyttökelpoisuusluokkaan välttävä ja eteläosa luokkaan tyydyttävä. Järven syvin kohta, yli 8 m, sijaitsee pohjoisessa altaassa. Happipitoisuudet järven alusvedessä ovat olleet viime vuosina huonot sekä kesän että talven kerrostuneisuuskausina.

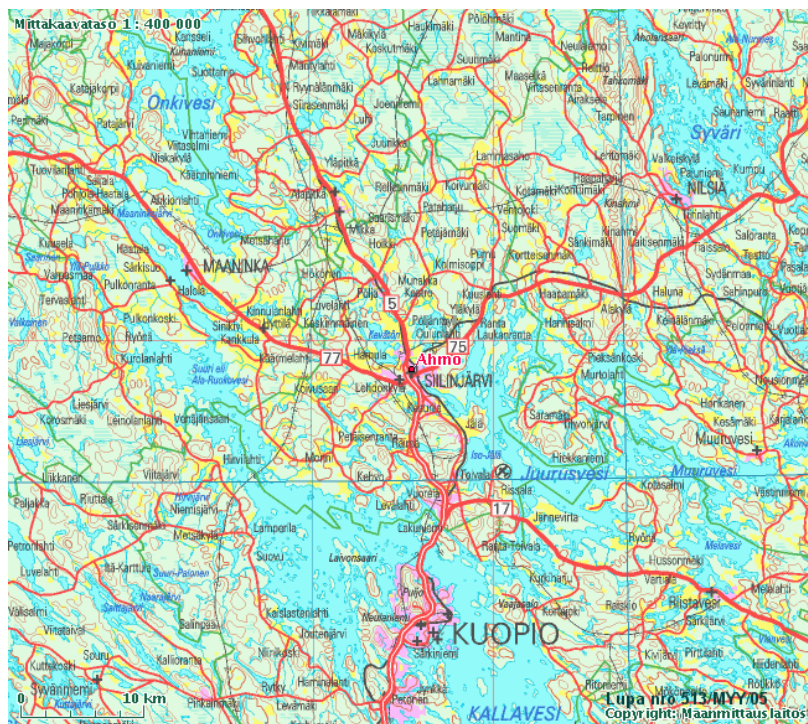


Kuva 30. Pitkäjärven sijainti Nummi-Pusulassa.

Pitkäjärven pohjoissyvänteen huonohappisuus aiheuttaa ravinteiden vapautumista sedimentistä ja edesauttaa järven rehevöitymistä. Syvänteen talvi- ja kesäaikainen hapettaminen vähentäisi sisäistä kuormitusta ja olisi siten perusteltua osana järven hoitotoimenpiteitä. Hapetus purkaisi vähitellen sedimenttiin kertynyttä happivelkaa, ja hapetus-tarve kestäisi luultavasti joitakin vuosia (Heitto & Niimimäki, 2002).

5.3.2 Ahmonlampi, Siilinjärvi

Ahmonlampi (ks. kuva 31) on Siilinjärven keskustan kaava-alueella sijaitseva kirkasvesinen suppalampi, jonka virkistyskäyttömerkitys on keskeisen sijainnin vuoksi merkittävä. Ahmonlampi on mitoiltaan noin 650 m x 100 m pinta-alan ollessa 6,37 ha. Lammen vesitilavuudeksi pinnan korkeudella +95,30 on laskettu 0,36 milj. m³. Lammessa on kaksi syvännettä, joiden vesisyvyydet ovat noin 17 m (pohjoinen syväntä) ja noin 7 m (eteläinen syväntä).



Kuva 31. Ahmonlammen sijainti Siilinjärvellä.

Ahmonlampi saa vetensä pieneltä valuma-alueelta pintavaluntana ja maaperän vajovenä. Lammen nykyistä virkistyskäyttöä rajoittavat erityisesti kesäisin esiintyvät runsaat leväkasvustot. Sinilevälukinnat ovat lähes jokakesäinen ilmiö. Leväkasvua ylläpitää veden korkea fosforipitoisuus, joka on yhteydessä alusveden heikkoon happitilanteeseen ja sen aiheuttamaan voimakkaaseen sisäiseen kuormitukseen. Voimakkaan fosforikuormituksen on aiheuttanut lammen rannalla 1970-luvun alussa toimintansa lopettanut pesula, jonka jätevesien fosfori on varastoitunut lammen pohjasedimenttiin. Lammen ulkoinen kuormitus on nykyisin välttävällä tasolla sisäisen kuormituksen ollessa moninkertainen ulkoiseen verrattuna.

Ahmonlammen veden laatua on seurattu säännöllisesti vuodesta 1985 alkaen. Lampea on hapetettu vuosina 1986–1993 ja uudelleen talvesta 2001 alkaen. Toteutetulla hapetuksella ei kuitenkaan ole saatu aikaan pysyviä vaikutuksia lammen tilaan. Veden laatu-seurannan mukaan vuosina 2000–2002 molempien syvänteiden pohjavedessä on esiintynyt hapettomuutta ja pohjaveden ravinnepitoisuudet ovat olleet korkeat. Päällysveden ravinne- ja happitilanteen perusteella lampi voidaan luokitella reheväksi vesistöksi; alusveden osalta tilanne on tätäkin huonompi (SCC Viatek, 2004).

5.3.3 Ruutinlampi, Nummi-Pusula

Nummi-Pusulan Ruutinlampi (ks. kuva 32) on pinta-alaltaan noin 9 ha, keskisyvyyden ollessa 1,3 m, suurimman syvyyden 1,7 m ja tilavuuden 0,11 milj. m³. Ruutinlampi on mutapohjainen, erittäin rehevöitynyt ja ravinteikas lampi, ja sekä sisäinen että ulkoinen kuormitus vaikuttavat lammen tilaan.



Kuva 32. Ruutinlammen sijainti Nummi-Pusulassa.

Lammessa ei ole läpivirtausta, ja heikko happitilanne toistuu muutaman vuoden välein. Lammen tilan parantamiseksi on perustettu vuonna 2002 Ruutinlammen hoito- ja suojeluyhdistys ry, jonka tavoitteena on edistää lammen vesiensuojelua, muuta luonnonsuojelua ja maisemanhoitoa lammen ranta- ja valuma-alueella. Ruutinlammen tilaa on satunnaisesti tutkittu vuodesta 1986 lähtien, ja vuosina 2002–2003 suoritettu hapetuslaitetekokeilu on raportoitu Uudenmaan ympäristökeskuksen monistesarjassa (Arrajoki, 2004; Reunanen, 2004).

5.4 Havainnot

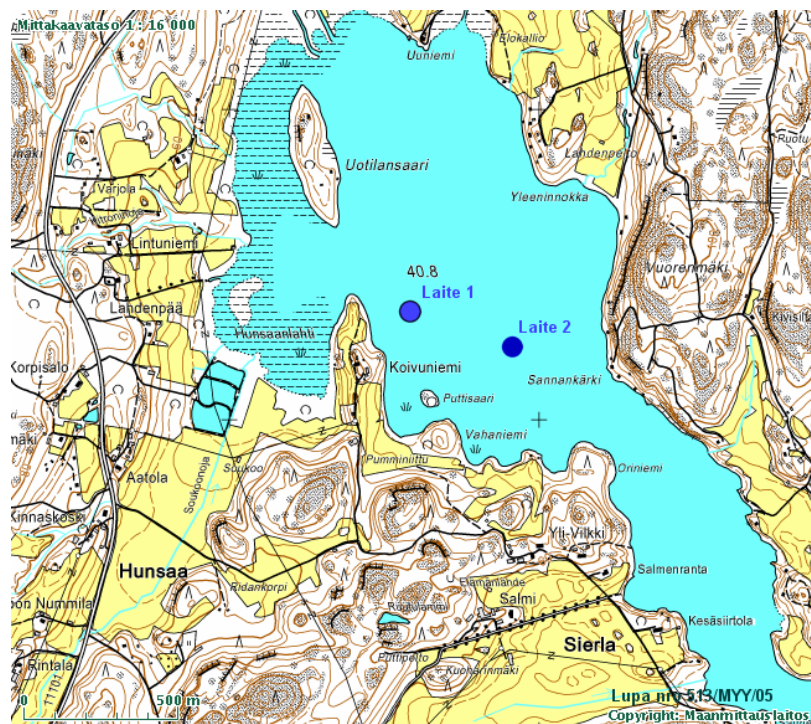
5.4.1 Yleistä

Kenttähavaintojen tukena käytettiin havaintopöytäkirjaa (liite 7), johon kirjattiin kohteen ja laitteen perustiedot, asennuspäivä sekä seurantajakson aloituspäivä, havaintojen kirjauspäivä, tiedot lumi- ja jääolosuhteista, ilman lämpötila sekä havainnot avannon kehitymisestä. Veden lämpötilaa ja happipitoisuutta seurattiin eri syvyyksissä sekä eri

etäisyydellä laitteesta. Lisäksi kerättiin havaintoja laitteiden toimintavarmuudesta sekä jään muodostumisesta laitteeseen.

5.4.2 Mini-ilmastuslaite

Waterix Oy:n Mini-ilmastuslaitteet (2 kpl) asennettiin Pitkäjärvelle 18.2.2005. Seurantajakso aloitettiin 22.2.2005, ja se päättyi 30.3.2005. Havainnot kirjattiin ylös noin viikon välein. Happi- ja lämpötilamittaukset suoritettiin YSI 550A -happimittarilla. Laitteiden asennuspaikat sijaitsivat Koivuniemen ja Sannankärjen välissä, lähellä järven syvintä kohtaa (kuvat 33 ja 34).



Kuva 33. Waterix Mini -ilmastimien sijainnit Nummi-Pusulan Pitkäjärven pohjoisosassa.

Molemmat laitteet oli varustettu 1,1 kW:n moottorilla imusyvyyden ollessa 6,5 m. Vesisyvyydet ilmastuspaikoilla olivat 6,9 m (laite 1) ja 7,5 m (laite 2).

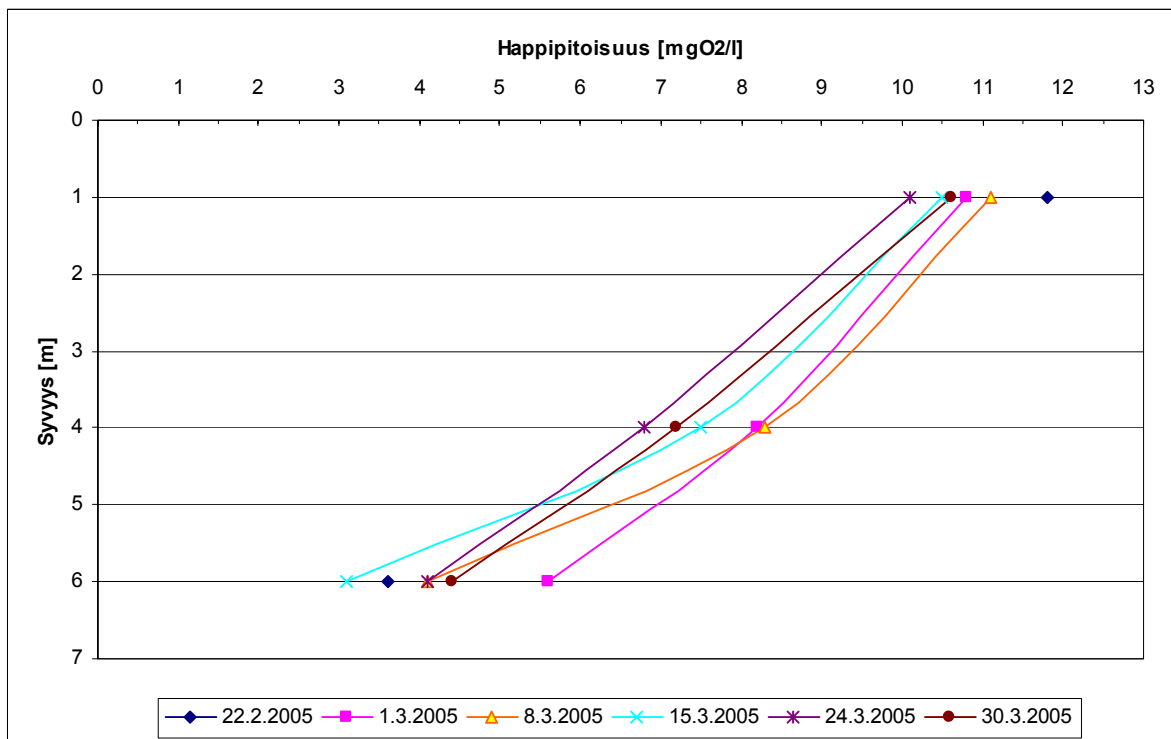
Laitteet kuljetettiin paikoilleen kolkalla ja laitteiston osat eli pumppu, imuputki ja kellukkeet liitettiin toisiinsa jäällä. Laitteen asennus kesti 5–6 tuntia laitetta kohti. Laitteen kiinnitykseen tarvittavat harukset oli ankkuroitu järven pohjaan, ja laite oli naruilla kiinni kellukkeissa. Imuputken päässä oli paino putken pitämiseksi paikoillaan. Lisäksi laitteet ankkuroitiin jäähän.



Kuva 34. Waterix Mini Nummi-Pusulan Pitkäjärvellä talvella 2005.

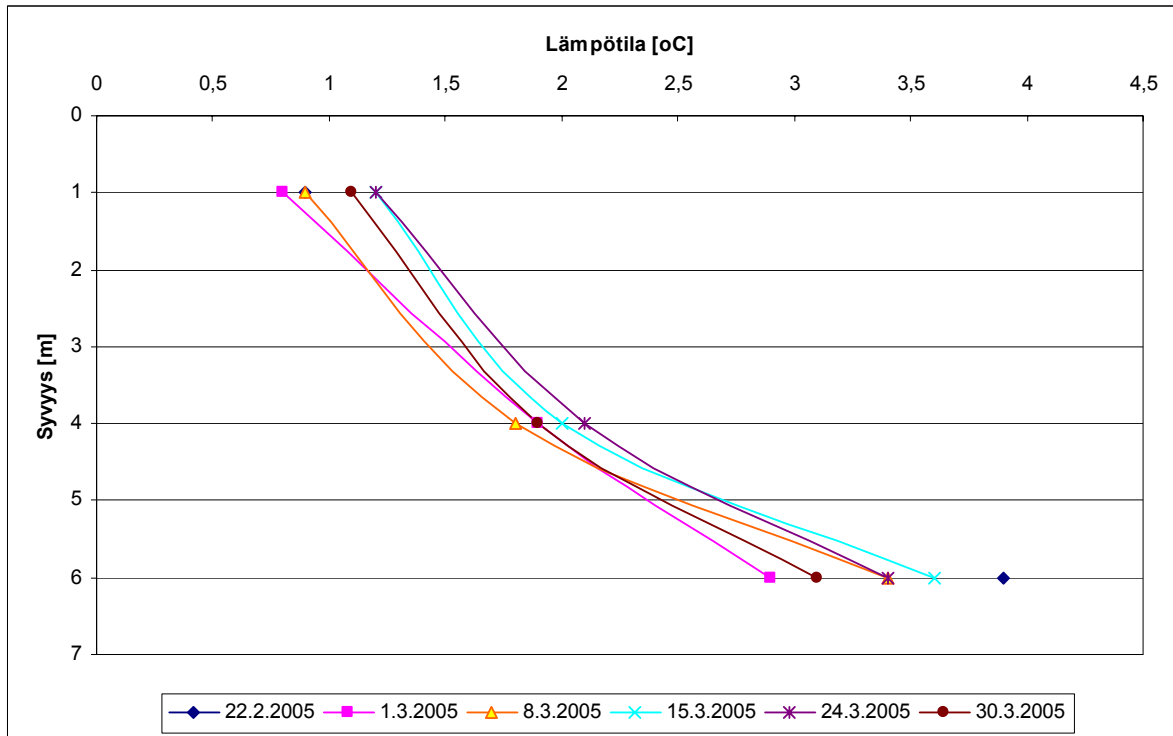
Sähkönsyöttö oli järjestetty läheisen ranta-asukkaan liittymästä siirtoetäisyyden ollessa rannalla noin 75 m ja veden alla noin 400 m. Veden alla olleessa kaapelissa ei ollut liittoskohtia, ja maakaapeli oli vedetty pintavetona. Laitteet oli varustettu vika- ja ylivirtasuojalla.

Havainnot molempien laitteiden kenttäkokeista esitetään kuvissa 35–46 ja liitteessä 8.



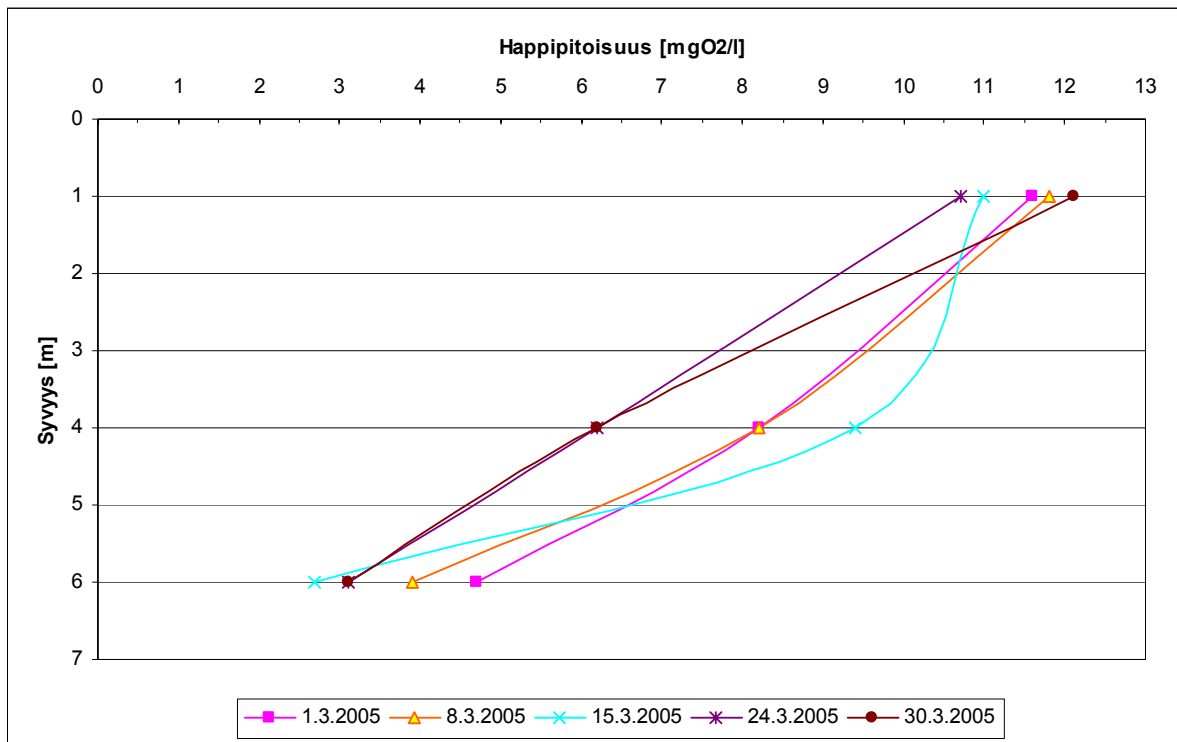
Kuva 35. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 1, avanto, etäisyys laitteesta 8–10 m.

Avannosta noin 1 metrin syvyydeltä mitatut happipitoisuudet vaihtelivat välillä 10,1 ja 11,8 mgO₂/l ja pienenivät tasaisesti syvemmälle mentäessä. Syvyydellä 6 m eli noin 90 cm järven pohjasta happipitoisuudet vaihtelivat välillä 3,1 ja 5,6 mgO₂/l.



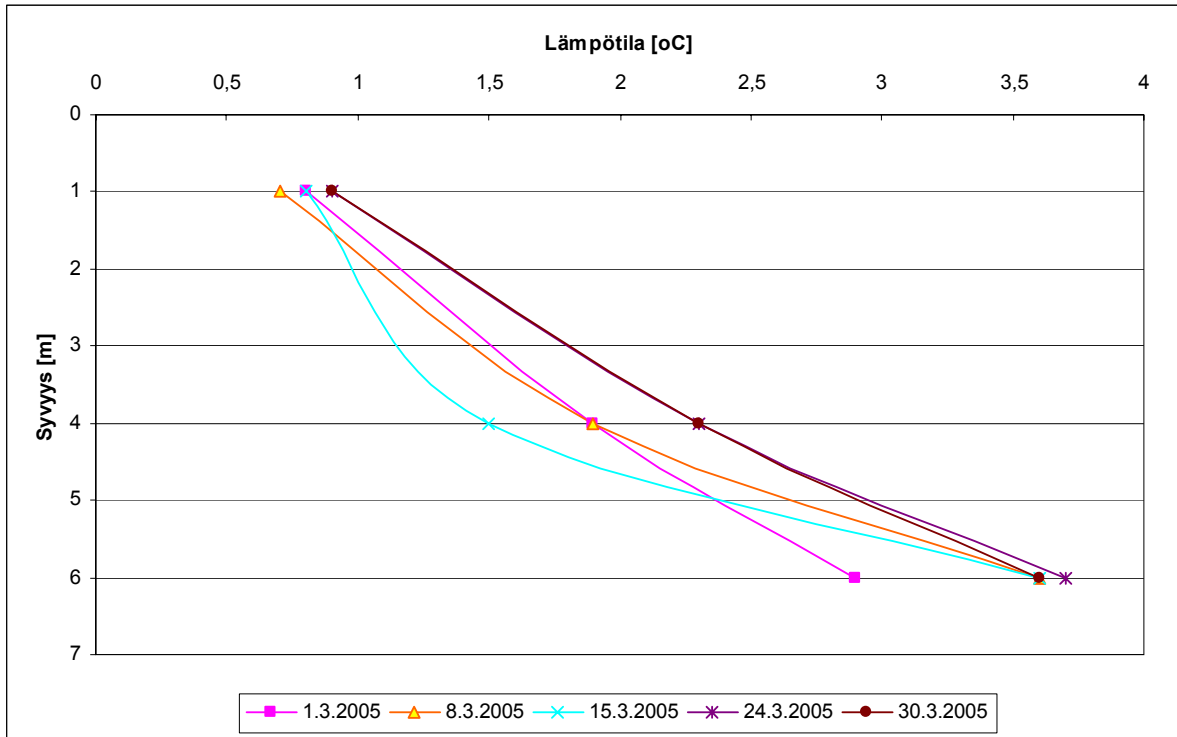
Kuva 36. Lämpötilahavainnot, Mini nro 1, avanto, etäisyys laitteesta 8–10 m.

Lämpötilat noin 1 m syvyydessä vaihtelivat 1 metrin syvyydellä välillä 0,8 ja 1,2 °C. Syvemmälle mentäessä lämpötila nousi melko tasaisesti vaihdellen pohjan lähellä välillä 2,9 ja 3,9 °C.



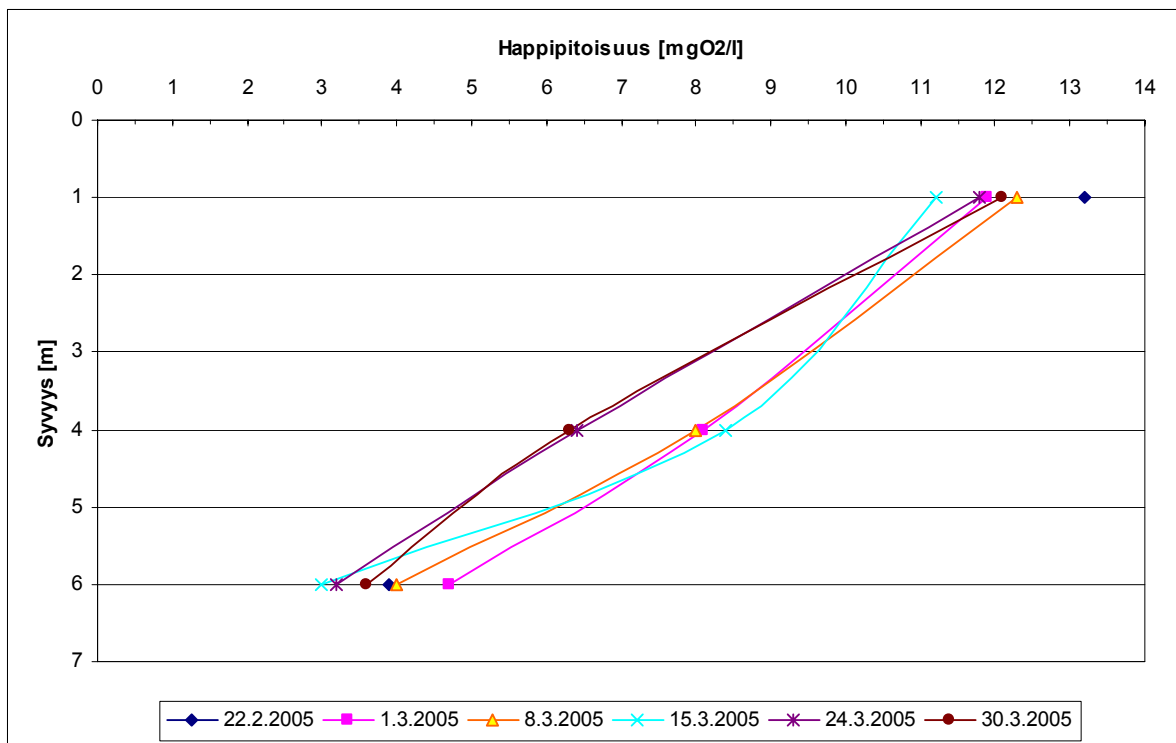
Kuva 37. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 1, etäisyys laitteesta 20 m.

Havaintopisteen, joka sijaitsi noin 20 m laitteesta, pintavedestä (syvyys 1 m) mitattiin lähes samansuuruisia happipitoisuuksia kuin avannosta laitteen läheltä; happipitoisuudet vaihtelivat välillä 10,7 ja 12,1 mgO₂/l. Lähellä pohjaa syvyydellä 6 m pitoisuudet vaihtelivat välillä 2,7 ja 4,7 mgO₂/l.



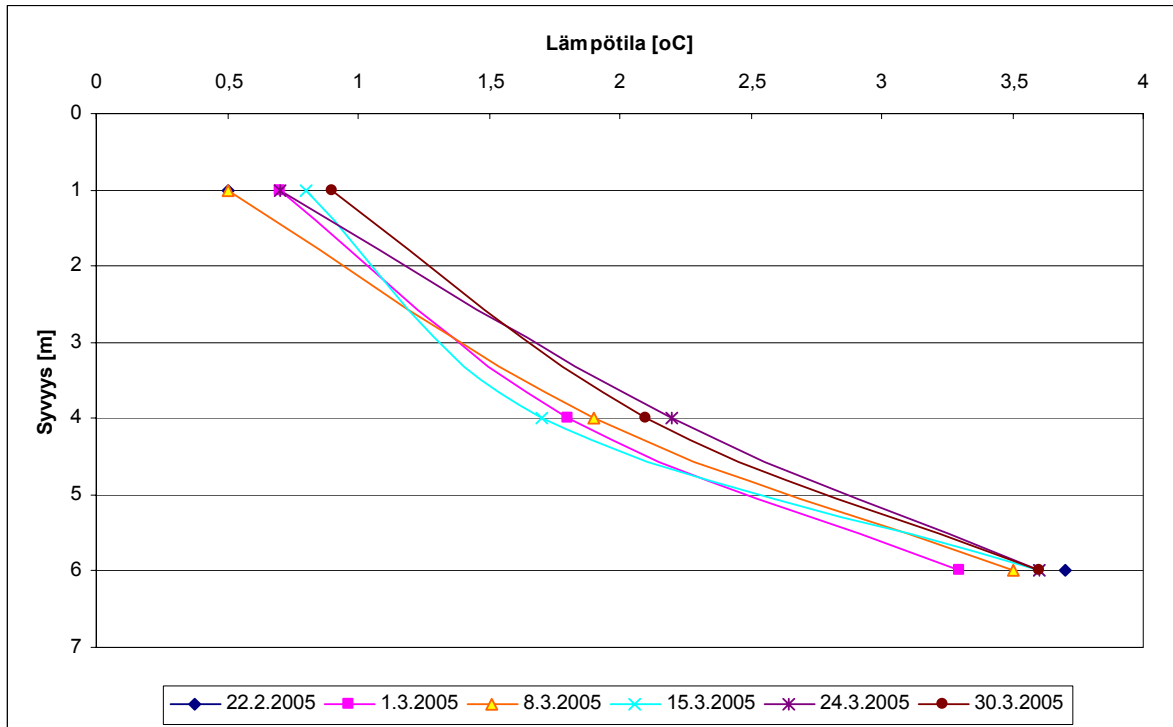
Kuva 38. Lämpötilahavainnot, Mini nro 1, etäisyys laitteesta 20 m.

Lämpötilahavainnot olivat samaa suuruusluokkaa kuin avannosta tehdyt havainnot: pinnassa lämpötila vaihteli välillä 0,7 ja 0,9 °C ja pohjassa välillä 2,9 ja 3,7 °C.



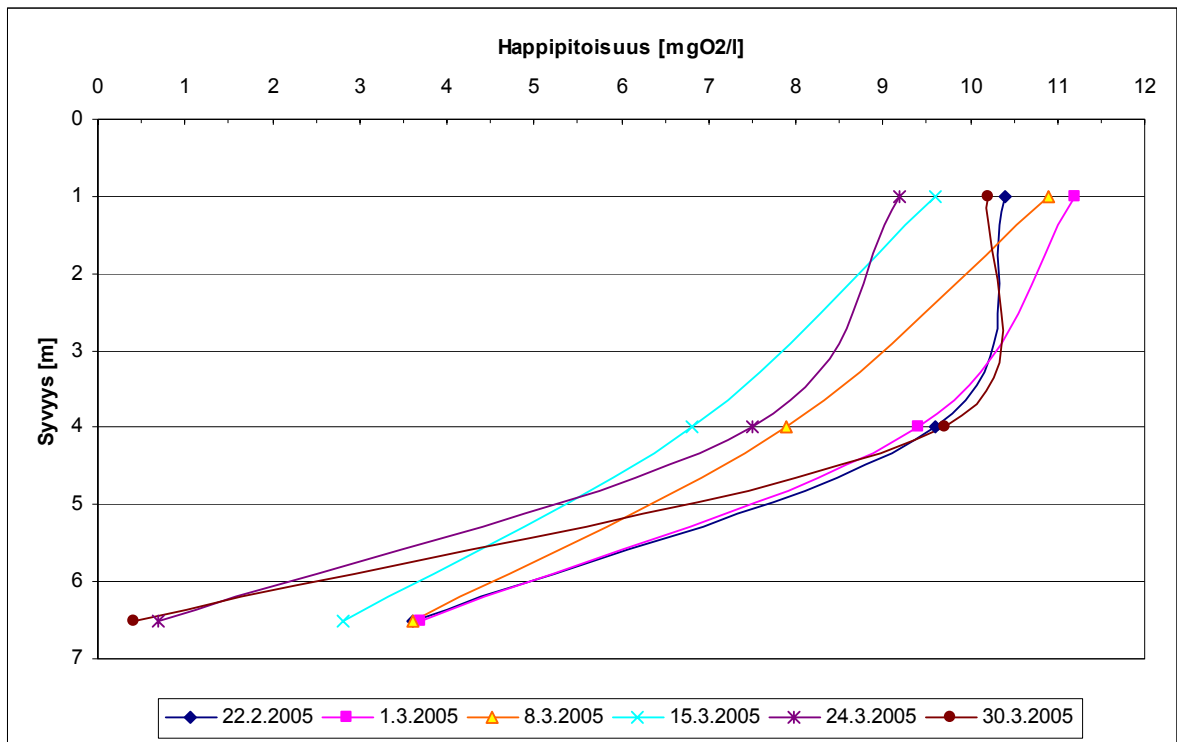
Kuva 39. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 1, etäisyys laitteesta 30 m.

Kauimmaisesta havaintopisteestä (etäisyys laitteesta 30 m) tehdyt havainnot olivat samaa suuruusluokkaa kuin muissakin pisteissä: pintavedessä happipitoisuus vaihteli välillä 11,2 ja 13,2 mgO₂/l ja pohjassa välillä 3,0 ja 4,7 mgO₂/l lämpötilan vaihdelta pinnassa välillä 0,5 ja 0,9 °C ja pohjassa välillä 3,3 ja 3,7 °C.



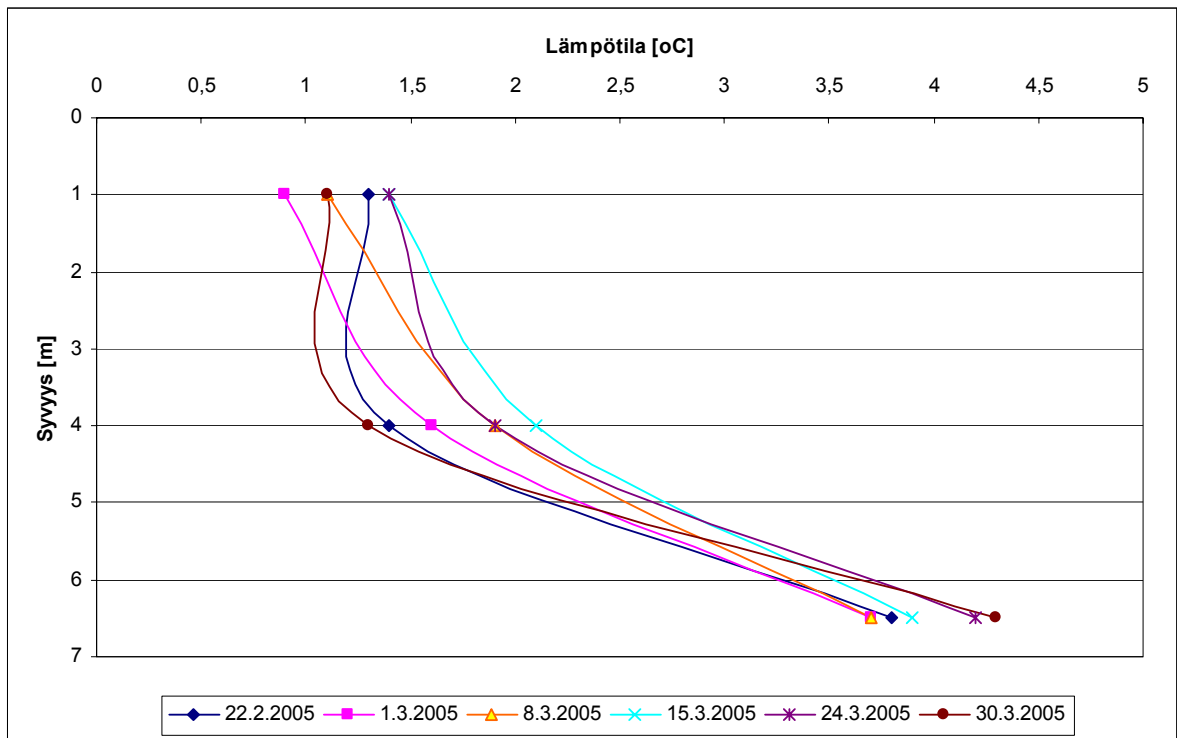
Kuva 40. Lämpötilahavainnot, Mini nro 1, etäisyys laitteesta 30 m.

Laitteen nro 1 muodostaman avannon halkaisija vaihteli välillä 18 ja 23 m havaintojakson aikana. Laitteen vaikutusalueelta tehdyissä mittauksissa ei havaittu rikkivedyn hajua, joka viittaisi siihen, että pohjan lähellä oleva vesi ei olisi ollut hapetonta havaintojakson aikana. Lumen paksuus jään päällä vaihteli mittausjakson aikana välillä 0 ja 15 cm.



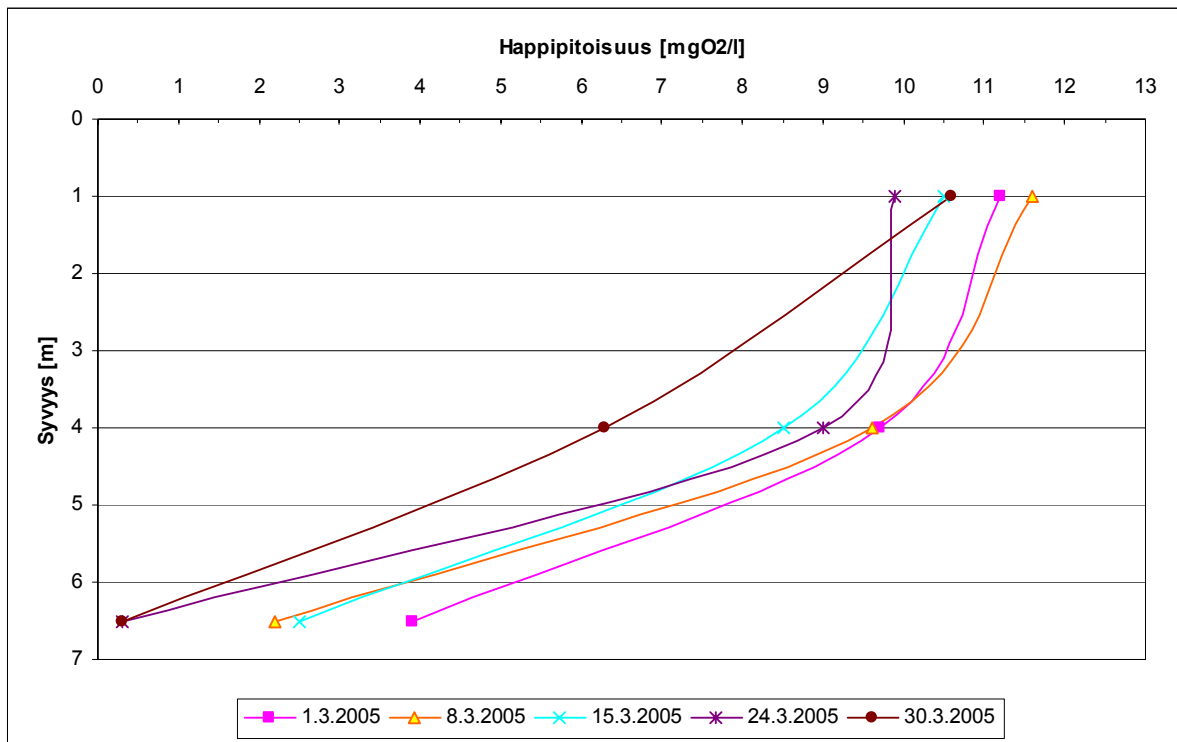
Kuva 41. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 2, avanto, etäisyys laitteesta 6–8 m.

Laitteen nro 2 läheltä avannosta (etäisyys laitteesta 6–8 m) mitatut happipitoisuudet syvyydellä 1 m vaihtelivat välillä 9,2 ja 11,2 mgO₂/l. Seurantajakson alussa ja lopussa (havaintokerrat 22.2. ja 30.3.) happipitoisuus pysyi lähes muuttumattomana noin 3,5 m:n syvyyteen asti. Muilla havaintokerroilla happipitoisuudet laskivat melko tasaisesti syvemmälle mentäessä, ja lähellä pohjaa (etäisyys pohjasta noin 1 m) happipitoisuudet vaihtelivat välillä 0,4 ja 3,7 mgO₂/l. Matalin happipitoisuus mitattiin seurantajakson lopussa ja korkein havaintojakson alussa. Avannon halkaisija vaihteli seurantajakson aikana välillä 14 ja 25 m. Seurantajakson loppupuolella (havaintokerrat 15.3. ja 24.3.) todettiin avannosta tehdyissä aistinvaraisissa havainnoista selvä rikkivedyn haju. Samoilla havaintokerroilla mitatut happipitoisuudet pohjan lähellä syvyydellä 6,5 m olivat vastaavasti 2,8 ja 0,7 mgO₂/l.



