PÄÄLLYSLEVÄSTÖN BIOMASSAN KERTYMINEN ERI RAVINNETASOILLA SEKÄ VAIKUTUKSET VEDEN RAVINNEPITOISUUKSIIN

SAKU ANTTILA

HELSINGIN YLIOPISTON
YMPÄRISTÖEKOLOGIAN LAITOKSEN
RAPORTTEJA JA SELVITYKSIÄ 6.

PÄÄLLYSLEVÄSTÖN BIOMASSAN KERTYMINEN ERI RAVINNETASOILLA SEKÄ VAIKUTUKSET VEDEN RAVINNEPITOISUUKSIIN

SAKU ANTTILA

LAHDEN
KORKEAKOULUKIRJASTO

HELSINGIN YLIOPISTON
YMPÄRISTÖEKOLOGIAN LAITOKSEN
RAPORTTEJA JA SELVITYKSIÄ 6.

HELSINGIN YLIOPISTO – HELSINGFORS UNIVERSITET

Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion	Laitos – Institution
Matemaattis –luonontieteellinen	Ympäristöekologian laitos

Tekijä – Författare

Saku Anttila

Työn nimi – Arbetets titel

Päällyslevästön biomassan kertyminen eri ravinnetasoilla sekä vaikutukset veden ravinnepitoisuuksiin

Oppiaine – Läroämne

Ympäristöekologia

Työn laji – Arbetets art	Aika – Datum	Sivumäärä – Sidoantal
Pro gradu	9.8.2001	49 + liitteet

Tiivistelmä – Referat

Tutkimuksen hypoteesinä oli, että eri ikäisten päällysleväyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin on erilainen. Nuori päällysleväyhteisö assimiloi vedestä enemmän ravinteita valoisaan aikaan kuin vanhempi yhteisö. Pimeään aikaan vanhempi yhteisö vapauttaa enemmän ravinteita veteen kuin nuorempi yhteisö. Tutkimuksessa verrattiin 3:n ja 6:n viikon ikäisten yhteisöjen vaikutusta niitä ympäröivän veden ravinnemääriin eri ravinnetasoissa sekä päivällä että yöllä. Lisäksi päällyslevästön biomassan kehittymistä keinotekoisille alustoille tutkittiin viikoittaisilla inkuboinneilla kuuden viikon ajan eri ravinnetasoissa.

Tutkimus tehtiin kesällä 1999 kansainvälisen matalien järvien tutkimushankeen, SWALE:n (Shallow Wetland Lake Function and Restoration in a Changing European Climate) yhteydessä. Koepaikka sijaitsi Lahden Vesijärven (kokonaispinta-ala 110 km^2, keskisyvyys 6 m) Kilpiäistenpohjan lahdessa (61° 05′ N, 25° 30′ E). Lahti on matala ja osin jo umpeenkasvanut, ja sitä reunustavat laajat järviruokokasvustot. Työ aloitettiin 21.6., jolloin perustetiin 12 mesokosmosta Kilpiäistenpohjan rantavyöhykkeelle (vedenkorkeus n. 1 m). Mesokosmokset rakennettiin polyeteeni-muovista, ja ne olivat sylinterinmuotoisia (halkaisija 1 m, syvyys n. 0,8 m ja tilavuus keskimäärin 0,65 m^3). Altaiden seinien pinta-alan suhde veden tilavuuteen (A_w / V_{tot}) oli keskimäärin 3,87 m^{-1}. Altaisiin lisättiin ensimmäisen kerran ravinteita 2.7., minkä jälkeen lisäyksiä tehtiin viikoittain. Ravinnetasoja oli kuusi ja koe oli replikoitu. Kokeen molemmissa osissa käytettiin polyeteeni-muovista valmistettuja 2,5 cm:n levyisiä liuskoja. Tutkimus jakaantui kahteen osaan: 1. Ravinnetason ja päällysleväkasvuston aikaisen sukkessiovaiheen merkitystä muodostuvan biomassan määrään keinoalustoille selvitettiin viikoittaisilla inkuboinneilla, joita tehtiin kuuden viikon ajan. 2. Eri-ikäisten päällysleväyhteisöjen vaikutusta ravinnedynamiikkaan tutkittiin selvittämällä 3 ja 6 viikon ikäisten päällysleväyhteisöjen vedestä ottamien ravinteiden määrää sekä päivä- että yöaikaan eri ravinnetasoissa. Tässä kokeessa liuskat suljettiin läpinäkyvien akryyliputkien sisään kahdeksaksi tunniksi. Putkiin jääneiden vesien ravinnepitoisuuksien, pH:n ja happikonsentraatioiden muutokset inkuboinnin aikana suhteutettiin päällysleväyhteisöjen biomassoihin ja näitä tuloksien eroja verrattiin koepäivien ja -öiden välillä.

Biomassan viikkokertymä oli suurin kokeen kolmannella koeviikolla. Kolme ja kuusi viikkoa vanhojen päällysleväyhteisöjen biomassojen välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja koeviikkojen välillä. Eri-ikäisten yhteisöjen vaikutus veden ravinnemääriin oli päiväaikaan merkitsevä ainoastaan ammoniumtypen osalta, jolloin nuorempi yhteisö käytti enemmän ammoniumia kuin vanhempi. Nuorempi yhteisö vähensi myös nitraattitypen ja epäorgaanisen hiilen määriä vedessä enemmän kuin vanhempi yhteisö, mutta erot eivät olleet merkitseviä. Yöaikaan tehty tutkimus epäonnistui, koska aurinko ehti nousta ennen koeviikon 3 loppumista. Tämä näkyi putkien veden pH-arvojen, DIC:n ja happikonsentraation muutoksissa.

Päällyslevästön biomassan vaikutti altaiden veden pinnoille kasvanut *Lemna trisulca*–kasvusto, joka 4.8. tehdyssä arviossa peitti 70-95 % altaiden veden pinnasta. Kokeen väittämän mukaan vanhempi päällysleväyhteisö ottaa vähemmän ravinteita ympäröivästä vedestä kuin nuorempi yhteisö. Väittämän toteutuminen vaatii riittävän päällyslevästön biomassan, jotta aineiden diffuusio veden ja päällysleväyhteisön välillä pienenee. Vanhempien yhteisöjen biomassat eivät olleet merkitsevästi suurempia verrattuna nuorempiin. Myös koeasetelma vaikeutti tulosten käsittelyä ja vähensi tulosten luotettavuutta. Yhteisön iän vaikutus olisi pitänyt selvittää keskittymällä yhteen ravinnetasoon ja käyttämällä useampia rinnakkaisia näytteitä. Toisaalta koejärjestely piti sovittaa yhteen SWALE - projektin kanssa, joten mainitut parannukset koejärjestelmään eivät välttämättä olisi olleet mahdollisia. Liuskojen nosto vedestä saattoi irrottaa varsinkin vanhempien päällysleväyhteisöjen kohdalla osan heikosti kiinnittyneistä levistä. Tulosten mukaan päällyslevästöt kasvoivat eniten kolmannella koeviikolla, jolloin sen vaikutuksen ympäröivään veteen voi olettaa olleen suurin.

Avainsanat – Nyckelord

Päällyslevästö, ravinnedynamiikka

Säilytyspaikka – Förvaringsställe

Muita tietoja

Sisällysluettelo:

1. Johdanto 1
1.1. Päällyslevästön rakenne ja sukkessio 1
1.2. Päällyslevien biomassaa ja tuotantoa säätelevät tekijät 3
1.3. Päällyslevästön tutkiminen ja siihen liittyviä ongelmia 5
1.4. Tutkimuksen tarkoitus 7

2. Aineisto ja menetelmät 8
2.1. Koeasetelma 8
2.2. Viikoittainen biomassan kerääntyminen ja biomassamääritykset 9
2.3. Ravinnedynamiikka 10
2.4. Tilastolliset menetelmät 12

3. Tulokset 13
3.1. Biomassan viikkokertymä 13
3.2. Ravinnedynamiikka 14
3.2.1 Eri-ikäisten yhteisöjen biomassat 14
3.2.2. Päiväaikainen ravinteidenotto 15
3.2.3. Yöllinen ravinteidenotto 22
3.3. Altaiden kasviplanktonin ja seinämien päällysleväyhteisöjen biomassat 28

4. Tulosten tarkastelu 30
4.1. Biomassan viikkokertyminen ja eri-ikäisten yhteisöjen biomassat 30
4.2. Eri-ikäisten päällyslevästöyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin, päiväkoe 35
4.3. Eri-ikäisten päällyslevästöyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin, yökoe 37

5. Yhteenveto 38

6. Kiitokset 39

7. Kirjallisuus 40

Liitteet

1. JOHDANTO

1.1. Päällyslevästön rakenne ja sukkessio

Makrofyyttien pinnalla elävä yhteisö koostuu levistä ja bakteereista, kuolevista soluista, erilaisista eläimistä ja detrituksesta. Tämä massa liittyy sekä päällyslevästöstä että makrofyyteistä peräisin olevaan polysakkaridi- ja proteiinialustaan. Päällyslevät ovat kiinnittyneenä tähän kasvualustaan, ja osa niistä tunkeutuu kompleksin läpi suoraan makrofyytin pintaan ja kiinnittyy koko pinnallaan tai yksinkertaisilla limamaisilla varsilla makrofyyttiin (Allanson, 1973). Päällysleväyhteisö kehittyy ajan myötä yhä kolmiulotteisemmaksi, ja lopullinen rakenne on usein monikerroksinen (Jones ym., 1998). Päällyskerroksessa on esiin työntyviä pitkiä ja varsimaisia piileviä sekä lyhyitä piileviä. Ulommaisena yhteisössä voi olla vielä pitempiä, heikosti kiinnittyneitä leväyhdyskuntia ja isoja yksisoluisia leviä sekä isompien levien pinnoilla kasvavia pieniä leviä.

Päällysleväyhteisön kehittyminen riippuu eri levälajien kyvystä kolonisoida, kasvaa, kilpailla, kestää stressiä ja vastustaa biomassan pienenemiseen johtavia prosesseja kuten virtausten aiheuttamaa mekaanista stressiä. Lopputuloksena on erilaisten yhteisörakenteiden muodostuminen erilaisiin habitaatteihin (Cox, 1990). Päällysleväyhteisön kehitykseen vaikuttaa paljolti myös kasvualustan elinkierto. Vanhemmat makrofyytit kantavatkin usein suurempaa päällyslevämassaa kuin nuoremmat (Sheldon & Boyle, 1975; Siver, 1978; Roos, 1983). Yleensä sukkession ensivaiheessa kasvualustalle ilmestyvät bakteerit, kuten Hudon ja Bourget (1981) havaitsivat kokeessaan. Sukkession edetessä alustalle tulivat piilevät kasvaen aluksi alustan suuntaisesti, mutta myöhemmin myös päällekkäin ja pystyasennossa. Pystyasentoiset levät yleistyivät kokeen edetessä, ja levien lajimäärä ja solutiheys saavuttivat huippunsa sukkession loppuvaiheessa. Ennen bakteerien kolonisaatiota alustalle voi myös kertyä orgaanista ainesta kuten mukopolysakkaridejä

(Hoagland ym., 1982). Suomalaisen tutkimuksen mukaan kasvukauden alussa uusille makrofyyttipinnoille (*Equisetum fluviatile*) kasvoi ensin varren pinnan suuntaisesti *Tabellaria* ja *Fragilaria* – piilevälajeja (Kairesalo, 1984). Kolonisaation jatkuessa kaksiulotteinen yhteisö muuttui yhä enemmän kolmiulotteiseksi, ja *Tabellaria*- ja *Fragilaria* - yhdyskunnat kasvoivat yhä enemmän pystyyn samalla kun tyypillisempiä pystyjä piilevälajeja kuten *Gomphonema*- ja *Cymbella* –lajeja, sekä viherleviä kuten *Oedogonium*- ja *Bulbochaete* –lajeja, ilmaantui yhteisöön. Sekä makrofyytin että päällysleväyhteisön ikääntyminen johtaa siis päällyslevästön biomassan kasvuun, mutta ei aina välttämättä leväyhteisön rakenteen muutokseen (Siver, 1978; Roos, 1983). Yleensä kuitenkin leväyhteisön kasvaessa tiheämmäksi pystyasentoiset ja pitkät levälajit yleistyvät (Bohr, 1981). Roos (1983) selittää tämän johtuvan siitä, että levät kilpailevat valosta, ravinteista ja tilasta, ja kilpailutilanteessa pystyasentoiset ja pitkät organismit hyötyvät eniten. Myös Hudon ja Bourget (1981) päätyivät vastaaviin tuloksiin.

Päällysleväyhteisön biomassaan sitoutuu ravinteita ympäröivästä vedestä, ja osa näistä ravinteista jäänee kiertämään yhteisössä. Esimerkiksi eräässä ravinnelisäyskokeessa päällyslevästön sitoman fosforin määrä nousi samalla, kun veden ravinnepitoisuus pysyi matalana (Havens ym., 1999 a). Ravinnepitoisuudet ovat päällysleväyhteisön sisällä usein ympäröivän veden pitoisuuksia korkeammat, ja levästön ja sitä ympäröivän veden ravinnepitoisuuksien välillä vallitsee jyrkkä gradienttiero (Grimshaw ym., 1997). Päällyslevästö toimii siis ravinnevarastona, josta olosuhteiden muuttuessa ravinteita voi vapautua ympäröivään veteen. Eron syntyminen ja ylläpitäminen vaatii nopeaa hiilen, fosforin, typen ja muiden ravinteiden kierrätystä päällysleväyhteisön tuottajien, partikulaarisen ja liuenneen detrituksen, bakteerien, sienten ja heterotrofisten alkueläinten välillä. Päällyslevästön korkea tuotanto saattaakin olla mahdollista vain intensiivisen ravinteiden ja kaasujen, kuten hiilidioksidin, kierron ansiosta (Wetzel, 1993). On kuitenkin epäselvää, kuinka suuri osa detritusfaasiin kulkeutuvista ravinteista mineralisoidaan ja käytetään yhteisön sisällä (esim. Hudon &

Bourget, 1981). McQueen ym. (1989) totesivat, että päällyslevästö saattaa kierrättää tehokkaasti jo assimiloitua fosforia yhteisön sisällä, sillä päällyslevästö vapautti keskimäärin vain 10,7 % ottamastaan fosforista. Nopean kierrätyksen mahdollistaa fotosynteettisten solujen ja bakteerisolujen välinen lyhyt välimatka. Tiedetäänkin, että päällyslevien fotosynteesin estyttyä yhteisön bakteerien tuotanto voi vähentyä, kuten ravinteiden ja kaasujen kierrätyskin (Neely & Wetzel, 1995).

1.2. Päällyslevien biomassaa ja tuotantoa säätelevät tekijät

Päällysleväkasvustoon vaikuttavat fysikaaliset, kemialliset ja biologiset tekijät. Osa näistä vaikuttaa epäsuorasti, tai niiden merkitys ilmenee yhteisöä positiivisesti tai negatiivisesti kontrolloivien tekijöiden kautta. Esimerkiksi tuuli ja virtaukset irrottavat päällysleväyhteisöstä soluja vaikuttaen näin ollen negatiivisesti (Tanimizu ym., 1981; Cattaneo, 1990), mutta toisaalta turbulenssi voi myös stimuloida yhteisön kasvua tuomalla levästön käyttöön lisää ravinteita (Duthie & Jones, 1990, Hawes & Smith, 1993).

Eräs tärkeimmistä päällyslevästöön suoraan vaikuttavista tekijöistä on fosforin saatavuus. Useissa kokeissa on todettu päällyslevästön biomassan kasvavan veden totaalifosforin (TP) konsentraation noustessa (esim. Cattaneo & Kalff, 1980; Krewer & Holm, 1982; Fairchild ym. 1985; Osenberg, 1989), ja fosfori voi olla päällyslevästön kasvua rajoittava ravinne (esim. Muller, 1983). Riippuvuutta päällyslevästön biomassan ja fosforin välillä ei kaikissa tutkimuksissa ole kuitenkaan löydetty (Lalonde & Downing, 1991; Havens ym., 1999 a; Havens ym, 1999 b; Mosisch ym., 1999). Tämä selittyy sillä, että fosforilisäysten seurauksena myös kasviplankton lisääntyy ja varjostaa päällyslevästöä (Hansson, 1988). Fosforin lisäksi myös typen merkitys voi olla huomattava päällyslevästölle (McQueen ym., 1989; Havens ym., 1999 a; Mosisch ym., 1999). Typen käyttöön saattavat vaikuttaa yllättävätkin tekijät, kuten koeyksikköjen reunojen pinta-alan suhde veden tilavuuteen. Tämän suhteen kasvaessa esim. päällyslevästön nitraatin kulutuksen on

todettu kasvavan (Berg ym., 1999). Päällyslevästön merkitys typpeä systeemistä poistavana elementtinä saattaa tietyissä ympäristöissä olla huomattava (Law ym., 1993; Weisner ym. 1994). Hapettomien mikroympäristöjen muodostuminen silloin, kun päällysleväyhteisön biomassa kasvaa niin suureksi, että veden ja yhteisön rajakerros vaikuttaa aineiden diffuusioon (Carlton & Wetzel, 1988; Mullohand, 1996), luo otollisia olosuhteita denitrifikaatiolle (esim. Sorensen & Revsbech, 1990; Dalsgaard & Revsbech, 1992).