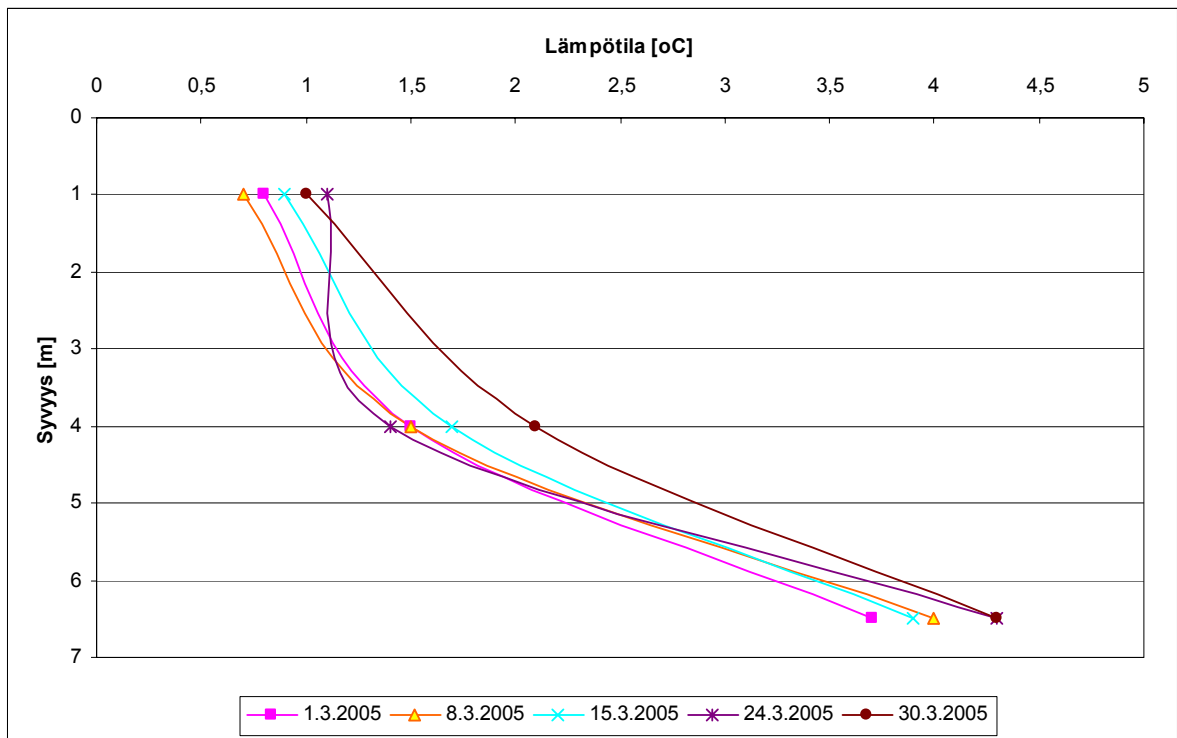
Kuva 42. Lämpötilahavainnot, Mini nro 2, avanto, etäisyys laitteesta 6–8 m.

Avannosta mitatut lämpötilat syvyydellä 1 m vaihtelivat välillä 0,9 ja 1,4 °C. Seuranta-
jakson alussa ja lopussa lämpötila pysyi lähes muuttumattomana noin 3,5 metrin syvyy-
teen asti. Muilla havaintokerroilla lämpötila laskivat melko tasaisesti syvemmälle men-
täessä, ja syvyydellä 6,5 m lämpötila vaihteli välillä 3,7 ja 4,3 °C.



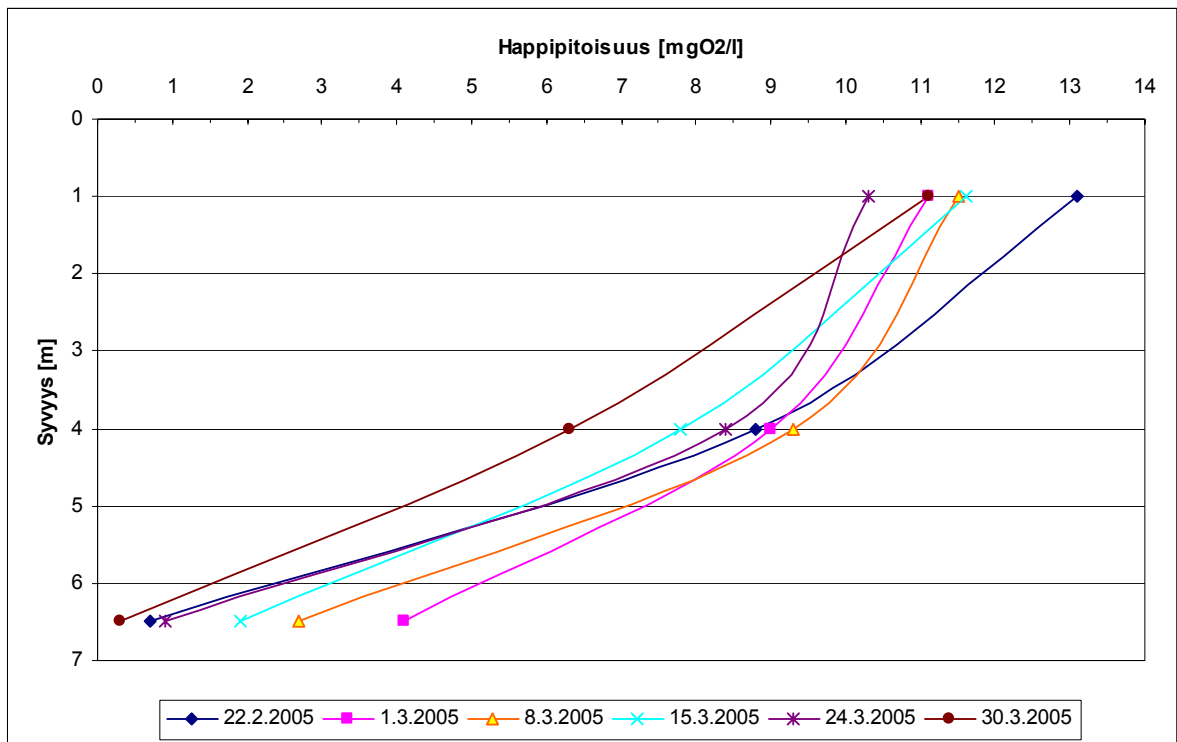
Kuva 43. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 2, etäisyys laitteesta 20 m.

Etäisyydeltä 20 m laitteesta mitatut happipitoisuudet olivat samalla tasolla laitteen läheltä avannosta mitattuihin pitoisuuksiin verrattuna. Pitoisuudet vaihtelivat välillä 9,9 ja 11,6 mgO₂/l syvyydellä 1 m. Havaintojakson loppupuolella tehtyjen happimittausten perusteella vesi lähellä pohjaa oli lähes hapetonta (0,3 mgO₂/l) happipitoisuuden vaihdella aikaisemmilla mittauskerroilla välillä 2,2 ja 3,9 mgO₂/l. Korkein pitoisuus mitattiin seurantajakson alussa.



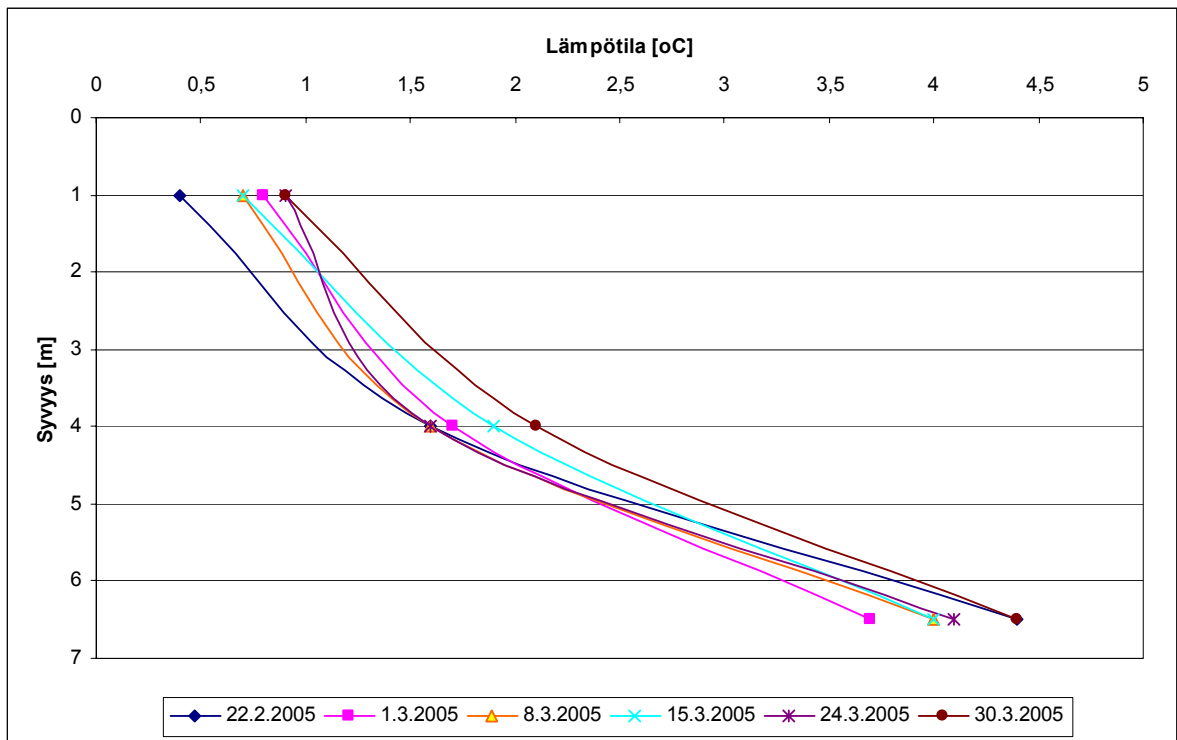
Kuva 44. Lämpötilahavainnot, Mini nro 2, etäisyys laitteesta 20 m.

Etäisyydeltä 20 m mitatut lämpötilat vaihtelivat välillä 0,7 ja 1,1 °C (syvyys 1 m). Ne laskivat melko tasaisesti syvemmälle mentäessä poikkeuksena havaintojakson loppupuolella (24.3.) tehty mittaus, jossa lämpötila pysyi lähes vakiona noin 3,5 m:n syvyyteen asti. Lähellä pohjaa lämpötilat vaihtelivat välillä 3,7 ja 4,3 °C.



Kuva 45. Happipitoisuushavainnot, Mini nro 2, etäisyys laitteesta 30 m.

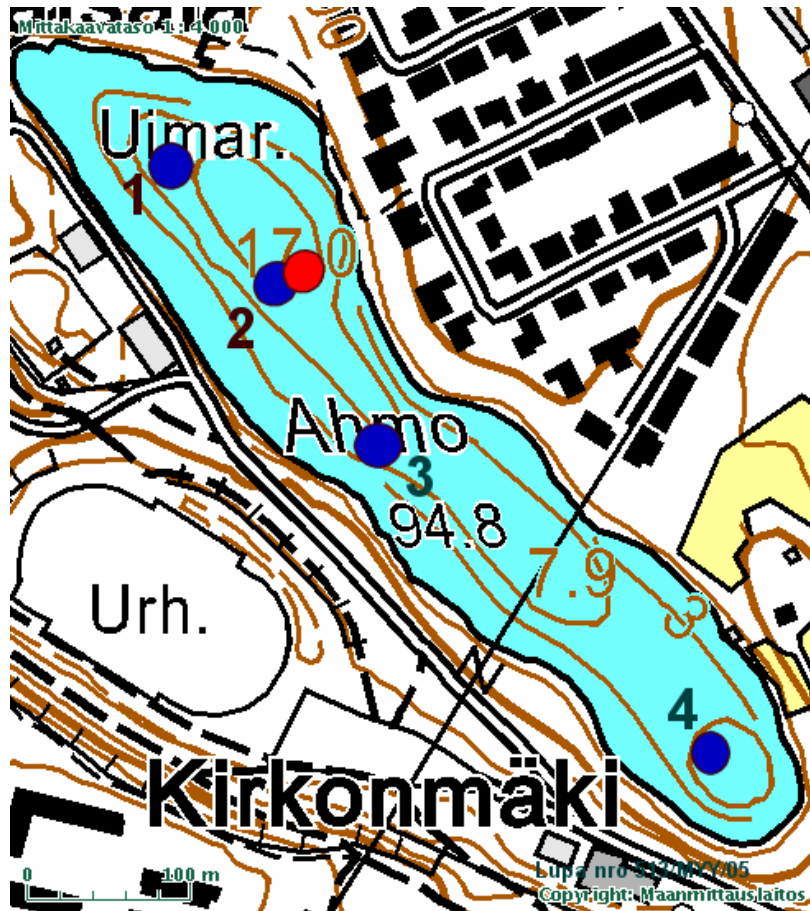
Etäisyydeltä 30 m laitteesta veden happipitoisuus syvyydellä 1 m vaihteli välillä 10,3 ja 13,1 mgO₂/l. Syvemmälle mentäessä veden happipitoisuudet laskivat suhteellisen tasaisesti ja lähellä pohjaa pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,3 ja 4,1 mgO₂/l. Pienin pitoisuus läheltä pohjaa mitattiin havaintojakson lopussa. Lämpötilahavainnot 1 m:n syvyydessä vaihtelivat välillä 0,4 ja 0,9 °C ja lähellä pohjaa välillä 3,7 ja 4,4 °C.



Kuva 46. Lämpötilahavainnot, Mini nro 2, etäisyys laitteesta 30 m.

5.4.3 Visiox-ilmastin

Visiox-ilmastin asennettiin Siilinjärven Ahmonlammelle 8.2.2005 kuvan 47 mukaiseen paikkaan lammen pohjoiseen syvänteeseen (punainen piste). Pisteet 1–4 ovat näytteenottopisteitä. Ilmastimen moottorin nimellisteho oli 4 kW ja imuputken pituus (imusyvyys) oli 14,5 m.



Kuva 47. Visiox-ilmastimen sekä mittauspisteiden sijainti Siilinjärven Ahmonlammella.

Ilmastin kuljetettiin paikalle erillisinä komponentteina: moottori mukaan lukien suoja-kansi ja suihkukruunu olivat erillisinä osina. Lisäksi imuputki koottiin 1,5 m pitkistä osista rannalla kiinnittämällä osat toisiinsa ruuvikiinnityksellä. Imuputken rakenne on joustava, jotta se kestäisi paremmin aallokon ja tuulen aiheuttamat rasitukset. Komponentit voidaan kuljettaa peräkärjellä varustetulla pakettiautolla, jolloin kaikki tarvittavat osat mahtuvat mukaan. Talvella asennuksessa tarvitaan apuna moottorikelkkaa sekä rekeä; kesällä asennus voidaan suorittaa laitevalmistajan asennuslautalta.

Laitteen sitomiseksi paikoilleen (harustaminen) käytettiin 25 kg:n painoisia betonilaattoja, joita asennettiin 10 kpl laitteen molemmille puolille. Harusvaijereina käytettiin 5 mm:n paksuista haponkestävää vaijeria. Laattojen ja vaijerien asennus oli tapahtunut aikaisempien ilmastuskokeilujen yhteydessä 1990-luvun alkupuolella.

Sähkönsyöttö rannasta laitteelle vedettiin kumikaapelilla (5 x 4 mm²) järven pohjassa kaapelin pituuden ollessa noin 150 m. Kaapeli oli asennettu aikaisempien ilmastuskokeiden yhteydessä. Rannalla olevaan sähkökaappiin sähkö johdettiin ilmakaapelilla läheiseltä pohjavedenottamolta. Laite oli varustettu vikavirtasuojalla.

Laitteen asennus kestää sähköistämisen ja harustuksen osalta 4–5 tuntia, kun harustukseen käytettävät painolaatat ja vaijerit on asennettu aikaisemmin paikoilleen. Kaapelin uitt nopeus on käytännössä noin 500 metriä tunnissa, mutta mahdollisten liitosten tekeminen vaatii lisää aikaa. Lisäksi talvella tapahtuvassa asennuksessa tarvittavien avantojen tekeminen ja laitteen uittaminen paikoilleen vievät aikaa. Laitteen kokoaminen, paikoilleen kuljettaminen sekä toimintakuntoon saaminen vaativat olosuhteiden ja vuodenajan mukaan 1–2 työpäivää kolmen hengen asennusryhmältä. Siilinjärven kunta tiedotti ilmastuksesta ranta-asukkaille.

Seurantajakso aloitettiin asennusta edeltävänä päivänä (7.2.2005) merkitsemällä ilmastuspaikan happimittauskohdat sekä jään paksuuden mittauskohdat puisilla merkkikepeillä. Ilmastusalue ympäröitiin lippusiimalla ja merkittiin varoitustauluilla (kuva 48). Happipitoisuus- ja lämpötilamittauksissa käytettiin YSI 52 -mittaria.

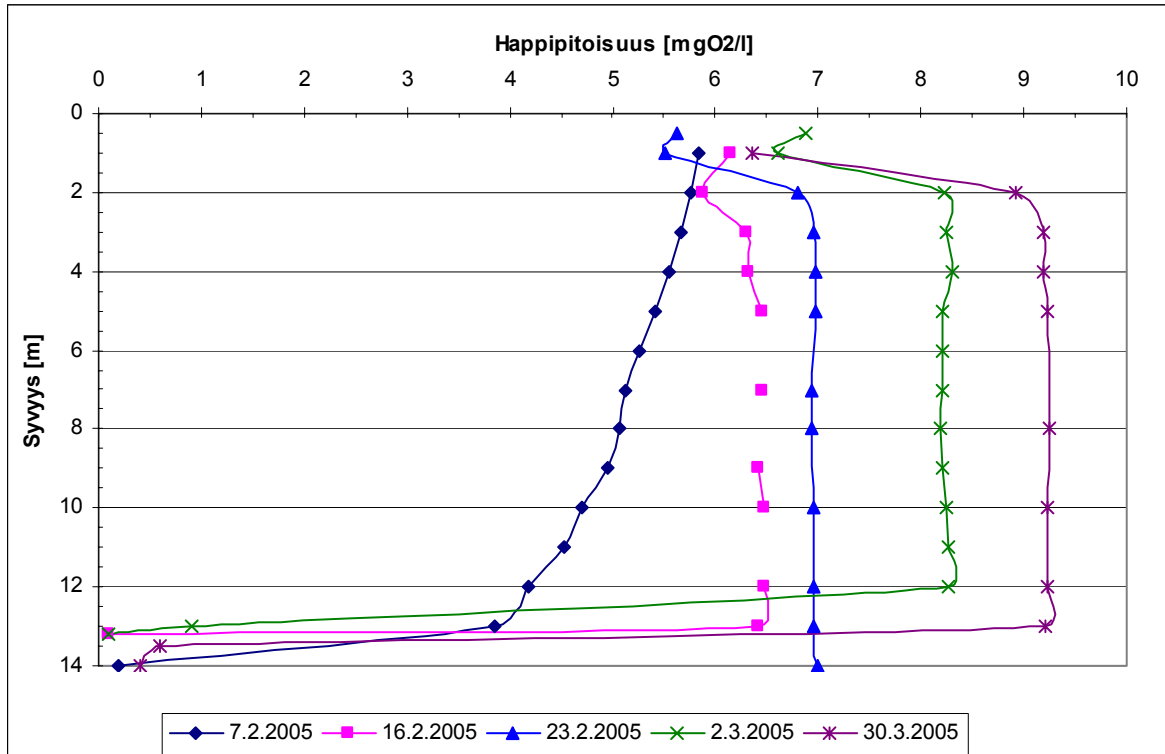


Kuva 48. Visiox-ilmastimen kenttäkoealue Siilinjärven Ahmonlammella helmikuussa 2005.

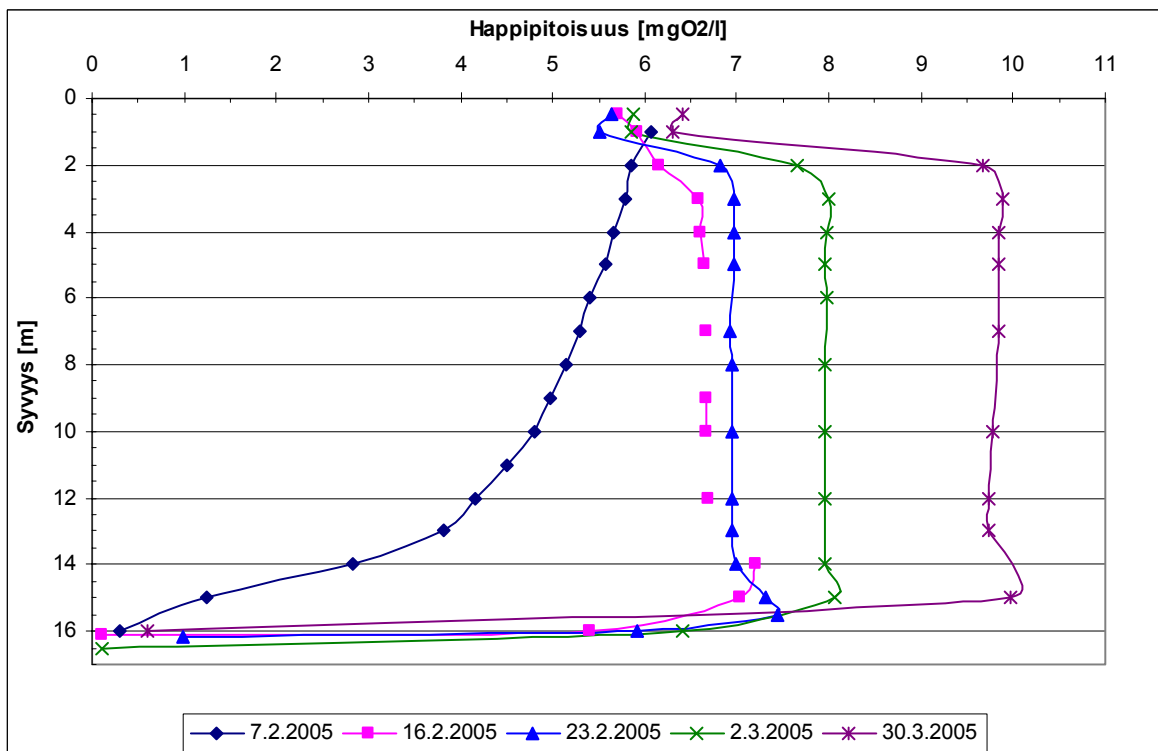
Happipitoisuudet ja jään paksuudet mitattiin seurantajakson aikana (7.2.–30.3.2005) samoista kohdista eri etäisyydeltä laitteesta. Jään paksuus vaihteli 30–56 cm mittauspaikan mukaan. Asennuksen yhteydessä jääkansi laitteen välittömässä läheisyydessä rikkoontui, mutta seurantajakson aikana jään paksuus rikkoontuneella alueella kasvoi 35 cm:iin asti. Jään päällä oli lunta 2–15 cm seurantajakson aikana.

Happipitoisuutta ja veden lämpötilaa mitattiin eri syvyyksistä ja eri etäisyydeltä ilmastuslaitteesta yhteensä neljästä eri mittauspisteestä. Visiox-ilmastin oli asennettu näytepisteen nro 2 lähelle (etäisyys laitteesta 7 m) Ahmonlammen pohjoiseen syvänteeseen, jossa vesisyvyys oli 16,1 m. Muut näytepisteet sijaitsivat uimarannan läheisyydessä (piste nro 1, vesisyvyys 13,5 m, etäisyys laitteesta 70 m), lammen kapeassa kohdassa (piste nro 3, vesisyvyys 10 m, etäisyys laitteesta noin 130 m) ja lammen matalassa päässä (piste nro 4, vesisyvyys 8,5 m, etäisyys laitteesta noin 435 m). Pisteiden nro 1, 2 ja 4

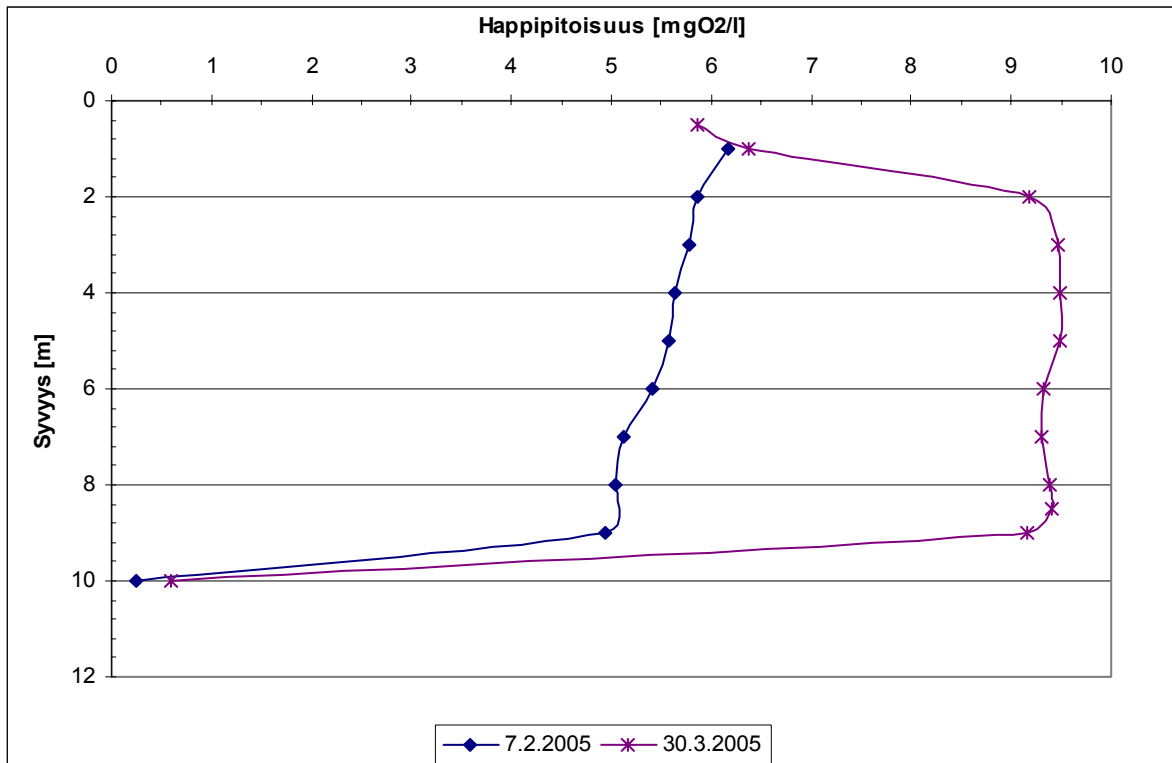
tiedot kerättiin viikon välein havaintojakson aikana ja pisteen nro 3 seurantajakson alussa ja lopussa. Havainnot esitetään kuvissa 49–56 ja liitteessä 9.



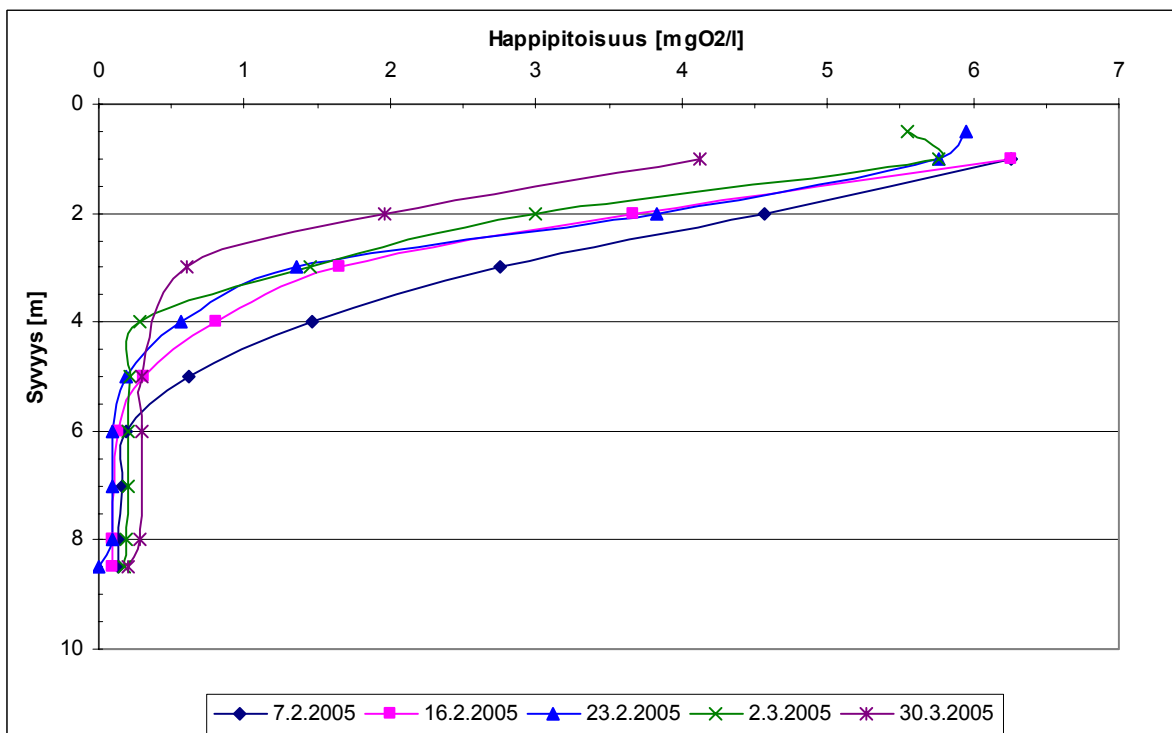
Kuva 49. Happipitoisuushavainnot pisteessä nro 1 (uimaranta).



Kuva 50. Happipitoisuushavainnot pisteessä nro 2 (ilmastimen lähellä).



Kuva 51. Happipitoisuushavainnot pisteessä nro 3 (kapeikko).

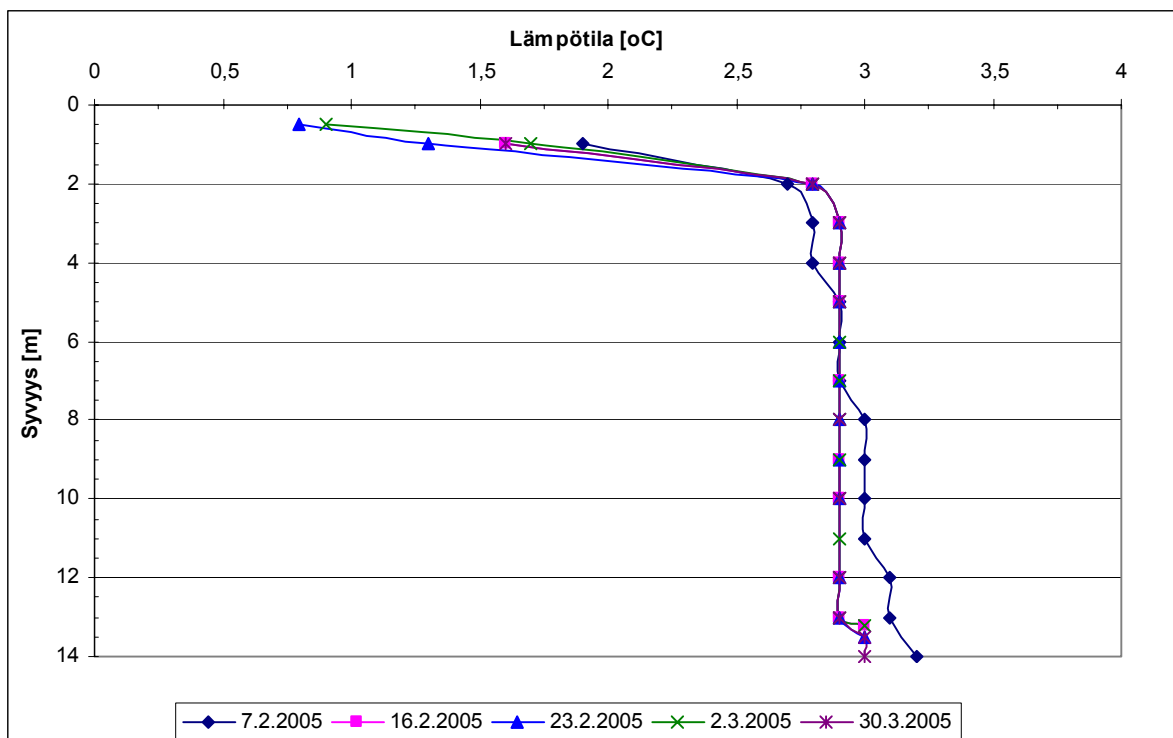


Kuva 52. Happipitoisuushavainnot pisteessä nro 4 (lammen matala pää).

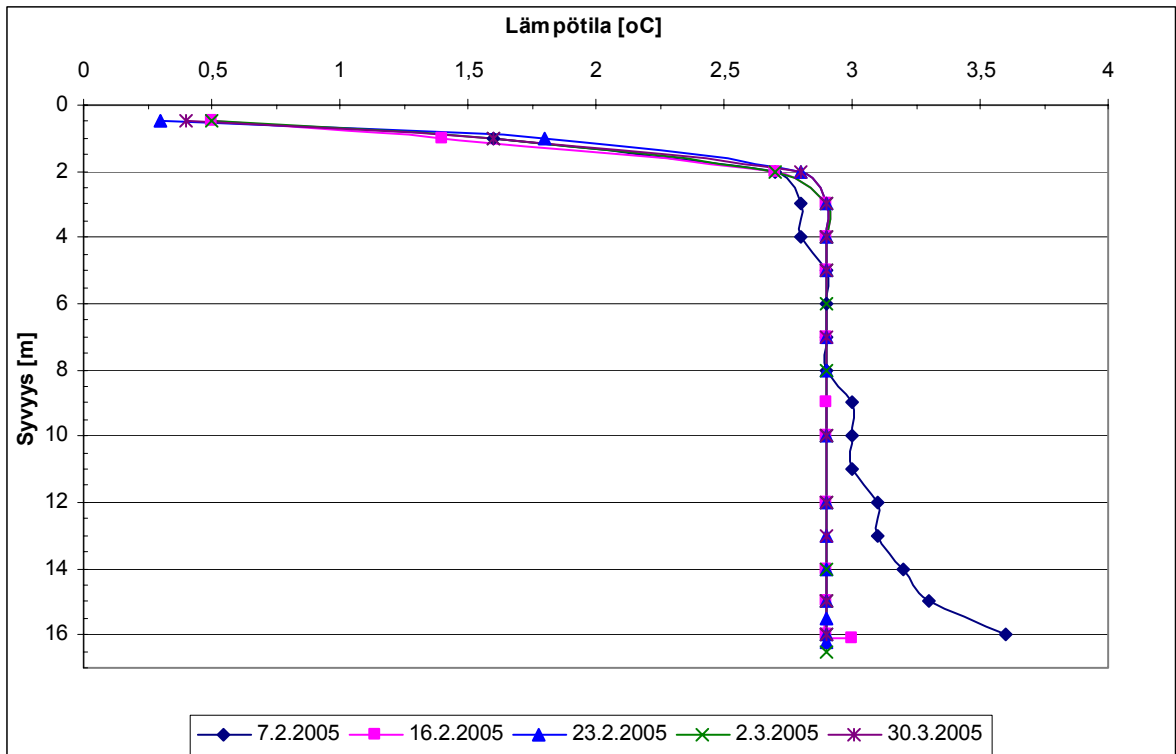
Happipitoisuudet pisteissä nro 1, 2 ja 3 vaihtelivat seurantajakson alussa (ennen laitteen asennusta) välillä 5,8 ja 6,2 mg/l (syvyys 1 m) ja laskivat tasaisesti syvemmälle mentäessä veden ollessa hapetonta lammen pohjassa. Pisteessä nro 4 veden happipitoisuus 1 metrin syvyydessä oli noin 6,3 mg/l ja happipitoisuus laski alle 1 mg/l:aan noin 5 metrin syvyydessä.

Viikon kuluttua laitteen käyttöönotosta pisteessä nro 1 veden happipitoisuus vaihteli välillä 5,9 ja 6,5 mg/l 13 metrin ja pisteessä nro 2 välillä 6,2 ja 7,2 mg/l 15 metrin syvyyteen asti. Pinnalla (syvyys 1–2 m) happipitoisuus vaihteli välillä 5,9 ja 6,2 mg/l. Kahden viikon kuluttua laitteen käyttöönotosta oli pisteessä nro 1 happipitoisuus noussut tasolle 6,8–7,0 mg/l ja pisteessä nro 2 tasolle 7,0–7,4 mg/l. Kolmen viikon kuluttua pisteessä nro 1 veden happipitoisuus oli noussut tasolle 8,3 mg/l ja pisteessä nro 2 tasolle 8,0 mg/l. Havaintojakson lopussa happipitoisuus pisteessä nro 1 syvyydellä 2–13 m oli noussut tasolle 9,2 mg/l ja pisteessä nro 2 tasolle 9,8 mg/l.

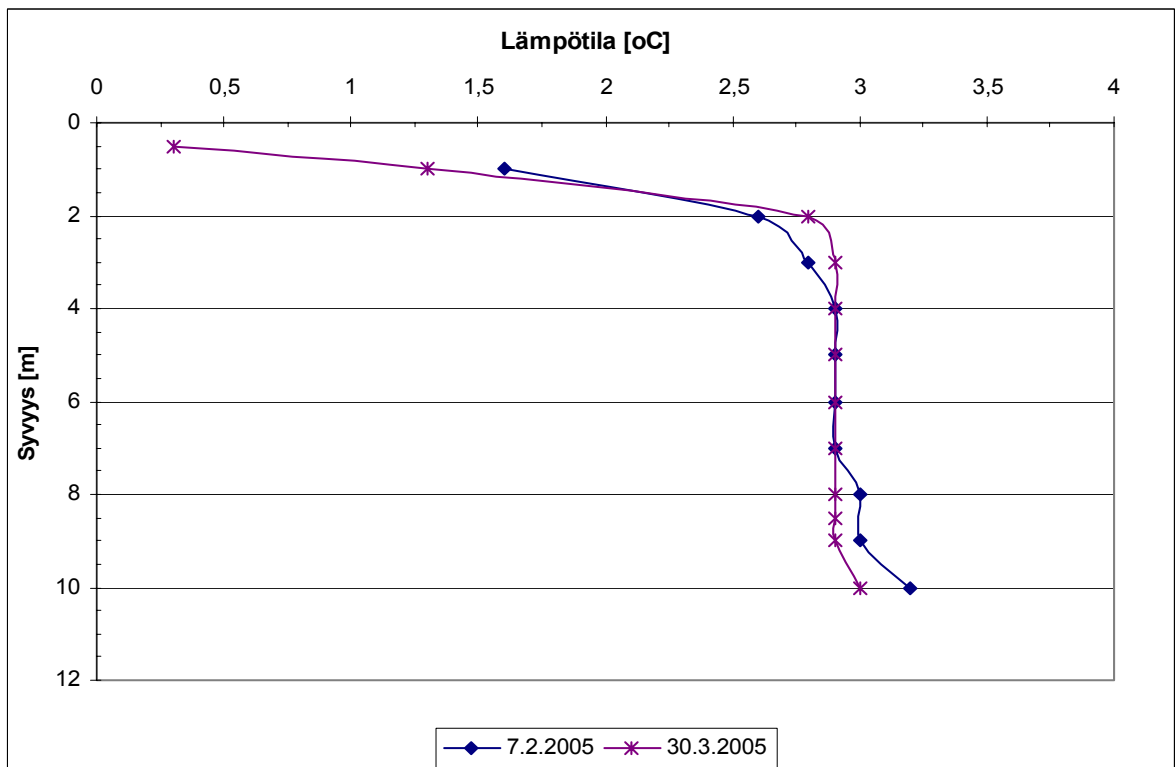
Havaintojakson lopussa pisteessä nro 3 happipitoisuus vaihteli välillä 9,1 ja 9,5 mg/l syvyydellä 2–9 metriä. Pisteessä nro 4 happipitoisuudet laskivat tasaisesti koko seurantajakson ajan ja saavuttivat tason 1 mg/l syvyydellä 2–5 metriä mittausajankohdan mukaan.



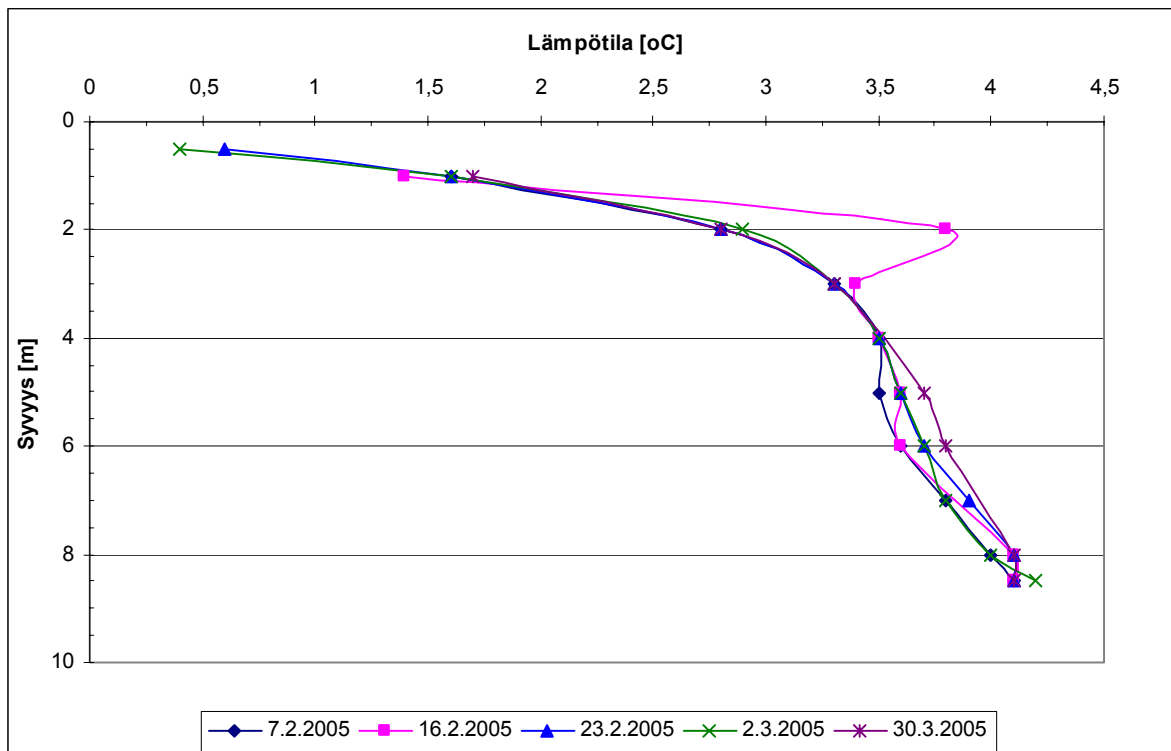
Kuva 53. Lämpötilahavainnot pisteessä nro 1 (uimaranta).



Kuva 54. Lämpötilahavainnot pisteessä nro 2 (ilmastimen lähellä).



Kuva 55. Lämpötilahavainnot pisteessä nro 3 (kapeikko).

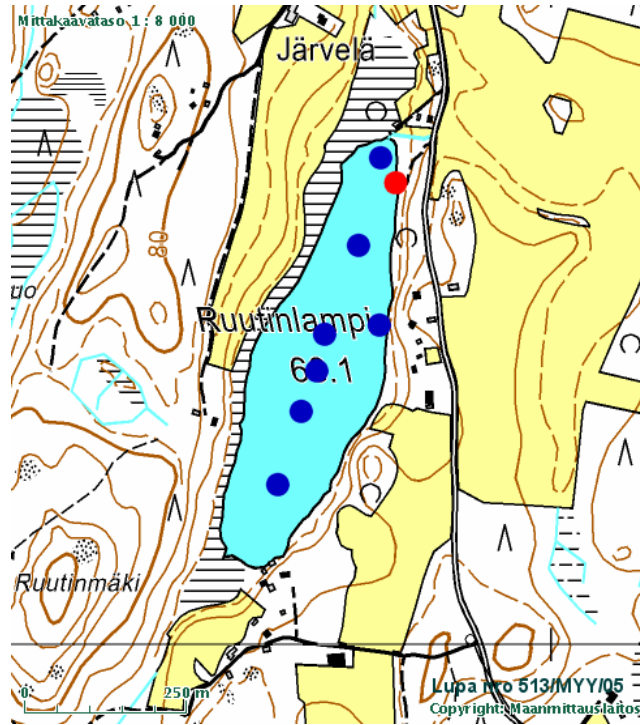


Kuva 56. Lämpötilahavainnot pisteessä nro 4 (lammen matala pää).

Lämpötilahavainnosta voidaan pisteiden nro 1–3 kohdalla todeta, että lämpötila 1 metrin syvyydessä vaihteli välillä 0,3 ja 1,9 °C, ja harppauskerroksen syvyys oli noin 2 m. Harppauskerroksen alapuolella lämpötila vakiintui tasolle 2,8–3,0 °C. Pisteessä nro 4 (lammen matala pää) harppauskerrosta ei ollut havaittavissa yhtä selvästi. Lämpötila 1 m syvyydessä vaihteli välillä 1,4 ja 1,7 °C ja pohjan lähellä syvyydessä 8,5 m lämpötila vaihteli välillä 4,1 ja 4,2 °C. Lämpötilan selvää tasaantumista noin 3 m:n syvyydessä ei mittausten perusteella voitu havaita. (kuva 56).

5.4.4 Lietepumppu

Maanviljelijä Aarre Arrajoki ilmasti Nummi-Pusulän Ruutinlampea 6.2.–22.2. ja 5.3.–20.3.2005 lietepumpulla, joka oli asennettu laiturille lammen pohjoispäähän (punainen piste, kuva 57). Pumppu oli varustettu hajotinlevyllä, ja pumpun moottorin nimellisteho oli 4 kW. Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot tehtiin yhteensä 7 pisteestä (siniset pisteet, kuva 57). Pisteiden numerointi esitetään liitteessä 10.



Kuva 57. Lietepumpun ja havaintopisteiden sijainti Ruutinlammella.

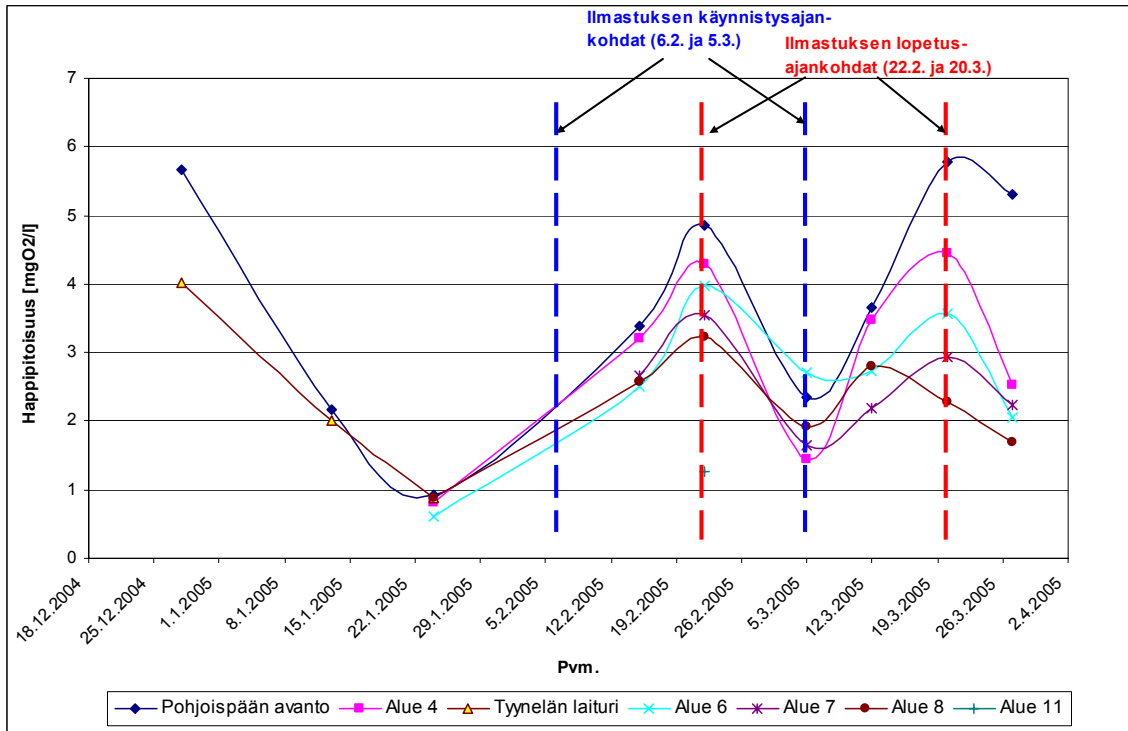
Lietepumppu oli kiinnitetty laituriin köydellä. Sähkö (380 V) johdettiin rannan läheisyydessä sijainneesta rakennuksesta siirtomatkan ollessa noin 350 metriä. Hajotinlevy oli suunnattu noin 45° kulmassa ylöspäin veden pinnasta, jotta pohjasedimentti sekoituisi mahdollisimman vähän (kuva 58).



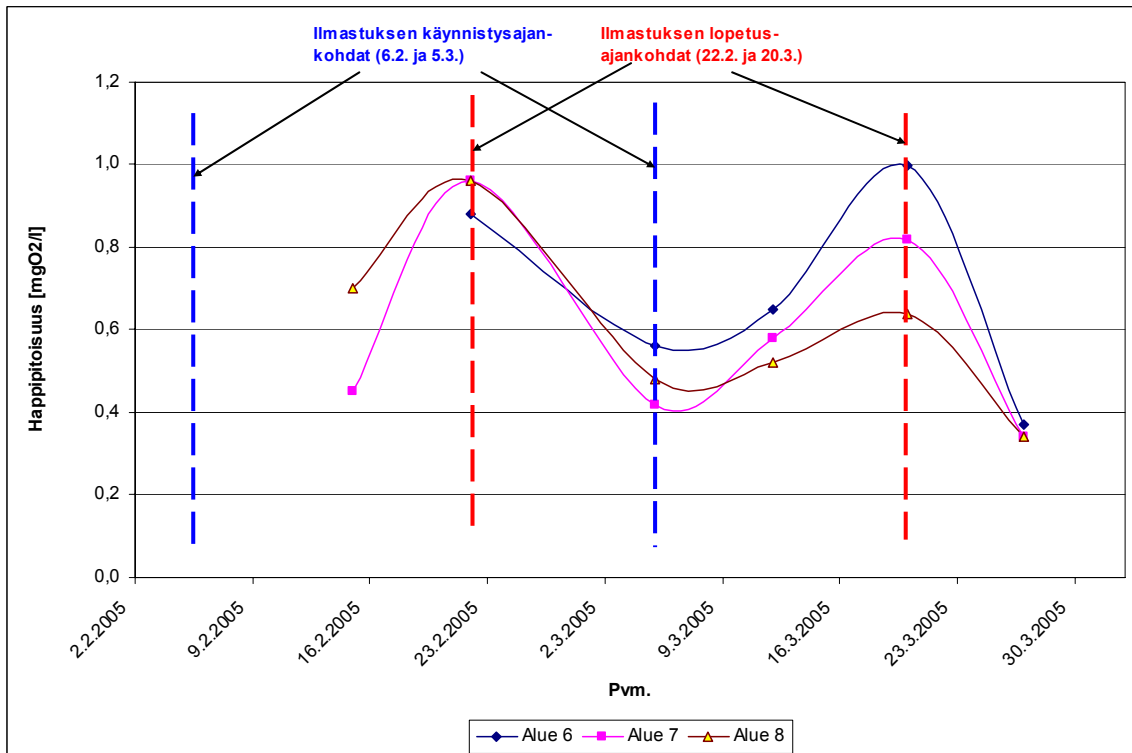
Kuva 58. Lietepumppu varustettuna hajotinlevyllä toiminnassa Ruutinlammella talvella 2004 (kuvat: Aarre Arrajoki).

Ranta-asukkaille tiedotettiin hapetuksesta ennen sen aloittamisesta Ruutinlammen hoito- ja suojeluyhdistyksen kautta. Ranta-asukkaat ovat itse olleet mukana päättämässä tehtävistä kunnostustoimenpiteistä tai saivat tiedon ilmastuksesta henkilökohtaisesti. Hapetuksen vuoksi heikentyneestä jäätilanteesta varoitettiin kylteillä.

Lietepumppu + hajotinlevy -yhdistelmän kenttäkokeiden havainnot esitetään kuvissa 59–62 sekä liitteessä 10. Happi- ja lämpötilamittauksissa käytettiin YSI 55 -mittaria.



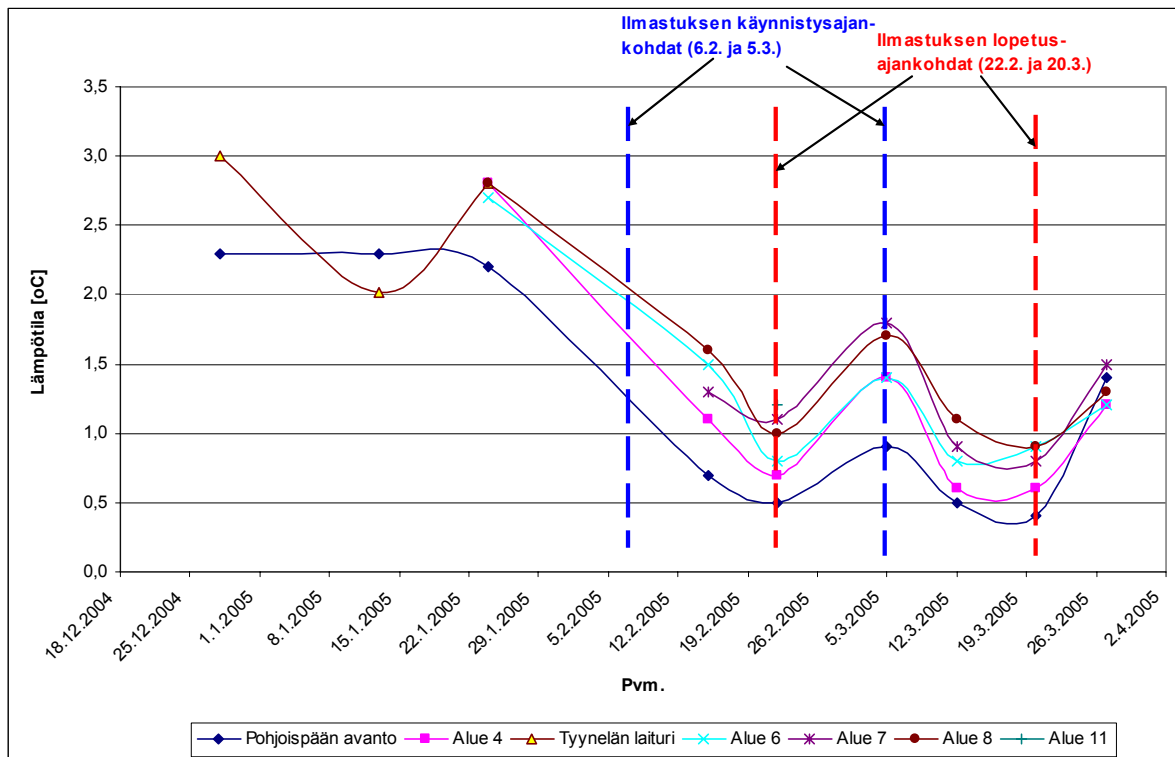
Kuva 59. Lietepumppu + hajotinlevy, happipitoisuudet eri havaintopisteissä syvyydellä 80–100 cm.



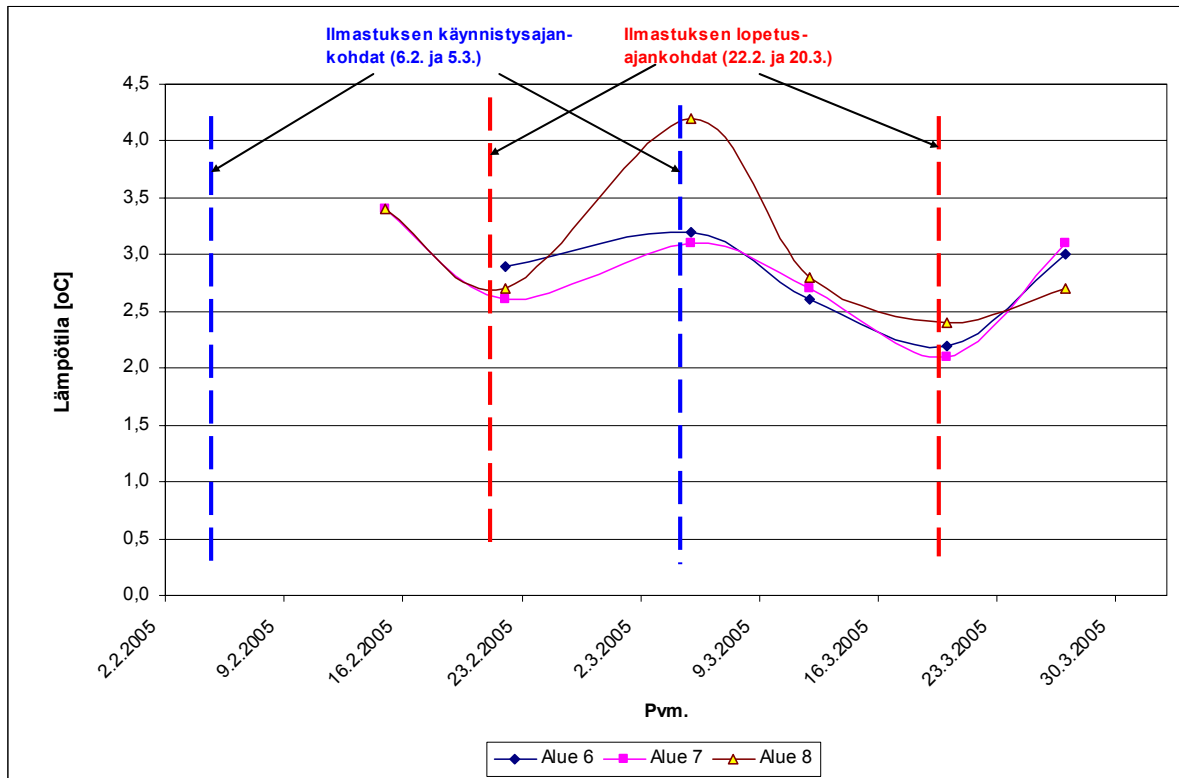
Kuva 60. Lietepumppu + hajotinlevy, happipitoisuudet eri havaintopisteissä syvyydellä 150 cm.

Havaintojakson alussa happipitoisuus lammen pohjoispään avannossa syvyydellä 80–100 cm oli 5,7 mgO₂/l ja Tyynelän laiturin luona avannossa 4,0 mgO₂/l. Tammikuun loppupuolella tehdyissä havainnoissa happipitoisuudet olivat kaikissa havaintopisteissä alle 1 mgO₂/l, ja todennäköisesti happipitoisuudet laskivat vieläkin alemmas ennen hapetuksen käynnistämistä. Hapetuksen aloittamisen jälkeen (6.2.) veden happipitoisuus lähti nousemaan kaikissa havaintopisteissä. Maksimipitoisuudet ennen laitteen pysäyttämistä vaihtelivat välillä 3,2 ja 4,9 mgO₂/l. Hapetuksen lopettamisen jälkeen (22.2.) pitoisuudet laskivat välille 1,5 ja 2,7 mgO₂/l noin kahdessa viikossa. Hapetuksen käynnistämisen jälkeen (5.3.) pitoisuudet lähtivät nousemaan ja saavuttivat pitoisuustason 2,3–5,8 mgO₂/l. Korkein happipitoisuus mitattiin laitteen läheltä lammen pohjoispäästä ja pienin pitoisuus kauimpana laitteesta (alue 8). Alueella 8 korkein pitoisuus (2,8 mgO₂/l) laitteen toisen käynnistytksen jälkeen mitattiin viikkoa aikaisemmin kuin muissa pisteissä, joissa pitoisuudet nousivat ilmastuksen lopetusajankohtaan saakka.

Läheltä pohjaa syvyydeltä 150 cm happipitoisuudet ja lämpötilat mitattiin kolmesta pisteestä (alueet 6, 7 ja 8). Happipitoisuus nousi pumpun käynnistämisen jälkeen tasolle 0,9 mgO₂/l. Hapetuksen lopettamisen jälkeen pitoisuudet laskivat tasolle 0,4–0,6 mgO₂/l noin kahdessa viikossa. Hapetus aloitettiin uudelleen, minkä seurauksena happipitoisuudet nousivat tasolle 0,6–1,0 mgO₂/l. Pitoisuudet lähtivät laskuun heti hapetuksen päättymisen jälkeen ja päättyivät tasolle 0,3–0,4 mgO₂/l.



Kuva 61. Lietepumppu + hajotinlevy, lämpötilahavainnot eri havaintopisteissä syvyydessä 80–100 cm.



Kuva 62. Lietepumppu + hajotinlevy, lämpötilahavainnot eri havaintopisteissä syvyydellä 150 cm.

Veden lämpötila vaihteli seurantajakson alussa kahdessa mittauspisteessä syvyydellä 80–100 cm välillä 2,3 ja 3,0 °C. Tammikuun havaintokerran (24.1.) jälkeen lämpötila laski noin kuukaudessa melko tasaisesti tasolle 0,5–1,2 °C. Hapetuksen lopettamisen jälkeen lämpötila nousi kahden viikon aikana tasolle 0,9–1,8 °C. Hapetus aloitettiin uudelleen 5.3., ja lämpötila laski kahdessa viikossa tasolle 0,4–0,9 °C. Lämpötilat lähtivät nousuun heti hapetuksen päättymisen jälkeen ja päätyivät tasolle 1,2–1,5 °C.

Läheltä pohjaa syvyydeltä 150 cm mitatut lämpötilat olivat havaintojakson alussa 3,4 °C ja laskivat hapetuksen lopettamisajankohtana tasolle 2,6–2,9 °C. Hapetuksen lopettamisen jälkeen lämpötilat nousivat alueilla 6 ja 7 ainoastaan noin 0,5 °C, mutta alueella 8 nousu oli 1,5 °C. Kun hapetus käynnistettiin uudelleen, lämpötilat laskivat tasaisesti tasolle 2,2–2,4 °C kahdessa viikossa.

5.5 Yhteenveto kenttäkokeiden havainnoista

5.5.1 Mini-ilmastuslaite

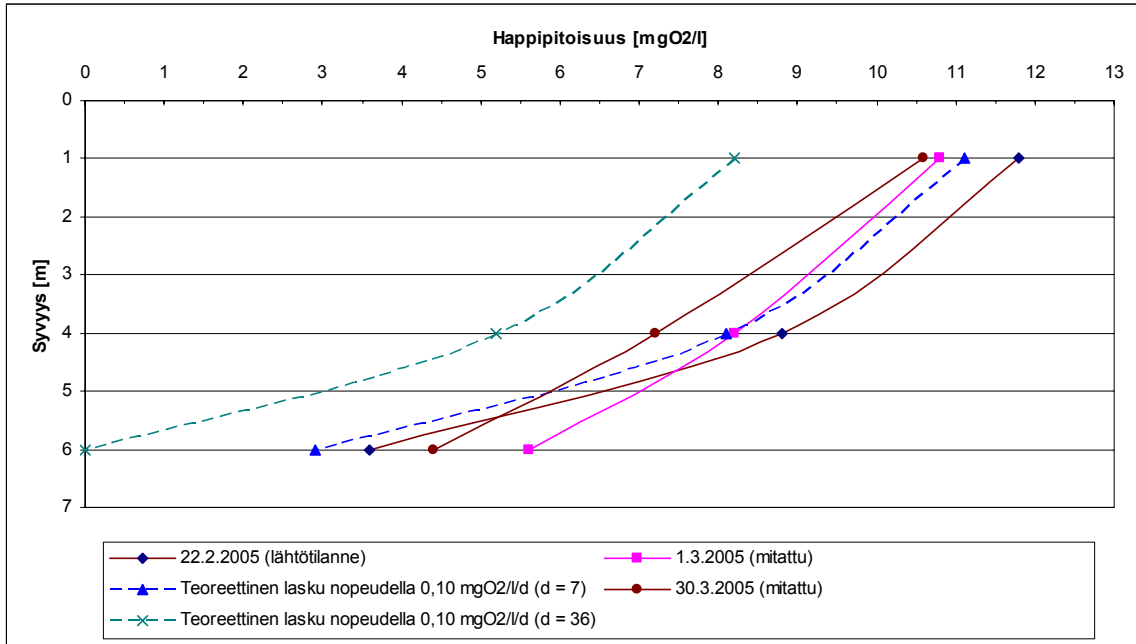
Waterix Mini -ilmastuslaitteiden kenttäkokeiden havainnosta voidaan todeta, että laitteiden veden happitilannetta parantavaa vaikutusta ei voitu luotettavasti todentaa ainoastaan mitattujen happipitoisuuksien perusteella. Mittaustuloksia täydennettiin laskennallisella tarkastelulla, jonka lähtökohtana käytettiin syksyn 2004 ja alkutalven 2005 happihavainnoita. Havainnot oli tehty ennen ilmastuksen aloittamista (liite 8).

Loppusyksyllä 2004 tehtyjen havaintojen mukaan Pitkäjärvi jäätynyt 25.11.2004 ja rannat olivat sulina laajoilta alueilta 10.1.–24.1.2005. Marraskuussa 2004 (5.11.) veden happipitoisuus oli 6 metrin syvyydessä 10,9 mgO₂/l ja helmikuussa 2005 (16.2.) 3,9 mgO₂/l molempien laitteiden kohdalla (Pajuniemi, 2005). Ennen ilmastuksen aloittamista mitattujen happipitoisuuksien perusteella voidaan päätellä, että järven jäätymisajankohtana veden happipitoisuus 6 metrin syvyydellä olisi ollut noin 11–12 mgO₂/l.

Järven jäätymisen ja hapetuksen aloittamisen välinen ajanjakso (pois lukien ajanjakso, jolloin rannat olivat sulina) sisältää 69 päivää. Happipitoisuus laski tarkastelujakson aikana tasosta 11–12 mgO₂/l tasolle 3,9 mgO₂/l eli 7,1–8,1 mgO₂/l (0,10–0,12 mgO₂/l/d) 6 metrin syvyydellä ilman ilmastuksen vaikutusta.

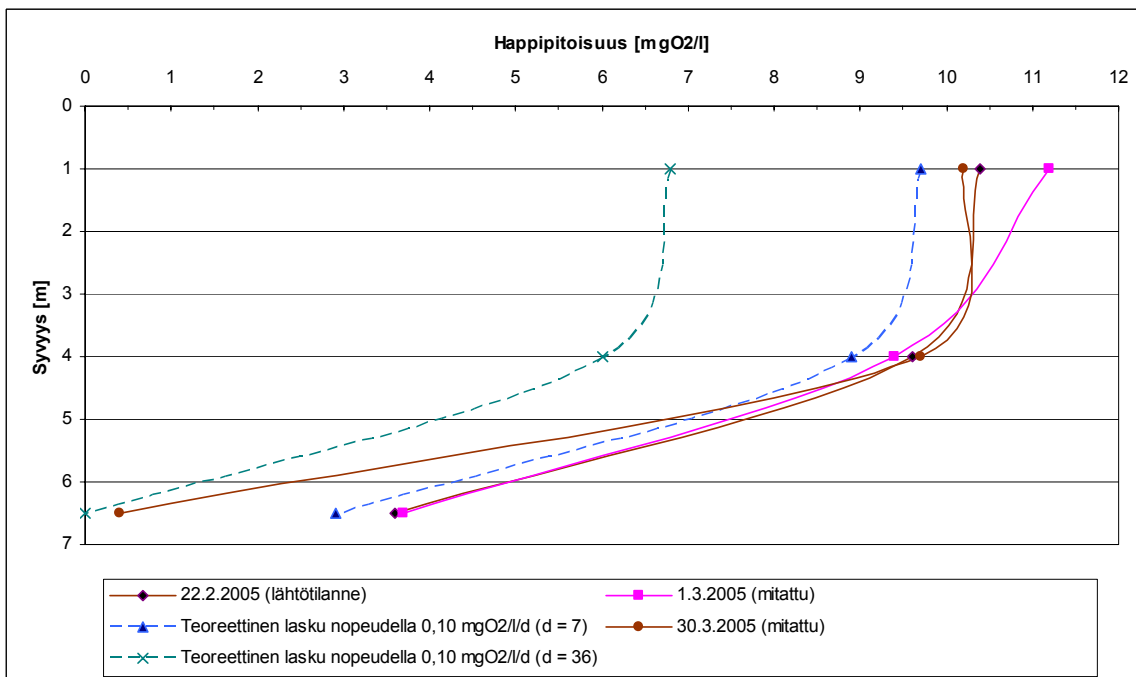
Havaintojakson aikana (22.2.–30.3.2005, yhteensä 38 vrk) happipitoisuus oli laitteen 1 kohdalla havaintojakson alussa 3,6 mgO₂/l ja lopussa 4,4 mgO₂/l, eli lisäys oli 0,8 mgO₂/l avannosta 6 metrin syvyydeltä mitattuna. Laitteen 2 kohdalla happipitoisuus oli havaintojakson alussa 3,6 mgO₂/l ja lopussa 0,4 mgO₂/l. Laitteen 2 kohdalla happipitoisuus putosi huomattavasti kolmella viimeisellä havaintokerralla (2,8 → 0,4 mgO₂/l, kuva 43).

Teoreettisesti tarkasteltuna molempien laitteiden kohdalla hapen kulumisnopeudella 0,10 mgO₂/l/d hapen olisi pitänyt loppua pohjan lähellä olevasta vedestä noin 36 vuorokauden jälkeen, kun lähtötilanteessa happipitoisuus oli 3,6 mgO₂/l (kuvat 63 ja 64). Laitteen 1 vaikutuksesta vesi lähellä pohjaa pysyi hapellisena (> 2,7 mgO₂/l) koko seurantajakson ajan, mutta laitteen 2 kohdalla vesi oli jakson lopussa lähes hapetonta. Tähän ovat vaikuttaneet laitteen imuputken alapään suojaverkon tukkeutuminen, joka heikensi laitteen tuottoa, sekä suurempi imusyvyyks verrattuna laitteeseen 1.



Kuva 63. Laskennallinen ja mitattu happipitoisuuden muutos laitteen nro 1 kohdalla mittausjakson alussa (22.2.05) ja lopussa (30.3.05).

Kuvasta 63 voidaan havaita, että hapetuksen vaikutus 1 metrin syvyydellä oli parhaimmillaan 2,4 mgO₂/l ja 6 metrin syvyydellä 4,4 mgO₂/l verrattaessa mitattuja happipitoisuuksia laskennalliseen happipitoisuuden laskuun. Siten hapetus hidasti veden happipitoisuuden laskua.



Kuva 64. Laskennallinen ja mitattu happipitoisuuden muutos laitteen nro 2 kohdalla mittausjakson alussa (22.2.05) ja lopussa (30.3.05).

Verrattaessa laskennallisia happipitoisuuksia mitattuihin laitteen 2 osalta voidaan todeta, että hapetuksen vaikutus veden happipitoisuuteen vedenpinnan läheisyydessä oli suurempi kuin laitteella 1 ja vastaavasti lähellä pohjaa vaikutus oli pienempi. Laskennallinen vaikutus 1 metrin syvyydellä oli 3,4 mgO₂/l ja 6 metrin syvyydellä 0,4 mgO₂/l (kuva 64). Laitteen nro 2 tuloksista voidaan havaita, että veden happipitoisuus lähellä pohjaa heikkeni havaintojakson aikana veden ollessa lähes hapetonta jakson lopussa. Laitteen läheltä avannosta aistinvaraisesti havaittu rikkivedyn haju tukee happimittaus-
tuloksia.

Vuosina 1979–2004 tehtyjen happimittausten perusteella (Hellgren, 2005) järven syvänteiden veden happipitoisuus on ollut useana talvena alle 2 mgO₂/l. Mittausajankohtina järveä ei hapetettu.

Laitteiden käyttö vaikutti merkittävästi koealueen jääolosuhteisiin. Seurantajakson aikana laitteiden muodostaman avannon koko vaihteli 14–25 m ja jään paksuus mitattuna 1,5 m avannon reunasta vaihteli 5–40 cm. Turvallisuuskäytökohtien huomioimiseksi ilmastupaikan merkintä lippusiimalla ja varoitustauluilla riittävän laajalle alueelle laitteen ympäristöön on välttämätöntä.

Laitteiden toiminnassa ei esiintynyt käyttökatkoksia seurantajakson aikana, mutta havaintojakson aikana huomattiin, että laitteiden pumppaustehot heikkenivät. Laitteita heiluttelemalla toiminta saatiin palaamaan ennalleen. Syynä imutehon heikkenemiseen olivat imuputkien alapäiden suojaverkkoihin kiinnittyneet kuolleet kalat, jotka olivat tukkineet lähes koko imuputken ja siten estäneet laitteiden suunnitellun toiminnan.

Jakson alussa laitteen suojakannen ja sähköjohdon päälle kertyi jäätä, mutta jään muodostuminen saatiin estettyä muuttamalla kannen kiinnitystapaa ja oikaisemalla johto. Laitteen kelluntaponttonien rakenne saattaa olla liian kevyt kovemmassa aallokossa. Ensimmäisen talven kokeiden perusteella laitteen kellukkeiden kiinnitystapa ja koko sekä imuputken päässä olevan suojaverkon rakenne ja kiinnitystapa on muutettu. Pro Pitkäjärvi ry on vuokrannut laitteet kahdeksi vuodeksi, ja ilmastus jatkuu kesällä 2005 ja myös talvella 2005–2006.

5.5.2 Visiox-ilmastin

Visiox-ilmastimen toiminnasta voidaan havaintojen perusteella todeta, että laite nosti veden happipitoisuutta havaintopisteissä nro 1, 2 ja 3 tasolle 6,0–9,8 mg/l rikkomatta lammen kerrostuneisuutta. Laitteen vaikutus ei ulottunut pohjan läheisyyteen, koska lammen pohjalla oli hapetonta vettä kaikkien havaintopisteiden kohdalla koko seurantajakson ajan. Matalat happipitoisuudet lähellä pohjaa voivat selittyä myös sillä, että mit-

taus on suoritettu löysän pintasedimentin sisältä. Laitteen vaikutus ei myöskään ulottunut pisteelle nro 4 asti pitkän välimatkan sekä havaintopisteiden nro 3 ja 4 välissä lammen pohjassa olevan ”kynnyksen” takia.

Yhteenvedona laitteen vaikutuksesta jääolosuhteisiin voidaan todeta, että laitteen toiminta ei ohentanut jäätä laitteen vaikutusalueella. Ainoastaan laitteen pressukehän sisäpuolella on jäätä vapaa alue, koska suihkutettava vesi pitää veden sulana.

Visiox toimi koko seurantajakson ajan moitteettomasti, eikä käyttökatkoksia esiintynyt. Laitteen ympärille, pressukehän päälle, kehittyi kovan pakkasjakson aikana vesihöyrystä jääkupu, joka ei kuitenkaan sulkeutunut kokonaan laitteen päälle eikä siten haitannut laitteen toimintaa. Jääkupu sulii pois ennen havaintojakson päättymistä lämpimän sään ansiosta.

Visiox-ilmastimen suunnittelussa ja käytössä on seurantajakson tulosten perusteella onnistuttu hyödyntämään kokemukset sekä Visioxin edeltäjän Mixox-laitteen käytöstä että muista aikaisempien vuosien hapetuskokeista.

5.5.3 Lietepumppu

Hajotinlevyllä varustettu lietepumppu nosti veden happipitoisuutta parhaimmillaan noin 3,5 mgO₂/l syvyydellä 80–100 cm lammen pohjoispään avannossa. Lähellä pohjaa syvyydellä 1,5 m hapetuksen vaikutus happipitoisuuksiin oli selkeästi pienempi, noin 0,5 mgO₂/l. Happipitoisuudet lähtivät kuitenkin laskemaan heti, kun hapetus lopetettiin. Aikaisemmissa kokeissa pohjoispään avannossa happipitoisuudet nousivat selvästi korkeammiksi hapetuksen seurauksena, parhaimmillaan yli 14 mgO₂/l. Korkea happipitoisuus johtui hapetuksen lisäksi lammen omasta hapentuotannosta, joka oli seurausta sulamisvesistä ja vedessä tapahtuneesta levätuotannosta (Arrajoki, 2004).

Lämpötilat alkoivat kasvaa hapetuksen lopettamisen jälkeen keskimääräisen kasvun ollessa noin 0,5 °C kahden viikon aikana. Hapetuksen käynnistämisen jälkeen lämpötilat laskevat saman verran. Syvyydellä 150 cm ilmastuksen aikaansaamat lämpötilanmuutokset olivat samansuuntaisia mutta pienempiä lukuun ottamatta alueella 8 tehtyjä havaintoja, joissa muutos oli suuruusluokkaa 1,5 °C. Lietepumpun vaikutus sekä lämpötiloissa että happipitoisuuksissa näkyi noin 300 metrin päässä laitteesta havaintoalueella 8.

Lietepumppu toimi moitteettomasti hapetusjaksojen aikana lukuun ottamatta 6 tunnin katkosta jälkimmäisellä havaintojaksolla. Lietepumpun käyttö vaikutti merkittävästi lammen jääolosuhteisiin. Virtaavan veden synnyttämä avanto oli pituudeltaan noin 40 m ja leveydeltään noin 15 m.

6. Hapetuksen menetelmävalinta ja laitemitoitus

Tässä luvussa tarkastellaan hapetuslaitteiden valintaa ja laitteiden mitoitusta. Tarkastelu perustuu lähteessä Lappalainen ja Lakso (2005) esitettyihin näkemyksiin täydennettynä projektissa suoritetuista laboratorio- ja kenttäkokeista kerätyillä kokemuksilla ja havainnoilla. Lähteessä on lisäksi kuvattu tärkeimmät käytössä olevat hapetusmenetelmät eli alusveden hapetus lisäämällä happea veteen, päällysveden johtaminen alusveteen, veden vaakakierrätys ja lämpötilakerrostuneisuuden purkaminen tai sen synnyn ehkäiseminen. Lisäksi on kerätty tietoja käytännön hapetuskokemuksista.

Järven lämpötilakerrostuneisuuden tyypittäminen on eräs tärkeimmistä asioista hapetusta suunniteltaessa. Taulukossa 8 esitetään yhteenveto lähtökohdaksi sopivan menetelmän valinnalle.

Taulukko 8. Hapetusmenetelmän valinta järven kerrostuneisuuden perusteella (Lappalainen & Lakso, 2005).

Järven kerrostuneisuustyyppi	Talvi	Kesä
Matalat järvet, joissa ei esiinny kesäistä lämpötilakerrostuneisuutta	Hapetustarve: lisähappea ilmastai tai vaakakierrätyksellä tai siihen yhdistetyllä hapetuksella.	Ei hapetustarvetta.
Matalahkot järvet, joissa esiintyy epämääräistä ja/tai vaihtelevaa kesäkerrostuneisuutta	Hapetustarve tai tilanteen mukaan kierrätystarve.	Joko kerrostuneisuuden säätely (pakotetut välikierrot), kerroksellisuuden esto tai alusveden hapetus.
Syvät järvet, joissa esiintyy kesäinen lämpötilakerrostuneisuus	Alusveden hapetus tai kierrätys-hapetus (kerrostuneisuuden purku ei ole yleensä suotavaa).	Alusveden hapetus tai kierrätys-hapetus (kerrostuneisuuden esto mahdollista mutta ei yleensä suotavaa).

6.1 Matalat ja kesäkerrostumattomat järvet

Mataliin järviin (maksimisyvyys yleensä 2–6 m, tuulille alttiissa järvissä jopa 10 m) ei tavallisesti muodostu lämpötilakerrostuneisuutta kesällä. Tällaisissa järvissä on happivajetta yleensä vain talvella. Erityisesti valuma-alueen latvajärvissä nämä vajeet saattavat johtaa järven veden täydelliseen hapettomuuteen pitkinä ja vähävetisinä talvina, kuten talvella 2002–2003, jolloin alusvesi oli melko lämmintä järven jäätymisvaiheessa. Tällaisissa järvissä kyseeseen tulevat lähinnä pinta-hapettimet (esim. Aire-O₂, Fuchs, hapetusharja) sekä paineilman käyttöön perustuvat laitteet (esim. Listem). Lisäksi omatoimija hätäilmastuksissa paljon käytetty lietepumppu soveltuu matalien järvien hapetukseen, mutta melko huonon hyötysuhteen vuoksi sen käyttökustannukset pitkäaikaisessa hapetuksessa ovat kaupallisiin laitteisiin verrattuna korkeammat. Toisaalta hankintakustannukset ovat kohtuullisen pienet, koska pumppua voidaan käyttää hapetukseen sen varsinaisen käyttötarkoituksen lisäksi.

Talvihapetuksella hoidetaan pääasiassa oiretta eli lisätään veden happipitoisuutta. Talvella alennetaan jo ennestään kylmän pohjanläheisen veden lämpötilaa, hidastetaan järven mikrobitoimintaa ja vähennetään hapenkulutusta. Runsaan hapenkulutuksen syvämpiin syihin ei pystytä vaikuttamaan yksin talvihapetuksella.

Suurehkoissa, kesäisin kerrostumattomissa hiukan syvemmissä järvissä on yleensä talvella jään alla lämpötila- ja happikerrostuneisuus, jolloin sopivat myös kerrostuneisuutta purkavat, veden ja ilman seosta alaspäin pumppaavat menetelmät (esim. Neutrox, Mikrox ja Ecoxy). Ne hyödyntävät osaksi päällysveden happivaroja jakamalla happea koko vesitilavuuteen. Myös kierrätyshapetusmenetelmä Mixox voi tulla kyseeseen kohtalaisen suuret päällysveden happivarat sisältävissä järvissä.