Vähäinen valon määrä nousee usein tärkeimmäksi päällyslevästön kasvua rajoittavaksi tekijäksi varsinkin tiheissä kasvustoissa (Loeb, Reuter & Goldman, 1983; Martin ym., 1983; Muller, 1983; Wetzel, 1983). Kairesalon (1984) mukaan päällysleväyhteisöjen sukkessiota keväällä ennen kuin ilmaversoiset kasvit nousevat veden pinnalle, säätelevät ravinteet, minkä jälkeen tärkein kontrolloija on valon määrä. Vähäinen valon määrä rajoittaa päällyslevien kasvua sekä vaikuttaa päällysleväyhteisöjen sukkessioon (Blindow, 1987). Päällysleväyhteisön biomassa voi laskea valon määrän vähenemisen seurauksena (Mosisch, 1999; Straskraba & Pieczynska, 1970; Mcqueen ym., 1989; Bourassa & Cattaneo, 2000). Kasviplanktonin ja ilmaversoisten makrofyyttien lisäksi päällyslevästön valoilmastoa voivat heikentää myös irtokellujat, kuten pikkulimaska (*Lemna minor*) ja ristilimaska (*Lemna trisulca*), jotka voivat muodostaa tiheän maton veden pinnalle (Portielje & Roijackers, 1995). Valo saattaakin olla ratkaiseva tekijä mm. tapauksissa, joissa vanhojen ja nuorten kasvinosien päällyslevästön tiheyksissä ei ole havaittu eroja (Blindow, 1987).

1.3. Päällyslevästön tutkiminen ja siihen liittyviä ongelmia

Päällyslevästöä tutkittaessa käytetään usein erityyppisiä keinotekoisia kasvualustoja, kuten esimerkiksi lasia, kiveä, hiekkaa, erilaisia muoveja ja metalleja sekä puuta. Näiden välillä on kuitenkin eroja, sillä päällyslevästö saattaa kiinnittyä eri kasvualustoille eri nopeudella. Kaikkia organismeja ei myöskään esiinny, ennen kuin sukkession ensimmäiset lajit ovat kiinnittyneet alustaan. Tuloksiin vaikuttaa näin ollen alustojen inkubointiaika (Blind, ym., 1980). Keinotekoisia kasvualustoja käytettäessä eliminoituvat myös päällysleväyhteisöjen ja vesikasvien väliset vuorovaikutussuhteet, joista on runsaasti todisteita (esim. Allen, 1971; Sand-Jensen, 1977; Cattaneo & Kalff, 1978; Phillips ym., 1978; Cattaneo & Kalf, 1980; Sand-Jensen & Söndergaard, 1981; Wetzel, 1983 b; Sand-Jensen & Borum, 1984; Grimshaw ym., 1997). Virheitä tuloksiin voivat aiheuttaa myös veden virtaukset, samoin kuin alustojen poistaminen inkuboinnin jälkeen, jolloin huomattava osa heikosti kiinnittyneestä yhteisöstä voi irrota. Altistuminen pinnan korkeille valointensiteeteille voi aiheuttaa ns. valoshokin, joka aiheuttaa virheitä biomassan määrän mittauksiin (Robinson, 1983). Myös päällyslevästöä laiduntavien eläinten, kuten kotiloiden, vaikutus päällyslevästön biomassaan voi olla huomattava (Cattaneo & Kalff ,1986; Brönmark, 1989; Cattaneo 1990). Englannissa tehdyn tutkimuksen mukaan laiduntajien poistaminen lisäsi makrofyytin (*Zostera marina L.*) päällyslevästön biomassaa enemmän kuin ravinnelisäykset (Neckless ym., 1993). Toisaalta laidunnus vaikuttaa usein epäsuorasti leväyhteisön kasvuun vapauttamalla ravinteita ja nopeuttamalla mineralisaatiota (Granelli, 1979; Gallep, 1979; Anderson ym. 1981). Laidunnus saattaa myös vaikuttaa leväyhteisön rakenteeseen muuttamalla sen diversiteettiä ja lajisuhteita (Nicotri, 1980; Hunter, 1980; Gregory, 1983; Jones ym., 1998).

Keinotekoinen kasvualusta on parhaimmillaan tutkittaessa esimerkiksi kolonisaatiota, yhteisön vuorovaikutuksia ja ympäristön muuttujien vaikutusta yhteisöön. Tutkimuksissa, joissa on tarkoitus simuloida

luonnollisia oloja, esimerkiksi biomassan ja tuotannon arvioinneissa, keinoalustaan pitää suhtautua varauksella (Robinsson, 1983). Biomassan määrittäminen antaa arvion päällyslevien tuotannosta, mutta tulokset eivät vastaa todellista nettotuotantoa, sillä päällysleväyhteisössä jatkuvasti tapahtuvien hävikkien, kuten orgaanisten aineiden erittämisen, hengityksen, kuolleisuuden, hajoamisen ja laidunnuksen, arviointi on vaikeaa. Päällyslevästön biomassan mittaukseen on käytetty mm. klorofyllin ja hiilen määrää, kuivapainoa ja totaalifosforin määrää. Näistä yleisin on klorofyllin määrä, joka mittaa hyvin päällysleväyhteisön biomassaa aktiivisen kasvun aikana. Ainoa luotettava tapa mitata tuotantoa on kuitenkin ^{14}C-menetelmä (Muller, 1983).

Kokeellisia ekosysteemejä käytetään usein ekologisten interaktioiden tutkimisessa. Suljetut mesokosmokset tarjoavat mahdollisuuden kontrolloituihin kokeisiin, joissa ekosysteemin vaste yksittäiseen muuttujaan saadaan selville. Mesokosmoksien käyttöön liittyy kuitenkin ongelmia, joita aiheuttavat mm. altaiden seinät luomalla systeemiin keinotekoisen kasvualustan eliöstölle (Chen ym., 1997). Tämän ns. seinävaikutuksen (wall-effect) merkitys koko mesokosmoksen toiminnalle voi olla ratkaiseva. Seinävaikutuksen pienentämiseksi altaan reunan pinta-alan ja veden tilavuuden suhteen tulisi olla mahdollisimman pieni (Jassby ym., 1977; Dudzik ym., 1979; Gamble & Davies, 1982; Berg ym., 1999). Mesokosmoskokeissa suhdeluku vaihtelee yleensä välillä 2 –14 m^{-1}. Mesokosmoksiin, joissa tämä suhdeluku on suuri, on todettu kehittyvän runsaimmin päällyslevästöä. Myös altaan muodon on todettu vaikuttavan, mm. altaaseen pääsevän valon määrän kautta päällyslevästön määrään (Berg ym., 1999).

1.4. Tutkimuksen tarkoitus

Tutkimuksessa käytettiin mesokosmoksia, joihin luotiin kuusi eri ravinnetasoa ravinnelisäyksillä. Tutkimuksen hypoteesinä oli, että eri ikäisten päällysleväyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin on erilainen. Nuori päällysleväyhteisö toimii ravinteiden nieluna, kun taas ravinteita vapautuu vanhemmasta yhteisöstä. Nuoremman yhteisön oletettiin ottavan valoisaan aikaan enemmän ravinteita ympäröivästä vedestä kuin vanhemman yhteisön. Toisaalta vanhemman yhteisön oletettiin vapauttavan nuorempaa enemmän ravinteita veteen pimeään aikaan. Tutkimuksessa verrattiin 3 ja 6 viikon ikäisten yhteisöjen vaikutusta niitä ympäröivän veden ravinnemääriin eri ravinnetasoissa. Lisäksi päällyslevästön biomassan kehittymistä keinotekoisille alustoille tutkittuun viikoittaisilla inkuboinneilla kuuden viikon ajan eri ravinnetasoissa.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1. Koeasetelma

Tutkimus tehtiin kesällä 1999 kansainvälisen matalien järvien tutkimushankeen, SWALE:n (Shallow Wetland Lake Function and Restoration in a Changing European Climate) yhteydessä. Koepaikka sijaitsi Lahden Vesijärven (kokonaispinta-ala 110 km^2, keskisyvyys 6 m) Kilpiäistenpohjan lahdessa (61° 05´ N, 25° 30´ E). Lahti on matala ja osin jo umpeenkasvanut, ja sitä reunustavat laajat järviruokokasvustot.

Työ aloitettiin 21.6., jolloin perustetiin 12 mesokosmosta Kilpiäistenpohjan rantavyöhykkeelle (vedenkorkeus n. 1 m). Mesokosmokset rakennettiin polyeteeni-muovista, ja ne olivat sylinterinmuotoisia (halkaisija 1 m, syvyys n. 0,8 m ja tilavuus keskimäärin 0,65 m^3). Altaiden seinien pinta-alan suhde veden tilavuuteen (A_w / V_{tot}) oli keskimäärin 3,87 m^{-1}. Altaisiin lisättiin ensimmäisen kerran ravinteita 2.7., minkä jälkeen lisäyksiä tehtiin viikoittain. Ravinnetasoja oli kuusi ja koe oli replikoitu. Fosfori lisättiin altaaseen KH_2PO_4 - muodossa ja typpi KNO_3 - muodossa (taulukko 1).

Taulukko 1. Altaiden viikoittaiset ravinnelisäykset

Ravinnetaso	NO_3-N (mg l^{-1})	PO_4 -P (µg l^{-1})
0	0	0
1	0,3	30
2	0,6	60
3	0,9	90
4	1,5	150
5	3	300

Tutkimus jakaantui kahteen osaan:

1. Ravinnetason ja päällysleväkasvuston sukkessiovaiheen merkitystä muodostuvan biomassan määrään selvitettiin viikoittaisilla inkuboinneilla, joita tehtiin kuuden viikon ajan.

2. Eri-ikäisten päällysleväyhteisöjen vaikutusta ravinnedynamiikkaan tutkittiin selvittämällä 3 ja 6 viikon ikäisten päällysleväyhteisöjen vedestä ottamien ravinteiden määrää sekä päivä- että yöaikaan eri ravinnetasoissa.

Lisäksi päällyslevästön merkitystä mesokosmoksien toiminnassa tutkittiin vertaamalla kolmen ja kuuden viikon aikana kehittyneiden kasviplanktonyhteisöjen ja päällyslevästöjen biomassoja.

Kokeen molemmissa osissa käytettiin polyeteeni-muovista valmistettuja 2,5 cm:n levyisiä liuskoja. Liuskat kiinnitettiin altaiden yläpuolella olleeseen naruun, ja alapäähän kiinnitetty hiekkapussi piti ne vedessä pystysuorassa. Keskimääräinen kasvupinta-ala oli 425 cm^2/liuska, mutta se riippui veden pinnan korkeudesta. Kokeet aloitettiin 28.6., jolloin altaisiin laitettiin kokeissa käytetyt liuskat.

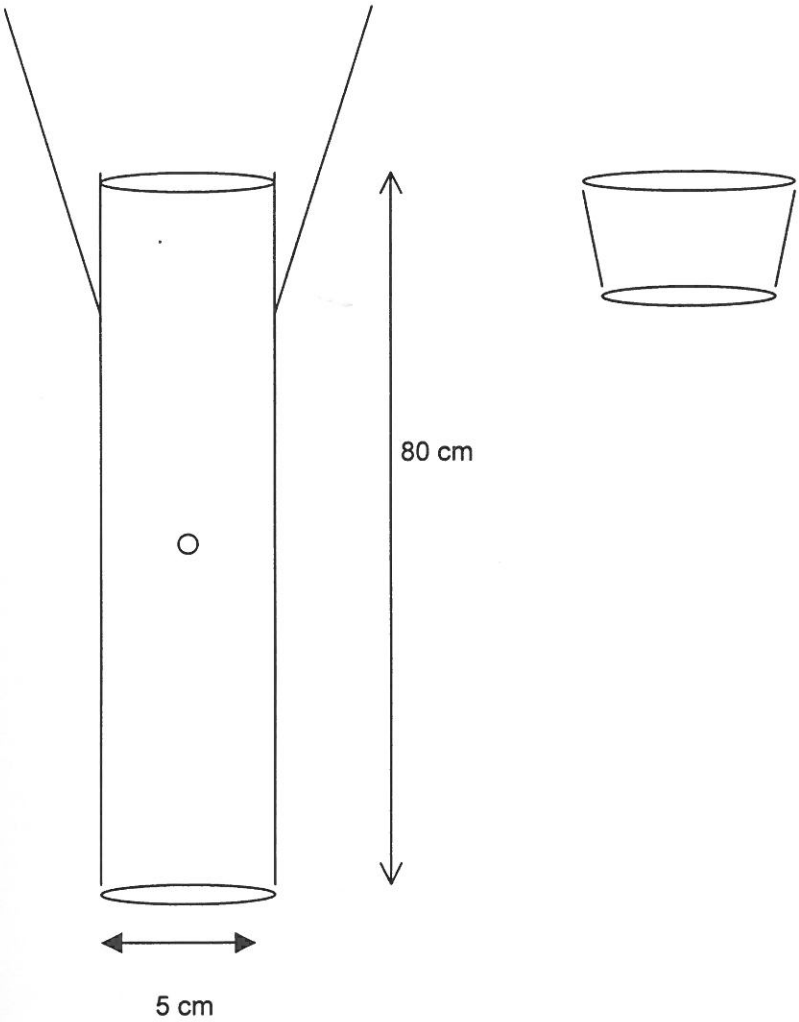
2.2. Viikoittainen biomassan kerääntyminen ja biomassamääritykset

Päällyslevästön viikoittaisen kerääntymisen selvittämiseksi jokaiseen altaaseen laitettiin yksi liuska kokeen alussa. Liuskaa inkuboitiin viikon ajan, jonka jälkeen liuska vaihdettiin. Ensimmäinen näytteenotto oli 5.7., minkä jälkeen se jatkui viikoittain aina kokeen loppuun saakka eli kuuden viikon ajan. Päällyslevästöjen biomassa muoviliuskoilla arvioitiin klorofyllin määrän perusteella ja tulokset ilmoitettiin pinta-alayksikköä kohden (µg chl a cm^{-2}). Liuskat nostettiin varovasti vedestä, vedessä ollut osa mitattiin ja liuska taitettiin 250ml:n purkkiin. Laboratoriossa päällyslevästö irroitettiin liuskasta raaputtamalla veitsellä ja huuhtelemalla tislatulla vedellä, ja kerätty biomassa laimennettiin 250 ml:aan tislattua vettä. Laimennoksesta suodatettiin osanäyte GF/C-suodattimelle, ja suodattimet pakastettiin myöhempää käsittelyä varten. Näytteet altaiden veden kasviplanktonin biomassan määrittämiseksi (µg chl a dm^{-3}) otettiin akryyliputkilla koko vesipatsaasta ja ne suodatettiin GF/C-suodattimille. Klorofyllianalyysissä käytettiin kuumauuttoa (12 min, 75 °C) ja liuottimena etanolia (7 ml) (SFS 5772). Uuton lopuksi näyteet

sekoitettiin kääntelemällä näyteputkia pystyakselinsa ympäri 100 kertaa. Määritys tehtiin spektrofotometrisesti (Jenway 6405) aallonpituudella 665 nm. Taustakorjausta varten absorbanssit määritetiin myös aallonpituudella 775 nm.