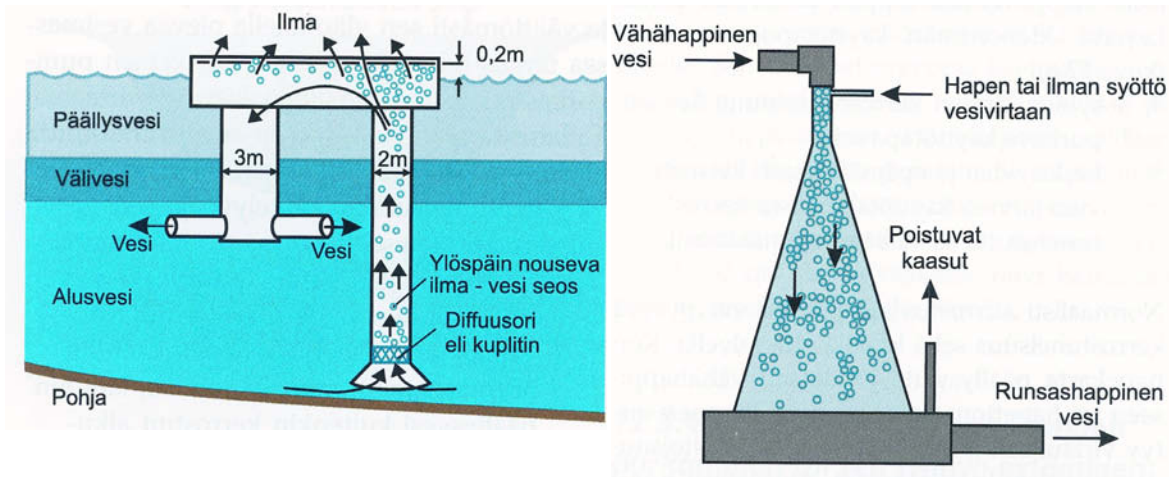
Matalien ja rehevien järvien kesäinen hapetustarve on ongelmallinen, sillä niihin saattaa syntyä happivajetta sedimentin ja veden rajapintaan (Sweerts et al., 1996). Vaikka lähes koko vesimassa on hapellista, järvi voi kärsiä happivaikeuksista. Tällöin järven pitäminen jatkuvassa ja tehokkaassa täyskierrossa on eräs kunnostuskeino. Tasalämpöinen vesi on altis myös lämpötilamuutosten aiheuttamille virtauksille. Viileinä jaksoina jäähtynyt pintavesi vie hapellista vettä lämpötilaerojen aiheuttamana virtauksena sedimenttiin ja syrjäyttää sieltä kevyempää ja vähähappista vettä.

Matalien järvien hapetuksen mitoituksessa sovelletaan syvien järvien alusveden hapetusmitoituksen periaatteita siten, että alusveden tilalla käytetään koko vesitilavuutta, josta jään sitoma vesitilavuus kuitenkin vähennetään pois. Hapettamisen viilentäessä pohjanläheisen veden lämpötilaa hapen kulumisen hidastuu. Toisaalta sekoitus ja happipitoisuuden lisääntyminen kiihdyttävät hajotusta, joten yleensä hapen kulutus kuitenkin nopeutuu.

6.2 Syvät järvet

Syvässä järvissä on yleensä sekä talvella että kesällä lämpötilakerrostuneisuus, joka on suotavaa säilyttää, mikäli mahdollista. Talvisin kerrostuneisuuden säilymisellä ei tosin ole suurta käytännön merkitystä. Syvien järvien hapetus on kohdistettava ensisijaisesti alusveteen siten, että ekologiset sivuvaikutukset olisivat mahdollisimman pienet.

Ekologisesti parhaiten soveltuvia alusveden hapetusmenetelmiä ovat Limno- ja Bernhard-tyyppiset hapettimet sekä Speecen kartioputkihapetin (kuva 65), jossa happikaasua syötetään alusveteen. Näitä menetelmiä ei tietyistä syistä ole käytetty Suomessa niiden kalliiden hankinta- ja käyttökulujen vuoksi. Vesi-Eko Oy:n Visiox on kuitenkin koekäytössä mm. Kuopion kaupungilla sekä mukana kenttäkokeissa Siilinjärven Ahmonlammella. Waterix Oy:n kehittämä Mini-ilmastuslaite oli mukana kenttäkokeissa, joissa kahden laitteen toimintaa seurattiin Nummi-Pusulän Pitkäjärvellä (luku 5).



Kuva 65. Bernhardin hapetusmenetelmän ja Specken kartiohapettimen toimintaperiaatteet (Lappalainen & Lakso, 2005).

Nämä kierrätyshapetusmenetelmät soveltuvat hyvin syvien ja kohtuullisen hyväkuntoisten järvien hapetukseen. Niiden toimintatavan takia alusvesi lämpenee ja sen tilavuus kasvaa kesällä, mikä asettaa rajaavia ehtoja laitteiden käytölle. Myös Neutrox- ja Ecoxy-tyyppiset hapettimet, joissa veden ja ilman seosta johdetaan putkessa syvänteen kohdalla lähelle pohjaa, sopivat syviin järviin. Kesäinen lämpötilakerrostuneisuuden osittainen purkautuminen aiheuttaa kuitenkin rehevöitymistä ilman ylimääräkuplioiden poistamislaitteistoa.

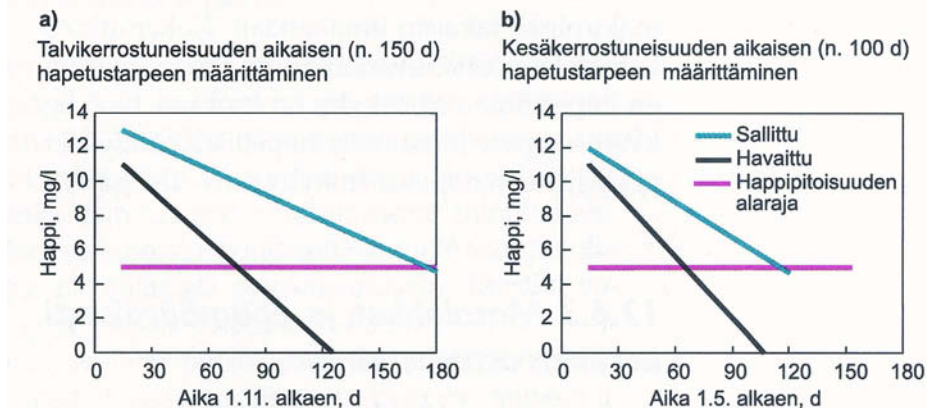
Pintahapettimet eivät sovi alusveden hapettamiseen. Talvella kerrostuneisuuden stabiiliteetti on pieni alus- ja päällysveden vähäisen lämpötila- ja tiheyseron vuoksi. Tällöin pintahapettimetkin saattavat sekoittaa koko vesimassan. Kesällä päällysveden ja alusveden tiheyserot ovat talveen verrattuna 10–20-kertaiset ja kerrostuneisuuden stabiiliteetti on vakaa. Kun eri vesikerrosten lämpötilat ovat 6 °C ja 16 °C, kerrosten tiheysero on noin 1 g/l. Pintahapettimet eivät sovellu myöskään kerrostuneisuuden purkamiseen. Tuulen sekoitusvaikutus ulottuu yleensä 4–7 metrin syvyyteen, johon myös pintahapettimien syvyysvaikutus puolestaan loppuu.

Syvien järvien hapetuksen mitoituksessa on tarpeen arvioida seuraavat tekijät:

- järven hapen kulumisnopeus ja sen syyt
- hapen kulumisen muutos, joka voi olla merkittävä, kun järveä hapetetaan
- se, millä eri menetelmillä ja laitteilla sekä tarvittavilla tehoilla ym. säädöillä hapetus onnistuu parhaiten.

Mittausten mukaan happi loppuu rehevähkön järven pohjasedimentistä jo parin millimetrin syvyydessä, vaikka yläpuolinen vesi olisikin hapellista (Sweerts et al., 1996). Jotta hapen vähyys ei olennaisesti rajoittaisi hajotusta pohjasedimentin ylimmässä (pak-

suus noin 1 cm) kerroksessa, alusveden happipitoisuus ei saisi laskea kerrostuneisuuskauden lopullakaan alle 5 mg/l:aan. Täten sallittu veden happipitoisuuden alenema on talvella noin 8 mg/l, joka vastaa alenemisnopeutta 0,05 mg/l/d. Kesällä sallittu alenema on noin 7 mg/l, joka vastaa alenemisnopeutta 0,07 mg/l/d (kuva 66). Alusveden happivarannon alenemaksi voidaan siten ilman sanottavia häiriöitä sallia 50–60 %.



Kuva 66. Talven ja kesän kerrostuneisuusajoina hyväksyttävä hapen kulumisnopeustarkastelu, kun minimihappipitoisuusarvona pidetään 5 mg/l (Lappalainen & Lakso, 2005).

Edellisen mukaan alusveden sallittava kriittinen hapenkulutus on karkeasti laskettavissa seuraavasti:

- kriittinen hapenkulutus talvella = alusveden tilavuus x 0,05 mg/l/d
- kriittinen hapenkulutus kesällä = alusveden tilavuus x 0,07 mg/l/d.

Mikäli järven havaittu hapenkulutus on suurempi ja järvessä esiintyy alhaisia happipitoisuuksia, hapetuksen tehtävänä on pitää tilanne hyväksyttävissä rajoissa. Mikäli todettu happipitoisuuden kulumisnopeus on talvella 0,11 mg/l/d, olisi hapettamisella korvattava erotus 0,06 mg/l/d. Näennäinen hapetustarve saataisiin kertomalla erotus alusveden tilavuudella. Varsinkin hapetusta aloitettaessa todellinen hapetustarve on kuitenkin paljon suurempi, mikä johtuu mikrobien ja muiden eliöiden aktiivisuuden lisääntymisestä veden happipitoisuuden kohotessa. Jos alusveden hapetukseen liittyy vielä kesäistä lämpötilan kohoamista, saattaa hapen kulutus olla aiempaan keskimääräiseen tilanteeseen verrattuna moninkertaista (Wahlgren et al., 1990).

Otettaessa huomioon edellä todettu hajotusaktiiviteetin kohoaminenkin saadaan järven todelliselle hapetustarpeelle yhtälö

$$HT = Ba \times \left(\frac{dO_2}{dt} - \frac{KrdO_2}{dT} \right) \times Vh \quad \text{kaava (14), missä}$$

- HT= todellinen hapenkulutus [kgO₂]

- B_a = mikrobiaktiivisuuden kohoamiskerroin, yleensä 1,5...2–4 siten, että kesällä alusveden lämpötilan kohotessa B_a on suuri eli 2–4 ja talvella pieni eli 1,5–2
- dO_2/dt = havaittu alusveden happipitoisuuden alenemisnopeus [mg/l/d]
- $K_{rd}O_2/dt$ = kriittinen alusveden happipitoisuuden alenemisnopeus [mg/l/d]
- V_h = alusveden tai tarkasteltavan altaan tilavuus [1 000 m³].

Hapensiirtotehoa mitoitettaessa on otettava huomioon menetelmästä riippuva hapettimen kyky siirtää happea haluttuun vesitilavuuteen. Siirtokyky riippuu mm. vesipaineesta, happivajeesta, muiden kaasujen osapaineesta ja kuplien koosta vedessä. Ilmakupliuksessa huomattavin osa veteen pumpatusta hapesta karkaa ilmakuplissa takaisin ilmaan. Kokemuksesta tiedetään, että tavanomaisten ilmaa käyttävien hapettimien siirtokyky on luokkaa 1–2 kgO₂/kWh. Johtamalla hapellista päällysvettä alusveteen hapensiirtokyky on 5–15 kgO₂/kWh.

6.3 Matalahkot ja epämääräisesti kesäkerrostuvat järvet

Rehevyyden hallinnan kannalta vaikeimpia ovat suurehkot ja epämääräisesti kesäkerrostuvat ja osin siksi ylirehevät järvet. Tuusulanjärvi on tähän ryhmään kuuluvista tunnetuin ja tutkituin (Saarijärvi & Lappalainen, 2003). Kesällä nämä järvet saattavat olla välillä täyskierrossa kerrostuakseen kohta uudelleen ilman lämpötilan noustessa ja tuulen tyyntyessä. Jos järvi on ylirehevä ja pohjaltaan huonokuntoinen, sen pohjaläheisen vesikerroksen happivarasto saattaa loppua ennen seuraavaa kiertoa. Osasyynä tähän on, että pohjasedimentin biologiset toiminnot ovat korkean lämpötilan, usein 14–17 °C, vuoksi nopeita. Tällöin rautaan sitoutunut fosfori liukenee pohjanläheiseen veteen raudan pelkistyessä hapettomissa oloissa. Lisäksi sedimentin pintaosiin kertyy mm. typpi- ja metaanikaasukuplia, jotka kuljettavat sedimentin pintaosien ravinteikkaita hiukkasia pintaan asti. Näistä hiukkasista liukenee ravinteita veteen (Saarijärvi & Lappalainen, 2003). Täyskierron aikana ravinteet siirtyvät järven pintakerrokseen levien ulottuville. Tällaiset pumppaavat täyskierrat kiihdyttävät sedimentistä lähtevää sisäistä kuormitusta, ja sykli ehtii toistua yleensä 2–3 kertaa kesässä.

Kuvatut haitalliset reaktiot estyvät tai vaimenevat huomattavasti, jos pohjanläheisen veden happipitoisuus ei laske alle 3–4 mg/l:aan. Pohjasedimentin pinnan hapellisena pitämiseen täytyy hakea ratkaisua kerrostuneisuuden säätelystä tai alusveden hapettamisesta. Ensin mainittu menetelmä on teknis-taloudellisesti kohtuullisen toteutuskelpoinen. Kerrostuneisuuden säätely tarkoittaa käytännössä kerrostuneisuuden purkamista ennen huonohapaisen tilanteen syntymistä. Tämä voidaan tehdä kierrätyshapetusmenetelmällä, jossa hapekasta päällysvettä pumpataan tavanomaista suuremmalla virtaamalla

laajana ja leyhyttelevänä virtauksena sedimentin pinnalle. Tällöin päällys- ja alusveden lämpötilaero ja kerrostuneisuuden stabiliteetti pienenevät ja järvi kiertää herkemmin. Tyyninä, aurinkoisina ja lämpiminä jaksoina kerrostuneisuus kuitenkin säilyy, ja alusveden levistä vapautuneet ravinteet pysyvät pääosin alusvedessä ja laajat leväkukinnat saattavat estyä. Viileä ja tuulinen sääjakso katkaisee kerrostuneen tilanteen mutta lisää pintaveden ravinnemääriä vain melko vähän, ja toisaalta tuulisuus vähentää levien kasvua. Säätelyn toteutustavassa on oleellista, että myös aivan sedimentin pinnassa oleva vesi joutuu ajoissa täyskiertoon ja saa happitäydennystä.

Kerrostuneisuuden estäminen paineilmaakuplituksella aiheuttaa jatkuvan vesikierron pohjalta pinnalle asti. Tämän menetelmän haittapuolena on, että hajoavista levistä vapautuvat ravinteet joutuvat nopeasti valaistuun kerrokseen ja järven levätuotanto pysyy koko ajan korkeana. Matalahkoja, ajoittain kerrostuvia järviä voidaan hapettaa kesälläkin alusvettä lämmittämättömillä menetelmillä, esim. Bernhard-, Limno- ja Speece-menetelmillä, mutta tällöin on varauduttava lukuisiin laitteisiin ja mataliin hyötysuhteisiin.

Matalahkojen järvien alusveden hapetuksen mitoituksessa voidaan soveltaa syvien järvien mitoitusperiaatteita. Kokemusperäisesti on kuitenkin huomattu, että alusveden tilavuuden määrittely on matalahkoissa järvissä ongelmallista. Lisäksi on havaittu, että järven pohjan läheiset virtaukset, jotka suuntautuvat syvännepaikkoja kohti, tuovat alusveen melko paljon lisäkuormitusta matalilta ranta-alueilta.

Mitoituksessa voidaan käyttää myös toista lähestymistapaa. Espoon Pitkäjärveltä ja Tuusulanjärveltä saatujen kokemusten perusteella on arvioitu, että näiden rehevien järvien happipitoisuus pystytään säilyttämään, mikäli järven koko vesimassa pumpataan kierrätyshapetuslaitteen läpi noin 40 vuorokaudessa. Tarvittava vuorokautinen virtaama on 0,025 kertaa järven tilavuus. Tällä tarkastelutavalla saadaan suuruusluokka hapettimien mitoitukselle (Lappalainen & Lakso, 2005).

7. Laitteiston valintakriteerit ja optimaalinen käyttötapa

Järvien rehevyyttä vähentävät menetelmät ovat hapetus, ravintoketjukurkennostus, fosforin kemiallinen saostus ja alusveden poistaminen. Lisäksi rehevyyden vähentämiseen voidaan käyttää ns. monitavoitteisia kunnostusmenetelmiä, joita ovat ruoppaus, vedenpinnan nosto, säännöstely ja vesikasvillisuuden poistaminen (Lappalainen & Lakso, 2005). Käytettäessä hapetusta tulee järven lämpötilakerrostuneisuus tuntea hyvin ja lisäksi tulee määrittää järven todellinen hapetustarve. Hapetukseen käytettävän laitteiston valintakriteerit voidaan määritellä seuraavasti:

- riittävä tuotto suhteessa kohdejärven hapentarpeeseen
- käytöstä aiheutuvat sivuvaikutukset
- hyötysuhde
- ylläpitokustannukset
- hankintahinta.

Laitteiston riittävä tuotto on perusedellytys onnistuneelle hapetukselle. Laitteistolta vaadittava tuotto voidaan määritellä teoreettisesti hyödyntämällä kaavaa (14), joka perustuu kohdejärvessä suoritettuihin happimittauksiin ja niihin perustuviin laskelmiin, tai käyttämällä järven tilavuuden mukaan määriteltävää vuorokausivirtaamaa. Joissakin tapauksissa laitteen toimittajalta voidaan edellyttää ns. happitakuun⁴ antamista. Laitteiston käytöstä aiheutuvat sivuvaikutukset voivat olla syntyvä avanto ja jään heikkeneminen sekä veden sekoittuminen, jolloin järven kerrostuneisuus purkautuu ja pohjasedimenttiä leviää veteen jonkin aikaa poistoputken läheisyydessä.

Laitteiston hyötysuhteen merkitys lisääntyy erityisesti pitkäaikaisissa hapetuskohteissa, jolloin huonolla hyötysuhteella toimivan laitteiston sähkönkulutus lisää ylläpitokustannuksia. Hankintahintaan vaikuttaa hankintatapa: laite voidaan ostaa omaksi tai hapetus voidaan toteuttaa urakointipalveluna. Tuotto ja sivuvaikutukset määrittelevät laitteiston vaikutukset järven tilaan, ja hyötysuhde, ylläpitokustannukset sekä hankintahinta määrittävät hapetuksen kustannustason.

Laitteiston optimaalinen käyttö edellyttää ilmastukseen liittyvien limnologisten ja tekni-
nisten vaikutusmekanismien hyvää tuntemusta. Ilmastuksen suunnittelun lähtökohdan eli järven kerrostuneisuuden lisäksi tulee ymmärtää ilmastukseen valitun laitteiston toimintaperiaate ja siihen vaikuttavat tekijät. Tämän tietämyksen hankkiminen ja hyödyntäminen edellyttää usean vuoden kokemusta erityyppisten ja -kokoisten järvien ilmastuksesta. Joissakin tapauksissa tarvittava kokemus ja tieto löytyvät kunnostusta suunnittelevalta osapuolelta, mutta tarvittava osaaminen voidaan hankkia resurssien salliessa myös konsulttipalveluna.

⁴ Tapauskohtaisesti sovittava raja, jonka alle happipitoisuus ei saa laskea laitteen vaikutusalueella.

8. Kustannukset

Kustannuksia voidaan arvioida määrittelemällä joko veteen siirrettävän happimäärän hinta tai ilmastuksen vuosikustannus ilmastettua järvipinta-alaa kohden. Suoritetuissa laboratorioskokeissa (luku 4) mukana olleille laitteille määriteltiin koetulosten perusteella sekä tuotto [kgO_2/d] sekä hyötysuhde [kgO_2/kWh].

Yksikkökustannukset vaihtelevat ilmapuhallusta käyttävissä laitteissa välillä 0,1 ja 0,4 €/kgO₂ ja kierrätyspumpuksissa välillä 0,05 ja 0,2 €/kgO₂. Järven pinta-alaan suhteutettuna vuosittaisten kustannuksen vaihteluväli on normaalisti 40–200 €/ha. Hehtaarikustannukset ovat korkeita erittäin pienissä ja rehevissä järvissä (Lappalainen & Lakso, 2005). Talvella 2005 lietepumpulla suoritetussa Ruutinlammen ilmastuksessa kustannukset olivat noin 44 €/ha, mutta kustannuksissa ei ole huomioitu pumpun hankintakustannuksia vaan ainoastaan pumpun käytöstä aiheutuneet kustannukset.

Ilmastusvaihtoehtoa järven kunnostuskeinona harkitsevalla on pääsääntöisesti kaksi vaihtoehtoa ilmastuksen toteuttamiseksi: ilmastus voidaan toteuttaa joko urakointipalveluna tai investointina. Urakointipalvelussa urakoitsijan vuosittain veloittama summa sisältää laitteen asennuksen, huollon ja valvonnan, ja vastuu laitteen toiminnasta on urakoitsijalla. Työn tilaaja vastaa sähköistyksistä ja käyttökustannuksista.

Ilmastuslaitteiden hankintahinnat riippuvat moottorin tehosta, joka määräytyy tarvittavan ilmastuskapasiteetin perusteella, laitteen rakenteesta, käytettävistä materiaaleista sekä laitteen valmistusmääristä. Pitkäaikaisissa ilmastuksissa on olennaista, että laitteen hyötysuhde on mahdollisimman korkea. Kokemusperäisen arvion perusteella turvamääräysten mukaisesti hyväksytysti suoritettujen sähköistyksen hinta vaihtelee kohteen ja ilmastustarpeen mukaan 2 000–3 000 €.

Investointivaihtoehdossa kohteeseen soveltuva ilmastuslaite hankitaan omaksi, jolloin vastuu laitteen toiminnasta on omistajalla. Usein laitteen valmistaja vastaa laitteen asennuksesta, ja tarvittaessa laitteen toimittajan kanssa voidaan sopia erillisestä ylläpitosopimuksesta. Päätös kahden eri vaihtoehdon välillä riippuu monesta eri tekijästä, mm. käytettävästä rahoitusmallista ja tilaajan järvien kunnostukseen liittyvästä asiantunteuksesta.

Ilmastuksen kustannustekijöitä määriteltäessä tulee huomioida kaikki kustannustekijät, jotka vaikuttavat kokonaiskustannuksiin, ei pelkästään laitteen käyttökustannukset. Kokonaiskustannukset vaihtelevat merkittävästi mm. kohteen pinta-alan, ilmastustarpeen ja käytettävän laitteen hyötysuhteen mukaan. Ilmastuksesta aiheutuvat kustannukset ovat aina tapauskohtaisia.

9. Turvallisuusnäkökohdat

9.1 Sähköturvallisuus

Ilmastuslaitteita käytettäessä laitteiden toimintaympäristö edellyttää erityistä huolellisuutta sähköasennusten tekemisessä. Sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat standardit määrittelevät vaatimukset, joita tulee noudattaa esim. uima-altaiden ja vastaavien tilojen sekä maa- ja puutarhatalouden laitteistojen pienjännitesähköasennuksissa. Standardit eivät kuitenkaan erikseen määrittele ilmastuslaitteiden asennukseen ja käyttöön sovellettavia vaatimuksia.

Sähköalan töitä saavat tehdä vain kelpoisuusvaatimukset täyttävät henkilöt ja yritykset. Sähkötöitä ovat sähkölaitteistojen rakennustyöt sekä sähkölaitteiden ja -laitteistojen korjaus- ja huoltotyöt. Turvatekniikan keskus TUKES (www.tukes.fi) pitää rekisteriä sähköurakoitsijoista, joilla on oikeus tehdä sähkötöitä. Rekisterissä on noin 14 000 urakoitsijaa, mutta joka vuosi paljastuu urakoitsijoita, joilla ei ole laillista oikeutta tehdä sähköasennuksia (TUKES, 2005a).

Sähkölaitteiden laitetakuu edellyttää, että laite on asennettu oikein ja sitä käytetään käyttöohjeiden mukaisesti. Laitetakuu ei korvaa virheellisestä kytkennästä tai sijoituksesta aiheutunutta vauriota tai vahinkoa. Vakuutusyhtiön suojeleohjeessa mainitaan, että sähkötöitä saavat tehdä vain lain, asetusten ja viranomaismääräysten edellytykset täyttävät henkilöt ja yritykset. Jos talo palaa väärin tehdyn sähköasennuksen seurauksena, voi tulla ongelmia vakuutusyhtiön korvausten kanssa (TUKES, 2005b).

Rannalla sijaitsevan sähkökaapin tulisi olla lukittu ilkivallan ehkäisemiseksi ja varustettu kWh-mittarilla ilmastuslaitteen sähkönkulutuksen seuraamiseksi. Laitetta syöttävät ryhmäjohdot tulee varustaa vikavirtasuojakytkimillä. Maakaapeli tulee suojata ulkoisia rasituksia vastaan esim. asentamalla kaapeli suojaputkeen sekä merkitsemällä kaapeli tarvittaessa maastoon. Veden alle asennettava kaapeli tulee suojata jään aiheuttamia rasituksia vastaan rannan läheisyydessä esim. läpivientiputkella. Laitteen asianmukaista toimintaa voidaan seurata joko kaukovalvonnan avulla tai havaintokäyntien yhteydessä. Kaukovalvontaa hyödyntämällä saadaan nopeasti tieto toimintakatkoksista.

Suomessa syttyy joka vuosi noin 2 000 sähköä aiheuttamaa tulipaloa, joissa menehtyy ihmisiä ja tuhoutuu omaisuutta. Sähköiskuihin kuolee vuosittain kolme henkilöä, ja vakavia sähkötapaturmia sattuu noin 50 henkilölle. Virheelliset ja huonosti tehdyt sähköasennukset tai sähkölaitteiden korjaukset ovat yhtenä syynä sähköpaloihin ja sähköiskuihin. Turvallisuusriski on erityisen suuri silloin, kun ammattitaidoton ja epäpätevä henkilö tekee sähkötöitä.

9.2 Jääolosuhteiden muuttuminen

Sellaisten ilmastuslaitteiden kohdalla, jotka tekevät avannon tai heikentävät merkittävästi jään paksuutta laitteen vaikutusalueella, on kiinnitettävä huomiota ilmastusalueen huolelliseen merkitsemiseen. Syntyvän avannon kokoa arvioitaessa voidaan hyödyntää aikaisemmissa kohteissa saatuja kokemuksia tai ilmastuslaitetoimittajan arviota avannon laajuudesta. Syntyvän avannon koko tai jään heikkeneminen voidaan tarvittaessa määrittellä laskennallisesti laitteen aiheuttaman virtauksen, jääolosuhteiden ja laitteen käyttöajan perusteella.

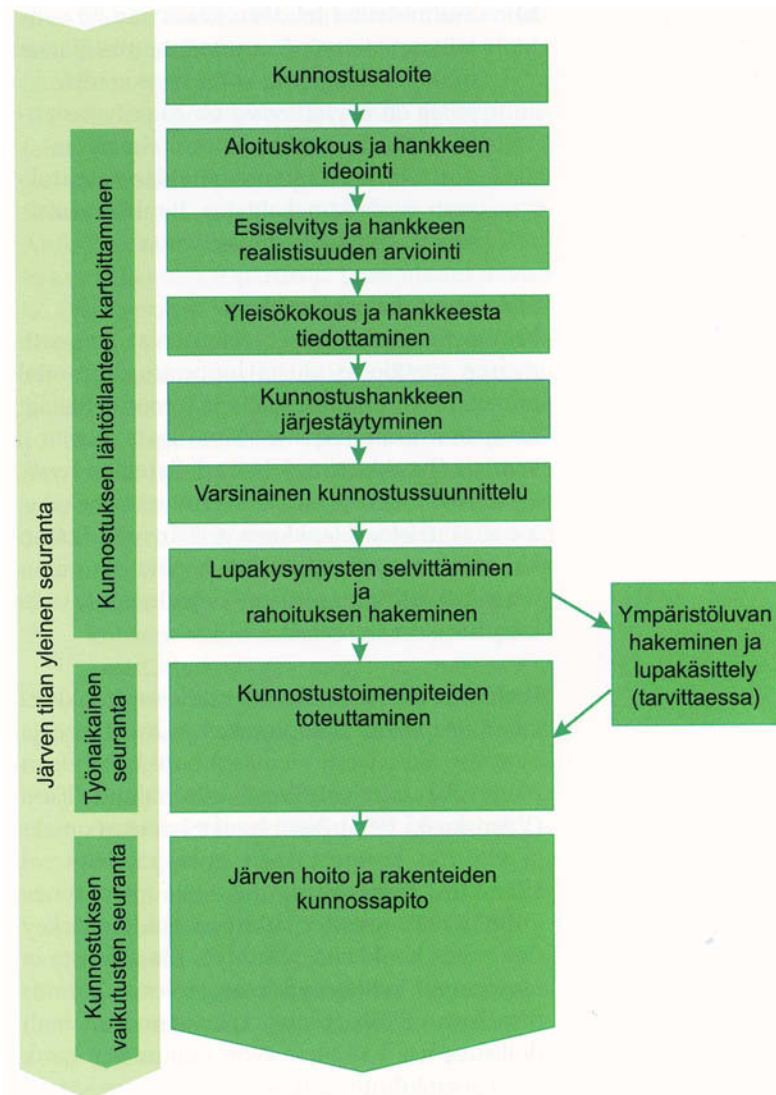
Jäälle kiinnitettävien merkkien (lippusiima, varoitustaulut) tulee kestää tuulesta ja saateesta aiheutuvat rasitukset. Varoitusmerkkien tulee olla riittävän selkeät, jotta jäällä liikkujat voivat havaita ne myös huonolla säällä. Moottorikelkkareittien läheisyydessä lippusiimat tulisi varustaa heijastimilla. Hapetuksesta on aiheellista varoittaa järvellä liikkujia ja ranta-asukkaita myös rannalle kiinnitettävillä varoitustauluilla hyvissä ajoin ennen ilmastuksen aloittamista. Lisäksi paikallislehtiä voidaan hyödyntää tiedottamisessa. Avannon reunalle voidaan tuoda pelastusrenkaiden lisäksi myös pelastusvene hätätilanteiden varalle.

10. Yhteenveto ja suositukset hapetuksen käytöstä järvien kunnostuksessa

Suomalaisille järville tyypillisiä piirteitä ovat mataluus ja korkeahko veden humuspitoisuus. Myös järvien kunnostustarve Suomessa kuvastaa näitä erityispiirteitä. Suurin kunnostustarve aiheutuu kahdesta osittain toisiinsa kytkeytyvästä, erityisesti virkistyskäyttöä haittaavasta ongelmasta: rehevöitymisen heikentämästä veden laadusta sekä mataluuden ja rehevöitymisen aiheuttamasta umpeenkasvusta. Hapetuksella voidaan parantaa rehevöitymisen seurauksena heikentynyttä veden laatua.

Suomalaista hapetustekniikkaa on kehitetty erityisesti 1980-luvulta lähtien, ja kokemusta on nykyisin noin 200 kohteesta. Pääpaino on ollut kierrätyshapetusmenetelmässä, jossa hapellista päällysvettä kierrätetään potkuripumpulla alusveteen pressukangassukkaa käyttämällä ja jossa järven kerrostuneisuus säilyy pääosin. Tätä menetelmää on käytetty yli 70 kohteessa tuloksellisesti, eli tavoitehappipitoisuudet on usein kyetty saavuttamaan (Lappalainen & Lakso, 2005). Vaikka hapetuksesta on varsin runsaasti kokemusta, eri menetelmien ja markkinoilla olevien laitteiden erot aiheuttavat ongelmia tuloksien vaikuttavuuden arvioinnissa ja eri kunnostuskohteisiin soveltuvien laitteiden valinnassa.

Järvien kunnostus on yleensä monivaiheinen tapahtuma, joka alkaa kunnostusaloitteen tekemisestä ja päättyy, kun kunnostustoimenpiteet on toteutettu. Toimenpiteiden suorittamisen jälkeen tulisi kuitenkin jatkaa järven hoitoa tavoitteena kunnostuksella saavutetun tilan säilyttäminen. Kunnostushanke vaatii onnistuakseen motivoitunutta vetäjää, suunnitelmallisuutta sekä hyvää yhteistyötä eri osapuolten välillä. Valmistelu on hankkeen onnistumisen kannalta kriittisin vaihe, koska silloin tehdään monia kauaskantoisia päätöksiä sekä sovitaan hankkeen tavoitteista ja toteuttamisesta. Kunnostushankkeen uskottavuus riippuu paljon siitä, miten hankkeen valmistelu hoidetaan. Kunnostushankkeen eri vaiheet esitellään pääpiirteittäin kuvassa 67.



Kuva 67. Kunnostushankkeen eri vaiheet (Vääriskoski & Ulvi, 2005).

Kaikissa kunnostushankkeissa ei välttämättä ole jokaista vaiheita. Hankkeen järjestäytymisvaiheessa laaditaan projektisuunnitelma, jossa esitetään mm. kunnostuksen tekniset päätökset. Kunnostussuunnitelmassa määritellään tarkemmin mm. hankkeen tavoitteet ja suunnitellut toimenpiteet, joista hapetus on yksi mahdollinen kunnostusvaihtoehto (Vääriskoski & Ulvi, 2005).

Tässä hankkeessa suunniteltiin laboratoriotestiympäristö sekä mittausmenetelmä, jolla markkinoille tulevia uusia hapetuslaitteita sekä tuotekehityksen tuloksena nykyisestä parantuneiden laitteiden suoritusarvoja voitaisiin jatkossa testata ja vertailla. Menetelmään liittyy vielä kehittämisen arvoisia asioita, kuten mittausjärjestelmän kehittäminen, reaaliaikainen monitorointi ja altaan dimensioista aiheutuvan vaikutuksen merkitys mitaustuloksiin, mutta periaatteessa menetelmä on käyttökelpoinen jo nykyiselläänkin.

Laboratoriokokeissa testatut laitteet olivat lietepumppua lukuun ottamatta prototyyppejä. Tuloksista voidaan todeta, että kaupallisissa tuotteissa laitteiden hyötysuhteet ovat parempia kuin lietepumppussa. Laitteen hyötysuhde on yksi merkittävä valintakriteeri etenkin pitkäkestoisen hapetuksen suunnittelussa. Hankkeen tulosten seurauksena tulee tapahtumaan laitteiden tuotekehitystä, jonka jälkeen niiden hyötysuhteet ja tuotot tulevat parantumaan. Tulevaisuudessa olisikin tarpeellista uusia nyt tehdyt laboratoriokokeet. Järvien hapetukseen soveltuvilla laitteilla saattaa olla tulevaisuudessa sovelluskohteita myös teollisuus- ja yhdyskuntajätevesien käsittelyprosesseissa.

Järviolosuhteissa hapetustarpeen arviointi monimutkaistuu, eikä tieto laitteen ominaisilmastustehosta ole riittävä. Ennen kuin laitevalinta voidaan tehdä, tulee tietää järven happitilanne sekä arvioida järven hapenkulutus. Hapenkulutuksen arvioimiseen tarvitaan tietoa altaan tilavuudesta, lämpötilasta sekä alusvedenhappipitoisuuden alenemisnopeudesta. Tässä hankkeessa saatu tieto laitteiden hyötysuhteista ja tuotoista on siis vasta ensimmäinen askel hapetuksen oikeassa mitoittamisessa.

Laittevalintaan vaikuttavat myös monet muut tekijät kuin hapetustarve. Hapetukselle voidaan asettaa tilanteen mukaan erilaisia tavoitteita. Hätähapetuksissa pyritään pelastamaan järven kalasto, eikä sillä pyritäkään rehevyyden vähentämiseen. Pitkävaikutteisissa kunnostushankkeissa hapetustarpeen mitoittaminen ja tavoitehappipitoisuuden saavuttaminen on tärkeää, jotta hankkeen tavoitteisiin voidaan päästä. Tosin pitkäaikaisissa kunnostuksissa, joita hapetuskohteet usein ovat, voi valittavan laitteiston hyötysuhde nousta lähes yhtä tärkeäksi valintakriteeriksi kuin laitteen tuotto.

Hankkeen edetessä on noussut esiin muutamia jatkotutkimustarpeita. Hapetuksen vaikuttavuuden arviointia tulisi kehittää hankkeessa, jossa perehdyttäisiin hapetustarpeen arviointiin erilaisissa järvikunnostuskohteissa. Järvikunnostushankkeiden toteuttajille olisi tarpeellista suunnitella rahoitusmalli, jossa arvioitaisiin, millaisiin hankkeisiin tarvitaan koko hapetuksen urakointi ja millaisiin hankkeisiin voi soveltua itse hoidettuna vuokrahapetin.

Tämän hankkeen aikana on tullut selväksi, että onnistunut hapetus vaatii runsaasti tietoa ja erikoisosaamista sekä näiden yhdistämistä kyseessä olevan kunnostuskohteen tilanteeseen. Kunnostuksen suunnittelussa alan ammattilaisten, kuten konsulttien, laitevalmistajien ja ympäristöhallinnon edustajien, tietämyksen hyödyntäminen edesauttaa tavoitteiden saavuttamista. Yhdistämällä hapetus muiden rehevyyttä vähentävien keinojen kanssa ja samanaikaisesti vähentämällä järven ulkoista kuormitusta on mahdollista saavuttaa pitkäkestoisia ja järven virkistys- ja vapaa-ajankäyttöarvoja parantavia lopputuloksia.

Lähdeviitteet

Arrajoki, A. 2004. Ruutinlammen ilmastuskokeilu talvella 2002–2003. Uudenmaan ympäristökeskus – monisteita nro 135. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus.

Ashley, K. I. 2001. Recent advances in hypolimnetic aeration design. Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. 27 (4): 2256–2260.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1984. ADCP/REP/84/21 – Inland Aquaculture Engineering. Chapter 21, Aeration and Oxygenation in Aquaculture.

Heitto, A. & Niinimäki, J. 2002. Nummi-Pusulän järvien kunnostus- ja hoitosuunnitelmat. Uudenmaan ympäristökeskus – monisteita nro 115. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus.

Hellgren, J. 2005. Nummi-Pusulän Pitkäljärven happimittaustulokset vv. 1979–2004. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus.

Lappalainen, K. M. 1990. Rehevöityminen seurausilmiöineen. Teoksessa: Ilmavirta, V. (toim.). Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet. Helsinki: Yliopistopaino. S. 108–133.

Lappalainen, K. M. 2004. Vesi-Eko Oy. Kirjeenvaihtoa.

Lappalainen, M. & Lakso, E. 2005. Järvien kunnostus. Luku 12: Järvien hapetus. Teoksessa: Ympäristöopas 114. Helsinki: Suomen ympäristökeskus ja Edita Prima Oy.

Pajuniemi, S. 2005. Nummi-Pusulän Pitkäljärven happi- ja lämpötilahavainnot.

Pelkonen, M. 1989. Hapensiirto aktiivilieteprosessissa. Vesitalous-lehti nro 4/1989, s. 47–51.

Pöpel, H. J. 1976. Aeration and Gas Transfer. Delft University of Technology. Department of Civil Engineering.

Reunanen, S. 2004. Ilmastuslaitteet ja ilmastusavantojen happipitoisuudet 17:llä Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan järvellä maaliskuussa 2003. Uudenmaan ympäristökeskus – monisteita nro 145. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus.

Saarijärvi, E. & Lappalainen, K. M. 2003. Tuusulanjärven hapettaminen vuonna 2002. Vuosiraporttimoniste. Vesi-Eko Oy. Keski-Uudenmaan vesiensuojelun kuntainliitto.

Saarinen, A. 2003. Selvitys talvella 2002–2003 ilmenneiden happikatojen aiheuttamista kalakuolemista ja ilmastustoimenpiteiden vaikutuksista Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan järvillä. Uudenmaan ympäristökeskus – monisteita nro 134. Helsinki: Uudenmaan ympäristökeskus.

SCC Viatek. 2004. Ahmonlammen kunnostus, hankeselvitys ympäristöluvan hakemista varten. Ei julkaistu.

Sweerts, J.-P. R. A., Dekker, T. M. J. & Cappenberg, T. E. 1996. Methane oxidation at the sediment-water interface of shallow eutrophic Lake Loosdrecht and deep meso-eutrophic Lake Vechten. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 25: 197–203.

TUKES. 2005a. Sähköturvallisuussäädökset, taskutieto. Helsinki: Turvatekniikan keskus.

TUKES. 2005b. Varmista sähköturvallisuus -opas. Helsinki: Turvatekniikan keskus.

Turunen, A. & Äystö, V. 2000. Selvitys vesistöjen kunnostustarpeista. Suomen ympäristökeskuksen moniste 180. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 47 s.

Wahlgren, A., Lappalainen, K. M. & Lakso, E. 1990. Veden ja pohjasedimentin hapettaminen. Teoksessa: Ilmavirta, V. (toim.). Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet. Helsinki: Yliopistopaino. S. 224–257.

Water Pollution Control Federation (WPCF), American Society of Civil Engineers. 1988. Aeration – a Wastewater Treatment Process. WPCF-Manual of Practise-No. FD-13. ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practise-No. 68.

Vesi-Eko Oy. 2003. Högbensjönin hätäilmastussuunnitelma.

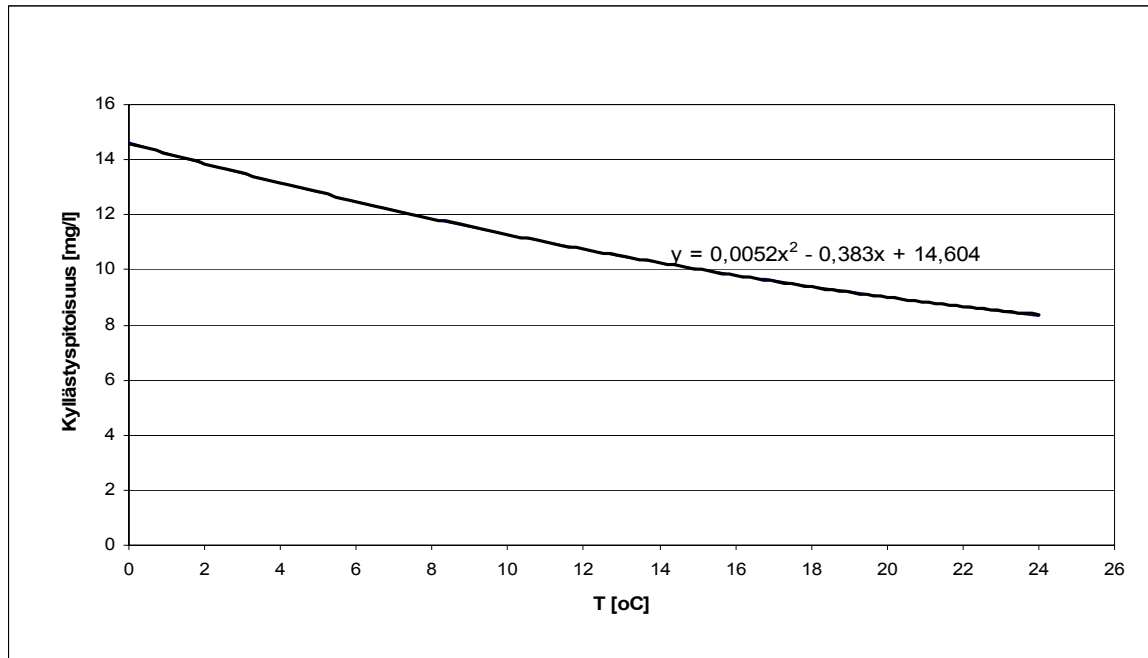
Vääriskoski, J. & Ulvi, T. 2005. Järvien kunnostus. Luku 3: Kunnostushankkeen käynnistäminen ja toteutus. Teoksessa: Ympäristöopas 114. Helsinki: Suomen ympäristökeskus ja Edita Prima Oy.

Äystö, V. 1997. Rehevien järvien kunnostuksen arviointi. Suomen ympäristö 115. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 165 s.

Liite 1: Hapen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa, paine 760 torr

Taulukko 9. Hapen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa (FAO, 1984).

t °C	mgO ₂ /l	t °C	mgO ₂ /l	t °C	mgO ₂ /l	t °C	mgO ₂ /l	t °C	mgO ₂ /l
0	14,65								
0,5	14,45	6,5	12,30	12,5	10,62	18,5	9,30	24,5	8,25
1	14,25	7	12,14	13	10,60	18	9,21	25	8,18
1,5	14,05	7,5	11,99	13,5	10,38	19,5	9,12	25,5	8,10
2	13,86	8	11,84	14	10,26	20	9,02	26	8,02
2,5	13,68	8,5	11,70	14,5	10,15	20,5	8,93	26,5	7,95
3	13,49	9	11,55	15	10,03	21	8,84	27	7,87
3,5	13,31	9,5	11,41	15,5	9,92	21,5	8,76	27,6	7,80
4	13,13	10	11,27	16	9,82	22	8,67	28	7,72
4,5	12,96	10,5	11,14	16,5	9,71	22,5	8,58	28,5	7,05
5	12,70	11	11,00	17	9,61	23	8,50	29	7,58
5,5	12,62	11,5	10,87	17,5	9,50	23,5	8,42	29,5	7,51
6	12,46	12	10,75	18	9,40	24	8,33	30	7,44



Liite 2: Aire-O₂-hapetuslaitteen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta

Taulukossa 10 esitetty happipitoisuus C mittausjakson alussa ja lopussa on kolmen happimittarin keskiarvo. Kyllästyshappipitoisuus C* perustuu lähteeseen FAO (1984). Hapensiirtokertoimen K_La laskenta on suoritettu 240 s:n välein. Mittausjakson kokonaiskestonä on käytetty aikaa, jonka laite oli käynnissä.

Taulukko 10. Aire-O₂-hapetuslaitteen hapensiirtokertoimien K_La laskentatulokset, T = 17,6 °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	K _L a [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–240	9,5	240	0,69–1,72	0,00052	20,445	0,344
240–480	9,5	240	1,72–2,98	0,00074	28,947	0,487
480–720	9,5	240	2,98–4,02	0,00073	28,504	0,479
720–960	9,5	240	4,02–5,03	0,00085	33,554	0,564
960–1200	9,5	240	5,03–5,70	0,00068	26,667	0,448
1200–1440	9,5	240	5,70–6,55	0,00107	42,112	0,708
1440–1680	9,5	240	6,55–6,99	0,00068	26,834	0,451
1680–1920	9,5	240	6,99–7,84	0,00173	67,928	1,142
1920–2220	9,5	300	7,84–8,42	0,00146	57,354	0,964
2220–2580	9,5	360	8,42–8,84	0,00142	55,817	0,938
2580–3000	9,5	420	8,84–8,90	0,00025	9,730	0,164
0–3000	9,5	3000	0,69–8,90	0,00091	35,795	0,602
Keskiarvo				0,00092	36,17	0,61

Veden lämpötilan ja lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (lämpötilakorjauskerroin) on määritetty taulukossa 11 perustuen kaavaan (12), lähtöarvoina T_m = 17,6 °C ja K_La = 0,00092 1/s. Lisäksi on esitetty happikorjauskerroin, yhteiskorjauskerroin sekä korjatut K_La-kertoimet ja ilmastustehot.

Happikorjauskerroin on vertailulämpötilassa (+4, +10 ja +20 °C) kyllästyshappipitoisuuden C*_{kyll.} suhde mittauslämpötilan (+16,1 °C) kyllästyspitoisuuteen C*_{mitt.} Kyllästyshappipitoisuudet lasketaan kaavan (15) mukaisesti vertailulämpötilan (T_v) funktiona. Yhteiskorjauskerroin on lämpötilakorjauskertoimen ja happikorjauskertoimen tulo.

$$C^* = 0,0052T_v^2 - 0,383T_v + 14,604 \quad \text{kaava (15)}$$

Taulukko 11. Veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötilakorjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjauskerroin C* kyl./C* mitt.	Yhteiskorjauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,724	1,391	1,007	0,000928	36,441	0,612
Muutettuna +10 °C	0,835	1,193	0,997	0,000918	36,046	0,606
Muutettuna +20 °C	1,059	0,952	1,008	0,000928	36,458	0,613
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,862	1,391	1,199	0,001104	43,356	0,729
Muutettuna +10 °C	0,920	1,193	1,098	0,001011	39,722	0,668
Muutettuna +20 °C	1,027	0,952	0,977	0,000900	35,357	0,594
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,696	1,391	0,968	0,000892	35,019	0,589
Muutettuna +10 °C	0,817	1,193	0,975	0,000898	35,254	0,593
Muutettuna +20 °C	1,066	0,952	1,015	0,000935	36,715	0,617

Määritettäessä ilmastus- ja ominaistehoja hapettomaan veteen käytettiin laskennassa taulukossa 10 esitettyjä hapensiirtokertoimia sekä kaavoja (8) ja (9). Kertomalla havaittu ilmastusteho ja ominaisilmastusteho yhteiskorjauskertoimella saadaan teho halutussa lämpötilassa.

Taulukossa 11 esitetyt ilmastustehot hapettomaan veteen OTR_{0c} [kgO₂/d] on määritelty kaavan (8) perusteella siten, että (C*–C) on määritelty kaavan (15) mukaisesti.

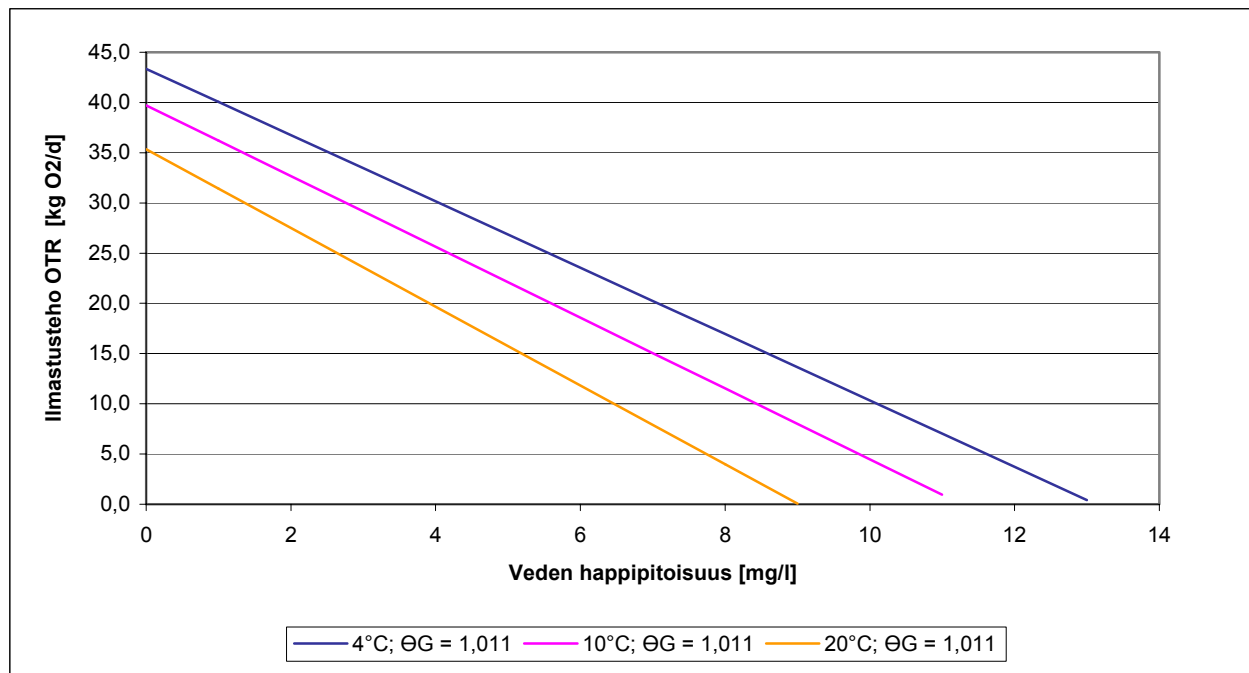
Ominaisilmastusteho hapettomaan veteen AE_{0c} [kgO₂/kWh] on määritelty kaavan (9) mukaisesti käyttäen OTR_{0c}-arvoa. Ilmastusteho OTR on määritelty kaavan (16) mukaisesti.

$$OTR = \frac{C^* - C}{C^*} \cdot OTR_{0c} \quad \text{kaava (16)}$$

Taulukoissa 12 ja 13 esitetään kuvien 11 ja 12 sekä 67–70 laskentatulokset.

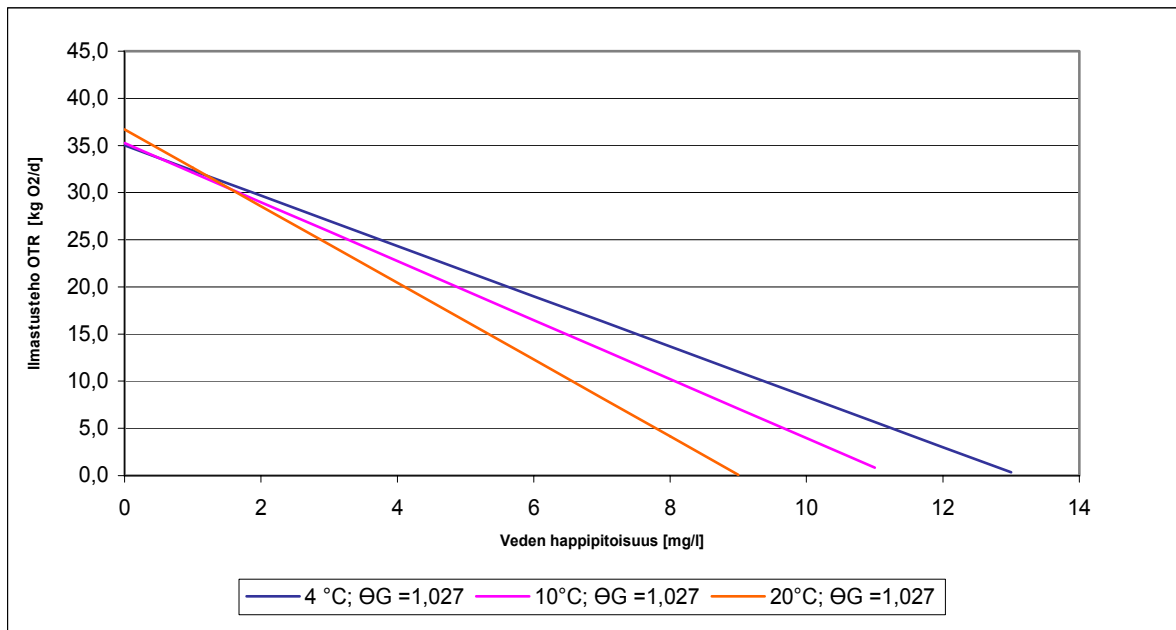
Taulukko 12. Laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 11, 68 ja 69.

O ₂ -pitoisuus ⁵ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	36,441	36,046	36,458	43,356	39,722	35,357	35,019	35,254
1	33,665	32,848	32,416	40,054	36,198	31,437	32,352	32,126	32,645
2	30,890	29,650	28,374	36,752	32,673	27,517	29,685	28,998	28,574
3	28,115	26,451	24,332	33,450	29,148	23,598	27,018	25,870	24,504
6	19,788	16,856	12,207	23,544	18,575	11,838	19,017	16,485	12,293
7	17,013	13,657	8,165	20,242	15,050	7,918	16,349	13,357	8,222
8	14,238	10,459	4,123	16,940	11,525	3,998	13,682	10,229	4,152
9	11,462	7,260	0,081	13,638	8,001	0,078	11,015	7,101	0,081
10	8,687	4,062		10,335	4,476		8,348	3,973	
11	5,912	0,864		7,033	0,952		5,681	0,845	
12	3,136			3,731			3,014		
13	0,361			0,429			0,347		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	36,4	36,0	36,5	43,4	39,7	35,4	35,0	35,3	36,7
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02



Kuva 68. Aire-O₂-hapetuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kolmen mittauksen keskiarvo.

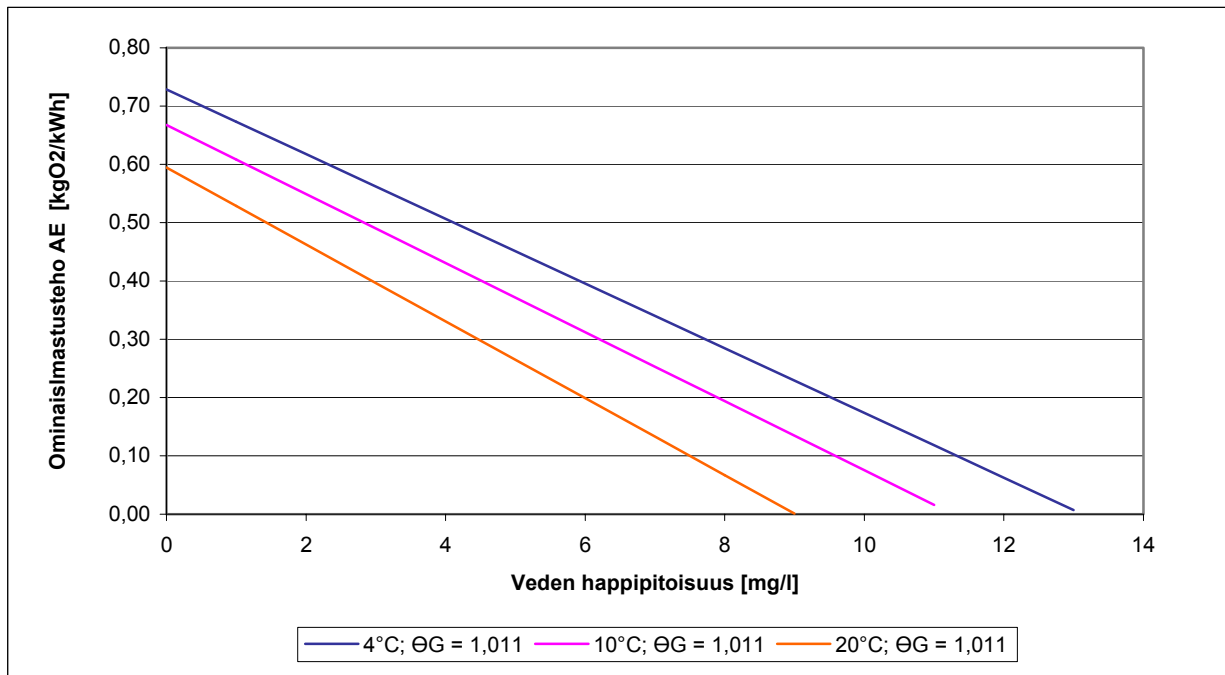
⁵ Arvo C kaavassa 16.



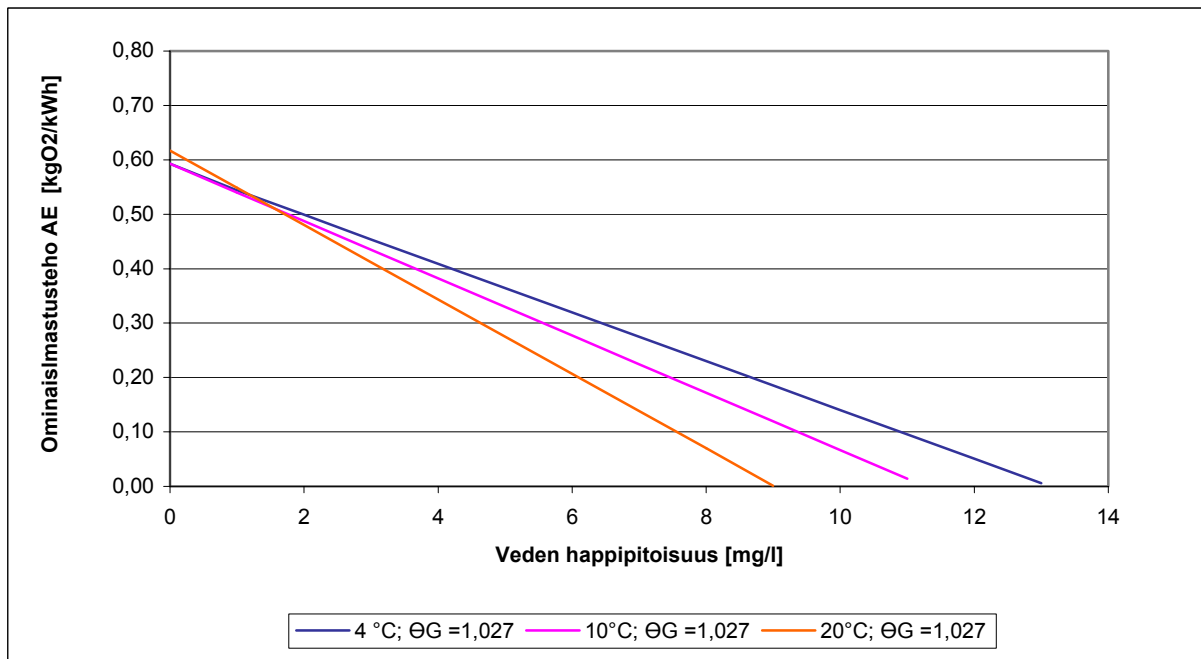
Kuva 69. Aire-O₂ -hapetuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kolmen mittauksen keskiarvo.

Taulukko 13. Laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 12, 70 ja 71.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	4	10	20	4	10	20	4	10	20
0	0,612	0,606	0,613	0,729	0,668	0,594	0,593	0,593	0,617
1	0,566	0,552	0,545	0,673	0,608	0,528	0,544	0,540	0,549
2	0,519	0,498	0,477	0,618	0,549	0,463	0,499	0,487	0,480
3	0,473	0,445	0,409	0,562	0,490	0,397	0,454	0,435	0,412
6	0,333	0,283	0,205	0,396	0,312	0,199	0,320	0,277	0,207
7	0,286	0,230	0,137	0,340	0,253	0,133	0,275	0,225	0,138
8	0,239	0,176	0,069	0,285	0,194	0,067	0,230	0,172	0,070
9	0,193	0,122	0,001	0,229	0,134	0,001	0,185	0,119	0,001
10	0,146	0,068		0,174	0,075		0,140	0,067	
11	0,099	0,015		0,118	0,016		0,095	0,014	
12	0,053			0,063			0,051		
13	0,006			0,007			0,006		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	0,612	0,606	0,613	0,729	0,668	0,594	0,593	0,593	0,617



Kuva 70. Aire-O₂-hapetuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kolmen mittauksen keskiarvo.



Kuva 71. Aire-O₂-hapetuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kolmen mittauksen keskiarvo.

Liite 3: Mikrox-hapettimen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta

Taulukossa 14 esitetty happipitoisuus C mittausjakson alussa ja lopussa on kolmen happimittarin keskiarvo. Kyllästyshappipitoisuus C^* perustuu lähteeseen FAO (1984). Hapensiirtokertoimen K_{La} laskenta on suoritettu 240 s:n välein. Mittausjakson kokonaiskestonä on käytetty aikaa, jonka laite oli käynnissä.

Taulukko 14. Mikrox-hapettimen hapensiirtokertoimien K_{La} laskentatulokset, $T = 16,1$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	K_{La} [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–240	9,8	240	1,40–4,26	0,00174	67,80	0,28
240–480	9,8	240	4,26–5,62	0,00118	45,89	0,19
480–720	9,8	240	5,62–7,14	0,00189	73,91	0,31
720–960	9,8	240	7,14–7,95	0,00154	59,93	0,25
960–1200	9,8	240	7,95–8,82	0,00267	104,31	0,43
1200–1500	9,8	300	8,82–9,54	0,00461	179,76	0,75
0–1500	9,8	1500	1,40–9,54	0,00236	92,25	0,38
Keskiarvo				0,00227	88,60	0,37

Veden lämpötilan ja lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (lämpötilakorjauskerroin) on määritetty taulukossa 15 perustuen kaavaan (12), lähtöarvoina $T_m = 16,1$ °C ja $K_{La} = 0,00227$ 1/s. Lisäksi on esitetty happikorjauskerroin, yhteiskorjauskerroin sekä korjatut K_{La} -kertoimet ja ilmastustehot.

Happikorjauskerroin on vertailulämpötilassa (+ 4, + 10 ja + 20 °C) kyllästyshappipitoisuuden C^* kyll. suhde mittauslämpötilan (+16,1 °C) kyllästyspitoisuuteen C^* mitt. Kyllästyshappipitoisuudet lasketaan kaavan (15) mukaisesti vertailulämpötilan (T_v) funktiona. Yhteiskorjauskerroin on lämpötilakorjauskertoimen ja happikorjauskertoimen tulo.

$$C^* = 0,0052T_v^2 - 0,383T_v + 14,604$$

kaava (15)

Taulukko 15. Veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötilakorjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjauskerroin C* kyl./C* mitt.	Yhteiskorjauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE0 _c
Muutettuna +4 °C	0,751	1,346	1,010	0,002295	89,524	0,373
Muutettuna +10 °C	0,865	1,155	1,000	0,002270	88,555	0,369
Muutettuna +20 °C	1,097	0,922	1,011	0,002296	89,567	0,373
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,876	1,346	1,179	0,002678	104,491	0,435
Muutettuna +10 °C	0,935	1,155	1,081	0,002454	95,733	0,399
Muutettuna +20 °C	1,044	0,922	0,962	0,002184	85,213	0,355
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,724	1,346	0,975	0,002215	86,410	0,360
Muutettuna +10 °C	0,850	1,155	0,982	0,002230	86,989	0,362
Muutettuna +20 °C	1,109	0,922	1,023	0,002322	90,595	0,377

Määritettäessä ilmastus- ja ominaistehoja hapettomaan veteen käytettiin laskennassa taulukossa 14 esitettyjä hapensiirtokertoimia sekä kaavoja (8) ja (9). Kertomalla havaittu ilmastusteho ja ominaisilmastusteho yhteiskorjauskertoimella saadaan teho halutussa lämpötilassa.

Taulukossa 16 esitetyt ilmastustehot hapettomaan veteen OTR_{0c} [kgO₂/d] on määritelty kaavan (8) perusteella siten, että (C*-C) on määritelty kaavan (15) mukaisesti.

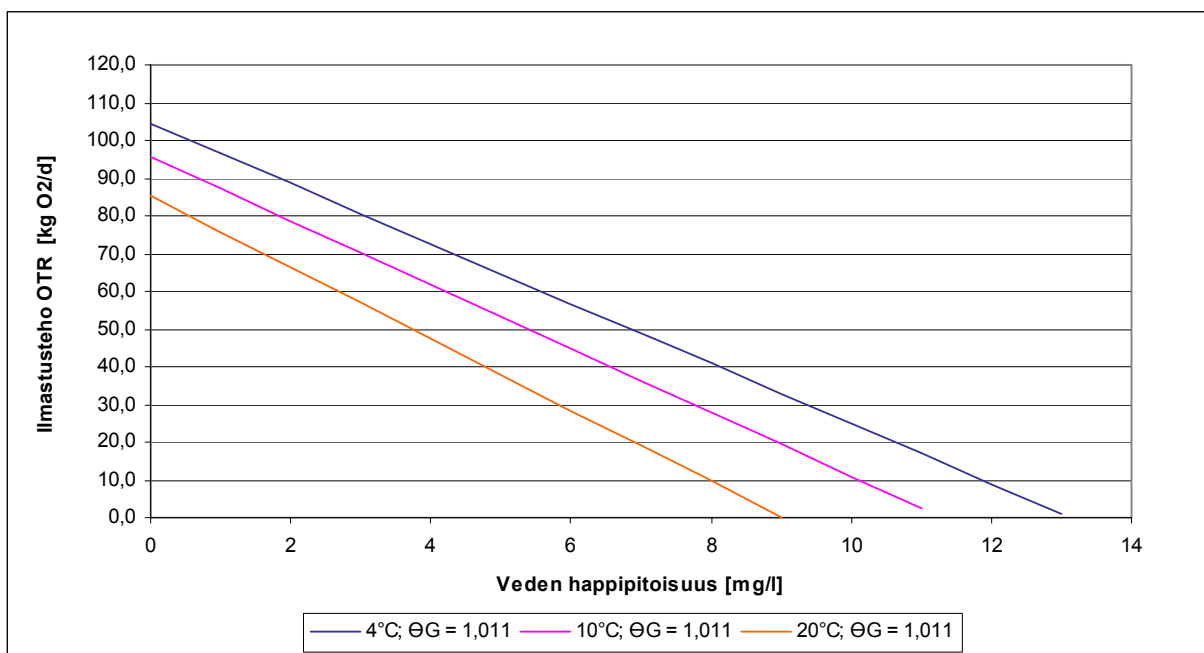
Ominaisilmastusteho hapettomaan veteen AE0_c [kgO₂/kWh] on määritelty kaavan (9) mukaisesti käyttäen OTR_{0c} -arvoa. Ilmastusteho OTR on määritelty kaavan (16) mukaisesti.

$$OTR = \frac{C^* - C}{C^*} \cdot OTR_{0c} \quad \text{kaava (16)}$$

Taulukoissa 16 ja 17 esitetään kuvien 13 ja 14 sekä 70–73 laskentatulokset.

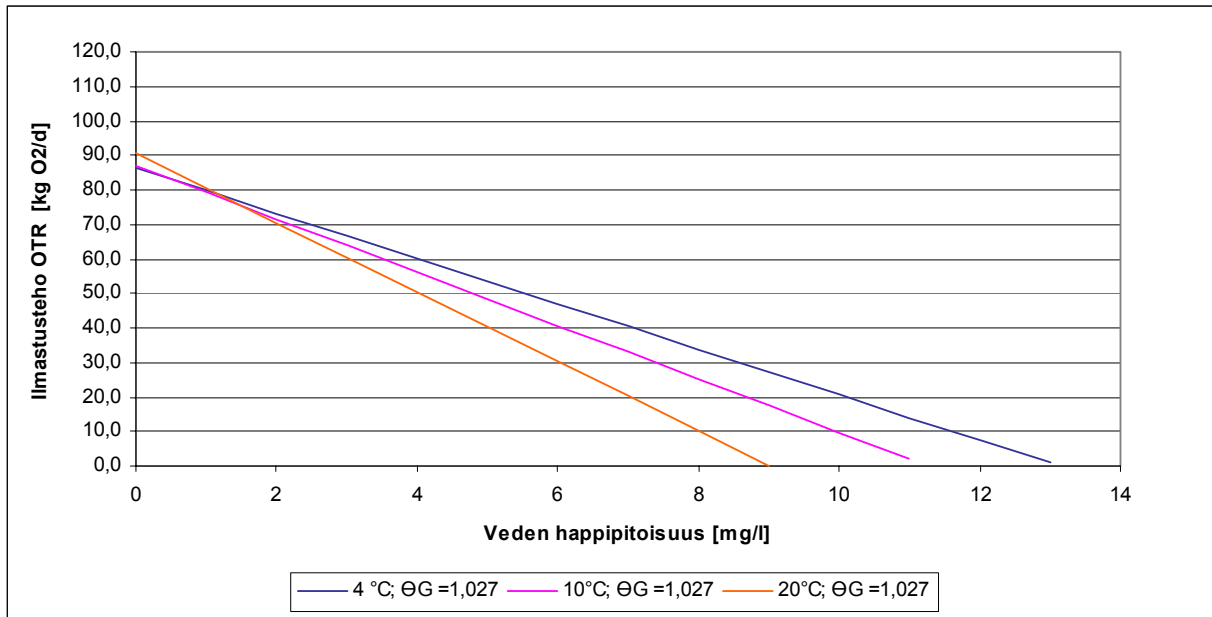
Taulukko 16. Laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 13, 72 ja 73.

O ₂ -pitoisuus ⁶ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	89,524	88,555	89,567	104,491	95,733	85,213	86,410	86,989
1	82,706	80,698	79,637	96,533	87,239	75,766	79,829	79,270	80,551
2	75,887	72,840	69,707	88,575	78,744	66,319	73,248	71,552	70,507
3	69,069	64,982	59,777	80,617	70,250	56,872	66,667	63,833	60,463
6	48,614	41,410	29,988	56,742	44,766	28,530	46,924	40,677	30,332
7	41,796	33,552	20,058	48,784	36,272	19,083	40,342	32,959	20,288
8	34,978	25,694	10,128	40,826	27,777	9,636	33,761	25,240	10,245
9	28,159	17,837	0,199	32,867	19,283	0,189	27,180	17,521	0,201
10	21,341	9,979		24,909	10,788		20,599	9,803	
11	14,523	2,122		16,951	2,294		14,018	2,084	
12	7,705			8,993			7,437		
13	0,886			1,035			0,856		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	89,5	88,6	89,6	104,5	95,7	85,2	86,4	87,0	90,6
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02



Kuva 72. Mikrox-hapettimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.

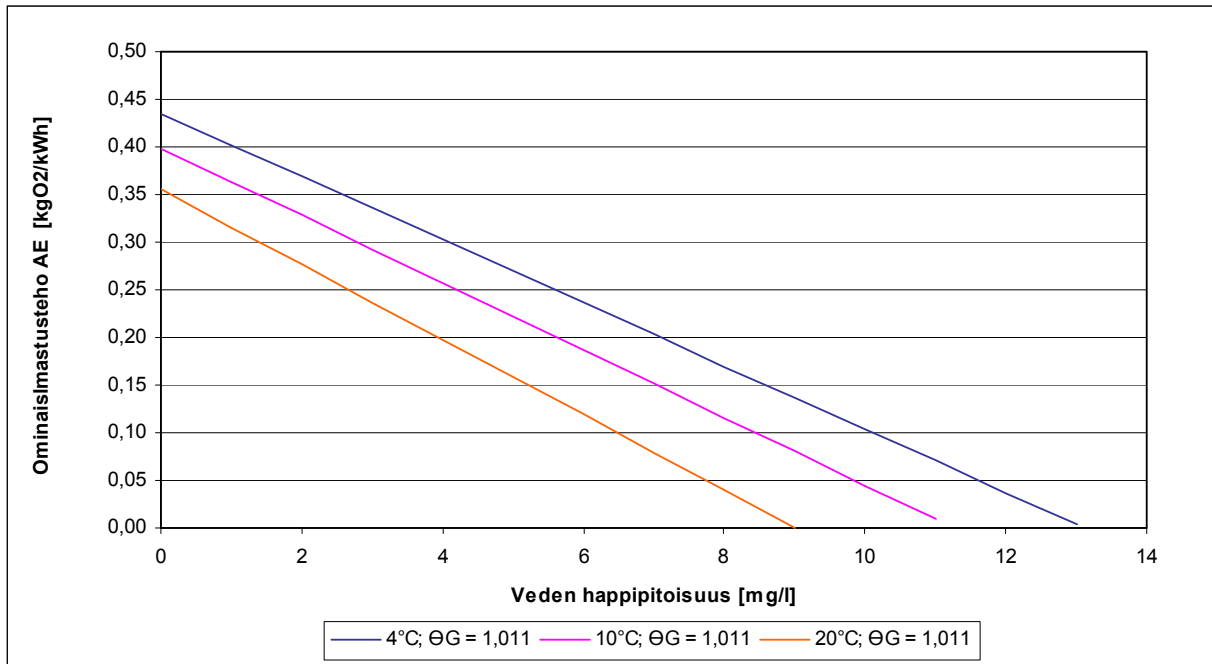
⁶ Arvo C kaavassa 16.



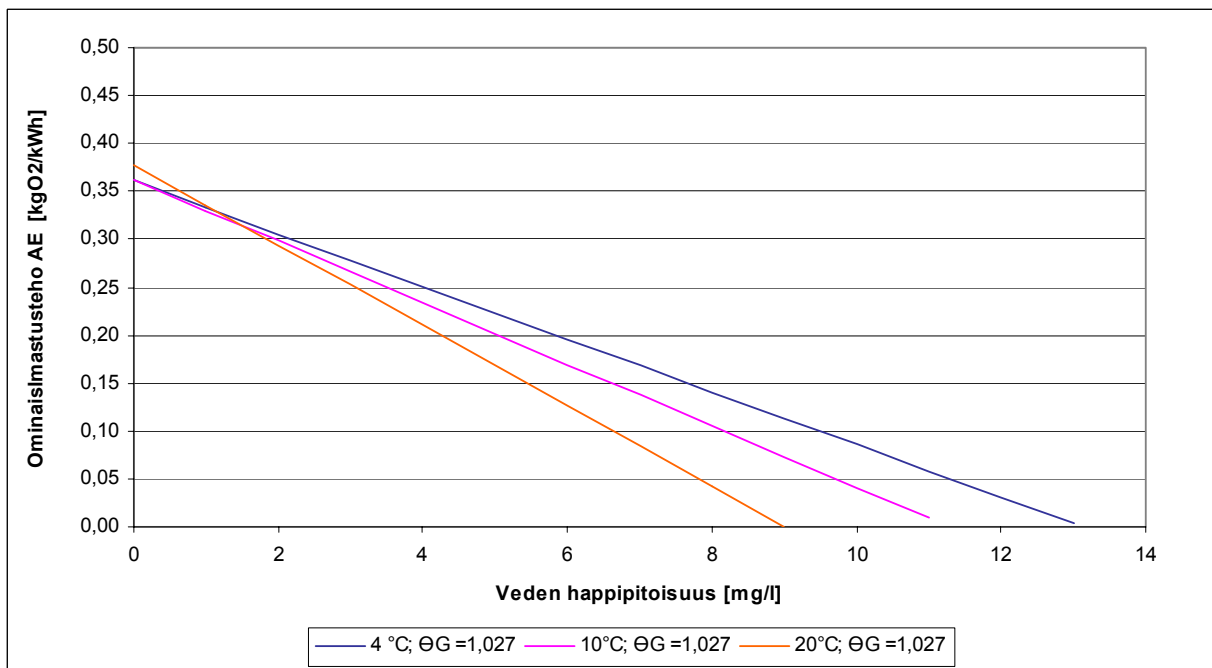
Kuva 73. Mikrox-hapettimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 17. Laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 14, 74 ja 75.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	0,373	0,369	0,373	0,435	0,399	0,355	0,362	0,362	0,377
1	0,345	0,336	0,332	0,402	0,363	0,316	0,333	0,330	0,336
2	0,316	0,304	0,290	0,369	0,328	0,276	0,305	0,298	0,294
3	0,288	0,271	0,249	0,336	0,293	0,237	0,278	0,266	0,252
6	0,203	0,173	0,125	0,236	0,187	0,119	0,196	0,169	0,126
7	0,174	0,140	0,084	0,203	0,151	0,080	0,168	0,137	0,085
8	0,146	0,107	0,042	0,170	0,116	0,040	0,141	0,105	0,043
9	0,117	0,074	0,001	0,137	0,080	0,001	0,113	0,073	0,001
10	0,089	0,042		0,104	0,045		0,086	0,041	
11	0,061	0,009		0,071	0,010		0,058	0,009	
12	0,032			0,037			0,031		
13	0,004			0,004			0,004		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	0,37	0,37	0,37	0,44	0,40	0,36	0,36	0,36	0,38



Kuva 74. Mikrox-hapettimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 75. Mikrox-hapettimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Liite 4: Waterix Oy:n Mini ja Micro-ilmastuslaitteiden ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta

Taulukoissa 18 ja 19 esitetty happipitoisuus C mittausjakson alussa ja lopussa on kahden mittauksen keskiarvona huomioiden mittarin nro 2 korjatut lukemat. Kyllästyspitoisuus C^* perustuu lähteeseen FAO (1984). Hapensiirtokertoimien $K_L a$ laskenta on suoritettu 360 s:n (Micro) ja 180 s:n (Mini) välein. Mittausjakson pituutena on käytetty aikaa, jonka laite oli käynnissä. Loppuarvona on käytetty arvoa, joka on saatu kun laite on ollut pysäytettynä 2 minuuttia.