2.3. Ravinnedynamiikka

Ravinnedynamiikkakoetta varten kokeen alussa jokaiseen altaaseen laitettiin 4 liuskaa. Koe tehtiin koeviikoilla 3 ja 6 (19.-20.7. ja 10.-11.8.) sekä päivällä että yöllä, joten kumpanakin koeviikkona käytettiin 2 liuskaa. Koetta varten liuskat suljettiin läpinäkyvän akryyliputkien sisään (sisähalkaisija 5 cm, pituus 80 cm ja tilavuus 6.2 l), joiden keskiosassa oli parafilm-muovilla ja teipillä peitetty reikä (halkaisija 0.5 cm) (kuva 1). Putkien sulkemiseen käytettiin muovikorkkeja ja kumitulppia. Ne ripustettiin naruilla altaiden yläpuolelle. Liuskoja putkiin suljettaessa niiden yläpää kiinnitettiin puisen kepin toisessa päässä olleeseen koukkuun. Keppi ja liuska pujotettiin putkeen siten, että liuska liikkui mahdollisimman vähän veden alla. Liuskaan kiinnitetty hiekkapussi katkaistiin saksilla veden alla ja putken alapää suljettiin muovikorkilla ja yläpää kumikorkilla niin, että putkeen ei jäänyt ilmaa. Liuskan ilmassa ollut osa jäi korkin ja putken väliin pitäen näin liuskan pystysuorassa putken sisällä. Veden sekoittamiseksi putki käännettiin kerran ympäri, minkä jälkeen siitä otettiin näyte epäorgaanisen hiilen (DIC) pitoisuuden määrittämiseksi. Tämän jälkeen putki laskettiin takaisin altaaseen ja kiinnitettiin altaiden yläpuoliseen naruun. Kontrolliputki, jossa ei ollut liuskaa, sijoitettiin koeputken viereen. Myös siitä otettiin näyte alkutilanteen DIC-konsentraation selvittämiseksi. Lopuksi mitattiin altaiden veden happikonsentraatio Marvet AJ90 - mittarilla ja otettiin näytteet aloitushetken ravinnetilanteen selvittämiseksi (NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, kokonaistyppi, kokonaisfosfori, DIC) sekä pH-näyte. Kokoomanäytteet pinnasta pohjaan otettiin akryyliputkilla. Ikubointiputkien annettiin olla vedessä 8 h. Päiväkoe aloitettiin klo 9.00 ja yökoe klo 23.00.



Kuva 1. Inkubointiputki ja sen sulkemisessa käytetty kumikorkki.

DIC määritettiin Easy Quant 90 hiilianalysaattorilla. Veden pH mitattiin Mettler Delta 340 – mittarilla. Liukoisten ravinteiden määritystä varten näyteet suodatettiin ennen mittausta lasikuitusuodattimien (GF/C) läpi. Veden totaalitypen ja totaalifosforin näytteet hapetettiin ennen mittausta. Ennen analysointia kaikki näytteet suodatettiin lasikuitumembraanien (0,2 µm, Millipore) läpi. Näytteet analysointiin automaattisella ravinneanalysaattorilla spektrofotometrisesti (Lachat). Menetelmät eri ravinnefraktioille olivat seuraavat: Totaalifosfori, SFS 3026; totaalityppi, SFS 3031; fosfaattifosfori SFS 3025; nitraattityppi, SFS 3030; ammoniumtyppi, SFS 3032. Ravinneanalysaattoria käytti laborantti Marianne Lundqvist. Inkuboinnin päätyttyä putket nostettiin vedestä ja DIC - näytteet otettiin välittömästi kuten yllä. Putkien veden

happikonsentraatio määritettiin DIC - näytteenoton jälkeen työntämällä happimittarin anturi (Marvet AJ90) putken yläosasta putken sisään. Tämän jälkeen putket suljettiin ja kuljetettiin peitettyinä laboratorioon, jossa vedestä otettiin vesikemianäytteet (NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, N-tot, P-tot, pH). Liuskojen päällyslevästö irrotettiin ja klorofyllianalyysit tehtiin kuten aiemmin on selitetty.

2.4. Tilastolliset menetelmät

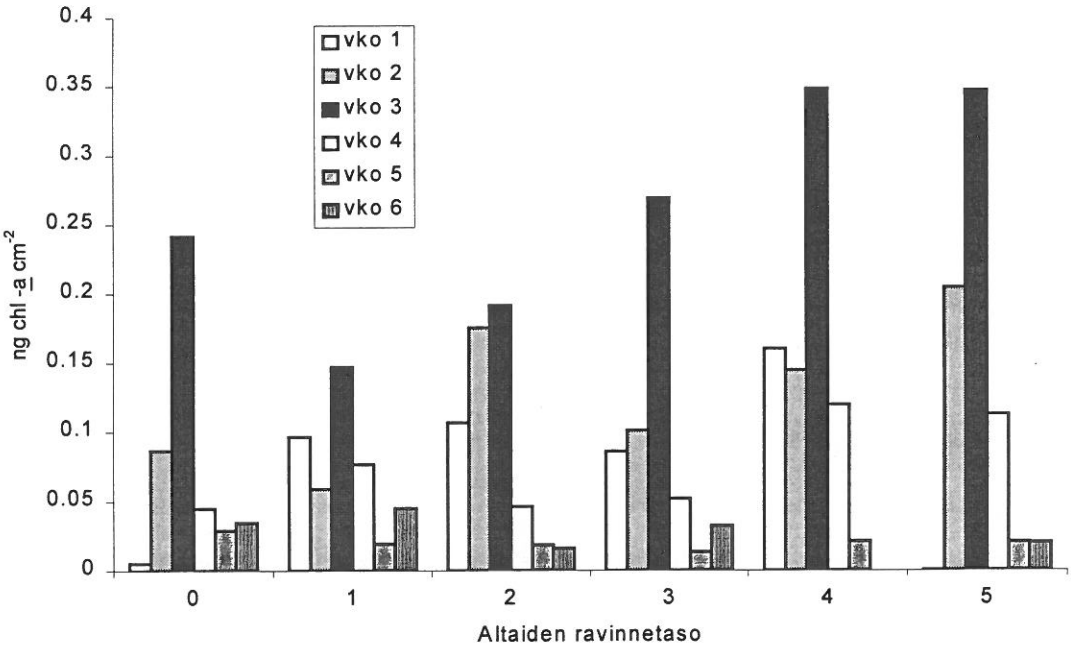
Päällyslevästön aiheuttama muutos arvioitiin laskemalla ravinnepitoisuuksista erotukset alkutilanne - liuskaton putki (a) ja alkutilanne - liuskallinen putki (b). Päällyslevästön vaikutus saadaan erotuksesta a - b. Tilastollisessa analyysissä käytetyt ravinnetasot laskettiin altaiden ravinnelisäysten mukaan. Arvoille tehtiin seuraavat muutokset: Kontrollialtaista mitattuja fosfaatin ja nitraatin keskiarvoja käytettiin ravinnetason nolla-arvona. Tähän arvoon lisättiin kunkin altaan ravinnelisäys ja summiin tehtiin $\log_{10}$ - muunnos. Tämä siksi, että altaiden ravinnelisäykset eivät kasvaneet tasaisessa suhteessa.

Aineisto analysoitiin UNIX-ympäristön tilasto-ohjelmalla (R: A programming Environment for Data Analysis and Graphics) käyttäen GLM-menetelmää. Päällyslevästön aiheuttamiin muutoksiin eri ravinnefraktioissa ja happikonsentraatiossa sijoitettiin toisen asteen regressiokäyrä. Selittävänä muuttujana käytettiin altaiden ravinnelisäyksiä. Kunkin ravinteen kohdalla koeviikkojen 3 ja 6 regressiokäyrien tasoeroa verrattiin lineaarisella mallilla eli testattiin eri-ikäisten yhteisöjen ravinteiden käytön määrällistä eroavuutta. Regressiokäyrien muodon erilaisuuden selvittämiseksi aineistoja verrattiin varianssianalyysillä eli testattiin, käyttikö koeviikon 3 yhteisö joillakin ravinnetasoilla eri määriä ravinteita kuin koeviikon 6 yhteisö. Sekä päällyslevästöjen biomassojen viikoittaisen kehityksen että päällyslevästöjen ja kasviplanktonin tuloksia verrattiin samoilla menetelmillä.

3. TULOKSET

3.1. Biomassan viikkokertymä

Biomassan viikkokertymä oli suurin kokeen kolmannella viikolla (kuva 2). Ero oli merkitsevästi suurempi suhteessa jokaisena muuna viikkona kehittyneeseen biomassaan (taulukko 2). Myös kahtena ensimmäisenä koeviikkona kertyi merkitsevästi enemmän biomassaa kuin viimeisinä koeviikkoina (viikot 5 ja 6) (taulukko 2). Ravinnetasot eivät selittäneet biomassan viikkokertymistä, vaan suurimmillaankin selitysaste oli vain 0,332 (taulukko 3).



Kuva 2. Viikossa kehittyneiden päällysleväyhteisöjen biomassat koeviikkoina eri ravinnetasoissa. Kunkin ravinnetason arvot on laskettu keskiarvona kahdesta saman ravinnetason altaasta.

Taulukko 2. Merkitsevyystasot verrattaessa eri koeviikkojen aikana kehittyneitä päällyslevästöjen biomassoja. Merkitsevyystasojen koodit : < ***0,001***; < *0,01*; < *0,05*; > 0,05 (arvot laskettu aineistosta, jossa kaikki altaat käsitelty erillisinä).

Vko	1	2	3	4	5	6
1		0.519	*0.004*	0.283	*0.002*	*0.008*
2	0.519		*0.009*	0.097	***0.0007***	*0.002*
3	0.004	0.009		0.0004	***0.00001***	***0.000115***
4	0.282	0.097	***0.0004***		*0.008*	*0.025*
5	*0.003*	***0.0007***	***0.00001***	*0.008*		0.665
6	*0.008*	*0.002*	***0.0001***	*0.025*	0.665	

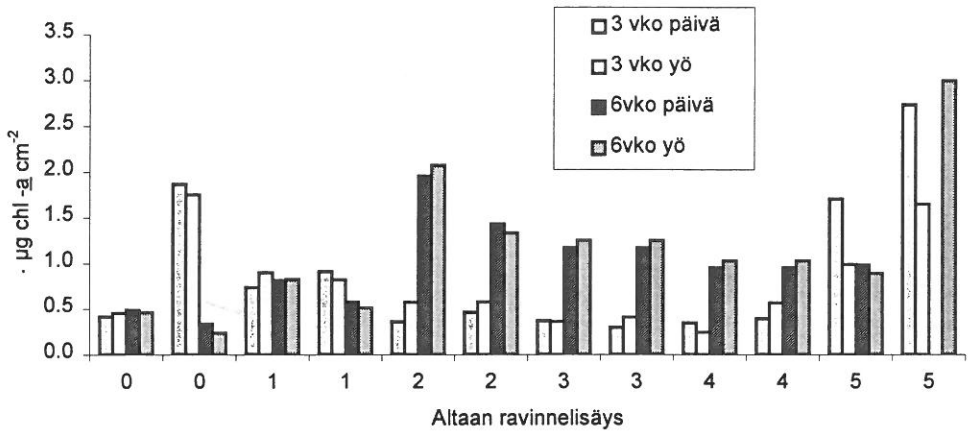
Taulukko 3. Ravinnelisäysten selitysaste biomassan viikkokehityksessä (arvot laskettu aineistosta, jossa kaikki altaat käsitelty erillisinä)

	Viikko 1	viikko 2	Viikko 3	Viikko4	Viikko 5	Viikko6
R^2	0.332	0.201	0.158	0.156	0.007	0.106

3.2. Ravinnedynamiikka

3.2.1 Eri-ikäisten yhteisöjen biomassat

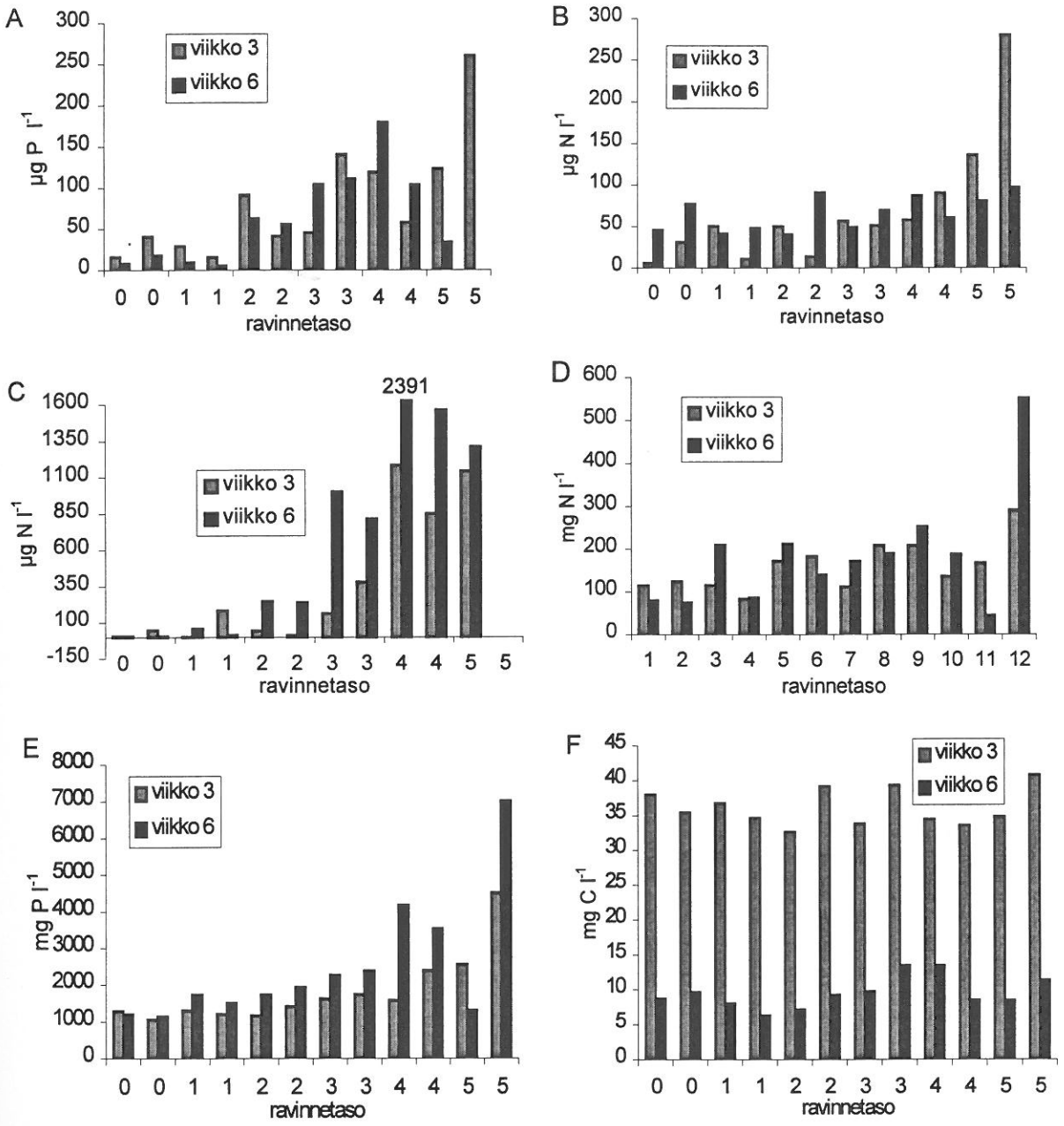
Ravinnedynamiikkakokeessa käytettyjen 3 ja 6 viikkoa vanhojen päällysleväyhteisöjen biomassat vaihtelivat välillä 0,3 – 3 µg chl -a cm^{-2}. Eri-ikäisten yhteisöjen biomassojen välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja (t = 0,30) (liite 4). Testitulos eri ravinnetasoilla käytetyistä ravinteista (Pr (>F) = 0,0402) kuitenkin osoittaa, että koeviikon 6 päällysleväyhteisöjen biomassat olivat keskisuurilla ravinnelisäyksillä merkitsevästi suurempia kuin viikon 3. Koeviikkoina käytetyt rinnakkaiset päivä- ja yöliuskat keräsivät kaikilla ravinnetasoilla lähes saman määrän biomassaa (kuva 3). Ravinnelisäyksien vaikutus biomassoihin ei ollut merkittävä, vaan selitysasteet olivat molempina koekertoina matalat (päiväliuskat: R^2 (koeviikko 3) = 0,34; R^2 (koeviikko 6) = 0,36).



Kuva 3. Ravinnedynamiikkakokeessa koeviikoilla 3 ja 6 käytettyjen leväyhteisöjen biomassat (µg chl -a cm^{-2}).