Taulukko 18. Micro-ilmastuslaitteen hapensiirtokertoimien $K_L a$ laskentatulokset, $T = 17,5$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	$K_L a$ [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–360	9,5	360	2,04–2,17	0,00005	1,85	0,46
360–720	9,5	360	2,17–2,39	0,00008	3,29	0,82
720–1080	9,5	360	2,39–2,60	0,00009	3,38	0,84
1080–1440	9,5	360	2,60–2,78	0,00007	2,80	0,70
1440–1800	9,5	360	2,78–2,97	0,00008	3,18	0,79
0–1800	9,5	1800	2,04–3,05	0,00008	3,18	0,79
Keskiarvo				0,00007	2,90	0,72

Taulukko 19. Mini-ilmastuslaitteen hapensiirtokertoimien $K_L a$ laskentatulokset, $T = 17,5$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	$K_L a$ [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–180	9,5	180	1,03–2,66	0,00119	46,76	1,50
180–360	9,5	180	2,66–3,94	0,00115	45,42	1,45
360–600	9,5	240	3,94–5,24	0,00111	43,88	1,40
0–600	9,5	600	1,03–5,32	0,00118	46,44	1,49
Keskiarvo				0,00116	45,62	1,46

Veden lämpötilan ja lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (lämpötilakorjauskerroin) on määritetty taulukoissa 20 ja 21 perustuen kaavaan (12), lähtöarvoina $T_m = 17,5$ °C ja $K_L a = 0,00007$ 1/s. Lisäksi on esitetty happikorjauskerroin, yhteiskorjauskerroin sekä korjatut $K_L a$ -kertoimet ja ilmastustehot.

Happikorjauskerroin on vertailulämpötilassa (+4, +10 ja +20 °C) kyllästyshappipitoisuuden C*kyll. suhde mittaustilämpötilan (+12,5 °C) kyllästyspitoisuuteen C*mitt. Kyllästyshappipitoisuudet lasketaan kaavan (15) mukaisesti vertailulämpötilan (T_v) funktiona. Yhteiskorjauskerroin on lämpötilakorjauskertoimen ja happikorjauskertoimen tulo.

$$C^* = 0,0052T_v^2 - 0,383T_v + 14,604 \quad \text{kaava (15)}$$

Taulukko 20. Veden lämpötilan vaikutus Micron hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin Θ _G = 1,024	Lämpötilakorjauskerroin Θ _G ^{T_v-T_m}	Happikorjauskerroin C* kyll./C* mitt.	Yhteiskorjauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,726	1,385	1,008	0,000074	2,923	0,729
Muutettuna +10 °C	0,837	1,188	0,997	0,000073	2,891	0,721
Muutettuna +20 °C	1,061	0,948	1,008	0,000074	2,924	0,730
Lämpötilakerroin Θ _G = 1,011						
Muutettuna +4 °C	0,864	1,385	1,196	0,000088	3,468	0,865
Muutettuna +10 °C	0,922	1,188	1,096	0,000081	3,178	0,793
Muutettuna +20 °C	1,029	0,948	0,975	0,000072	2,829	0,706
Lämpötilakerroin Θ _G = 1,027						
Muutettuna +4 °C	0,700	1,385	0,969	0,000071	2,810	0,701
Muutettuna +10 °C	0,821	1,188	0,976	0,000072	2,829	0,706
Muutettuna +20 °C	1,072	0,948	1,016	0,000075	2,946	0,735

Taulukko 21. Veden lämpötilan vaikutus Minin hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin Θ _G = 1,024	Lämpötilakorjauskerroin Θ _G ^{T_v-T_m}	Happikorjauskerroin C* kyll./C* mitt.	Yhteiskorjauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,726	1,388	1,008	0,001168	45,974	1,470
Muutettuna +10 °C	0,837	1,191	0,997	0,001156	45,477	1,454
Muutettuna +20 °C	1,061	0,950	1,008	0,001169	45,997	1,471
Lämpötilakerroin Θ _G = 1,011						
Muutettuna +4 °C	0,863	1,388	1,197	0,001388	54,629	1,747
Muutettuna +10 °C	0,921	1,191	1,097	0,001272	50,050	1,600
Muutettuna +20 °C	1,028	0,950	0,976	0,001132	44,551	1,425
Lämpötilakerroin Θ _G = 1,027						
Muutettuna +4 °C	0,698	1,388	0,969	0,001123	44,194	1,413
Muutettuna +10 °C	0,819	1,191	0,975	0,001130	44,490	1,423
Muutettuna +20 °C	1,069	0,950	1,016	0,001177	46,334	1,482

Määritettäessä ilmastus- ja ominaistehoja hapettomaan veteen käytettiin laskennassa taulukoissa 18 ja 19 esitettyjä hapensiirtokertoimia sekä kaavoja (8) ja (9). Kertomalla havaittu ilmastusteho ja ominaisilmastusteho yhteiskorjauskertoimella saadaan teho halutussa lämpötilassa.

Taulukoissa 22 ja 23 esitetyt ilmastustehot hapettomaan veteen $OTR0_c$ [kgO_2/d] on määritelty kaavan (8) perusteella siten, että (C^*-C) on määritelty kaavan (15) mukaisesti.

Ominaisilmastusteho hapettomaan veteen $AE0_c$ [kgO_2/kWh] on määritelty kaavan (9) mukaisesti käyttäen $OTR0_c$ -arvoa. Ilmastusteho OTR on määritelty kaavan (16) mukaisesti.

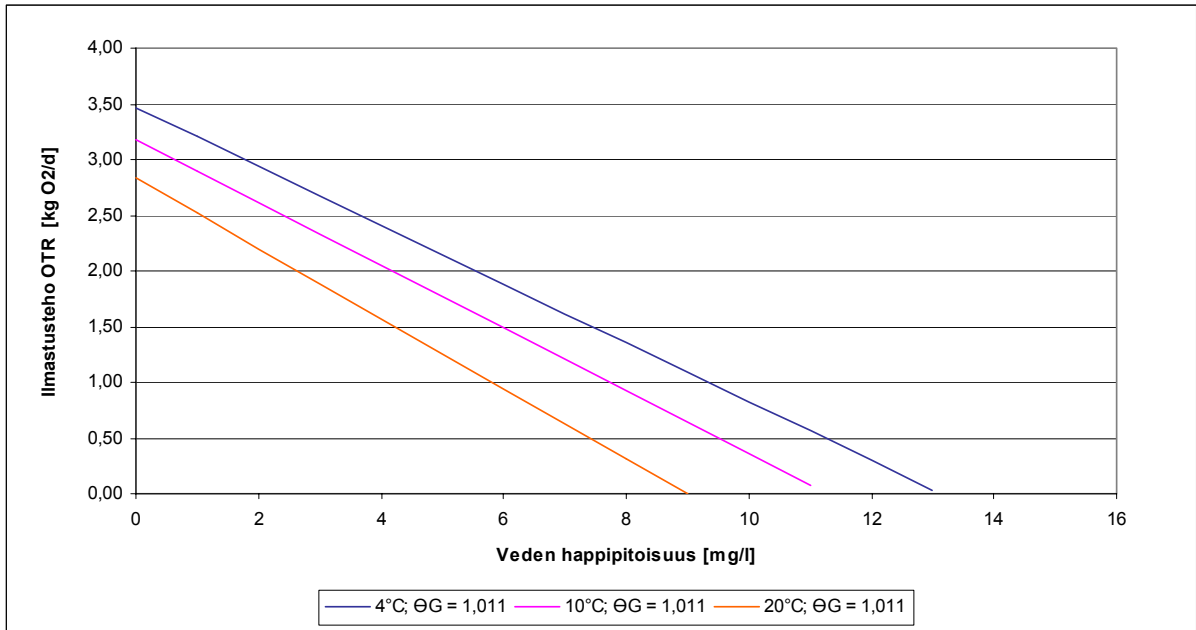
$$OTR = \frac{C^* - C}{C^*} \cdot OTR0_c \quad \text{kaava (16)}$$

Taulukoissa 22–25 esitetään kuvien 15–18 sekä 75–81 laskentatulokset.

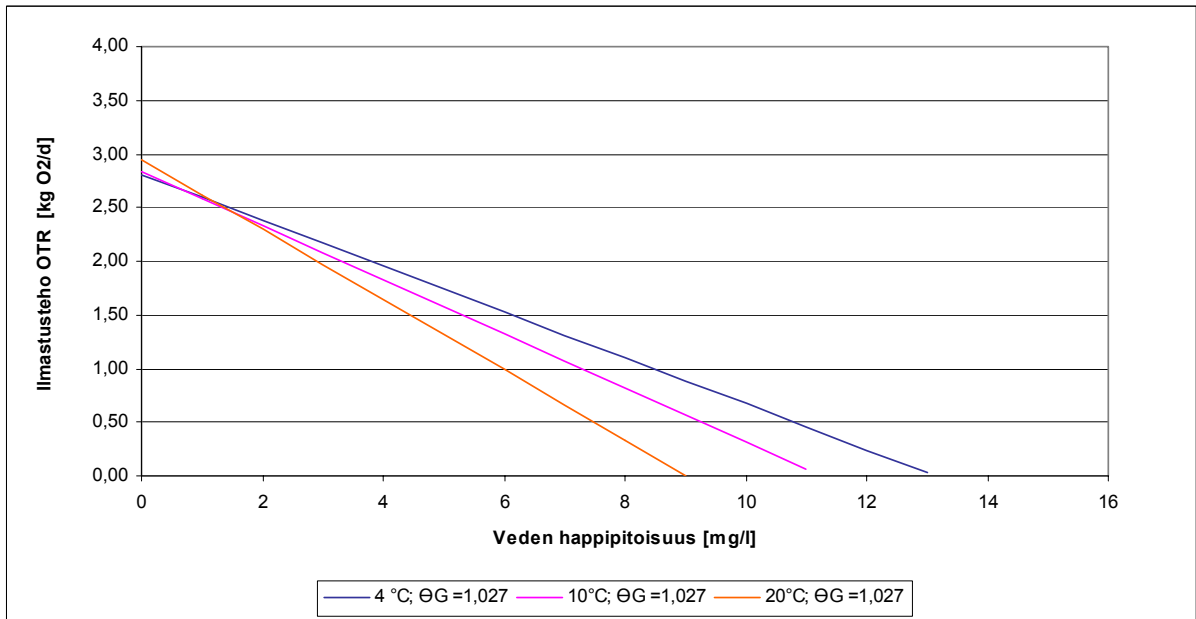
Taulukko 22. Laskentatulokset Micron ilmastusteholle OTR kuvassa 15, 76 ja 77.

O ₂ -pitoisuus ⁷ [mg/l]	OTR [kgO_2/d]								
	0	2,923	2,891	2,924	3,468	3,178	2,829	2,810	2,829
1	2,700	2,635	2,600	3,204	2,896	2,515	2,596	2,578	2,620
2	2,478	2,378	2,276	2,940	2,614	2,201	2,382	2,327	2,293
3	2,255	2,122	1,952	2,676	2,332	1,888	2,168	2,076	1,966
6	1,587	1,352	0,979	1,883	1,486	0,947	1,526	1,323	0,987
7	1,365	1,095	0,655	1,619	1,204	0,633	1,312	1,072	0,660
8	1,142	0,839	0,331	1,355	0,922	0,320	1,098	0,821	0,333
9	0,919	0,582	0,006	1,091	0,640	0,006	0,884	0,570	0,007
10	0,697	0,326		0,827	0,358		0,670	0,319	
11	0,474	0,069		0,563	0,076		0,456	0,068	
12	0,252			0,299			0,242		
13	0,029			0,034			0,028		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR0 _c [kgO_2/d]	2,9	2,9	2,9	3,5	3,2	2,8	2,8	2,8	2,9
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02

⁷ Arvo C kaavassa 16.



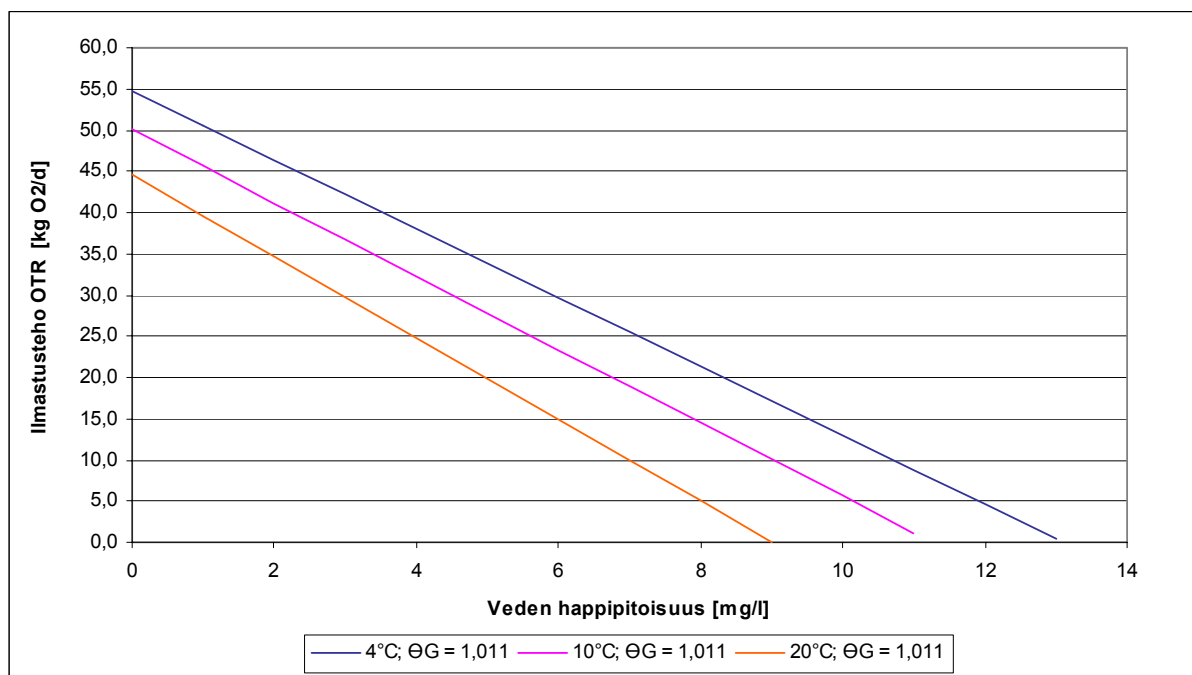
Kuva 76. Micro-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



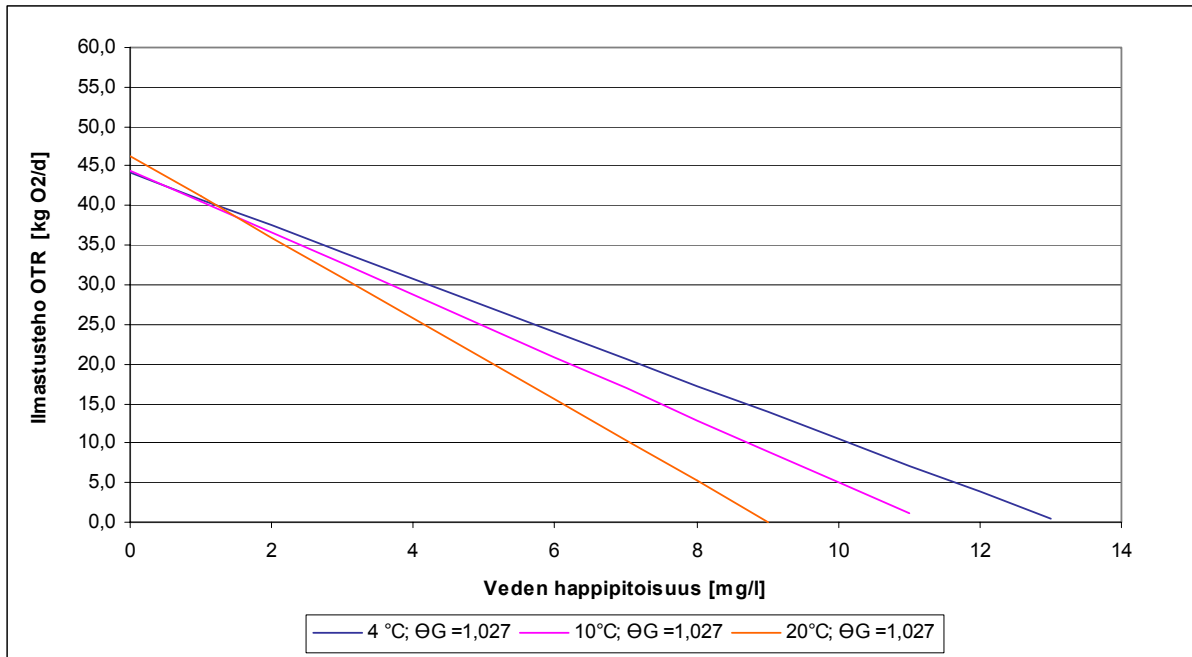
Kuva 77. Micro-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 23. Laskentatulokset Minin ilmastusteholle OTR kuvassa 17, 78 ja 79.

O ₂ -pitoisuus ³ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	45,974	45,477	45,997	54,629	50,050	44,551	44,194	44,490
1	42,473	41,442	40,897	50,469	45,609	39,611	40,828	40,542	41,197
2	38,971	37,407	35,798	46,308	41,168	34,672	37,462	36,595	36,061
3	35,470	33,371	30,698	42,147	36,727	29,733	34,096	32,647	30,924
6	24,966	21,266	15,400	29,665	23,404	14,916	23,999	20,804	15,513
7	21,464	17,230	10,301	25,505	18,963	9,977	20,633	16,857	10,376
8	17,963	13,195	5,201	21,344	14,522	5,038	17,267	12,909	5,240
9	14,461	9,160	0,102	17,183	10,081	0,099	13,901	8,961	0,103
10	10,960	5,125		13,023	5,640		10,535	5,014	
11	7,458	1,090		8,862	1,199		7,169	1,066	
12	3,957			4,702			3,803		
13	0,455			0,541			0,438		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	46,0	45,5	46,0	54,6	50,1	44,6	44,2	44,5	46,3
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02



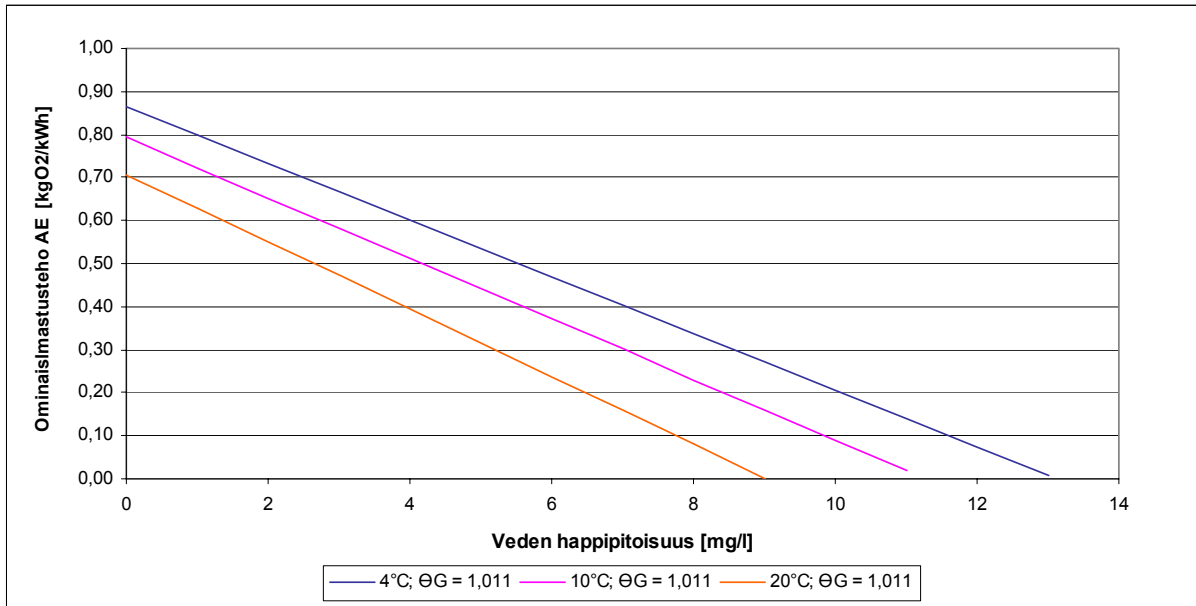
Kuva 78. Mini-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



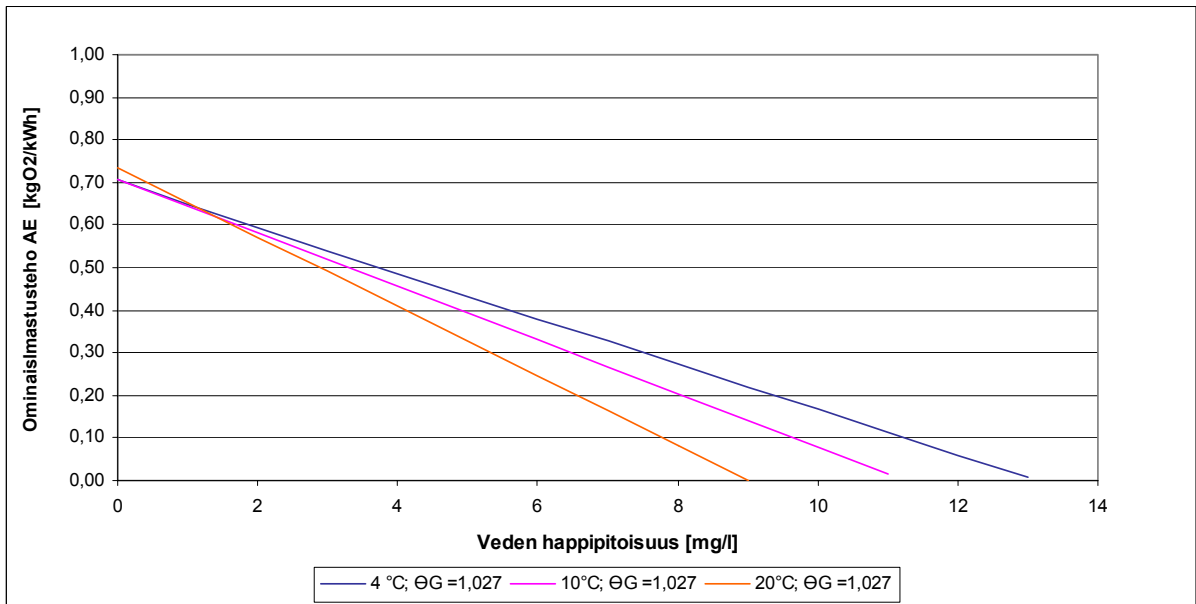
Kuva 79. Mini-ilmastuslaitteen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 24. Laskentatulokset Micron ominaisilmastusteholle AE kuvassa 16, 80 ja 81.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	0	0,729	0,721	0,730	0,865	0,793	0,706	0,706	0,706
1	0,674	0,657	0,649	0,799	0,723	0,627	0,648	0,643	0,654
2	0,618	0,593	0,568	0,734	0,652	0,549	0,594	0,581	0,572
3	0,563	0,529	0,487	0,668	0,582	0,471	0,541	0,518	0,491
6	0,396	0,337	0,244	0,470	0,371	0,236	0,381	0,330	0,246
7	0,340	0,273	0,163	0,404	0,300	0,158	0,327	0,267	0,165
8	0,285	0,209	0,083	0,338	0,230	0,080	0,274	0,205	0,083
9	0,229	0,145	0,002	0,272	0,160	0,002	0,221	0,142	0,002
10	0,174	0,081		0,206	0,089		0,167	0,080	
11	0,118	0,017		0,140	0,019		0,114	0,017	
12	0,063			0,074			0,060		
13	0,007			0,009			0,007		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	0,73	0,72	0,73	0,87	0,79	0,71	0,71	0,71	0,74
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20



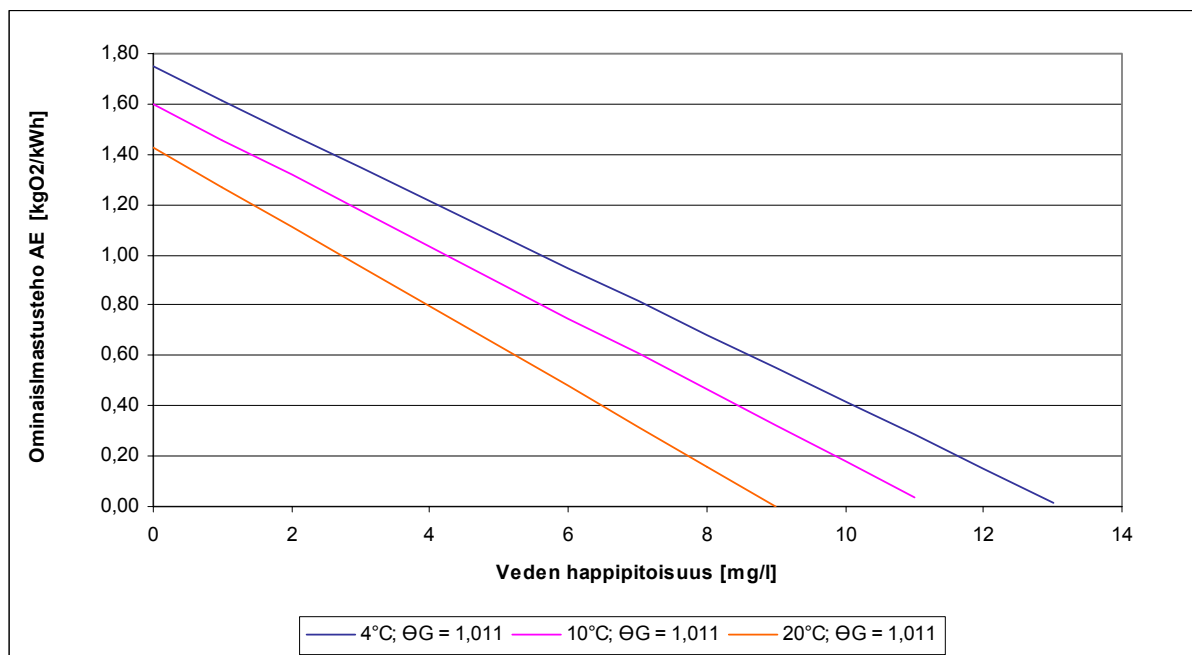
Kuva 80. Micro-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 81. Micro-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 25. Laskentatulokset Minin ominaisilmastusteholle AE kuvassa 18, 82 ja 83.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	0	1,470	1,454	1,471	1,747	1,600	1,425	1,423	1,423
1	1,358	1,325	1,308	1,614	1,458	1,267	1,306	1,296	1,317
2	1,246	1,196	1,145	1,481	1,316	1,109	1,198	1,170	1,153
3	1,134	1,067	0,982	1,348	1,174	0,951	1,090	1,044	0,989
6	0,798	0,680	0,492	0,949	0,748	0,477	0,767	0,665	0,496
7	0,686	0,551	0,329	0,816	0,606	0,319	0,660	0,539	0,332
8	0,574	0,422	0,166	0,683	0,464	0,161	0,552	0,413	0,168
9	0,462	0,293	0,003	0,549	0,322	0,003	0,445	0,287	0,003
10	0,350	0,164		0,416	0,180		0,337	0,160	
11	0,238	0,035		0,283	0,038		0,229	0,034	
12	0,127			0,150			0,122		
13	0,015			0,017			0,014		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	1,47	1,45	1,47	1,75	1,60	1,43	1,42	1,42	1,48
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20



Kuva 82. Mini-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 83. Mini-ilmastuslaitteen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Liite 5: Vesi-Eko Oy:n Visiox-ilmastuslaitteen ilmastustehon ja ominaisilmastustehon laskenta

Taulukossa 26 esitetty happipitoisuus C mittausjakson alussa ja lopussa on kolmen happimittarin keskiarvo mittarin nro 3 korjaus huomioiden. Kyllästyshappipitoisuus C^* perustuu lähteeseen FAO (1984). Hapensiirtokertoimen $K_L a$ laskenta on suoritettu 120 s:n välein. Mittausjakson pituutena on käytetty aikaa, jonka laite oli käynnissä. Loppuarvona on käytetty arvoa, joka on saatu kun laite on ollut pysäytettynä 2 minuuttia.

Taulukko 26. Visiox-ilmastimen hapensiirtokertoimien $K_L a$ laskentatulokset, $T = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	$K_L a$ [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–120	10,63	120	1,38–3,71	0,00242	102,6	0,97
120–240	10,63	120	3,71–5,60	0,00266	112,6	1,07
240–360	10,63	120	5,60–6,94	0,00258	109,5	1,04
0–360	10,63	360	1,38–7,12	0,00269	114,1	1,08
Keskiarvo				0,00255	108,2	1,02

Veden lämpötilan ja lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (lämpötilakorjauskerroin) on määritetty taulukossa 27 perustuen kaavaan (12), lähtöarvoina $T_m = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $K_L a = 0,00255 \text{ 1/s}$. Lisäksi on esitetty happikorjauskerroin, yhteiskorjauskerroin sekä korjatut $K_L a$ -kertoimet ja ilmastustehot.

Happikorjauskerroin on vertailulämpötilassa (+4, +10 ja +20 °C) kyllästyshappipitoisuuden C^* kyll. suhde mittauslämpötilan (+12,5 °C) kyllästyspitoisuuteen C^* mitt. Kyllästyshappipitoisuudet lasketaan kaavan (15) mukaisesti vertailulämpötilan (T_v) funktiona. Yhteiskorjauskerroin on lämpötilakorjauskertoimen ja happikorjauskertoimen tulo.

$$C^* = 0,0052T_v^2 - 0,383T_v + 14,604$$

kaava (15)

Taulukko 27. Veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötila- korjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjaus- kerroin C* kyl./C* mitt.	Yhteiskor- jauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,817	1,239	1,013	0,00259	109,6	1,04
Muutettuna +10 °C	0,942	1,063	1,002	0,00256	108,4	1,03
Muutettuna +20 °C	1,195	0,848	1,013	0,00259	109,7	1,04
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,911	1,239	1,129	0,00288	122,2	1,16
Muutettuna +10 °C	0,973	1,063	1,034	0,00264	111,9	1,06
Muutettuna +20 °C	1,086	0,848	0,921	0,00235	99,6	0,94
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,797	1,239	0,988	0,00252	106,9	1,01
Muutettuna +10 °C	0,936	1,063	0,994	0,00254	107,6	1,02
Muutettuna +20 °C	1,221	0,848	1,036	0,00265	112,1	1,06

Määritettäessä ilmastus- ja ominaistehoja hapettomaan veteen käytettiin laskennassa taulukossa 26 esitetyjä hapensiirtokertoimia sekä kaavoja (8) ja (9). Kertomalla havaittu ilmastusteho ja ominaisilmastusteho yhteiskorjauskertoimella saadaan teho halutussa lämpötilassa.

Taulukossa 28 esitetyt ilmastustehot hapettomaan veteen OTR_{0c} [kgO₂/d] on määritelty kaavan (8) perusteella siten, että (C*–C) on määritelty kaavan (15) mukaisesti.

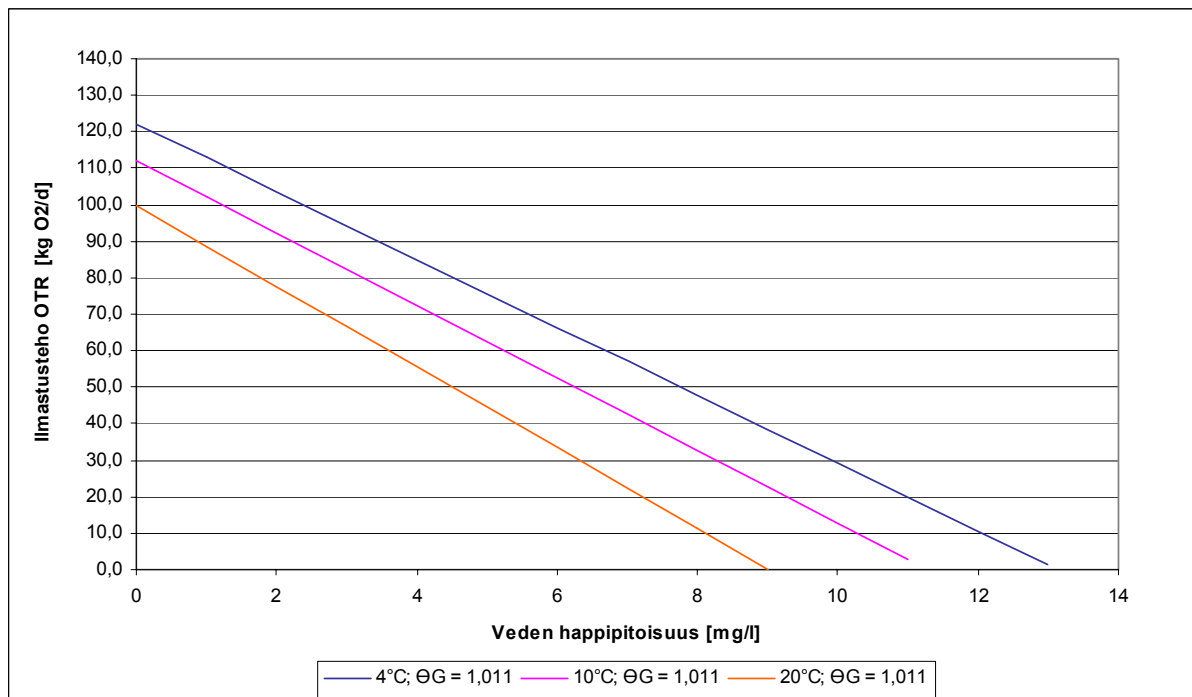
Ominaisilmastusteho hapettomaan veteen AE_{0c} [kgO₂/kWh] on määritelty kaavan (9) mukaisesti käyttäen OTR_{0c} -arvoa. Ilmastusteho OTR on määritelty kaavan (16) mukaisesti.

$$OTR = \frac{C^* - C}{C^*} \cdot OTR_{0c} \quad \text{kaava (16)}$$

Taulukoissa 28 ja 29 on esitetty kuvien 19 ja 20 sekä 83–86 laskentatulokset.

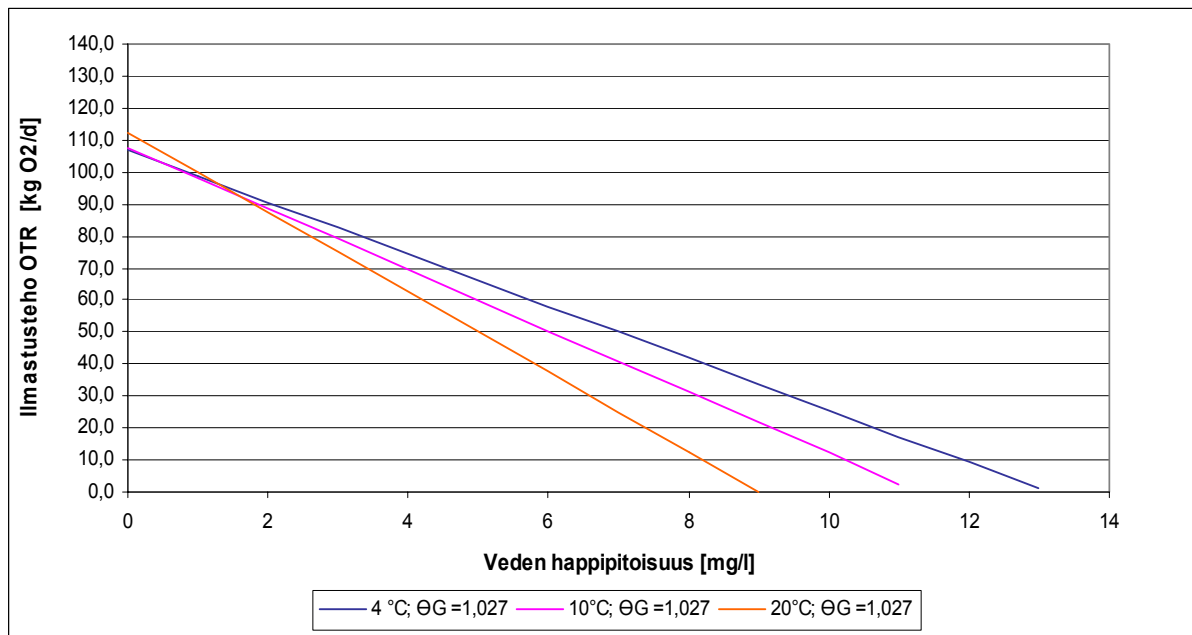
Taulukko 28. Laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 19, 84 ja 85.

O ₂ -pitoisuus ⁸ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	109,6	108,4	109,7	122,2	111,9	99,6	106,9	107,6
1	101,3	98,8	97,5	112,9	102,0	88,6	98,8	98,1	99,67
2	92,9	89,2	85,3	103,6	92,1	77,5	90,6	88,5	87,24
3	84,6	79,6	73,2	94,3	82,1	66,5	82,5	79,0	74,81
6	59,5	50,7	36,7	66,3	52,3	33,4	58,1	50,3	37,53
7	51,2	41,1	24,6	57,0	42,4	22,3	49,9	40,8	25,10
8	42,8	31,5	12,4	47,7	32,5	11,3	41,8	31,2	12,68
9	34,5	21,8	0,2	38,4	22,5	0,2	33,6	21,7	0,25
10	26,1	12,2		29,1	12,6		25,5	12,1	
11	17,8	2,6		19,8	2,7		17,3	2,6	
12	9,4			10,5			9,2		
13	1,1			1,2			1,1		
Θ _G -kerroin	1,02			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	109,6	108,4	109,7	122,2	111,9	99,6	106,9	107,6	112,1
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02



Kuva 84. Visiox-ilmastimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011.

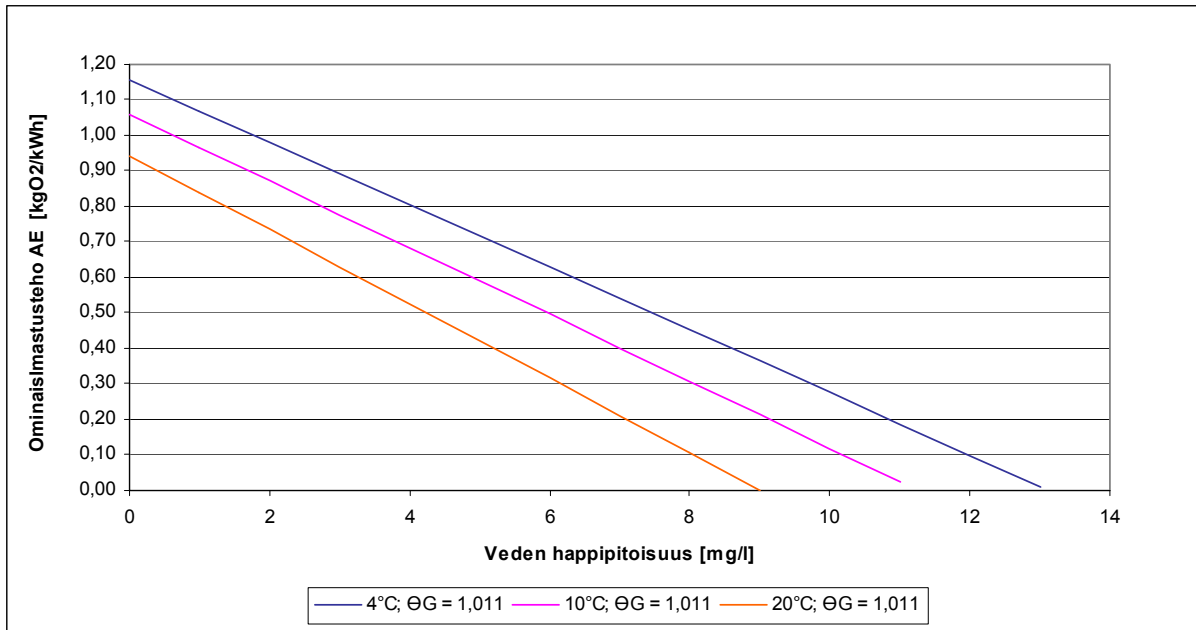
⁸ Arvo C kaavassa 16.