3.2.2. Päiväaikainen ravinteidenotto

Nitraattitypen pitoisuudet olivat varsinkin suurien ravinnelisäysaltaiden vedessä huomattavasti ammoniumtyppeä ja fosfaattia korkeammat molempien koepäivien alussa, mutta samankin ravinnelisäyksen saaneiden altaiden välillä oli huomattavia eroja (kuva 4). Ravinnelisäykset selittivät liukoisten ravinteiden määrästä altaissa koeviikolla 3 selvästi suuremman osan kuin koeviikkolla 6 (taulukko 4). Kumpanakaan koepäivänä ravinnelisäykset eivät selittäneet muutoksia DIC:ssä (taulukko 4). Viikon 3 kokeessa DIC:n määrä oli huomattavasti korkeampi kuin viikon 6 kokeessa; tasoeroa kuvaavat keskiarvot 36,1 ± 2,63 mg l^{-1} (viikko 3) ja 9,5 ± 2,24 mg l^{-1} (viikko 6) (kuva 4). Totaalitypen pitoisuudet olivat altaissa viikolla 6 viikkoa 3 korkeammat (kuva 4). Totaalifosforin kohdalla ei pitoisuuksissa ollut merkittäviä eroja koepäivien välillä (kuva 4). Ravinnelisäykset selittivät 40 – 50 % totaalifosforin vaihtelusta ja 27 – 40 % totaalitypen vaihtelusta (taulukko 4). Mitatut pH:n aloitusarvot vaihtelivat molempien päiväkokeiden alussa 8-9.4 välissä. Loppuarvot vaihtelivat viikolla 3 välillä 7,98 – 9,04 ja viikolla 6 välillä 8,11 – 9,16. Myöskään pH:n eroja eri ravinnelisäysaltaissa ei pysty selittämään ravinnelisäyksillä (viikko 3, R^2 = 0,29, viikko 6, R^2 = 0,159).



Kuva 4. Fosfaatin (µg P l^{-1}) (A), ammoniumin (µg N l^{-1}) (B), nitraatin (µg N l^{-1}) (C), totaalitypen (mg N l^{-1}) (D), totaalifosforin (mg P l^{-1}) (E) ja liuenneen epäorgaanisen hiilen DIC) (mg C l^{-1}) (F) pitoisuudet eri ravinnelisäyksillä altaiden vedessä koeviikkojen 3 ja 6 viikon päiväkokeiden alussa.

Taulukko 4. Ravinnelisäysten selittämä osa (R^2) liukoisten ravinteiden alkupitoisuuksien vaihtelusta päiväkokeessa.

	Viikko 3	Viikko 6
NO_3^-	0,771	0,586
NH_4^+	0,736	0,349
PO_4^{3-}	0,514	0,376
DIC	0,0003	0,105
Tot – P	0,514	0,400
Tot –N	0,409	0,265

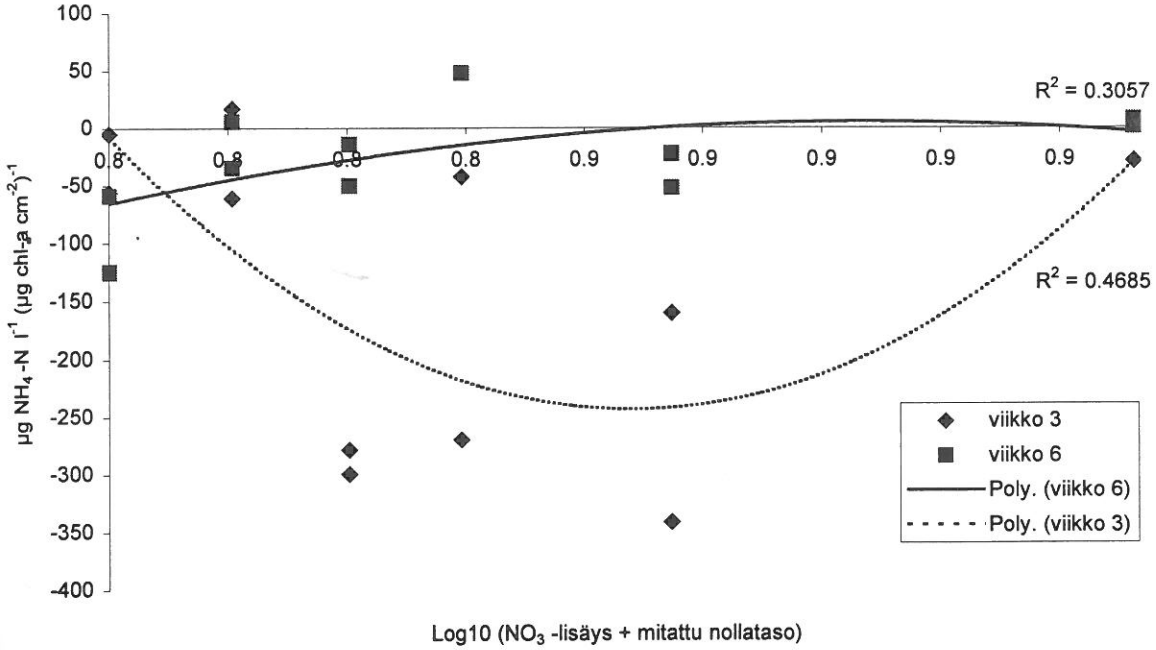
Viikon 3 päällyslevästöt vähensivät putkien vesien ammoniumtypen, nitraattitypen ja epäorgaanisen hiilen pitoisuuksia enemmän kuin viikon 6 päällyslevästöt. Ero sidotun ravinteen määrässä koepäivien välillä oli kuitenkin merkitsevä ainoastaan NH_4^+:n osalta (t = 0,024). Ero oli suurimmillaan keskisuurilla ravinnelisäyksillä (F = 0,03) (taulukko 5) (kuva 5).

Taulukko 5. Viikoilla 3 ja 6 tehtyjen putkikokeiden päiväinkuboinnin tulokset. Selitykset: R2 vko 3 ja vko 6 = ravinnelisäysten selittämä osa (R^2) leväyhteisön aiheuttamista muutoksista vedessä. F 3 & 6 vko = testitulos regressiokäyrien muodon eroavaisuudesta. t 3 & 6 vko = testitulos regressiokäyrien tasoerosta.

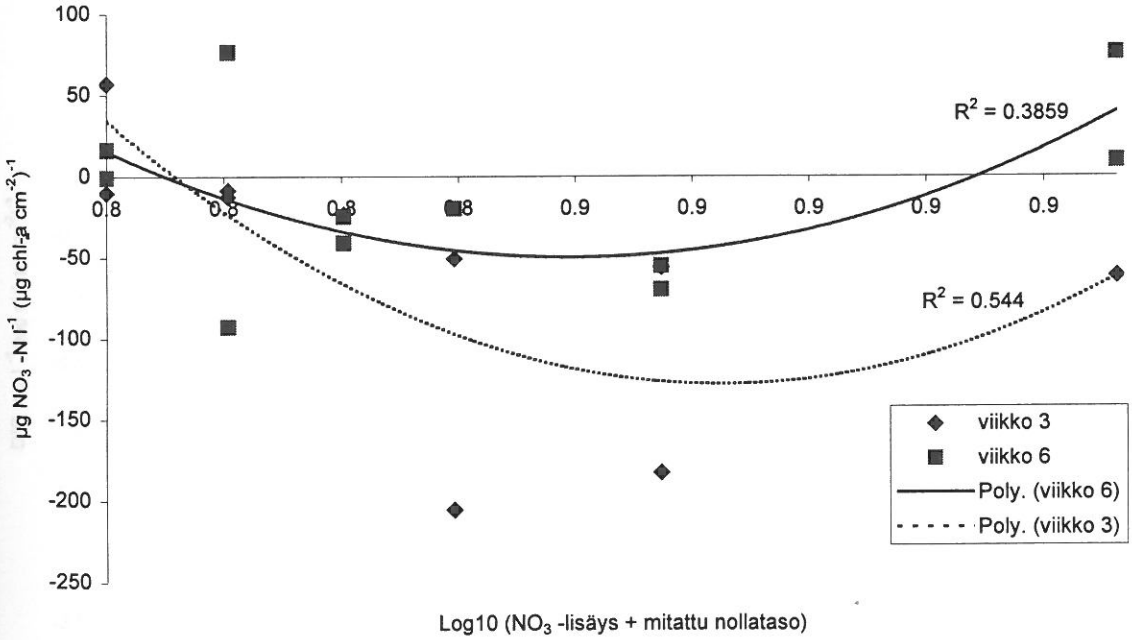
	R2 vko 3.	R2 vko. 6.	F 3 & 6 vko	Merkitsevä	t 3 & 6 vko	Merkitsevä
NO_3^-	0,544	0,3302	0,2707		0,13472	
NH_4^+	0,4685	0,3187	0,03069	*	0,02386	*
PO_4^{3-}	0,0447	0,3278	0,6166		0,821	
DIC	0,4005	0,0273	0,4827		0,1432	
O_2	0,3116	0,2633	0,9512		0,326	

Koeviikolla 3 päällyslevästöt vähensivät koeviikon 6 päällyslevästöjä enemmän veden nitraattitypen määrää. Ero oli suurin keskisuurilla ja suurimmalla ravinnelisäyksellä (kuva 6). Tilastollisia merkitsevyyksiä koepäivien välillä ei kuitenkaan ollut (taulukko 5). Päällysleväyhteisön iällä ei näyttänyt olevan vaikutusta veden fosfaattipitoisuuden muutoksiin. Regressiosuorien muodossakaan ei fosfaatin kohdalla ollut eroavuutta (kuva 7) (taulukko 5). Myöskään sidotun epäorgaanisen hiilen määrissä ei koepäivien välillä ollut eroavuutta, mutta suurilla ravinnelisäyksillä viikon 3 päällysleväyhteisö vähensi vanhempaa

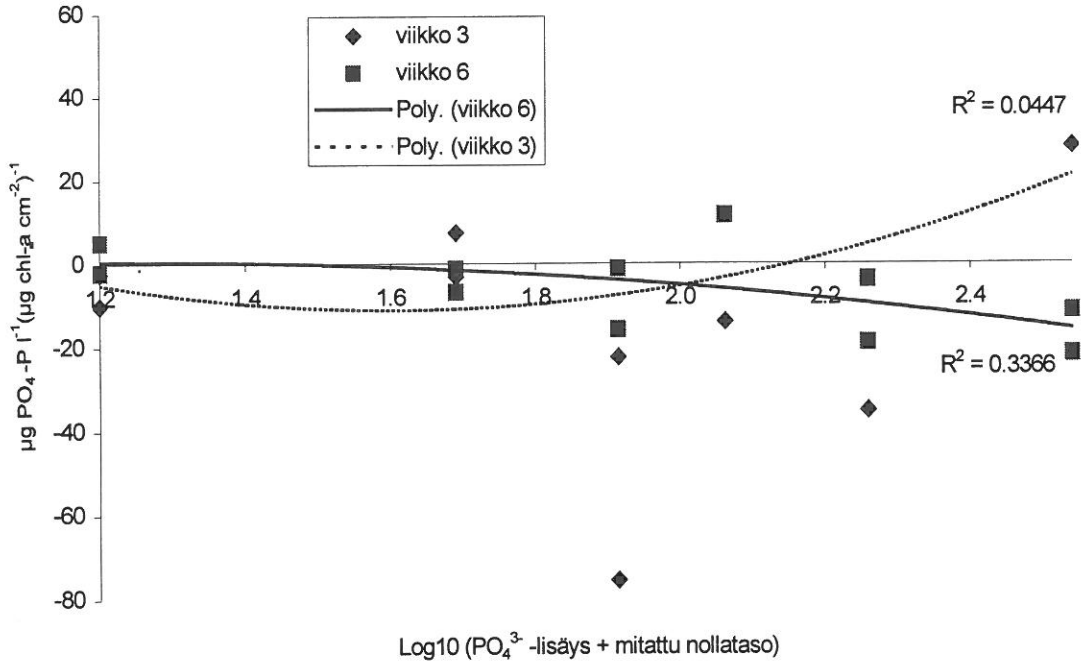
yhteisöä enemmän veden DIC:n määrää (kuva 8). Kuitenkaan koepäivien regressiosuorien muodot eivät olleet merkitsevästi erilaisia (taulukko 5), eli ravinteisuudella ei ollut merkitystä eri-ikäisten yhteisöjen DIC:n käyttöön. Sama pätee myös hapen tuottoon (kuva 9) (taulukko 4). Viikolla 6 päällyslevästöjen aiheuttamat muutokset happikonsentraatiossa olivat yleisesti kaikilla ravinteilla ja ravinnetasoilla vähäisiä. Viikolla 3 päällyslevästön vaikutus putkien veteen oli suurin keskisuurilla ja suurilla ravinnelisäyksillä. Päällyslevästö lisäsi putkien veden kokonaisfosforin määrää merkitsevästi enemmän viikon 3 inkuboinnissa (t = 0,0161) kuin viikon 6 kokeessa. Typen osalta merkitseviä eroja ei ollut (liite 1). Ravinnelisäykset eivät selittäneet muutoksia käytetyissä liukoisten ravinteiden määrissä ja hapen tuotossa. Selitysasteet olivat kuitenkin viikon 3 kokeessa suurempia muiden muuttujien paitsi fosfaatin osalta (taulukko 5). Viikon 6 kokeessa selitysasteet olivat huomattavasti pienemmät kuin viikolla 3. Ravinnelisäykset eivät selittäneet pH –arvojen muutoksia kumpanakaan koekertana; R^2–arvot toisen asteen regressiosuorissa vaihtelivat välillä 0,27 – 0,39. Liuskallisissa putkissa veden pH nousi inkuboinnin aikana ja vaihteli välillä 8,4 – 9,4 molempina koepäivinä, kun kontrolliputkissa pH vaihteli välillä 7,8 - 9 (viikko 3) ja 8,1 – 9,3 (viikko 6).



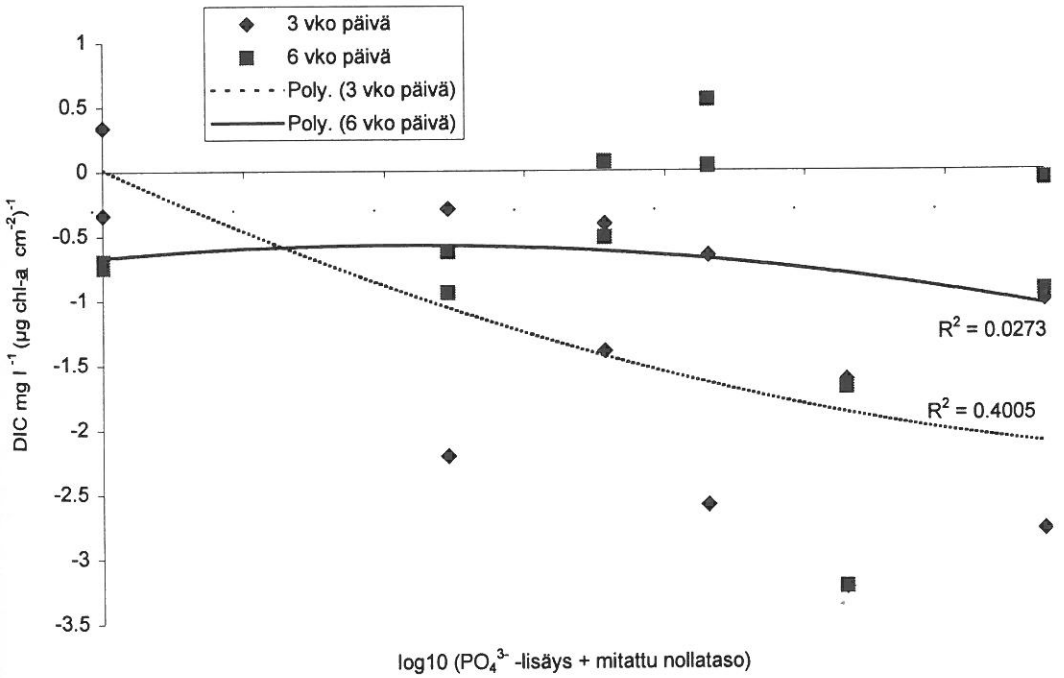
Kuva 5. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön päiväaikainen vaikutus veden ammoniumin määrään [µg l^{-1} NH_4 –N (µg chl –a cm^{-2})$^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