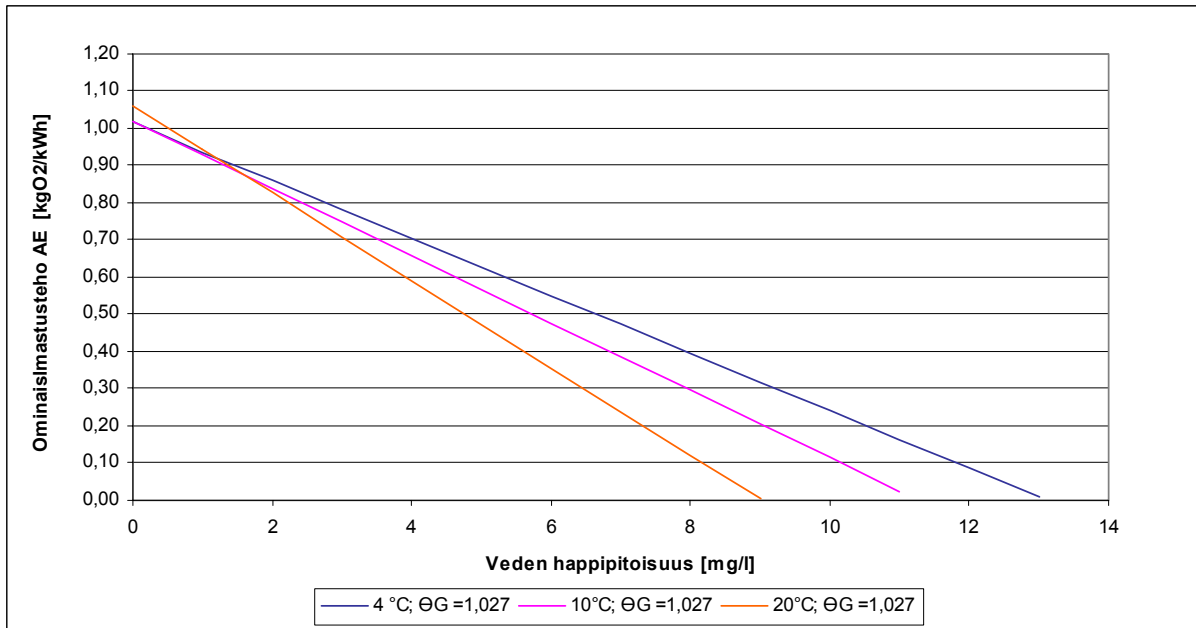
Kuva 85. Visiox-ilmastimen ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027.

Taulukko 29. Laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 20, 86 ja 87.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	1,038	1,027	1,038	1,157	1,060	0,944	1,019	1,019	1,061
0	1,038	1,027	1,038	1,157	1,060	0,944	1,019	1,019	1,061
1	0,959	0,936	0,923	1,069	0,966	0,839	0,935	0,929	0,944
2	0,880	0,845	0,808	0,981	0,872	0,734	0,858	0,838	0,826
3	0,801	0,753	0,693	0,893	0,778	0,630	0,781	0,748	0,708
6	0,564	0,480	0,348	0,628	0,496	0,316	0,550	0,477	0,355
7	0,485	0,389	0,233	0,540	0,402	0,211	0,473	0,386	0,238
8	0,406	0,298	0,117	0,452	0,308	0,107	0,396	0,296	0,120
9	0,326	0,207	0,002	0,364	0,214	0,002	0,318	0,205	0,002
10	0,247	0,116	1,038	0,276	0,119		0,241	0,115	
11	0,168	0,025	0,923	0,188	0,025		0,164	0,024	
12	0,089			0,100			0,087		
13	0,010			0,011			0,010		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	1,04	1,03	1,04	1,16	1,06	0,94	1,02	1,02	1,06
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20



Kuva 86. Visiox-ilmastimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011.



Kuva 87. Visiox-ilmastimen ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027.

Liite 6: Lietepumpun eri yhdistelmien ilmastustehojen ja ominaisilmastustehojen laskenta

Taulukoissa 30–32 esitetyt happipitoisuudet C mittausjakson alussa ja lopussa ovat kahdeksan happimittarin keskiarvo kahdesta mittauksesta laskettuna kaikille eri liete-pumpun yhdistelmille. Kyllästyshappipitoisuus C^* perustuu lähteeseen FAO (1984). Hapensiirtokertoimen K_{La} laskenta on suoritettu 360 s:n välein. Mittausjakson kokonaiskestona on käytetty aikaa, jonka laite oli käynnissä. Loppuarvona on käytetty arvoa, joka on saatu kun laite on ollut pysäytettynä 5 minuuttia.

Taulukko 30. Lietepumppu + hajotinlevy -yhdistelmän hapensiirtokertoimien K_{La} laskentatulokset, $T = 6,1$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästys-pitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	K_{La} [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–360	12,5	360	0,97–2,39	0,00037	18,93	0,18
360–720	12,5	360	2,39–3,75	0,00040	20,74	0,20
720–1080	12,5	360	3,75–5,01	0,00043	22,38	0,22
1080–1440	12,5	360	5,01–5,86	0,00034	17,53	0,17
1440–1800	12,5	360	5,86–6,70	0,00038	19,50	0,19
0–1800	12,5	1800	0,97–6,63	0,00038	19,47	0,19
Keskiarvo				0,00038	19,82	0,19

Taulukko 31. Lietepumppu + letku -yhdistelmän hapensiirtokertoimien K_{La} laskentatulokset, $T = 7,1$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästys-pitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	K_{La} [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–360	12,1	360	0,54–2,30	0,00046	23,08	0,23
360–720	12,1	360	2,30–3,86	0,00048	24,08	0,24
720–1080	12,1	360	3,86–5,16	0,00047	23,90	0,24
1080–1440	12,1	360	5,16–6,27	0,00048	24,14	0,24
1440–1800	12,1	360	6,27–7,13	0,00044	22,33	0,22
0–1800	12,1	1800	0,54–7,10	0,00046	23,34	0,23
Keskiarvo				0,00047	23,48	0,23

Taulukko 32. Lietepumppu + ejektori -yhdistelmän hapensiirtokertoimien K_{La} laskentatulokset, $T = 7,9$ °C.

Mittausjakso [s]	Kyllästyspitoisuus C^* [mg/l]	Mittausaika t [s]	Happipitoisuus C [mg/l]	K_{La} [1/s]	OTRO _c	AEO _c
0–360	11,9	360	0,74–1,96	0,00032	15,85	0,17
360–720	11,9	360	1,96–3,21	0,00037	18,36	0,20
720–1080	11,9	360	3,21–4,37	0,00040	19,72	0,22
1080–1440	11,9	360	4,37–5,35	0,00039	19,19	0,21
1440–1800	11,9	360	5,35–6,27	0,00042	20,64	0,23
0–1800	11,9	1800	0,74–6,35	0,00039	19,16	0,21
Keskiarvo				0,00038	18,75	0,21

Veden lämpötilan ja lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (lämpötilakorjauskerroin) on määritetty taulukoissa 33–35 perustuen kaavaan (12), lähtöarvoina $T_m = 6,1$ °C ja $K_{La} = 0,00038$ 1/s (lietepumppu + hajotinlevy), $T_m = 7,1$ °C ja $K_{La} = 0,00047$ (lietepumppu + letku) ja $T_m = 7,9$ °C ja $K_{La} = 0,00038$ 1/s (lietepumppu + ejektori). Lisäksi on esitetty happikorjauskerroin, yhteiskorjauskerroin sekä korjatut K_{La} -kertoimet ja ilmastustehot.

Happikorjauskerroin on vertailulämpötilassa (+4, +10 ja +20 °C) kyllästyshappipitoisuuden C^* kyll. suhde mittauslämpötilan (+16,1 °C) kyllästyspitoisuuteen C^* mitt. Kyllästyshappipitoisuudet lasketaan kaavan (14) mukaisesti vertailulämpötilan (T_v) funktiona. Yhteiskorjauskerroin on lämpötilakorjauskertoimen ja happikorjauskertoimen tulo.

$$C^* = 0,0052T_v^2 - 0,383T_v + 14,604 \quad \text{kaava (15)}$$

Taulukko 33. Lietepumppu + hajotinlevy; veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötilakorjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjauskerroin C^* kyll./ C^* mitt.	Yhteiskorjauskerroin	- K_{La}	OTRO _c	AEO _c
Muutettuna +4 °C	0,951	1,056	1,005	0,000385	19,907	0,194
Muutettuna +10 °C	1,097	0,906	0,994	0,000381	19,692	0,191
Muutettuna +20 °C	1,390	0,723	1,005	0,000386	19,917	0,194
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,977	1,056	1,032	0,000396	20,449	0,199
Muutettuna +10 °C	1,044	0,906	0,945	0,000363	18,735	0,182
Muutettuna +20 °C	1,164	0,723	0,842	0,000323	16,676	0,162
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,946	1,056	0,998	0,000383	19,786	0,192
Muutettuna +10 °C	1,109	0,906	1,005	0,000386	19,918	0,194
Muutettuna +20 °C	1,448	0,723	1,047	0,000402	20,744	0,202

Taulukko 34. Lietepumppu + letku; veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötila- korjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjaus- kerroin C* kyl./C* mitt.	Yhteiskor- jauskerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,929	1,083	1,007	0,000469	23,633	0,236
Muutettuna +10 °C	1,071	0,929	0,996	0,000464	23,377	0,234
Muutettuna +20 °C	1,358	0,742	1,007	0,000470	23,644	0,236
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,967	1,083	1,047	0,000488	24,587	0,246
Muutettuna +10 °C	1,032	0,929	0,959	0,000447	22,527	0,225
Muutettuna +20 °C	1,152	0,742	0,854	0,000398	20,051	0,201
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,921	1,083	0,997	0,000465	23,419	0,234
Muutettuna +10 °C	1,080	0,929	1,004	0,000468	23,576	0,236
Muutettuna +20 °C	1,410	0,742	1,046	0,000488	24,553	0,246

Taulukko 35. Lietepumppu + ejektor; veden lämpötilan vaikutus hapensiirtokertoimiin sekä ilmastus- ja ominaisilmastusarvoihin.

Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,024$	Lämpötila- korjauskerroin $\Theta_G^{T_v-T_m}$	Happikorjaus- kerroin C* kyl./C* mitt.	Yhteiskor- jaus- kerroin	-Kla	OTR _{0c}	AE _{0c}
Muutettuna +4 °C	0,912	1,106	1,008	0,000383	18,904	0,207
Muutettuna +10 °C	1,051	0,949	0,997	0,000379	18,699	0,205
Muutettuna +20 °C	1,332	0,757	1,008	0,000383	18,913	0,208
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,011$						
Muutettuna +4 °C	0,958	1,106	1,059	0,000403	19,870	0,218
Muutettuna +10 °C	1,023	0,949	0,971	0,000369	18,204	0,200
Muutettuna +20 °C	1,142	0,757	0,864	0,000328	16,204	0,178
Lämpötilakerroin $\Theta_G = 1,027$						
Muutettuna +4 °C	0,901	1,106	0,997	0,000379	18,690	0,205
Muutettuna +10 °C	1,058	0,949	1,003	0,000381	18,815	0,206
Muutettuna +20 °C	1,380	0,757	1,045	0,000397	19,595	0,215

Määritettäessä ilmastus- ja ominaistehoja hapettomaan veteen käytettiin laskennassa taulukoissa 30–32 esitettyjä hapensiirtokertoimia sekä kaavoja (8) ja (9). Kertomalla havaittu ilmastusteho ja ominaisilmastusteho yhteiskorjauskertoimella saadaan teho halutussa lämpötilassa.

Taulukoissa 36–41 esitetyt ilmastustehot hapettomaan veteen $OTR0_c$ [kgO₂/d] on määritelty kaavan (8) perusteella siten, että (C^*-C) on määritelty kaavan (15) mukaisesti.

Ominaisilmastusteho hapettomaan veteen $AE0_c$ [kgO₂/kWh] on määritelty kaavan (9) mukaisesti käyttäen $OTR0_c$ -arvoa. Ilmastusteho OTR on määritelty kaavan (16) mukaisesti.

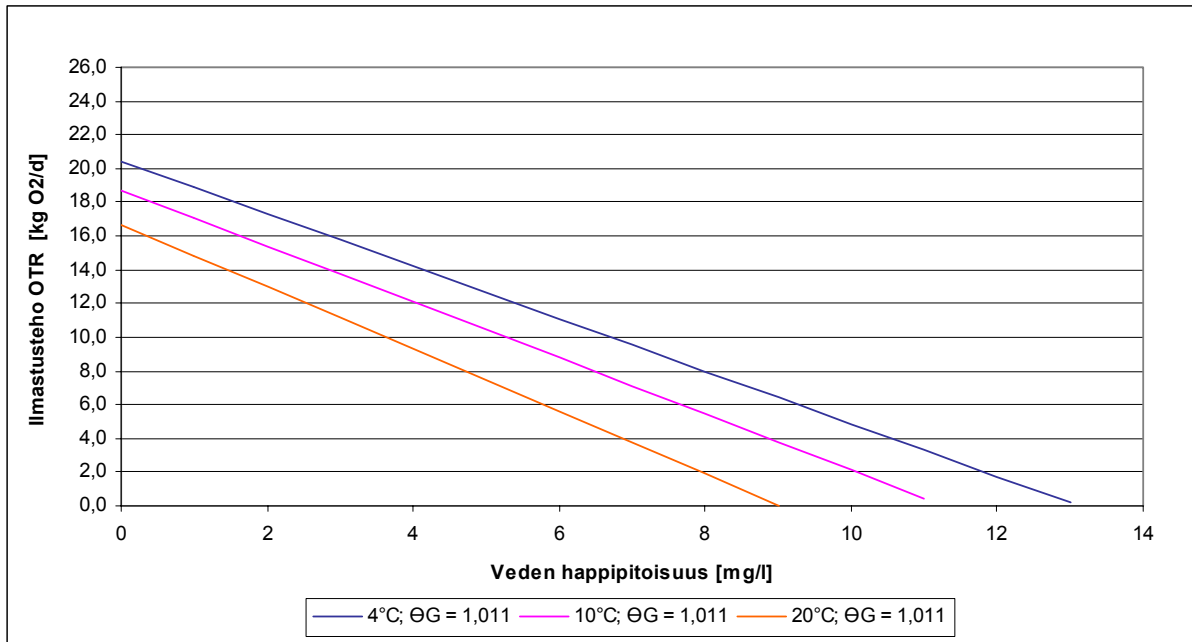
$$OTR = \frac{C^* - C}{C^*} \cdot OTR0_c \quad \text{kaava (16)}$$

Taulukoissa 36–41 on esitetty kuvien 21–26 sekä 88–99 laskentatulokset.

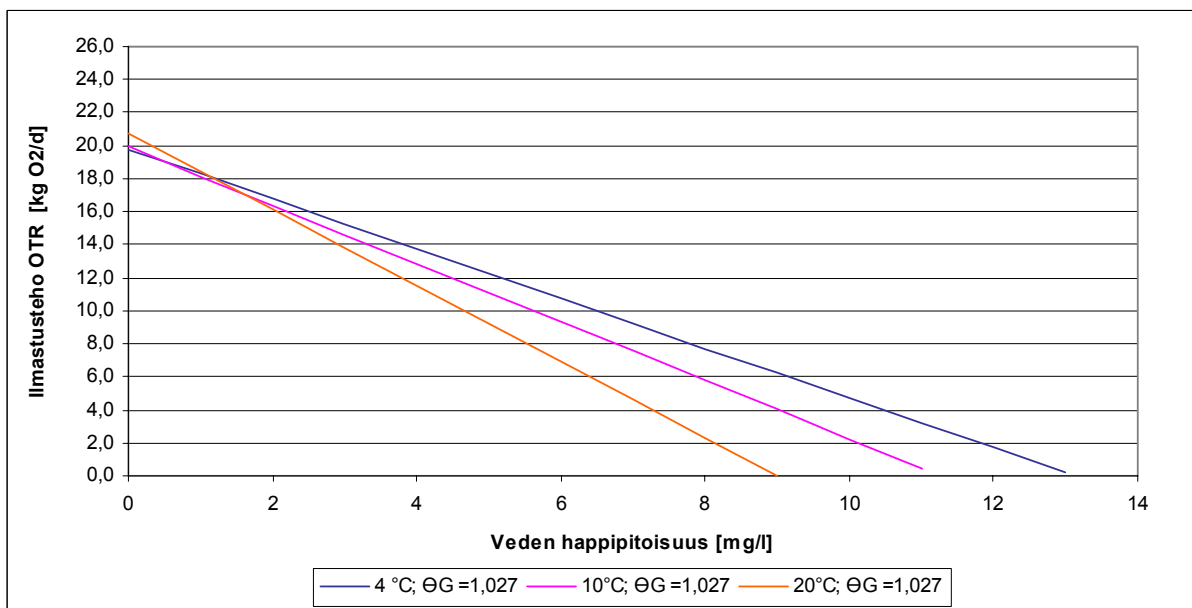
Taulukko 36. Lietepumppu + hajotinlevy, laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 21, 88 ja 89.

O ₂ -pitoisuus ⁹ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	19,907	19,692	19,917	20,449	18,735	16,676	19,786	19,918
1	18,391	17,945	17,709	18,891	17,073	14,827	18,279	18,151	18,444
2	16,875	16,197	15,501	17,334	15,410	12,979	16,772	16,383	16,144
3	15,359	14,450	13,293	15,777	13,748	11,130	15,265	14,616	13,844
6	10,810	9,208	6,668	11,104	8,761	5,583	10,744	9,314	6,945
7	9,294	7,461	4,460	9,547	7,098	3,735	9,237	7,547	4,645
8	7,778	5,714	2,252	7,990	5,436	1,886	7,730	5,779	2,346
9	6,262	3,966	0,044	6,432	3,774	0,037	6,223	4,012	0,046
10	4,746	2,219		4,875	2,111		4,717	2,245	
11	3,229	0,472		3,317	0,449		3,210	0,477	
12	1,713			1,760			1,703		
13	0,197			0,202			0,196		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR0 _c [kgO ₂ /d]	19,9	19,7	19,9	20,4	18,7	16,7	19,8	19,9	20,7
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02

⁹ Arvo C kaavassa 16.



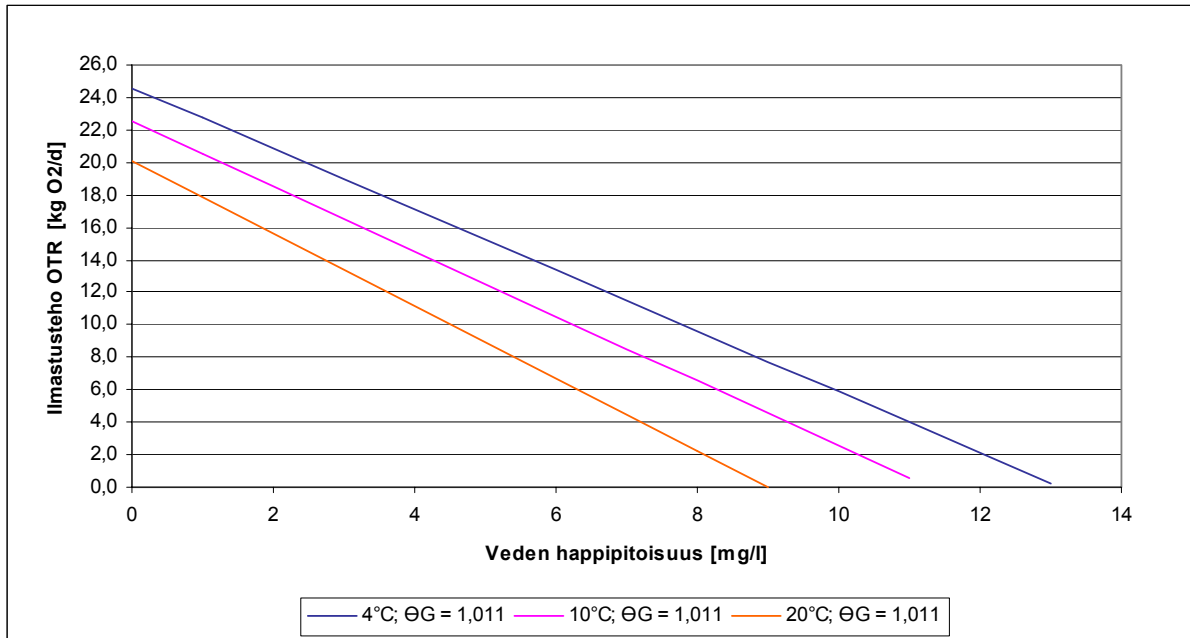
Kuva 88. Lietepumppu + hajotinlevy; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



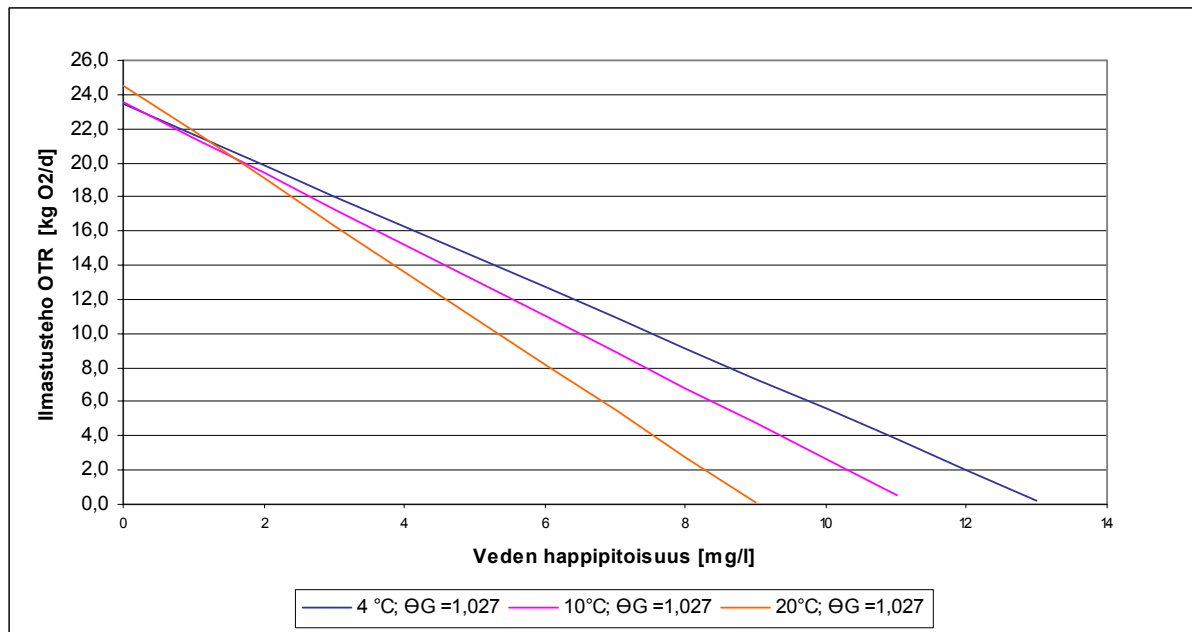
Kuva 89. Lietepumppu + hajotinlevy; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 37. Lietepumppu + letku, laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 22, 90 ja 91.

O ₂ -pitoisuus ³ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	23,633	23,377	23,644	24,587	22,527	20,051	23,419	23,576
1	21,833	21,303	21,023	22,715	20,528	17,828	21,636	21,484	21,831
2	20,033	19,228	18,401	20,842	18,529	15,605	19,852	19,392	19,109
3	18,233	17,154	15,780	18,970	16,530	13,382	18,068	17,300	16,387
6	12,833	10,931	7,916	13,352	10,534	6,713	12,717	11,024	8,221
7	11,033	8,857	5,295	11,479	8,535	4,490	10,934	8,933	5,499
8	9,233	6,783	2,674	9,607	6,536	2,267	9,150	6,841	2,777
9	7,434	4,709	0,052	7,734	4,537	0,044	7,366	4,749	0,054
10	5,634	2,634		5,861	2,538		5,583	2,657	
11	3,834	0,560		3,989	0,540		3,799	0,565	
12	2,034			2,116			2,016		
13	0,234			0,243			0,232		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	23,6	23,4	23,6	24,6	22,6	20,1	23,4	23,6	24,6
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02



Kuva 90. Lietepumppu + letku; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.

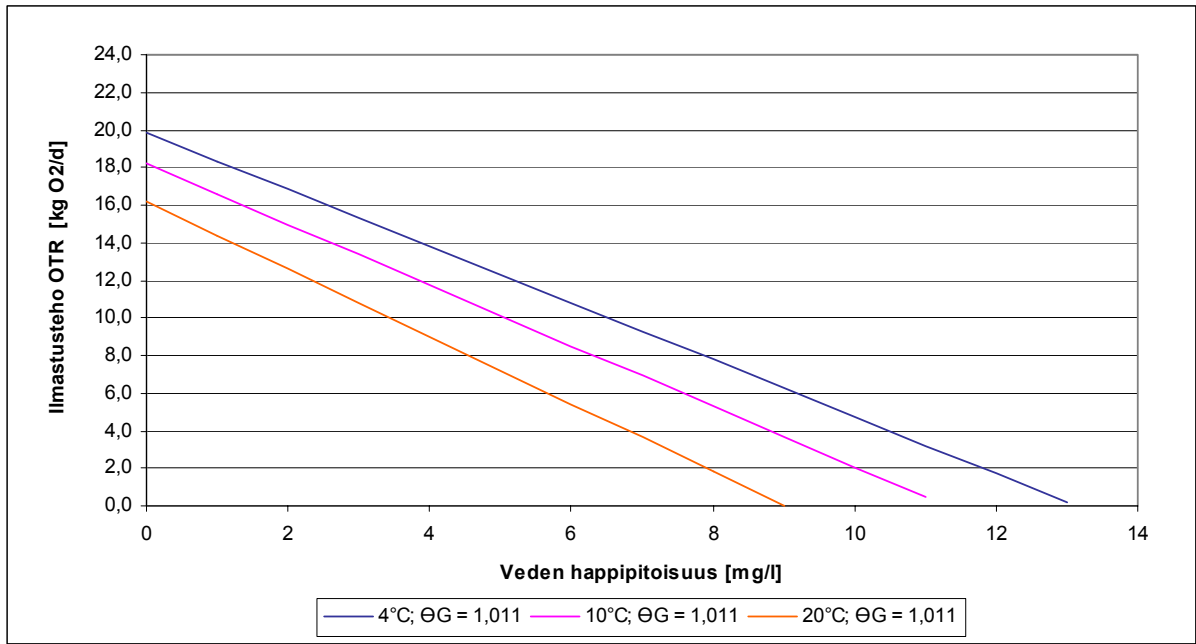


Kuva 91. Lietepumppu + letku; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

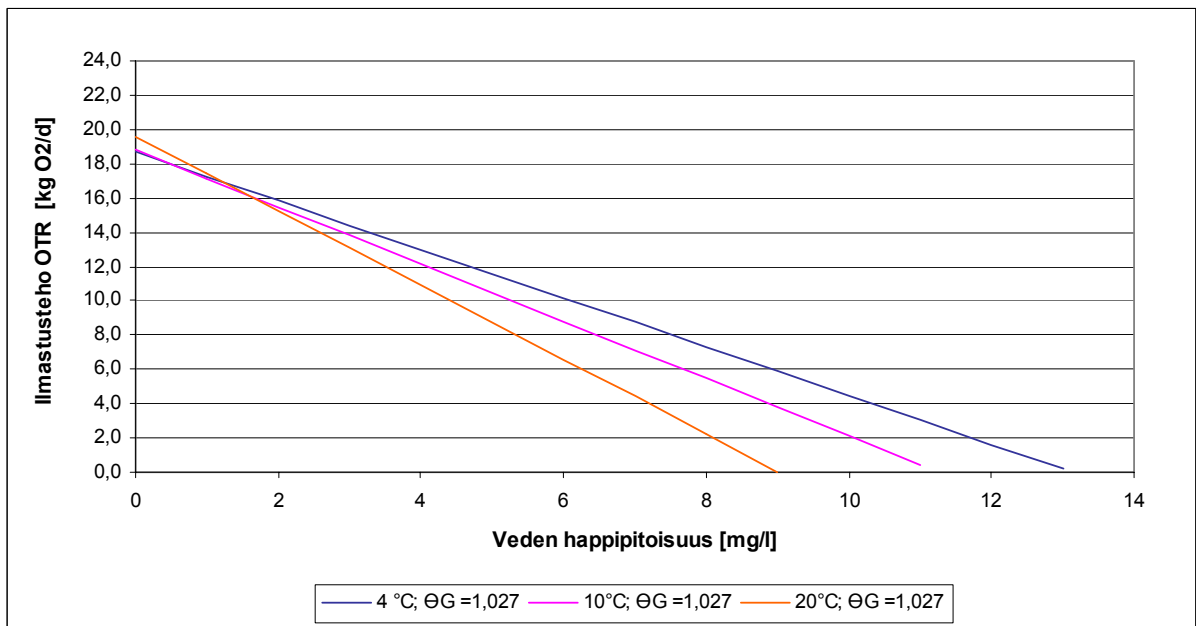
Taulukko 38. Lietepumppu + ejektori, laskentatulokset ilmastusteholle OTR kuvissa 23, 91 ja 92.

O ₂ -pitoisuus ¹⁰ [mg/l]	OTR [kgO ₂ /d]								
	0	18,904	18,699	18,913	19,870	18,204	16,204	18,690	18,815
1	17,464	17,040	16,816	18,356	16,589	14,408	17,266	17,145	17,422
2	16,024	15,381	14,719	16,843	14,974	12,611	15,843	15,476	15,250
3	14,585	13,722	12,623	15,330	13,359	10,815	14,419	13,806	13,077
6	10,265	8,744	6,332	10,790	8,513	5,425	10,149	8,798	6,560
7	8,826	7,085	4,236	9,277	6,897	3,629	8,726	7,129	4,388
8	7,386	5,426	2,139	7,763	5,282	1,832	7,302	5,459	2,216
9	5,946	3,766	0,042	6,250	3,667	0,036	5,879	3,790	0,043
10	4,506	2,107		4,737	2,051		4,455	2,120	
11	3,067	0,448		3,223	0,436		3,032	0,451	
12	1,627			1,710			1,608		
13	0,187			0,197			0,185		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
OTR _{0c} [kgO ₂ /d]	18,9	18,7	18,9	19,9	18,2	16,2	18,7	18,8	19,6
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
C* [mg/l]	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02	13,13	11,27	9,02

¹⁰ Arvo C kaavassa 16.



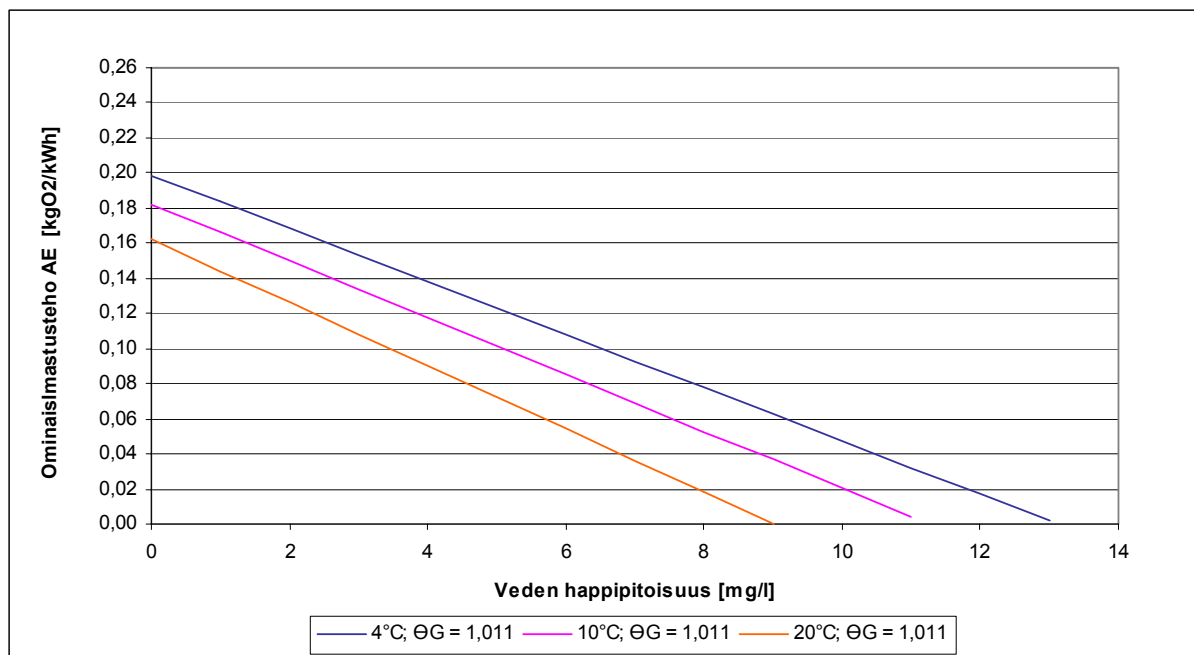
Kuva 92. Lietepumppu + ejektori; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



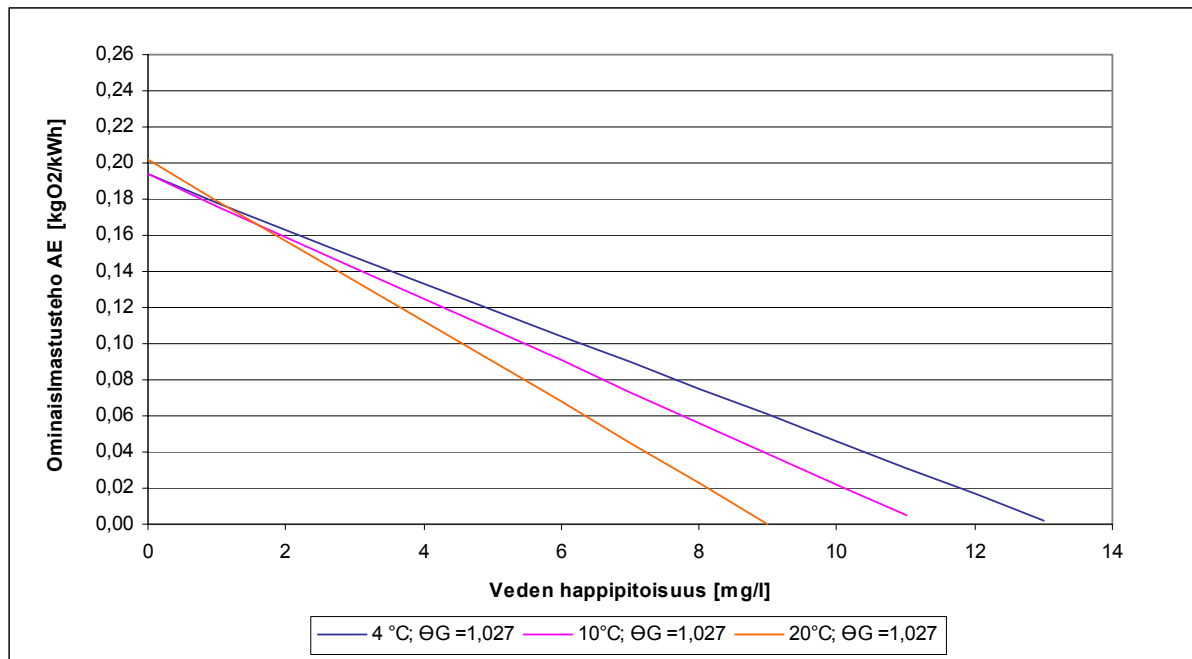
Kuva 93. Lietepumppu + ejektori; ilmastusteho OTR happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 39. Lietepumppu + hajotinlevy, laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 24, 94 ja 95.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	0	0,194	0,191	0,194	0,199	0,182	0,162	0,194	0,194
1	0,179	0,174	0,172	0,184	0,166	0,144	0,178	0,176	0,179
2	0,164	0,157	0,151	0,169	0,150	0,126	0,163	0,159	0,157
3	0,149	0,140	0,129	0,153	0,134	0,108	0,148	0,142	0,135
6	0,105	0,090	0,065	0,108	0,085	0,054	0,104	0,091	0,068
7	0,090	0,073	0,043	0,093	0,069	0,036	0,090	0,073	0,045
8	0,076	0,056	0,022	0,078	0,053	0,018	0,075	0,056	0,023
9	0,061	0,039	0,000	0,063	0,037	0,000	0,061	0,039	0,000
10	0,046	0,022		0,047	0,021		0,046	0,022	
11	0,031	0,005		0,032	0,004		0,031	0,005	
12	0,017			0,017			0,017		
13	0,002			0,002			0,002		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
AE0 _c [kgO ₂ /kWh]	0,194	0,191	0,194	0,199	0,182	0,162	0,194	0,194	0,202



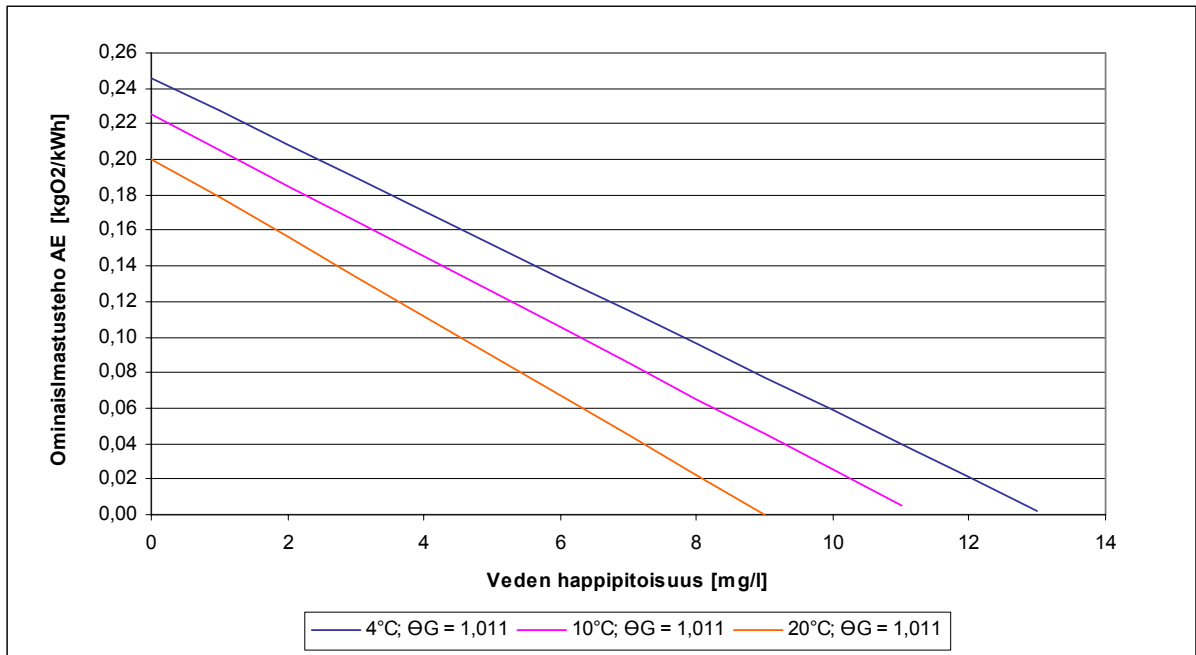
Kuva 94. Lietepumppu + hajotinlevy; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



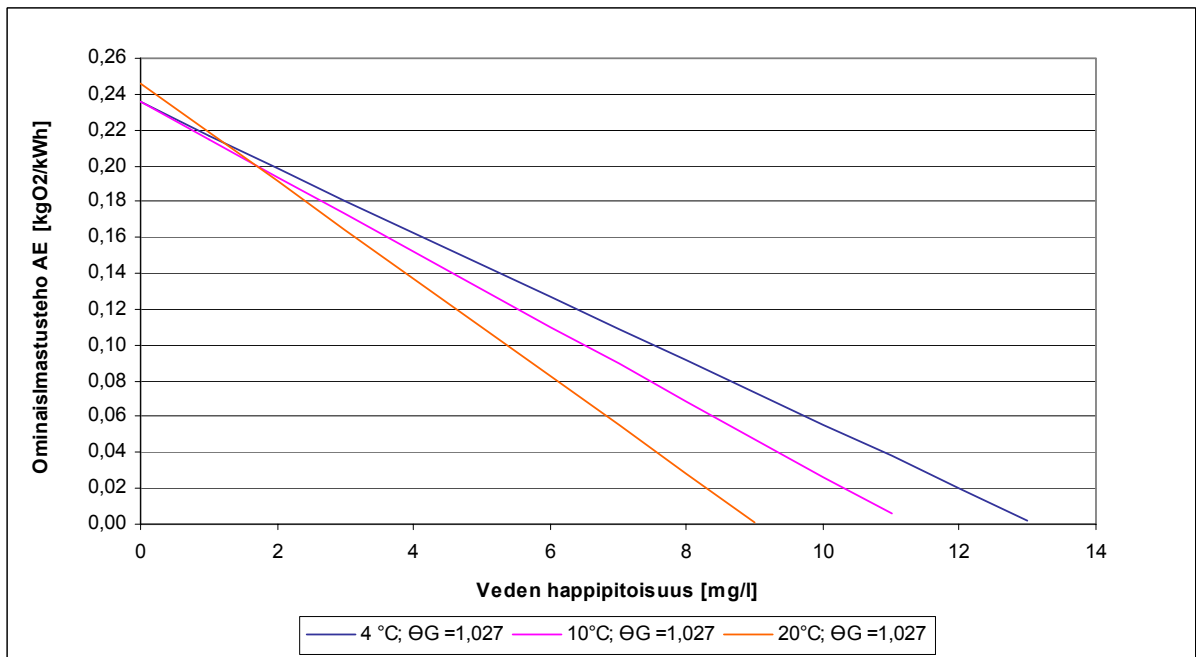
Kuva 95. Lietepumppu + hajotinlevy; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 40. Lietepumppu + letku, laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 25, 96 ja 97.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	4	10	20	4	10	20	4	10	20
0	0,236	0,234	0,236	0,246	0,225	0,201	0,236	0,236	0,246
1	0,218	0,213	0,210	0,227	0,205	0,178	0,216	0,215	0,218
2	0,200	0,192	0,184	0,208	0,185	0,156	0,199	0,194	0,191
3	0,182	0,172	0,158	0,190	0,165	0,134	0,181	0,173	0,164
6	0,128	0,109	0,079	0,134	0,105	0,067	0,127	0,110	0,082
7	0,110	0,089	0,053	0,115	0,085	0,045	0,109	0,089	0,055
8	0,092	0,068	0,027	0,096	0,065	0,023	0,092	0,068	0,028
9	0,074	0,047	0,001	0,077	0,045	0,000	0,074	0,047	0,001
10	0,056	0,026		0,059	0,025		0,056	0,027	
11	0,038	0,006		0,040	0,005		0,038	0,006	
12	0,020			0,021			0,020		
13	0,002			0,002			0,002		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
AE _{0c} [kgO ₂ /kWh]	0,236	0,234	0,236	0,246	0,225	0,201	0,236	0,236	0,246