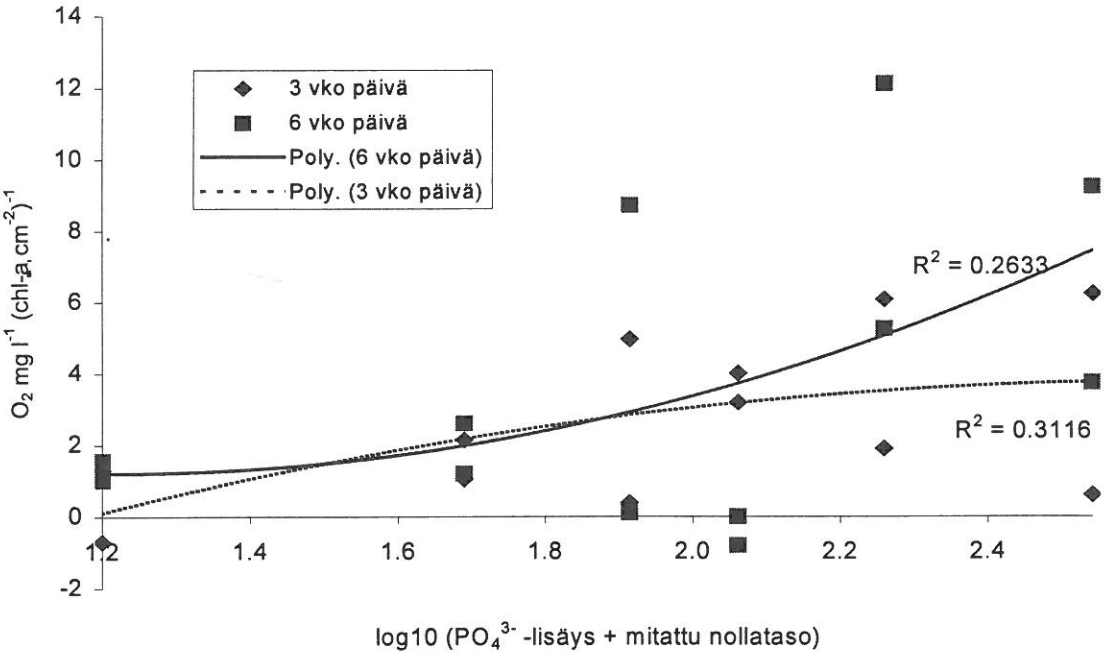
Kuva 6. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön päiväaikainen vaikutus veden nitraatin määrään [µg l^{-1} NO_3 –N (µg chl –a cm^{-2})$^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



Kuva 7. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön päiväaikainen vaikutus veden fosfaatin määrään [µg l^{-1} PO_4 –P (µg chl –a $cm^{-2})^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



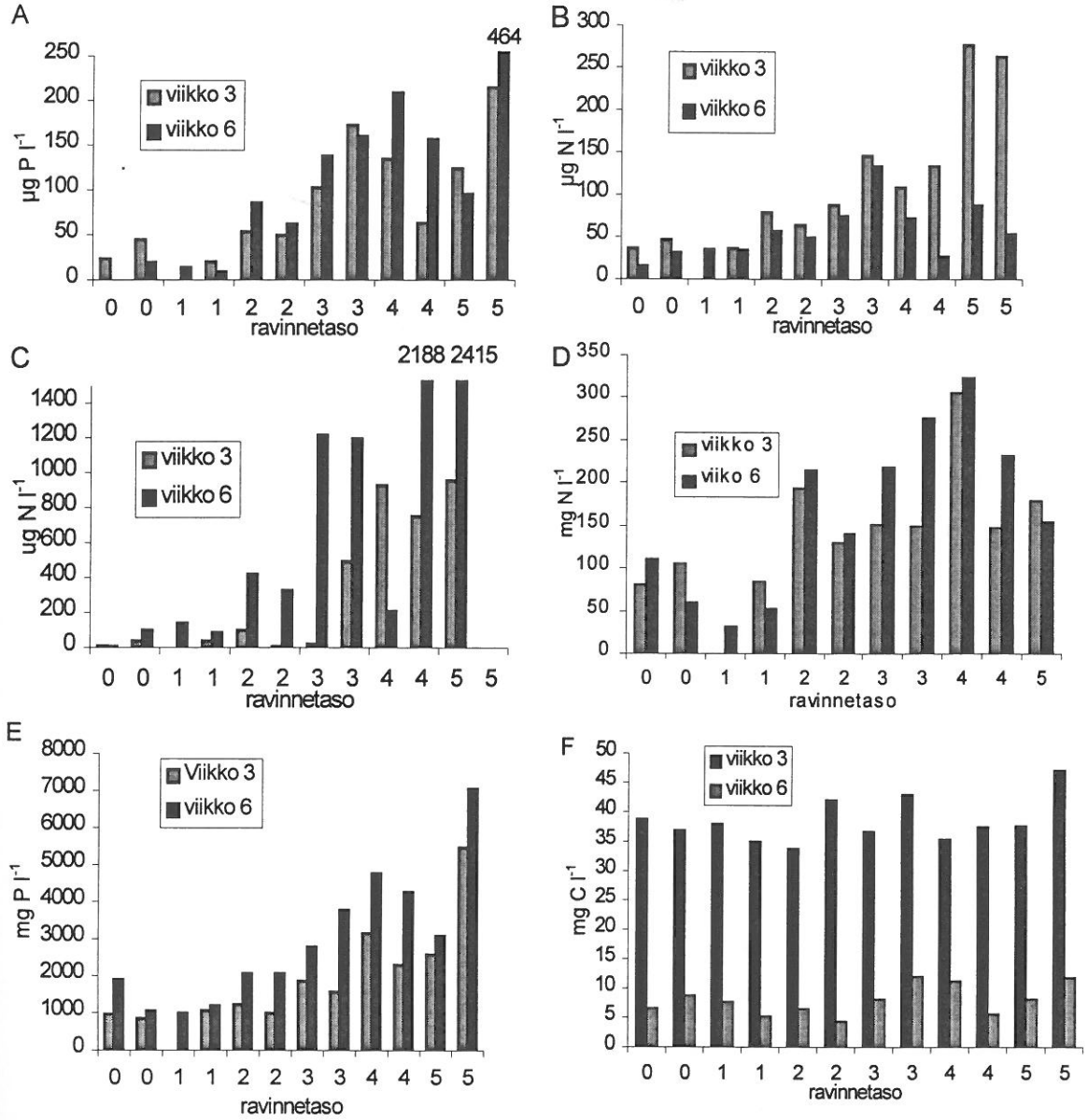
Kuva 8. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön päiväaikainen vaikutus veden liuenneen epäorgaanisen hiilen määrään [µg l^{-1} (µg chl –a $cm^{-2})^{1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



Kuva 9. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön päiväaikainen vaikutus veden hapen määrään [µg l^{-1} (µg chl –a $cm^{-2})^{-1}$]eri ravinnetasoissa [log10 (PO_4^{3-} -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.

3.2.3. Yöllinen ravinteidenotto

Yökokeissa ravinnelisäysten vaikutus näkyi altaiden veden ravinnepitoisuuksissa kokeiden alussa. Nitraattitypen pitoisuus kasvoi ravinnelisäysten vuoksi eniten, ja se oli varsinkin suurten lisäysten altaissa huomattavasti fosforia ja ammoniumtyppeä korkeampi (kuva 10). Ravinnelisäykset selittivät liukoisten ravinteiden muutoksista viikon 3 kokeessa enemmän kuin viikon 6 kokeessa (taulukko 6). Ravinnelisäykset eivät selittäneet DIC - pitoisuuksien muutoksia (taulukko 6). Samoin kuin päiväkokeessa, myös yökokeessa viikolla 3 altaiden vedessä oli huomattavasti enemmän epäorgaanista liuennettu hiiltä kuin viikolla 6. DIC:n määrä oli viikolla 3 keskimäärin 38,4 mg /l ± 3,8 ja viikolla 6 7,95 ± 2,56 mg / l (kuva 10). Ravinnelisäykset eivät selittäneet DIC:ssä tapahtuneita muutoksia (taulukko 6). Totaalitypen määrä oli keskimäärin kymmenkertainen verrattuna totaalifosforiin (kuva 10). Totaaliravinteiden vaihtelusta ravinnelisäykset selittivät fosforin osalta n. 60 % molempina koekertoina ja typen osalta n. 50% (taulukko 6). Ravinnelisäyksillä ei ollut vaikutusta veden pH-arvoihin, sillä selitysasteet olivat vain 0,018 (viikko 3, yö) ja 0,05 (viikko 6, yö). pH-arvot vaihtelivat viikon 3 alussa välillä 7,2 – 8,4 ja viikon 6 alussa välillä 8,03 – 10,3 .



Kuva 10. Fosfaatin (µg P l^{-1}) (A), ammoniumin (µg N l^{-1}) (B), nitraatin (µg N l^{-1}) (C), totaalitypen (mg N l^{-1}) (D), totaalifosforin (mg P l^{-1}) (E) ja liuenneen epäorgaanisen hiilen (DIC) (mg C l^{-1}) (F) pitoisuudet eri ravinnelisäyksillä altaiden vedessä koeviikkojen 3 ja 6 viikon yökokeiden alussa.

Taulukko 6. Ravinnelisäysten selittämä osa (R^2) liukoisten ravinteiden alkupitoisuuksien vaihtelusta yökokeessa.

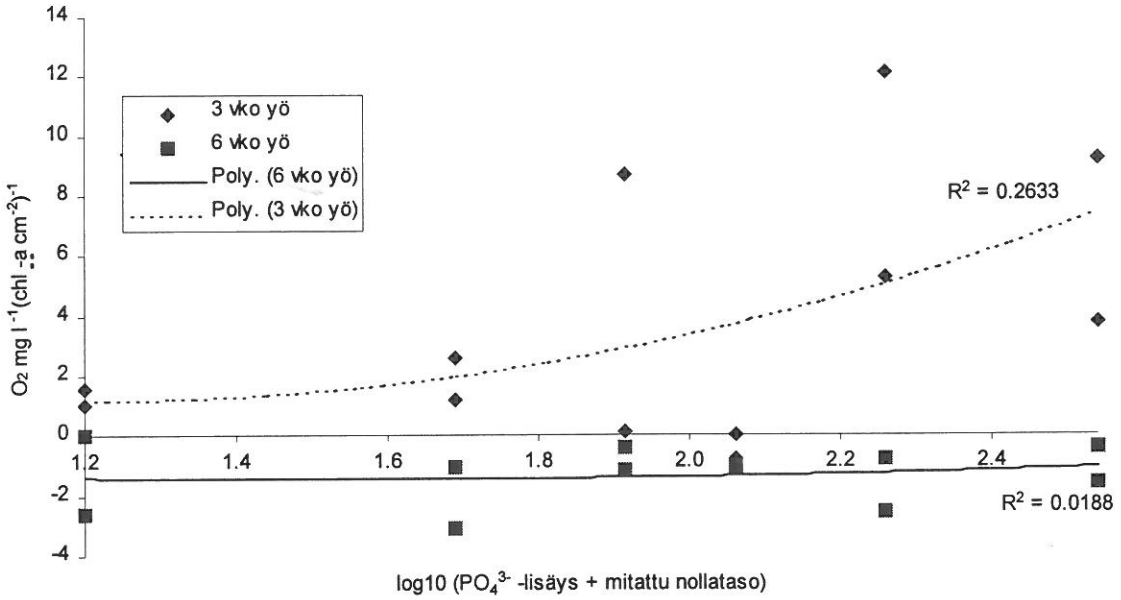
	3 vko yö	6 vko yö
NO_3^-	0,707	0,682
NH_4^+	0,918	0,157
PO_4^{3-}	0,537	0,53
DIC	0,094	0,131
Tot – P	0,560	0,590
Tot –N	0,510	0,446

Viikon 3 yöinkubointien tuloksiin pitää suhtautua varauksella, sillä aurinko oli ehtinyt jo nousta, kun viimeiset putket saatiin nostettua ylös altaista. Tämän vaikutus oli selvä ainakin DIC:n, hapen ja pH:n muutoksissa. Päällyslevästön vaikutus yölliseen hapen määrään oli viikolla 6 negatiivinen, kun viikolla 3 hapenmäärä kasvoi (kuva 11) (taulukko 7). Ero koeöiden välillä oli merkitsevä. Sen sijaan liuennutta epäorgaanista hiiltä vapautui viikon 6 kokeessa, kun taas viikon 3 kokeessa päällyslevästö vähensi myös yöllä DIC:n määrää putkien vedessä (kuva 12). Myös DIC:n kohdalla viikkojen välinen ero oli merkitsevä (taulukko 7). Veden nitraattitypen, ammoniumtypen ja fosfaatin pitoisuuksiin kasvustojen iällä ei näyttänyt olevan vaikutusta (kuvat 13-15). Regressiokäyrien muodot koeöiden välillä olivat merkitsevästi erilaisia ainoastaan nitraattitypen kohdalla (taulukko 7), viikon 3 kokeessa suurimmalla ravinnelisäyksellä nitraattia vapautui lähes 300 µg l^{-1} (chl a cm^{-2})$^{-1}$. Vastaavasti viikon 6 kokeessa päällyslevästö vähensi nitraattitypen määrää (kuva 13). Ammoniumtypen ja fosfaatin regressiokäyrät koeöinä olivat samankaltaisia, ja käytetyn ravinteen määrässä tapahtuneet muutokset olivat vähäisiä koeöiden välillä (kuvat 14 ja 15).

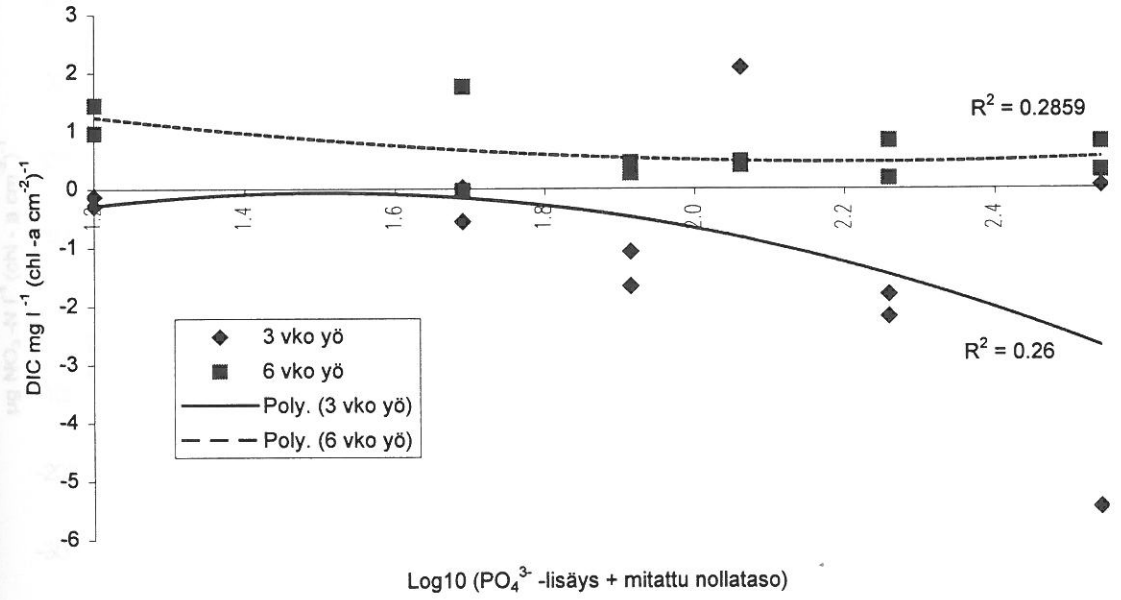
Taulukko 7. Viikoilla 3 ja 6 tehtyjen putkikokeiden yöinkuboinnin tulokset. Selitykset: R2 vko 3 ja vko 6 = ravinnelisäysten selittämä osa (R^2) leväyhteisön aiheuttamista muutoksista vedessä. F 3 & 6 vko = testitulos regressiokäyrien muodon eroavaisuudesta. t 3 & 6 vko = testitulos regressiokäyrien tasoerosta.