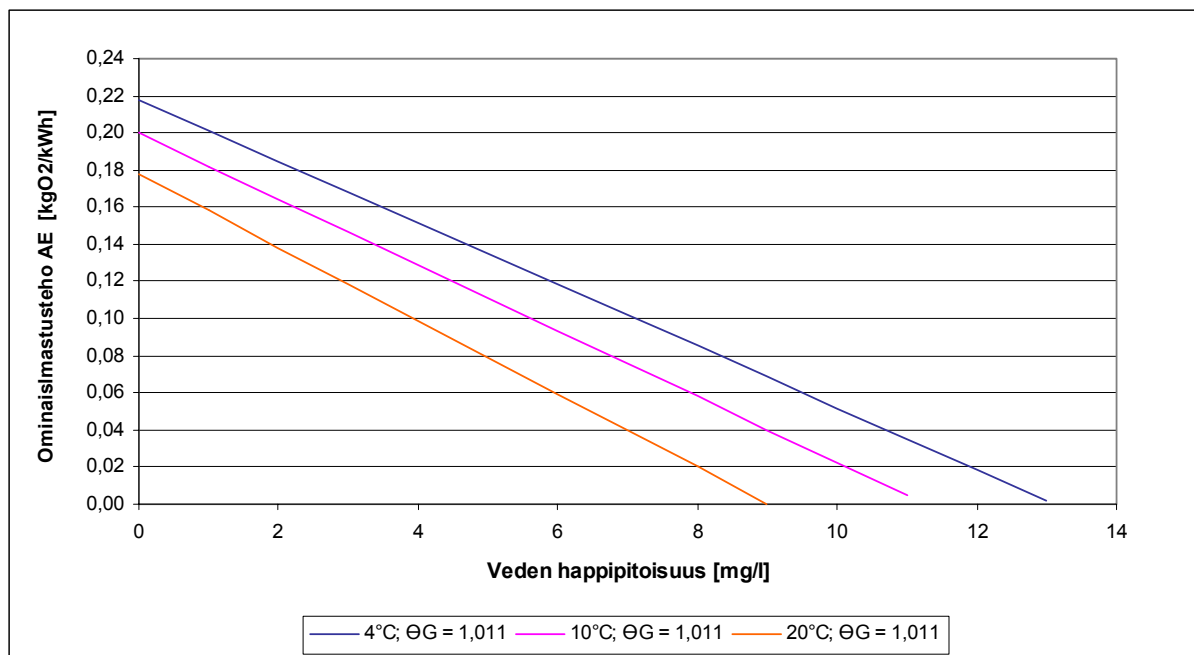
Kuva 96. Lietepumppu + letku; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



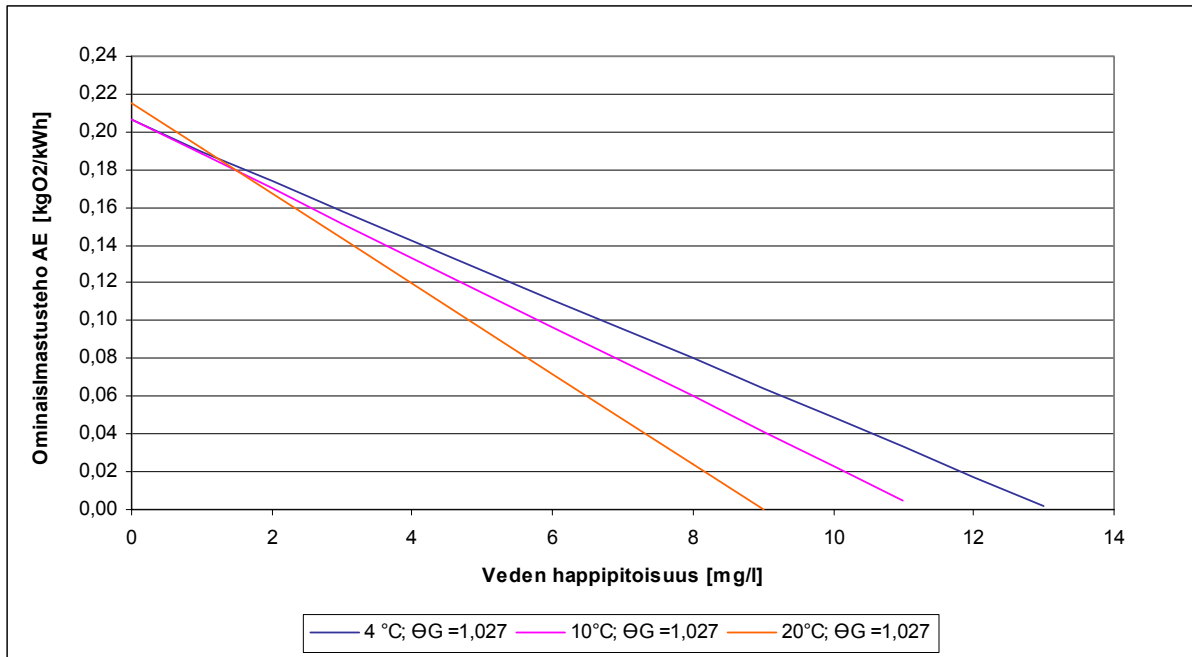
Kuva 97. Lietepumppu + letku; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Taulukko 41. Lietepumppu + ejektor, laskentatulokset ominaisilmastusteholle AE kuvissa 26, 98 ja 99.

C [mg/l]	AE [kgO ₂ /kWh]								
	0	0,207	0,205	0,208	0,218	0,200	0,178	0,206	0,206
1	0,192	0,187	0,185	0,201	0,182	0,158	0,189	0,188	0,191
2	0,176	0,169	0,162	0,185	0,164	0,138	0,174	0,170	0,167
3	0,160	0,151	0,138	0,168	0,147	0,119	0,158	0,151	0,143
6	0,113	0,096	0,069	0,118	0,093	0,060	0,111	0,097	0,072
7	0,097	0,078	0,046	0,102	0,076	0,040	0,096	0,078	0,048
8	0,081	0,060	0,023	0,085	0,058	0,020	0,080	0,060	0,024
9	0,065	0,041	0,000	0,069	0,040	0,000	0,065	0,042	0,000
10	0,049	0,023		0,052	0,023		0,049	0,023	
11	0,034	0,005		0,035	0,005		0,033	0,005	
12	0,018			0,019			0,018		
13	0,002			0,002			0,002		
Θ _G -kerroin	1,024			1,011			1,027		
T [°C]	4	10	20	4	10	20	4	10	20
AE _{0,c} [kgO ₂ /kWh]	0,207	0,205	0,208	0,218	0,200	0,178	0,206	0,206	0,215



Kuva 98. Lietepumppu + ejektor; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,011, kahden mittauksen keskiarvo.



Kuva 99. Lietepumppu + ejektori; ominaisilmastusteho AE happipitoisuuden funktiona eri lämpötiloissa lämpötilakertoimella 1,027, kahden mittauksen keskiarvo.

Liite 7: Kenttäkokeiden havaintopöytäkirja

LAITE (nimi, nimellisteho): _____

ASENNUS (pvm): _____

KOHDE (järven nimi, sijainti, nro): _____

SEURANTA ALOITETTU (pvm): _____

KOEALUEEN MERKINTÄ MAASTOON (miten merkitty, ovatko merkit pysyneet paikoillaan?):

HAVAINNOITAVAT ASIAT

❖ PVM: ____ . ____ 2005

❖ ILMAN LÄMPÖTILA: _____ °C

❖ LUMIOLOSUHTEET JÄÄLLÄ:

➤ lumen paksuus jään päällä (cm) _____

➤ vettä jäällä _____

❖ AVANNON KEHITTYMINEN:

➤ avannon läpimitta (m) _____

➤ ei avantoa

Muistiinpanot:

❖ LÄMPÖTILA JA HAPPIPITOISUUS ERI ETÄISYYDELLÄ LAITTEESTA

Näytepisteen koodi	Etäisyys lait- teesta [m]	Näytteenotto- syvyys [m]	Veden lämpö- tila [°C]	Happipitoisuus [mg/l]

❖ käytetty happimittari: _____

Muistiinpanot:

JÄÄN PAKSUUS ERI ETÄISYYDELLÄ LAITTEESTA

Pisteen koodi	Etäisyys laitteesta [m]	Jään paksuus [cm]

Muistiinpanot:

LAITTEEN TOIMINTAAN LIITTYVÄT HAVAINNOT

- toimintavarmuus; onko toiminnassa ilmennyt ongelmia:

- laitteen kunto; esim. jäätyminen, rikkoutuminen, kelluminen:

❖ **MUUT HUOMIOITAVAT ASIAT**

VALOKUVAT

KARTTA

- **karttaan merkitään sekä laitteen että havaintopisteiden sijainnit, lisäksi mahdollinen avanto.**

Liite 8: Havainnot Pitkäjärven kokeista

Jään paksuudet ja avantojen halkaisijat Nummi-Pusulan Pitkäjärvellä Waterix Minin seurantajakson aikana.

Pvm	Etäisyys laitteesta [m]		Jään paksuus [cm]		Avannon halkaisija [m]		Ilman lämpötila [°C]	Huom.
	Laite 1	Laite 2	Laite 1	Laite 2	Laite 1	Laite 2		
22.2.2005	9 30	6 30	0 31	0 31	23	14	-12	
1.3.2005	9 20 30	7 20 30	0 33 34	0 35 35	22	16	-16...-11	
8.3.2005	10 20 30	8 20 30	20 40 36	40 38 39	22	20	-3	Jään paksuus 1,5 m avannon reunasta
15.3.2005	8 20 30	8 20 30	8 41 40	20 40 40	19	20	-13...-6	Jään paksuus 1,5 m avannon reunasta
24.3.2005	8 20 30	8 20 30	15 45 43	10 42 42	18	20	+1...+3	Jään paksuus 1,5 m avannon reunasta
30.3.2005	9 20 30	8 20 30	5 45 43	10 44 45	20,5	25	-6...+3	Jään paksuus 1,5 m avannon reunasta

**Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Pitkäjärven kokeista. Laite 1,
vesisyvyys 6,9 m.**

Veden happipitoisuudet ja lämpötilat Nummi-Pusulän Pitkäjärvellä Waterix Minin seurantajakson aikana, laite 1.

Pvm.	Etäisyys laitteesta [m]	Mittaus- syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Huom.
22.2.2005	Avanto	1	11,8	0,9	Etäisyys laitteesta 8–10 m.
		4	-	-	
		6	3,6	3,9	
	20	1	-	-	
		4	-	-	
		6	-	-	
	30	1	13,2	0,5	
		4	-	-	
		6	3,9	3,7	
1.3.2005	Avanto	1	10,8	0,8	Etäisyys laitteesta 8–10 m. Laite vinossa, pumpussa kiinni Ø n. 1 m jääkansi, paksuus n. 15 cm.
		4	8,2	1,9	
		6	5,6	2,9	
	20	1	11,6	0,8	
		4	8,2	1,9	
		6	4,7	2,9	
	30	1	11,9	0,7	
		4	8,1	1,8	
		6	4,7	3,3	
8.3.2005	Avanto	1	11,1	0,9	Etäisyys laitteesta 8–10 m.
		4	8,3	1,8	
		6	4,1	3,4	
	20	1	11,8	0,7	
		4	8,2	1,9	
		6	3,9	3,6	
	30	1	12,3	0,5	
		4	8,0	1,9	
		6	4,0	3,5	
15.3.2005	Avanto	1	10,5	1,2	Etäisyys laitteesta 8–10 m.
		4	7,5	2,0	
		6	3,1	3,6	
	20	1	11,0	0,8	
		4	9,4	1,5	
		6	2,7	3,6	
	30	1	11,2	0,8	
		4	8,4	1,7	
		6	3,0	3,6	
24.3.2005	Avanto	1	10,1	1,2	Etäisyys laitteesta 8–10 m.
		4	6,8	2,1	
		6	4,1	3,4	
	20	1	10,7	0,9	
		4	6,2	2,3	
		6	3,1	3,7	
	30	1	11,8	0,7	
		4	6,4	2,2	
		6	3,2	3,6	

**Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Pitkäjärven kokeista. Laite 1,
vesisyvyys 6,9 m.**

Pvm.	Etäisyys laitteesta [m]	Mittaus- syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Huom.
30.3.2005	Avanto	1	10,6	1,1	Etäisyys laitteesta 8–10 m.
		4	7,2	1,9	
		6	4,4	3,1	
	20	1	12,1	0,9	
		4	6,2	2,3	
		6	3,1	3,6	
	30	1	12,1	0,9	
		4	6,3	2,1	
		6	3,6	3,6	

Happi- ja lämpötilahavainnot ennen laitteen käynnistämistä, laite 1 (Pajuniemi, 2005).

Pvm.	Syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]
16.2.2005	1	13,4	0,2
	5	8,2	1,7
	7	3,9	3,4

Aikaisemmat happihavainnot Pitkäjärveltä, havaintosyvyys 6 m (Pajuniemi, 2005).

Pvm.	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
31.8.2004	4,0
1.9.2004	7,9
5.9.2004	5,5
4.10.2004	8,5
5.11.2004	10,9

**Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Pitkjärven kokeista. Laite 2,
vesisyvyys 7,5 m.**

Veden happipitoisuudet ja lämpötilat Nummi-Pusulan Pitkjärvellä Waterix Minin seurantajakson aikana, laite 2.

Pvm.	Etäisyys laitteesta [m]	Mittaus- syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Huom.
22.2.2005	Avanto	1	10,4	1,3	Etäisyys laitteesta 6–8 m.
		4	9,6	1,4	
		6,5	3,6	3,8	
	20	1	-	-	
		4	-	-	
		6,5	-	-	
	30	1	13,1	0,4	
		4	8,8	1,6	
		6,5	0,7	4,4	
1.3.2005	Avanto	1	11,2	0,9	Etäisyys laitteesta 6–8 m. Pumpussa kiinni Ø n. 1 m. jääkansi, paksuus n. 15 cm.
		4	9,4	1,6	
		6,5	3,7	3,7	
	20	1	11,2	0,8	
		4	9,7	1,5	
		6,5	3,9	3,7	
	30	1	11,1	0,8	
		4	9	1,7	
		6,5	4,1	3,7	
8.3.2005	Avanto	1	10,9	1,1	Etäisyys laitteesta 6–8 m.
		4	7,9	1,9	
		6,5	3,6	3,7	
	20	1	11,6	0,7	
		4	9,6	1,5	
		6,5	2,2	4	
	30	1	11,5	0,7	
		4	9,3	1,6	
		6,5	2,7	4	
15.3.2005	Avanto	1	9,6	1,4	Etäisyys laitteesta 6–8 m. Laitteen rungossa (20 cm veden- pinnan yläpuolella) ohut jäälevy, Ø n. 80 cm. Avannosta löyhähtää selvä rikkivedyn haju.
		4	6,8	2,1	
		6,5	2,8	3,9	
	20	1	10,5	0,9	
		4	8,5	1,7	
		6,5	2,5	3,9	
	30	1	11,6	0,7	
		4	7,8	1,9	
		6,5	1,9	4	

**Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Pitkäjärven kokeista. Laite 2,
vesisyvyys 7,5 m.**

Pvm.	Etäisyys laitteesta [m]	Mittaus- syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Huom.
24.3.2005	Avanto	1	9,2	1,4	Etäisyys laitteesta 6–8 m. Avannosta löyhähtää selvä rikkivedyn haju.
		4	7,5	1,9	
		6,5	0,7	4,2	
	20	1	9,9	1,1	
		4	9	1,4	
		6,5	0,3	4,3	
	30	1	10,3	0,9	
		4	8,4	1,6	
		6,5	0,9	4,1	
30.3.2005	Avanto	1	10,2	1,1	Etäisyys laitteesta 6–8 m.
		4	9,7	1,3	
		6,5	0,4	4,3	
	20	1	10,6	1	
		4	6,3	2,1	
		6,5	0,3	4,3	
	30	1	11,1	0,9	
		4	6,3	2,1	
		6,5	0,3	4,4	

Happi- ja lämpötilahavainnot ennen laitteen käynnistämistä, laite 2 (Pajuniemi, 2005).

Pvm.	Syvyys [m]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]
16.2.2005	1	12,3	0,4
	5	7,2	2,2
	7	3,9	3,3

Aikaisemmat happihavainnot Pitkäjärveltä, havaintosyvyys 6 m (Pajuniemi, 2005).

Pvm.	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
31.8.2004	4,0
1.9.2004	7,9
5.9.2004	5,5
4.10.2004	8,5
5.11.2004	10,9

Liite 9: Havainnot jään paksuuksista Ahmonlammen kokeista

Pvm.	Etäisyys laitteesta [m]	Jään paksuus [cm]	Ilman lämpötila [°C]	Huom.
7.2.2005	2	34	Ei mitattu	
	5	30		
	10	37		
	15	35		
	30	38		
	noin 100	39		
16.2.2005	2	14	-14	Alue lähellä laitetta (≤ 2 m) oli sulana laitteen asennuksen aikana
	3	40		
	7	40		
	11	40		
23.2.2005	2	15	-11	
	3	48		
	7	42		
	13	41		
	noin 70	45		
	noin 435	46		
2.3.2005	2	27	-10	
	3	51		
	7	50		
	13	45		
	noin 70	48		
	noin 435	50		
30.3.2005	2	35	-1	
	3	55		
	7	54		
	13	-		
	noin 70	53		
	noin 435	56		

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

Piste 1. Uimaranta.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
7.2.2005	1	1,9	5,84
	2	2,7	5,76
	3	2,8	5,67
	4	2,8	5,54
	5	2,9	5,41
	6	2,9	5,26
	7	2,9	5,13
	8	3	5,06
	9	3	4,96
	10	3	4,7
	11	3	4,53
	12	3,1	4,19
	13	3,1	3,85
	14	3,2	0,19
16.2.2005	1	1,6	6,15
	2	2,8	5,88
	3	2,9	6,31
	4	2,9	6,32
	5	2,9	6,46
	6		
	7	2,9	6,45
	8		
	9	2,9	6,41
	10	2,9	6,47
	11		
	12	2,9	6,47
	13	2,9	6,42
	13,2	3	0,1
23.2.2005	0,5	0,8	5,85
	1	1,3	5,63
	2	2,8	6,8
	3	2,9	6,93
	4	2,9	6,96
	5	2,9	6,96
	6	2,9	6,89
	7	2,9	6,85
	8	2,9	6,82
	9	2,9	6,82
	10	2,9	6,83
	12	2,9	6,83
	13	2,9	6,83
	13,5	3	0,1

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

Piste 1. Uimaranta.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
2.3.2005	0,5	0,9	6,87
	1	1,7	6,61
	2	2,8	8,22
	3	2,9	8,24
	4	2,9	8,31
	5	2,9	8,21
	6	2,9	8,21
	7	2,9	8,2
	8	2,9	8,19
	9	2,9	8,2
	10	2,9	8,25
	11	2,9	8,27
	12	2,9	8,27
	13	2,9	0,9
13,2	3	0,1	
30.3.2005	1	1,6	6,36
	2	2,8	8,92
	3	2,9	9,2
	4	2,9	9,19
	5	2,9	9,23
	8	2,9	9,24
	10	2,9	9,22
	12	2,9	9,22
	13	2,9	9,21
	13,5	3	0,6
	14	3	0,4

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

Piste 2. Ilmastimen lähellä oleva piste.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
7.2.2005	1	1,6	6,07
	2	2,7	5,85
	3	2,8	5,8
	4	2,8	5,67
	5	2,9	5,57
	6	2,9	5,41
	7	2,9	5,29
	8	2,9	5,15
	9	3	4,98
	10	3	4,81
	11	3	4,5
	12	3,1	4,17
	13	3,1	3,82
	14	3,2	2,83
	15	3,3	1,24
	16	3,6	0,29
		16,1	pohja
16.2.2005	0,5	0,5	5,7
	1	1,4	5,91
	2	2,7	6,16
	3	2,9	6,59
	4	2,9	6,6
	5	2,9	6,64
	6		
	7	2,9	6,67
	8		
	9	2,9	6,67
	10	2,9	6,67
	11		
	12	2,9	6,69
	13		
	14	2,9	7,2
	15	2,9	7,04
	16	2,9	5,4
	16,1	3	0,1

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

Piste 2. Ilmastimen lähellä oleva piste.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
23.2.2005	0,5	0,3	5,63
	1	1,8	5,51
	2	2,8	6,81
	3	2,9	6,96
	4	2,9	6,97
	5	2,9	6,97
	7	2,9	6,93
	8	2,9	6,94
	10	2,9	6,95
	12	2,9	6,95
	13	2,9	6,95
	14	2,9	7
	15	2,9	7,32
	15,5	2,9	7,43
	16	2,9	5,91
16,2	2,9	0,99	
2.3.2005	0,5	0,5	5,87
	1	1,6	5,86
	2	2,7	7,65
	3	2,9	7,99
	4	2,9	7,98
	5	2,9	7,96
	6	2,9	7,98
	8	2,9	7,96
	10	2,9	7,96
	12	2,9	7,96
	14	2,9	7,95
	15	2,9	8,06
	16	2,9	6,42
	16,5	2,9	0,1
30.3.2005	0,5	0,4	6,42
	1	1,6	6,3
	2	2,8	9,68
	3	2,9	9,89
	4	2,9	9,85
	5	2,9	9,85
	7	2,9	9,84
	10	2,9	9,78
	12	2,9	9,73
	13	2,9	9,73
	15	2,9	9,97
	16	2,9	0,6

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

Piste 3. Kapeikko.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
7.2.2005	1	1,6	6,16
	2	2,6	5,86
	3	2,8	5,78
	4	2,9	5,64
	5	2,9	5,57
	6	2,9	5,42
	7	2,9	5,13
	8	3	5,05
	9	3	4,94
	10	3,2	0,24
30.3.2005	0,5	0,3	5,86
	1	1,3	6,38
	2	2,8	9,18
	3	2,9	9,47
	4	2,9	9,49
	5	2,9	9,48
	6	2,9	9,33
	7	2,9	9,31
	8	2,9	9,39
	8,5	2,9	9,4
	9	2,9	9,16
10	3	0,6	

Happi- ja lämpötilahavainnot eri mittauspisteissä Ahmonlammella.

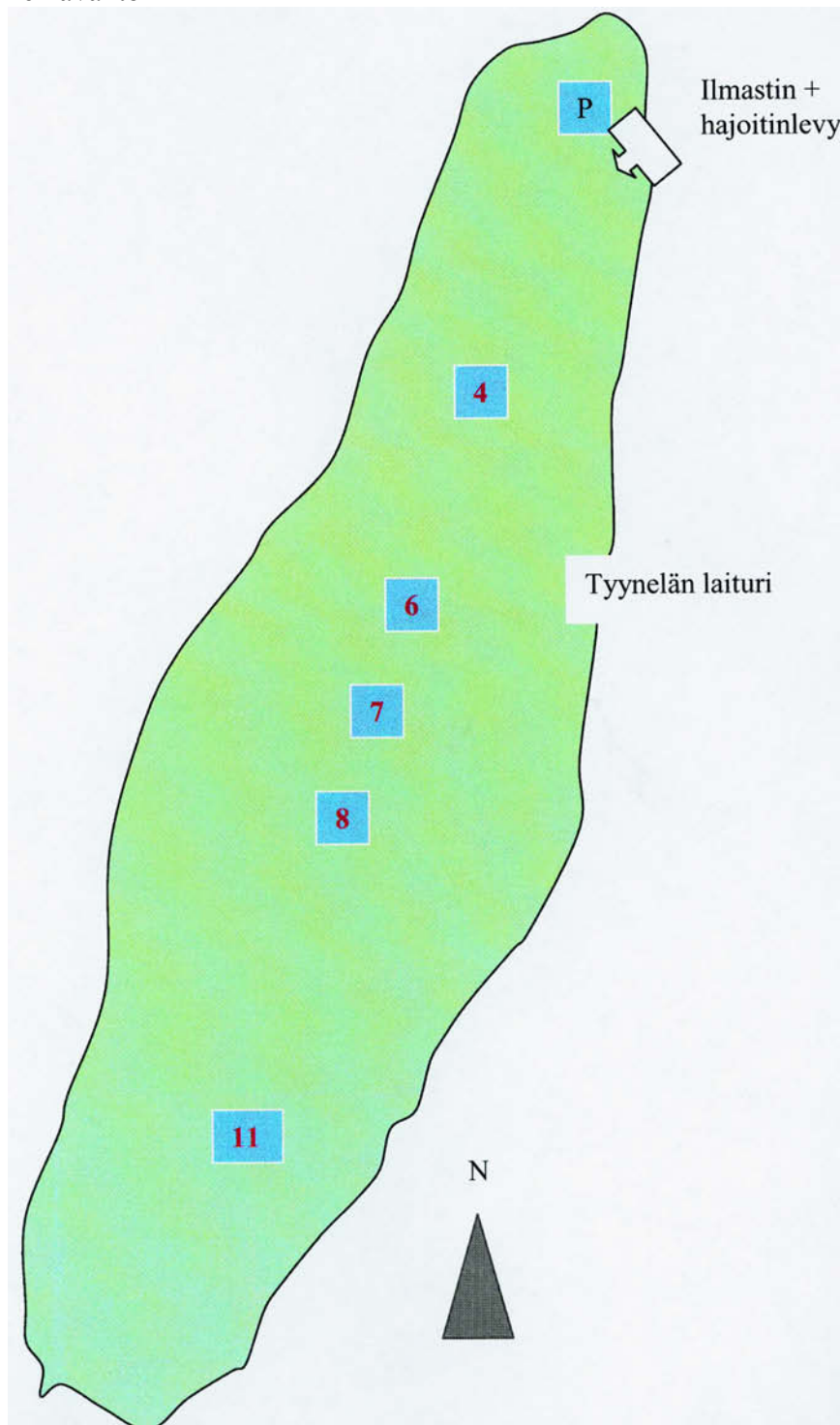
Piste 4. Lammen matala pää.

Pvm.	Syvyys [m]	Lämpötila [C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]
7.2.2005	1	1,6	6,26
	2	2,8	4,57
	3	3,3	2,76
	4	3,5	1,47
	5	3,5	0,62
	6	3,6	0,19
	7	3,8	0,16
	8	4	0,14
	8,5	4,1	0,13
16.2.2005	1	1,4	6,26
	2	3,8	3,67
	3	3,4	1,65
	4	3,5	0,8
	5	3,6	0,31
	6	3,6	0,14
	8	4,1	0,1
	8,5	4,1	0,1
	23.2.2005	0,5	0,6
1		1,6	5,77
2		2,8	3,83
3		3,3	1,36
4		3,5	0,56
5		3,6	0,19
6		3,7	0,1
7		3,9	0,1
8		4,1	0,1
8,5		4,1	0
2.3.2005	0,5	0,4	5,55
	1	1,6	5,76
	2	2,9	3
	3	3,3	1,45
	4	3,5	0,28
	5	3,6	0,22
	6	3,7	0,2
	7	3,8	0,2
	8	4	0,19
	8,5	4,2	0,18
30.3.2005	1	1,7	4,12
	2	2,8	1,96
	3	3,3	0,6
	5	3,7	0,3
	6	3,8	0,29
	8	4,1	0,28
	8,5	4,1	0,2

Liite 10: Lietepumppu + hajotinlevy -yhdistelmän happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot Ruutinlammella talvella 2004–2005

Havaintopisteiden sijainti ja numerointi.

P = pohjoinen avanto



Happipitoisuushavainnot [mgO₂/l], syvyys 80–100 cm.

Pvm.	Pohjoispään avanto	Alue 4	Tyynelän laituri	Alue 6	Alue 7	Alue 8	Alue 11
28.12.2004	5,67		4,01				
13.1.2005	2,17		2,02				
24.1.2005	0,92	0,82	0,87	0,60		0,89	
15.2.2005	3,38	3,20		2,51	2,67	2,58	
22.2.2005	4,85	4,3		3,97	3,54	3,22	1,26
5.3.2005	2,35	1,45		2,70	1,65	1,93	
12.3.2005	3,66	3,48		2,74	2,2	2,8	
20.3.2005	5,78	4,45		3,56	2,94	2,28	
27.3.2005	5,3	2,54		2,06	2,24	1,7	

Lämpötilahavainnot [°C], syvyys 80–100 cm.

Pvm.	Pohjoispään avanto	Alue 4	Tyynelän laituri	Alue 6	Alue 7	Alue 8	Alue 11
28.12.2004	2,3		3				
13.1.2005	2,3		2,02				
24.1.2005	2,2	2,8	2,8	2,7		2,8	
15.2.2005	0,7	1,1		1,5	1,3	1,6	
22.2.2005	0,5	0,7		0,8	1,1	1	1,2
5.3.2005	0,9	1,4		1,4	1,8	1,7	
12.3.2005	0,5	0,6		0,8	0,9	1,1	
20.3.2005	0,4	0,6		0,9	0,8	0,9	
27.3.2005	1,4	1,2		1,2	1,5	1,3	

Happipitoisuus- ja lämpötilahavainnot, syvyys 150 cm.

Pvm.	Alue 6		Alue 7		Alue 8	
	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]	Happipitoisuus [mgO ₂ /l]	Lämpötila [°C]
15.2.2005			0,45	3,4	0,70	3,4
22.2.2005	0,88	2,9	0,96	2,6	0,96	2,7
5.3.2005	0,56	3,2	0,42	3,1	0,48	4,2
12.3.2005	0,65	2,6	0,58	2,7	0,52	2,8
20.3.2005	1,00	2,2	0,82	2,1	0,64	2,4
27.3.2005	0,37	3,0	0,34	3,1	0,34	2,7

Tekijä(t)
Sassi, Jukka & Keto, Antton

Nimeke

Järvien kunnostuksen menetelmät Hapetuslaitteiden laboratorio- ja kenttäkokeet

Tiivistelmä

Projektissa mukana olleet kahdeksan laitetta testattiin Suomenojan tutkimusasemalla laboratoriomittakaavan koejärjestelyillä. Kaikkien laitteiden mittaustulokset käsiteltiin yhdenmukaisesti jäteveden ilmastuksessa käytettävällä periaatteella. Laitteille määriteltiin laboratoriokokeiden tulosten perusteella ilmastusteho (OTR) eli ilmastuksen tuotto ja ominaisilmastusteho (AE) eli ilmastuksen hyötysuhde. Laitteiden tuotot vaihtelivat välillä 3 ja 110 kgO₂/d hyötysuhteiden vaihdellessa välillä 0,2 ja 1,5 kgO₂/kWh (T = 4 °C, lämpötilakerroin 1,024). Laitteiden mitatut ottotehot vaihtelivat välillä 0,2 ja 10 kW.

Kenttäkokeissa seurattiin kolmen laitteen toimintaa kolmella eri kohdejärvellä ja määriteltiin laitteen vaikutus veden happipitoisuuteen. Kaikkien kolmen laitteen osalta voidaan todeta, että niiden käyttö joko nosti veden happipitoisuutta tai hidasti happipitoisuuden pienenemistä. Kenttäkokeissa havainnointiin lisäksi laitteen käyttövarmuuteen liittyviä asioita sekä laitteen toiminnan vaikutusta jääolosuhteisiin.

Hapetuksen menetelmävalintaan ja laitemitoitukseen vaikuttaa merkittävästi järven kerrostuneisuus. Matalissa ja kesäkerrostumattomissa järvissä talven hapetustarve voidaan järjestää ottamalla lisähapetta ilmasta veden vaakakierrätyksellä tai siihen yhdistetyllä hapetuksella. Matalissa järvissä, joissa esiintyy epämääräistä tai vaihtelevaa kesäkerrostuneisuutta, voidaan talvella käyttää hapetusta tai kierrätyshapetusta. Kesällä voidaan säätää kerrostuneisuutta pakoteuilla välikierroilla, estää kerroksellisuus tai hapettaa alusvettä. Syvässä järvissä, joissa esiintyy kesäinen lämpötilakerrostuneisuus, voidaan käyttää alusveden hapetusta tai kierrätyshapetusta. Hapetuksessa käytettävän laitteiston valintaan vaikuttavat laitteen riittävä tuotto suhteessa kohdejärven happitarpeeseen, käytöstä aiheutuvat sivuvaikutukset, hyötysuhde, ylläpitokustannukset sekä hankintahinta. Laitteiston riittävä tuotto on perusedellytys onnistuneelle hapetukselle.

Hapetuksen kustannukset voidaan arvioida määrittelemällä joko veteen siirrettävän happimäärän hinta tai hapetuksen vuosikustannus hapetettua pinta-alaa kohti. Yksikkökustannukset vaihtelevat ilmapuhallusta käyttävissä laitteissa välillä 0,1 ja 0,4 €/kgO₂ ja kierrätyshapetuksessa välillä 0,05 ja 0,2 €/kgO₂. Järven pinta-alaan suhteutettuna vuosittaisten kustannuksen vaihteluväli on normaalisti 40–200 €/ha. Turvamääräysten mukaisesti hyväksytysti suoritettun sähköistyksen hinta vaihtelee 2 000 ja 3 000 euron välillä. Kokonaiskustannukset vaihtelevat merkittävästi mm. kohteen pinta-alaan, ilmastustarpeen ja käytettävän laitteen hyötysuhteen mukaan ja ovat aina tapauskohtaisia.

Hapetuslaitteita käytettäessä laitteiden toimintaympäristö edellyttää erityistä huolellisuutta ja käyttöympäristön erityispiirteiden huomioimista sähköasennuksen tekemisessä. Sellaisten hapetuslaitteiden kohdalla, jotka tekevät avannon tai heikentävät merkittävästi jään paksuutta laitteen vaikutusalueella, on kiinnitettävä huomiota ilmastusalueen huolelliseen merkitsemiseen. Hapetuksesta on aiheellista varoittaa järvellä liikkujia myös rannalle kiinnitettävillä varoitus-tauluilla. Avannon reunalle voidaan tuoda pelastusrenkaiden lisäksi myös pelastusvene hätätilanteiden varalle.

Onnistunut hapetus vaatii runsaasti tietoa ja erikoisosaamista sekä näiden yhdistämistä kyseessä olevan kunnostuskohteen tilanteeseen. Kunnostuksen suunnittelussa eri alojen ammattilaisten tietämyksen hyödyntäminen auttaa tavoitteiden saavuttamisessa. Yhdistämällä hapetus muiden rehevyyttä vähentävien keinojen kanssa ja samanaikaisesti vähentämällä järven ulkoista kuormitusta on mahdollista saavuttaa pitkäkestoisia ja järven virkistys- ja vapaa-ajankäyttöarvoja parantavia lopputuloksia.

Avainsanat

waterways, lakes, restoration, aeration, dimensioning, equipment, costs, safety, field tests, laboratory tests

Toimintayksikkö

VTT Tuotteet ja tuotanto, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT

ISBN

951-38-6735-8 (nid.)

951-38-6736-6 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Projektinumero

G4SU00143

Julkaisu-aika

Lokakuu 2005

Kieli

Suomi

Sivuja

88 s. + liitt. 56 s.

Hinta

C

Projektin nimi

Ilmaus

Toimeksiantaja(t)

ympäristöministeriö, Suomen ympäristökeskus, maa- ja metsätalousministeriö, Tekes, Turun Seudun Vesi Oy, VTT

Avainnimeke ja ISSN

VTT Tiedotteita – Research Notes

1235-0605 (nid.)

1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Myynti:

VTT Tietopalvelu

PL 2000, 02044 VTT

Puh. 020 722 4404

Faksi 020 722 4374

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT TUOTTEET JA TUOTANTO – VTT INDUSTRIELLA SYSTEM –
VTT INDUSTRIAL SYSTEMS

- 2251 Riikonen, Heli, Valkokari, Katri & Kulmala, Harri I. Palkitseminen kilpailukyvyyn parantajana. Tuotantopalkkauksen kehittämismenetelmät vaatetusallalla. 2004. 67 s.
- 2254 Nuutinen, Maaria. Etäasiantuntijapalvelun haasteet. Työn toiminta- ja osaamisvaatimusten mallintaminen. 2004. 31 s.
- 2257 Koivisto, Tapio, Lehto, Taru, Poikkimäki, Jyrki, Valkokari, Katri & Hyötyläinen, Raimo. Metallin ja koneenrakennuksen liiketoimintayhteisöt Pirkanmaalla. 2004. 33 s.
- 2263 Pöyhönen, Ilkka & Hukki, Kristiina. Riskitietoisien ohjelmiston vaatimusmäärittelyprosessin kehittäminen. 2004. 36 s. + liitt. 9 s.
- 2264 Malm, Timo & Kivipuro, Maarit. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmät kone-sovelluksissa. Esimerkkejä. 2004. 90 s. + liitt. 4 s.
- 2265 Alanen, Jarmo, Hietikko, Marita & Malm, Timo. Safety of Digital Communications in Machines. 2004. 93 p. + app. 1 p.
- 2269 Mikkola, Markku, Ilomäki, Sanna-Kaisa & Salkari, Iiro. Uutta liiketoimintaa osamista yhdistämällä. 2004. 65 s.
- 2271 Häkkinen, Kai. Alihankintayhteistyö konepajateollisuudessa ja sen laadun arviointia. 2004. 64 s. + liitt. 17 s.
- 2277 Kondelin, Kalle, Karhela, Tommi & Laakso, Pasi. Service framework specification for process plant lifecycle. 2004. 123 p.
- 2283 Lemström, Bettina, Holttinen, Hannele & Jussila, Matti. Hajautettujen tuotantolaitosten tiedonsiirtotarpeet ja -valmiudet. 2005. 62 s. + liitt. 10 s.
- 2284 Valkonen, Janne, Tommila, Teemu, Jaakkola, Lauri, Wahlström, Björn, Koponen, Pekka, Kärkkäinen, Seppo, Kumpulainen, Lauri, Saari, Pekka, Keskinen, Simo, Saaristo, Hannu & Lehtonen, Matti. Paikallisten energiaresurssien hallinta hajautetussa energiajärjestelmässä. 2005. 87 s. + liitt. 58 s.
- 2287 Wahlström, Björn, Kettunen, Jari, Reiman, Teemu, Wilpert, Bernhard, Maimer, Hans, Jung, Juliane, Cox, Sue, Jones, Bethan, Sola, Rosario, Prieto, José M., Martínez Arias, Rosario & Rollenhagen, Carl. LearnSafe. Learning organisations for nuclear safety. 2005. 58 p. + app. 7 p.
- 2289 Laakso, Pasi, Paljakka, Matti, Kangas, Petteri, Helminen, Atte, Peltoniemi, Jyrki & Ollikainen, Toni. Methods of simulation-assisted automation testing. 2005. 59 p.
- 2303 Tommila, Teemu, Hirvonen, Juhani, Jaakkola, Lauri, Peltoniemi, Jyrki, Peltola, Jukka, Sierla, Seppo & Koskinen, Kari. Next generation of industrial automation. Concepts and architecture of a component-based control system. 2005. 104 p.
- 2307 Sassi, Jukka & Keto, Antton. Järvien kunnostuksen menetelmät. Hapetuslaitteiden laboratorio- ja kenttäkokeet. 2005. 88 s. + liitt. 56 s.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FI-02044 VTT, Finland
Puh. 020 722 4404	Tel. 020 722 4404	Phone internat. + 358 20 722 4404
Faksi 020 722 4374	Fax 020 722 4374	Fax + 358 20 722 4374