	R2 vko 3.	R2 vko. 6.	F 3 & 6 vko	Merkitsevä	t 3 & 6 vko	Merkitsevä
NO_3^-	0,7093	0,4537	0,0005651	***	0,2737	
NH_4^+	0,0757	0,276	0,5046		0,762	
PO_4^{3-}	0,0608	0,6869	0,2423		0,394	
DIC	0,26	0,2859	0.3446		0.00691	**
O_2	0,2795	0,0173	0,37		0.000178	***

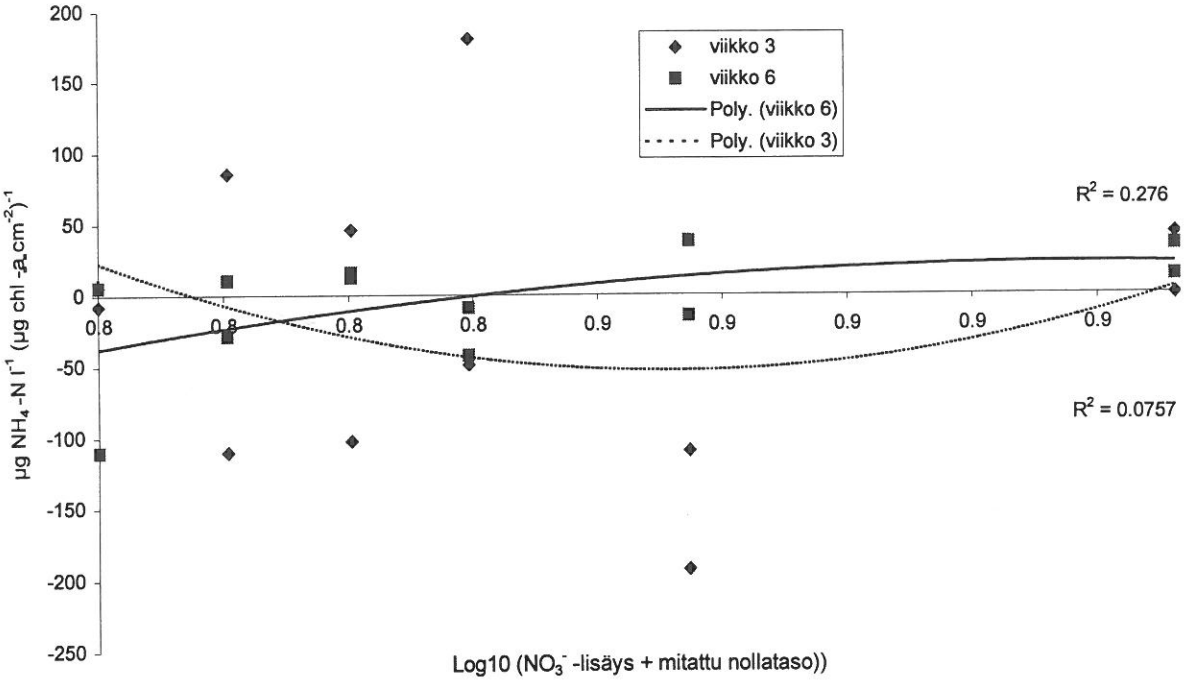
Yöinkuboinneissa nuori leväyhteisö otti typpeä, sillä kokonaistypen määrä väheni merkitsevästi enemmän viikon 3 kokeessa kuin viikon 6 kokeessa (Pr (>| t |) = 0,000476). Viikolla 6 päällyslevästön aiheuttama muutos oli vähäinen. Kokonaisfosforin osalta merkitseviä eroja koeöiden välillä ei ollut. Ravinnelisäykset eivät selittäneet pH -arvojen muutoksia (R^2 –arvot välillä 0,02 – 0,33). pH - arvot olivat korkeammat viikolla 6 kuin viikolla 3. Viikolla 6 ne vaihtelivat välillä 7,98 – 10,18 ja laskivat liuskallisissa putkissa pH-arvoihin 8,02 – 9,71 ja liuskattomissa putkissa arvoihin 8,09 – 9,9. Viikolla 3 pH-arvot vaihtelivat kokeen alussa välillä 7,19 – 8,41 ja nousivat yön aikana eniten liuskallisissa putkissa arvoihin 8,2 - 8,98 ja liuskattomissa arvoihin 7,41 – 8,53. Viikolla 3 tapahtunut pH-arvojen nousu viittaa fotosynteesin alkaneen ennen kokeen päättymistä.



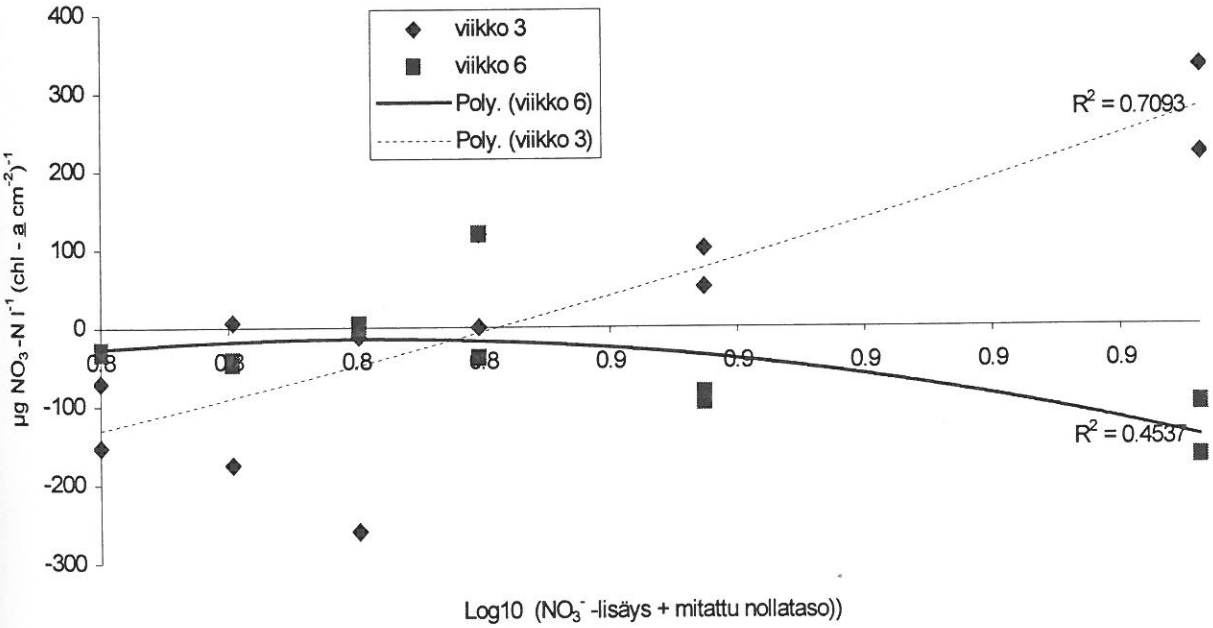
Kuva 11. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön yöaikainen vaikutus veden hapen määrään [mg l^{-1} (µg chl –a $cm^{-2})^{-1}$]eri ravinnetasoissa [log 10(PO_4^{3-} -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



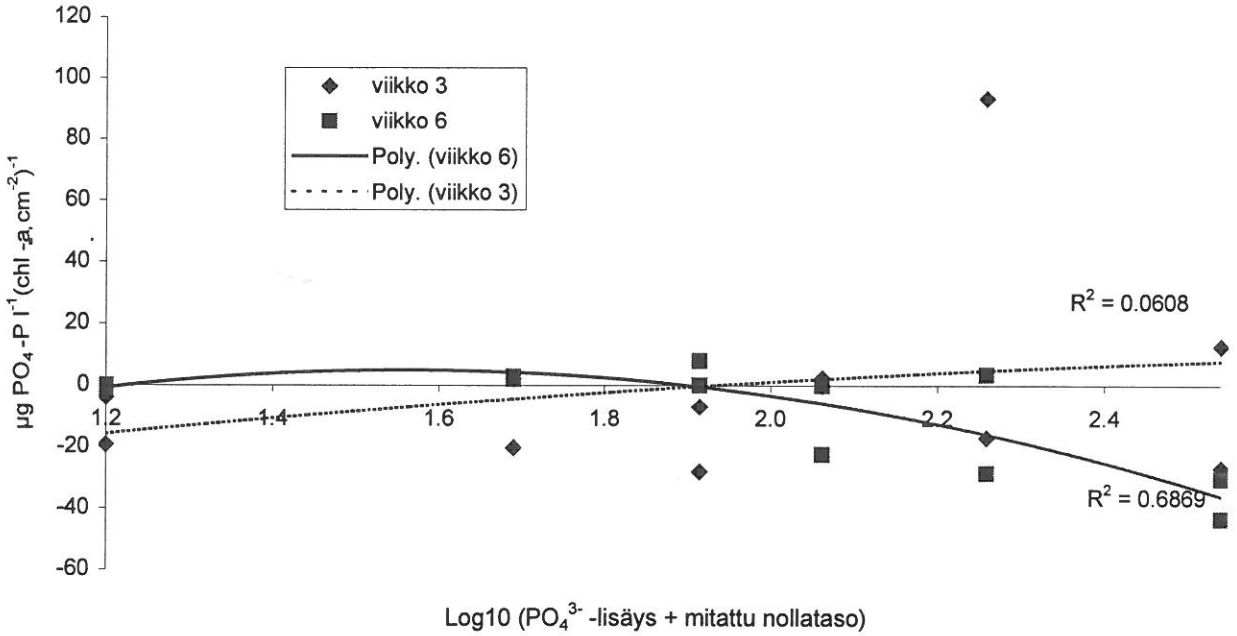
Kuva 12. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön yöaikainen vaikutus veden liuenneen epäorgaanisen hiilen määrään [mg l^{-1} (µg chl –a $cm^{-2})^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log 10(PO_4^{3-} -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



Kuva 13. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön yöaikainen vaikutus veden ammoniumin määrään [µg l^{-1} NH_4 –N (µg chl –a cm^{-2})$^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



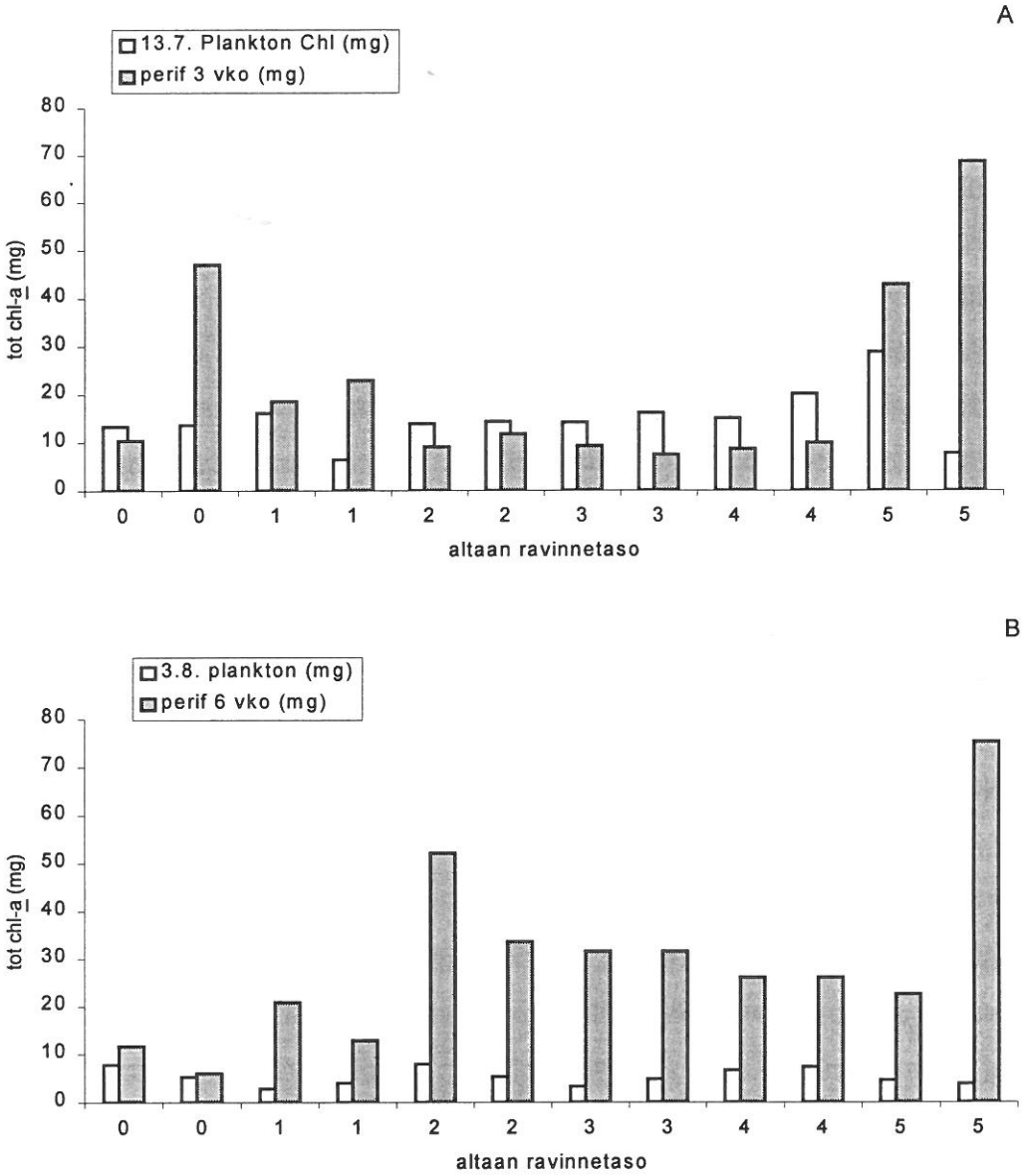
Kuva 14. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön yöaikainen vaikutus veden nitraatin määrään [µg l^{-1} NO_3 -N (µg chl –a cm^{-2})$^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log-muunnos (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.



Kuva 15. Kolmen ja kuuden viikon ikäisen päällyslevästön yöaikainen vaikutus veden fosfaatin määrään [µg l^{-1} PO_4 –P (µg chl –a $cm^{-2})^{-1}$] eri ravinnetasoissa [log10 (NO_3 -lisäys + mitattu nollataso)]. Kuvassa on esitetty myös toisen asteen regressiokäyrät (poly.) molemmille koepäiville ja niiden selitysasteet.

3.3. Altaiden kasviplanktonin ja seinämien päällysleväyhteisöjen biomassat

Altaiden reunojen päällysleväyhteisöjen kokonaisbiomassat olivat sekä kolmannella että kuudennella koeviikolla kasviplanktonin vastaavia suuremmat (33% suurempi viikolla 3 ja 82% suurempi viikolla 6) (kuva 16). Viikolla 3 ero kasviplanktonin ja päällyslevästöjen biomassojen välillä eri ravinnelisäysaltaissa ei ollut merkitsevä (F = 0,175) (liite 5). Viikolla 6 päällyslevästöjen biomassat olivat ravinnetasoilla merkitsevästi kasviplanktonin vastaavia suurempia (F = 0,000178) (liite 5).



Kuva 16. Altaiden kasviplanktonin (plankton) sekä seinämien päällysleväyhteisöjen (perif) biomassat (mg chl a) koeviikoilla 3 (A) ja 6 (B) eri ravinnelisäysaltaissa.

4. TULOSTEN TARKASTELU

4.1. Biomassan viikkokertyminen ja eri-ikäisten yhteisöjen biomassat

Päällyslevästöjen biomassakertymät kasvoivat kokeen alkupuolella ja saavuttivat huippunsa kolmantena koeviikkona, minkä jälkeen ne pienenivät. Myös muissa mesokosmoskokeissa päällyslevästöjen kehittyminen on ollut vastaavaa. Chen ym. (1997) tutkivat meressä olleiden mesokosmoksien pintaan kiinnittynyttä päällysleväyhteisöä ja totesivat, että seinämien päällyslevästöjen biomassat kasvoivat ekspotentaalisesti kokeen alussa ja saavuttivat maksiminsa 4 – 6 viikossa. Kanadassa eräässä pienessä järvessä tehdyssä tutkimuksessa varjostamattoman päällyslevästön biomassan muutokset olivat pieniä kokeen 9 viimeisenä viikkona, kun kolmena ensimmäisenä koeviikkona biomassan kasvu oli nopeaa (Bourassa & Cattaneo, 2000). Tosin tutkimuksissa, joissa päällyslevästön annetaan kehittyä pitkään, biomassan kasvuun alkavat heijastua myös sisäiset vuorovaikutukset, kuten kilpailu tilasta ja ravinteista (Roos, 1983; Hudon & Bourget, 1981). Kokeessani, jossa päällysleväyhteisöjä inkuboitiin viikon ajan kerrallaan, voidaan olettaa, että biomassan kehitykseen vaikuttivat eniten mesokosmoksissa kulloinkin vallinneet abioottiset olosuhteet, kuten valon ja ravinteiden määrä. Päällyslevästö kilpailee näistä resursseista kasviplanktonin, makrofyyttien ja irtokellujien kanssa (esim. Phillips, 1978; Cattaneo & Kalff, 1979; Hansson, 1988; Brönmark, 1989; Brönmark & Vermaat, 1998; Elster ym. 1995; Portielje & Roijackers, 1995; Brönmark & Vermaat, 1998).

Fosforin on todettu olevan sekä kasvi- että päällyslevästön kasvua rajoittava ravinne useimmissa järviekosysteemeissä (Dillon & Ridger, 1974; Riber & Wetzel, 1987; Bothwell, 1985; Hansson, 1988). Joissakin tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, varsinkin suurilla ravinnelisäyksillä, vain heikkoa riippuvuutta fosforimäärän ja päällyslevästön biomassan välillä (esim. Lalonde & Downing, 1991; Havens ym., 1999a; Mosisch

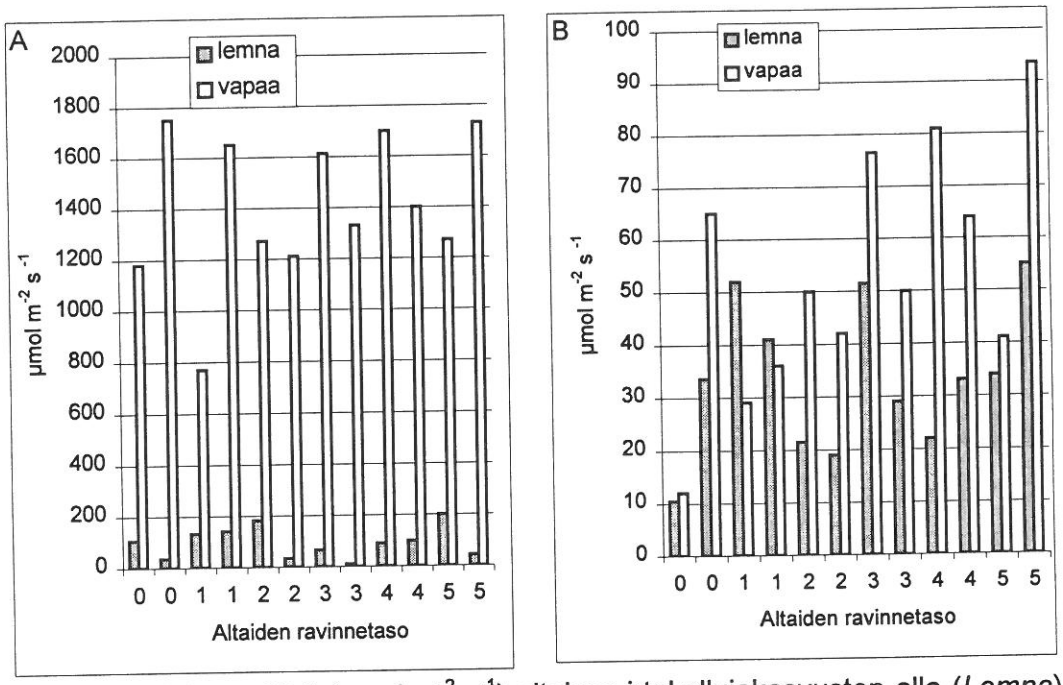
ym., 1999). Fosforin sijasta useissa mesokosmoskokeissa rajoittavana ravinteena on ollut typpi (Fairchild & Everett, 1988, Havens ym. ,1999 b, Mosisch ym., 1999) tai typpi ja fosfori yhdessä (Havens et al, 1999 a). Kokeen edetessä ravinnelisäysten vaikutus näkyi selvästi altaiden veden ravinnepitoisuuksissa, mutta vaikutus ei ilmennyt viikon aikana kehittyneiden päällyslevästöjen biomassoissa. Altaiden vesien fosfaatti- ja nitraattipitoisuudet olivat aina matalimmillaan kolmena ensimmäisenä koeviikkona ja ammoniumin pitoisuus altaissa oli vähäinen verrattuna nitraattiin. Kuitenkin kolmantena koeviikkona, jolloin kasvu oli nopeinta, sekä fosfaatin että nitraatin pitoisuudet olivat suurempia kuin edellisinä näytteenottopäivinä. Ammoniumin voi siis olettaa olleen se ravinne, joka todennäköisimmin rajoitti päällyslevästön kasvua tässä kokeessa.

Päällysleväyhteisön biomassa on herkkä veden ravinnepitoisuuksille (Cattaneo & Kalff, 1980; Goldman, 1981; Cattaneo, 1987), ja kilpailutilanteessa kasviplankton pystyy hyödyntämään sitä paremmin fosfaattia (esim. Hansson, 1988). Joidenkin tutkimusten mukaan ravinnetason noustessa kasviplankton runsastuu varjostaen päällyslevästöä ja vähentäen siten sen kasvua ja tuotantoa (esim. Phillips et al, 1978; Hansson, 1988). Kolmantena koeviikkona kehittyneiden päällyslevästöjen biomassat olivat kaikissa altaissa merkitsevästi suurempia verrattuna muina koeviikkoina kehittyneisiin biomassoihin. Kuitenkin myös altaiden veden planktonin klorofyllipitoisuus oli lähes kaikissa altaissa korkeimmillaan kyseisenä koeviikkona, joten kasviplanktonin varjostava vaikutus päällyslevästöön oli ilmeisesti vähäinen.

Koejakson aikana oli aurinkoinen ja lämmin jakso, joka alkoi 7. heinäkuuta ja päättyi 14. heinäkuuta (liite 7). Tämä todennäköisesti lisäsi päällyslevästön kasvua juuri kolmannella koeviikolla. Luultavasti altaiden päällyslevästön kasvuun on myös vaikuttanut jokaiseen koealtaaseen kokeen alusta lähtien kehittynyt *Lemnacae*-kasvusto. Kasvusto koostui pääasiassa ristilimaskasta (*Lemna trisulca*), ja se peitti elokuussa arviolta 75 – 90% altaiden veden pinnasta. Samana päivänä mittattiin

LAHDEN
KORKEAKOULUKIRJASTO

myös valon määrä (LiCor 4π anturi, tallennusyksikkönä LiCor LI-1400) veden pinnassa (4 cm syvyydeltä) ja pohjassa (n. 80 cm syvyydeltä) ristilimaskan alta sekä kirkkaan veden kohdasta. Ristilimaskan vaikutus veteen pääsevään valon määrään oli huomattava (kuva 17). Pinnassa valon määrä kasvuston alla oli vain n. 5 % kirkkaan veden kohtaan verrattuna. Pohjassa valonmäärä oli n. 5 – 10 % pinnan määrästä. Ero kirkaan kohdan ja kasvuston alta tehtyjen mittausten välillä oli pohjassa pintaa huomattavasti pienempi.



Kuva 17. Valon määrä (µmol m^{-2} s^{-1}) altaissa irtokellujakasvuston alla (*Lemna*) sekä kirkkaassa (vapaa) kohdassa (A) 4 cm syvyydellä ja (B) altaiden pohjalla.

Huonosti valaistuissa olosuhteissa biomassan kasvua ja tuotantoa rajoittavaksi tekijäksi nousee usein valo (Loeb ym., 1983; Martin ym., 1983; Muller, 1983; Wetzel, 1983, Bindow, 1987, Bourassa & Cattaneo, 2000), ja valorajoittuneisuus saattaa myös estää ravinnelisäysten vaikutuksen päällyslevästössä (Mcqueen ym., 1989). Ristilimaskan kaltaiset irtokellujat voivat ottaa suuria määriä ravinteita vedestä. Päivittäisiksi määriksi on arvioitu 2,0 – 4,7 kg ha^{-1} typpeä ja 0,15 – 1,6 kg ha^{-1} fosforia (Elster ym. 1995). Tässä kokeessa altaiden veden fosfaatti- ja nitraattipitoisuudet kasvoivat huomattavasti kolmena viimeisenä koeviikkona eikä ammoniumin pitoisuuksissa tapahtunut merkittäviä muutoksia, joten todennäköisesti kokeen viimeisillä viikoilla tärkein

päällyslevästöjen kasvuun vaikuttanut tekijä oli valo. Oletusta tukee myös se, että ravinnelisäysten selittävä vaikutus viikossa kehittyneiden päällyslevästöjen biomassoihin oli vähäinen. Irtokellujakasvustot siis vaikuttivat viikoittaisen päällyslevästön biomassan kehitykseen sekä planktonin biomassan vähentymiseen eniten viimeisinä koeviikkoina.

Vanhemman päällysleväyhteisön on useissa kokeissa todettu olevan biomassaltaan ja tuotannoltaan nuorempaa suurempaa (esim. Sheldon & Boyle, 1975; Siver 1978; Roos, 1983). Kolmen ja kuuden viikon aikana kehittyneiden päällysleväyhteisöjen biomassat eivät olleet eri ravinnetasoilla määriltään merkitsevästi erilaisia, vaikka viikossa kehittyneiden yhteisöjen biomassat romahtivat kahtena viimeisenä koeviikkona. Päällysleväyhteisön kehittyessä biomassan kasvu tapahtuu pääasiassa yhteisön pintakerroksessa, ja yhteisön suoraan kasvualustaan kiinnittynyt biomassa pysyy lähes muuttumattoman (Paul & Duthie, 1989). Altaissa kuusi viikkoa olleiden liuskojen päällyslevästöjen biomassat olivat kuitenkin keskisuurilla ravinnelisäyksillä merkitsevästi suurempia kuin kolme viikkoa inkuboiduilla liuskoilla. Koska kolonisoitava pinta-ala oli pieni ja rajoitettu, kuusi viikkoa inkuboituihin liuskoihin kehittyneiden päällyslevästöyhteisöjen tiheyden ja korkeuden voi olettaa olleen juuri keskisuurilla ravinnelisäyksillä kolmeviikkoisia suurempi. Päällyslevästö saattaa myös kierrättää huomattavasti jo assimiloituja ravinteita yhteisön sisällä käyttäen niitä biomassansa kasvuun (McQueen ym., 1989; Mullohand, 1996; Carlton & Wetzel, 1999). Altaiden pinnalle kasvanut *Lemna*-kasvusto vaikutti todennäköisesti myös kolme ja kuusi viikkoa inkuboiduille liuskoille kehittyneisiin päällyslevästöihin estäen biomassojen merkittävän lisääntymisen koeviikon 3 ja 6 välillä.

Seinämillä kasvavan päällyslevästön vaikutus mesokosmoksen toimintaan on suorassa suhteessa reunojen pinta-alan ja veden tilavuuden suhteeseen (A / V – suhde) ja A / V – suhteen kasvaessa päällyslevästön merkityksen altaan toiminnassa on todettu kasvavan (Jassby ym., 1977, Dudzik ym., 1979; Gamble & Davies, 1982).

Käytettäessä liuskoihin kolmessa ja kuudessa viikossa kehittyneitä biomassoja altaiden reunojen kokonaisleväbiomassojen arvioissa on huomioitava mahdolliset virhelähteet mm. altaan muoto ja siitä aiheutuva normaalista poikkeava valon väheneminen. Esimerkiksi Mcqueen ym. (1989) havaitsivat tutkimuksessaan, että päällyslevästön kasvua rajoitti mesokosmoksen varjossa olevalla seinämällä valon määrä. Valon vaimeneminen altaiden vedessä korreloi positiivisesti kasvavan A / V - suhteen kanssa (Berg ym., 1999). Vaikka kokeen altaiden A / V -suhde oli suhteellisen korkea, keskimäärin 3,87 m^{-1}, altaiden muoto (= matala & leveä) esti voimakkaan seinävaikutuksen. Silti kolmessa ja kuudessa viikossa altaiden reunoille kehittyneiden päällysleväyhteisöjen kokonaisbiomassa oli huomattavan suuri verrattuna vastaaviin planktonin leväbiomassoihin.

Seinämien päällysleväyhteisöt olivat merkittäviä yhteyttäjiä varsinkin kokeen loppupuolella, jolloin planktonbiomassat pienenivät. On arvioitu, että seinämiin kehittyneen päällyslevästön tuotanto voi vastata yli 50% koko mesokosmoksen tuotannosta 2-4 viikon kuluttua kokeen alusta. Tämän jälkeen päällyslevästön suhteellinen osuus altaan kokonaistuotannosta yleensä pienee (Chen ym., 1997). Vaikka päällyslevästön suhteellinen osuus tuottavasta biomassasta olikin suuri, sen vaikutus altaiden ravinnemääriin ei välttämättä ollut yhtä merkittävä, koska päällysleväkasvuston ravinnedynamiikka saattaa muuttua yhteisön kehittyessä. Vanhemmat ja kehittyneemmät yhteisöt saattavat kierrättää huomattavaa määrää ravinteita yhteisön sisällä (Mullohand, 1996; Carlton & Wetzel, 1999).

4.2. Eri-ikäisten päällysleväyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin, päiväkoe

Fosforin kierrätyksen päällyslevästön sisällä on osoitettu olevan merkittävä ravinnelähde, kun yhteisön biomassa kasvaa niin suureksi, että veden ja yhteisön rajakerros vaikuttaa aineiden diffuusioon (Mullohand, 1996; Carlton & Wetzel, 1999). Oletin tutkimuksessani, että vanhemmat päällysleväyhteisöt assimiloivat ympäröivästä vedestä vähemmän ravinteita kuin nuoremmat yhteisöt. Yhtenä oletuksen edellytyksenä oli, että vanhempien päällyslevästöjen biomassat ovat nuorempia suurempia, sillä vasta biomassan kasvaessa diffuusiota vähentävä rajakerros pääsee syntymään. Kokeessa näin ei käynyt, sillä koeviikoilla käytettyjen eri-ikäisten päällysleväyhteisöjen biomassat eivät olleet merkitsevästi erilaisia. Myöskään altaisiin tehtyjen ravinnelisäysten vaikutus päällyslevästöjen ravinteiden käyttöön ei ollut kumpanakaan koepäivänä lineaarinen eli yhteisöt eivät assimiloineet suurilla ravinnelisäyksillä enempää ravinteita kuin pienillä lisäyksillä.

Molempina koepäivinä muutokset veden happikonsentraatioissa, pH-arvoissa ja epäorgaanisen hiilen määrissä osoittavat tuotannon olleen suurempaa liuskallisissa putkissa kuin kontrolleissa. Altaiden pH-arvot nousivat inkuboinnin aikana enemmän liuskallisissa putkissa kuin tyhjissä putkissa. Vastaavasti päällyslevästöt vähensivät putkien vesien DIC-pitoisuuksia ja nostivat happikonsentraatioita. Vaikka päällysleväyhteisöjen biomassojen ero ei ollut merkitsevästi erilainen koeviikkojen 3 ja 6 välillä, eri-ikäisten yhteisöjen vaikutukset ympäröivän veden ravinnemääriin olivat erilaisia. Molempina koepäivinä päällyslevästöt vähensivät putkien veden nitraatin, ammoniumin ja DIC:n määriä. Päällyslevästöjen vaikutukset putkien vesien fosfaattipitoisuuksiin olivat kuitenkin vähäisiä molempina koepäivinä. Viikolla 6 tehdyssä kokeessa päällyslevästöjen vaikutukset vesien ravinnemääriin olivat viikon 3 yhteisöjen vaikutuksia pienempiä, mutta ero oli ravinnelisäyksien sekä tasoeron suhteen merkitsevä ainostaan

ammoniumin kohdalla. Vanhempien päällysleväyhteisöjen biomassat olivat keskisuurilla ravinnelisäyksillä nuorempia yhteisöjä korkeampia. Kuitenkin viikolla 3 juuri keskisuurilla ravinnelisäyksillä päällyslevästöt käyttivät enemmän ammoniumia, nitraattia sekä liuennutta orgaanista hiiltä kuin vanhemmat yhteisöt. Päällysleväyhteisöjen käyttämän liuenneen epäorgaanisen hiilen määrät viittaavat myös tuotannon olleen viikon 3 kokeessa juuri keskisuurilla ravinnelisäyksillä suurempaa kuin viikolla 6. Myös muissa tutkimukssa on löydetty eroja eri-ikäisten päällysleväyhteisöjen toiminnassa. Sekä fotosynteesin että hapen nettotuotannon on todettu olleen nuoremilla päällysleväyhteisöillä vanhempia suurempaa (Sand-Jensen ym., 1985; Sand-Jensen & Revsbech, 1987).

Mesokosmoskokeissa on todettu päällyslevästön biomassan kasvavan veden totaalifosforin konsentraation noustessa, ja yhteisön kehittyessä myös yhteisön sisältämä fosforin määrä kasvaa (esim. Cattaneo & Kalff, 1980, Krewer & Holm, 1982, Fairchild ym. 1985, Osenberg, 1989; Havens ym., 1999 (b)). McQueen ym. (1989) totesivat tutkimuksessaan, että päällyslevästö toimi fosforin nieluna sekä kontrolli- että ravinnelisäysaltaissa kolmena ensimmäisenä koeviikkona. Päivittäin päällyslevästöön sitoutui fosforia 0,56 mg P m^{-2} (kontrolli) ja 0,71 mg P m^{-2} (ravinnelisäys). Seuraavan neljän viikon aikana päällyslevästöstä vapautui veteen fosforia eli se toimi fosforin lähteenä. Lasketut määrät olivat 0,15 mg P m^{-2} d^{-1} (kontrolli) ja 0,19 mg P m^{-2} d^{-1} (ravinnelisäys). Omassa kokeessani nuorempi päällysleväyhteisö saattoi vähentää huomattavasti putkien veden ravinnepitoisuuksia. Suurimmat päällyslevästön aiheuttamat vähennykset tietyn altaan putken vedestä inkuboinnin (8h) aikana olivat nitraatilla 205 µg NO_3 -N l^{-1} (chl –a cm^{-2})$^{-1}$, ammoniumilla 341 µg NH_4 -N l^{-1} (chl –a cm^{-2})$^{-1}$, fosfaatilla 75,5 µg PO_4 - P l^{-1} (chl –a cm^{-2})$^{-1}$ ja liunneella epäorgaanisella hiilellä 3,2 mg l^{-1} (chl –a cm^{-2})$^{-1}$. Altaan ravinnetason vaikutus käytetyn ravinteen määrään oli vähäinen ja viikon 6 kokeessa määrät olivat huomattavasti pienemmät.

Päällysleväyhteisö kehittyy ajan kuluessa usein yhä enemmän kolmiulotteiseksi (esim. Hudon & Bourget ,1981; Kairesalo, 1984; Jones ym., 1998) samalla, kun yhä suurempi määrä orgaanista ainetta siirtyy detritusfaasiin (esim. Hudon & Bourget, 1981). Päällysleväyhteisön glukoosin, DIC:n, ammoniumin ja fosfaatin assimilaatiosta ympäröivästä vedestä vastaavat pääasiassa yhteisön pintakerroksessa yhteyttävät organismit (Paul & Duthien, 1989). Yhteisön sisäinen ravinteiden ja orgaanisen hiilen nopea kierrätys on kuitenkin välttämätöntä päällysleväyhteisöjen korkealle tuotannolle (Wetzel, 1993). Vaikka päällysleväyhteisöä ympäröivän veden ravinnetaso on korkea, yhteisön sisällä tapahtuvasta mineralisaatiosta vapautuvat ravinteet ovat helpommin tuottajien käytettävissä kuin yhteisön ulkopuolelta otettavat ravinteet (Wetzel, 1983 b). Viikon aikana kehittyneiden päällyslevästöjen biomassat olivat suurimillaan kolmannella koeviikolla ja yhteisöjen voi olettaa olleen aktiivisessa kasvuvaiheesssa juuri tuolloin. Päällysleväyhteisöt eivät kuitenkaan saavuttaneet 6 viikossa riittävää biomassaa, jotta tehokas ravinteiden kierrätys yhteisön sisällä ja hajotustoiminnan vaikutuksesta ympäröivään veteen vapautuvien ravinteiden määrä olisi kasvanut merkittävästi verrattuna viikon 3 päällysleväyhteisöihin. Kuten aiemmin on todettu, suurin syy siihen, että eroja viikon 3 ja 6 biomassojen välillä ei ollut, oli todennäköisesti altaiden veden pinnoille kehittyneet *Lemnacae* –kasvustot.

4.3. Eri-ikäisten päällyslevästöyhteisöjen vaikutus ympäröivän veden ravinnepitoisuuksiin, yökoe

Kuten aiemmin on todettu, viikoilla 3 ja 6 tehdyt kokeet eivät ole vertailukelpoisia. Auringonnousu ennen kokeen lopettamista viikolla 3 käynnisti päällyslevästön yhteytyksen, mikä näkyy hapen, DIC:n ja pH:n arvojen muutoksissa. Yksi tutkimuksen hypoteeseistä oli, että vanhempi päällysleväyhteisö vapauttaa yön aikana ravinteita veteen. Viikon 6 kokeen päällyslevästön ravinteita vapauttavasta vaikutuksessa ympäröivään veteen ei yön aikana löytynyt todisteita.

5. YHTEENVETO

Päällyslevästön biomassan kasvuun kokeen loppupuolella vaikutti altaiden veden pinnoille kasvanut *Lemnacae*–kasvusto. Kokeen väittämän mukaan vanhempi päällysleväyhteisö ottaa vähemmän ravinteita ympäröivästä vedestä kuin nuorempi yhteisö. Väittämän toteutuminen vaatii riittävän päällyskasvuston biomassan, jotta aineiden diffuusio veden ja päällysleväyhteisön välillä pienenee (Mullohand, 1996; Carlton & Wetzel, 1999). Vanhempien yhteisöjen biomassat eivät olleet merkitsevästi suurempia verrattuna nuorempiin. Myös koeasetelma vaikeutti tulosten käsittelyä ja vähensi tulosten luotettavuutta. Yhteisön iän vaikutus olisi pitänyt selvittää keskittymällä yhteen ravinnetasoon ja käyttämällä useampia rinnakkaisia näytteitä. Toisaalta koejärjestely piti sovittaa yhteen SWALE - projektin kanssa, joten mainitut parannukset koejärjestelmään eivät välttämättä olisi olleet mahdollisia. Liuskojen nosto vedestä saattoi irroittaa varsinkin vanhempien päällysleväyhteisöjen kohdalla osan heikosti kiinnittyneistä levästöistä. Tulosten mukaan päällyslevästöt kasvoivat eniten kolmannella koeviikolla, jolloin sen vaikutuksen ympäröivään veteen voi olettaa olleen suurin. Myös muissa mesokosmoskokeissa päällyslevästön kasvu on ollut aktiivisimillaan 3-4 viikon kuluttua kokeen alkamisesta (Chen ym., 1997; Bourassa & Cattaneo, 2000). Viitteitä nuoremman päällysleväyhteisön suuremmasta ravinteiden assimilaatiosta löytyi. Ero koepäivien välillä oli merkitsevä ainoastaan ammoniumin osalta, mutta nuorempi yhteisö otti myös enemmän nitraattia ja DIC:ä ympäröivästä vedestä kuin vanhempi yhteisö.

6. KIITOKSET

Haluan kiittää professori Timo Kairesaloa työni ohjauksesta. SWALE – projektissa mukana olleet Jaana Hietasen johdolla auttoivat ja ymmärsivät minua kokeen aikana, mikä mahdollisti sen suorittamisen. Lehtori Jari Oksanen antoi korvaamatonta tilastotieteellistä apua. Kiitokset laborantti Marianne Lundqvistille, joka teki ravinneanalyysit. Lisäksi haluan kiittää yli-assistentti Anne Ojalaa saamastani avusta ja tuesta.

7. KIRJALLISUUS:

Anderson, R. V., Coleman, D. C., Cole, C. V. & Elliot, E. T. 1981: Effect of the nematodes *Acrobleides* sp and *Mesodiplogaster therithieri* on substrate utilization and nitrogen and phosphorous minerilization in soil. - Ecology 62: 549 - 555.

Allanson, B. R. 1973: The fine structure of periphyton of *Chara* sp. and *Potamageton natans* from Wytham Pond, Oxford, and its significance to the macrophytes-periphyton metabolic model of R. G. Wetzel and H. L. Allen. - Freshwat. Biol. 3: 535-542.

Allen, H. L. 1971: Primary productivity, chemo - organotrophy, and nutritional interactions of epiphytic algae and bacteria on macrophytes in the littoral of a lake. - Ecol. Monogr. 41: 97-127.

Berg, C. M., Glibert, P., M. & Chen, C-C. 1999: Dimension effects on ecological processes in pelagic systems. - Limnol. Oceanogr. 44: 1331-1340.

Blindow, I. 1987: The composition and density of epiphyton on several species of submerged macrophytes - the neutral substrate hypothesis tested. - Aquat. Bot. 29: 157 - 168.

Bohr, R. 1981: Do climax algal system exist? - Verh. Int. Ver. Limnol. 21: 1481-1483.

Bourassa, N. & Cattaneo, A. 2000: Responses of lake outlet community to light and nutrient manipulation: effects on periphyton and invertebrate biomass and composition. - Freshwat. Biol. 44: 629-639.

Bothwell, M. L. 1985: Growth rate responses of lotic periphyton diatoms to experimental phosporous enrichment: the infulence to temperature and light. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45: 264-270.

Brönmark, C. 1989: Interactions between epiphytes, macrophytes and freshwater snails: A review. - J. Moll. Stud. 55: 299-311.

Brönmark, C. & Vermaat, J. E. 1998: Complex fish-snail-epiphyton interactions and their effect on submerged freshwater macrophytes. Kirjassa: Jeppesen ym., The structuring role of submerged macrophytes in lakes: 47 – 68. Springer. 467 s.

Carignan, C. & Kalff. J. 1982: Phosphorous release by submerged macrophytes: Significance to epiphyton and phytoplankton. - Limnol. Oceanogr. 27: 419-427.

Carlton, R. G. & Wetzel, R. G. 1988: Phosphorous flux from lake sediments: effect of epipelic algal oxygen production. - Limnol. Oceanogr. 33: 562-570.

Cattaneo A. 1987: Periphyton in lakes of different trophy. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 44: 296-303.

Cattaneo A. 1990: The effect of fetch on periphyton variation. - Hydrobiologia 16: 81-96.

Cattaneo A. & Kalff, J. 1978: Seasonal changes in the epiphytic community of natural and artificial macrophytes on Lake Memphremagog. - Hydrobiologia 60: 135-144.

Cattaneo A. & Kalff, J. 1979: Primary production of algae growing on natural and artificial aquatic plants: A study of interactions between epiphytes and their substrate. - Limnol. Oceanogr 24: 1031-1037.

Cattaneo A. & Kalff, J. 1980: The relative contribution of aquatic macrophytes and their epiphytes to the production of macrophyte beds. - Limnol. Oceanogr. 25: 280-289.

Cattaneo A. & Kalff, J. 1986: The effect of grazer site manipulation on periphyton communities. - Oecologia 130: 249-254.

Chen, C., Petersen, J. & Kemp, W. M. 1997: Spatial and temporal scaling of periphyton growth on walls of estuarine mesocosms. – Mar. Ecol. Prog. Ser. 155: 1-15.

Cox, E. J. 1990: Studies on the algae of a softwater stream. I. Occurrance and distribution with particular reference to the diatoms. - Arch. Hydrobio. Suppl. 83: 525-552.

Dalsgaard, T. & Revsbech, N. P. 1992: Regulating factors in tricling filter biofilms as measured with the oxygen microsensor. - FEMS Microbiology Ecology 101: 151-164.

Dillon, P. J. & Ridger, F. H. 1974: The phosphorous-chlorophyll relationship in lakes. - Limnol. Oceanogr. 19: 767-773.

Dudzik, M., Hand, J., Jassby, A., Lapan, E., Levy, D. & Rees, J. 1979: Some considerations in the design of aquatic microcosms for plankton research. – Int. J. Environ. Stud. 13: 125-130.

Duthie, H. C. & Jones, D. K. 1990: Epilithic algal productivity on the submerged Niagara Escarpment, Georgian Bay, Canada. - Verh. Int. Theor. Angew. Limnol. 24: 411-415

Elster, J., Kvet, J. & Hauser, V. 1995: Root length of duckweeds (Lemnaceae) as an indicator of water trophic status. - Ecology (Bratislava) 14: 43-59.

Fairchild, G. W., Lowe, R. L. & Richardson, W. B. 1985: Algal periphyton growth on nutrient diffusing substrates: an in situ bioassay. - Ecology 66: 465-475.

Fairchild, G. W. & Everett, A. C. 1988: Effects of nutrient (N, P, C) enrichment upon periphyton standing crop, species composition in an oligotrophic softwater lake. - Freshwat. Biol. 19: 57-70.

Gamble J. C. & Davies, J. H. 1982: Application of enclosures to the study of marine pelagic systems. Kirjassa: Grice, D. & Reeve, M. R. (toim.), Marine mesocosms: 25-48. Springer-Verlag, New York. 511 s.

Gallep, G. W. 1979: Chiromomid influence on phosphorus release in sediment - water microcosms. - Ecology 60: 547-566.

Goldman, C. R. 1981: Lake Tahoe: Two decades of change in a nitrogen deficient oligotrophic lake. – Verh. Internat. Ver. Limnol. 21: 45-70.

Graneli, W. 1979: The influence of *Chironomous plymosus* larvae on the exchange of dissolved substances between sediment and water. - Hydrobiologia 66: 149-159.

Gregory, S. V. 1983: Plant-Herbivore interactions in stream systems. Kirjassa: Barnes ym., Stream Ecology. Application and testing of general ecological theory: 145 - 161. Plenum Press. 587 s.

Grimshaw, H. J., Wetzel, R. G., Bradenburg, M., Segerblom, K., Wenkert, L. J., Marsh, G. A., Charnetzky, W., Haky, J. E. & Carraher, C. 1997: Shading of periphyton communities by wetland emergent macrophytes: Decoupling of algal photosynthesis from microbial nutrient retention. - Arch. Hydrobiol. 139: 17-27.

Havens, K. E., East, T. L., Rodusky, A. J. & Sharfstein, B. 1999 (a): Littoral periphyton responses to nitrogen and phosphorous: An experimental study in a subtropical lake. - Aquat. Bot. 63: 267-290.

Havens, K. E., East, T. L., Hwang, S-J., Rodusky, A. J., Sharfstein, B. & Steinman A. D. 1999 (b): Algal responses to experimental nutrient addition in the littoral community of subtropical lake. - Freshwat. Biol. 42: 329-344.

Hawes, I. & Smith, R. 1993: Effects of localized nutrient enrichment on the shallow epilithtic periphyton of oligotrophic Lake Taupo. N. Z. J. - Mar. Freshwater Res. 27: 365-372.

Hansson, L. A. 1988: Effects of competitive interactions on the biomass development of planktonic and periphytic algae in lakes. - Limnol. Oceanogr. 33: 121-128.

Hoagland, K. D., Roemer S. C. & Rosowski J. R. 1982: Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the diatoms (*Bacillariophycaea*). - Amer. J. Bot. 69: 188-213.

Hudon, C. & Bourget, E. 1981: Initial colonization of artificial substrate: Community development and structure studied by scanning electron microscopy. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 38: 1371 - 1384.

Hunter, R. D. 1980: Effects of grazing on the quantity and quality of freshwater Aufwuchs. - Hydrobiologia 69: 251-259.

Huthcinson, G. E. 1957. A Treatise on Limnology, Vol. 3. New York, John Wiley & Sons, Inc. 660 s.

Jones, I. J., Moss, B. & Young, J. O. 1998: Interactions between periphyton, nonmolluscan invertebrates, and fish in standing freshwaters. Springer.

Kairesalo, T. 1984: The seasonal succession of epiphytic communities within *Equisetum fluviatile* L. Stand in Lake Pääjärvi, southern Finland. - Int. Revue ges. Hydrobiologie. 69: 475-505.

Krewer, J. A. & Holm, H. W. 1982. The phosphorous - chlorophyll *a* relationship in periphytic communities in a controlled ecosystem. - Hydrobiologia 94: 173-176.

Lalonde, S. & Downing, J. A. 1991: Epiphyton biomass is related to lake trophic status, depth and macrophyte architecture. - Can. J. Fish. Aquat. Sci. 48: 2285-2291.

Law, C.S., Rees, A. P. & Owens, N. J. P. 1993: Nitrous oxide production by estuarine epiphyton. - Limnol. Oceanogr. 38: 435-441.

Loeb, S. L., Reuter, J. E. & Goldman, C. R. 1983: Litoral zone, production of oligotrophic lakes. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 161-167. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Martin, T. A., Graham J. M., Graham, L. E. & Krauzfelder, J. A. 1983: Factors regulating the spatial and temporal distribution of Cladophora and Ulothrix in the Lauretian Great lakes. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 135-145. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Mosisch, T. D., Bunn, S. E., Davies, P. M. & Marshall, C. J. 1999: Effects of shade in periphyton growth in a subtropical stream. - Aquat. Bot. 64: 167-177.

Mcqueen, D. J., Mazumder, A., Taylor, W. D. & Lean, D. R. S. 1989: Effect of nutrients and grazers on periphyton phosphorous in lake enclosures. - Freshwat. Biol. 22: 405-415.

Muller, C. 1983. Uptake and accumulation of some nutrient elements in relation to the biomass of an epilithtic community. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 147-151. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Mullohand, P. J. 1996: Role in nutrient cycling in streams. Kirjassa: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. (toim). Algal Ecology: Freshwater benthic ecosystems: 609-639. Academic Press. San Diego. CA.

Neckles, H. A., Wetzel, R. L. & Orth, R. J. 1993: Relative effects of nutrient enrichment and grazing on epiphyte-macrophyte (*Zostera marina L.*) dynamics. - Oecologia 93: 285-295.

Neely, R. K. & Wetzel, R. G. 1995: Simultaneus use of ^{14}C and ^{3}H to determine autotrophic production and bacterial protein production in periphyton. - Microbial Ecol. 30: 227-237.

Nicotri, M. E. 1977: Grazing effects of four marine interdidal herbivores on the microflora. - Ecology 58: 1020-1032.

Osenberg, C. W. 1989: Resource limitation, competition and the influence of life history in a freshwater snail community. - Oecologia 79: 512-519.

Paul, B. J. & Duthien, H. C. 1989: Nutrient cycling in the epilithon of running waters. - Can. J. Bot. 67: 2302-2309.

Phillips, G., L., Eminson, D. & Moss, B. 1978. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated waters. - Aquat. Bot. 4: 103-126.

Portielje, R. & Roijackers, R. M. M. 1995: Primary succession of aquatic macrophytes in experimental ditches in relation to nutrient input. - Aquat. Bot. 50: 127-140.

Riber H. H. & Wetzel, R. G. 1987: Boundary layer and internal diffusion effects on phosphorous fluxes in lake periphyton. - Limnol. Oceanogr. 32: 1181-1194.

Roos, P. J. 1983: Dynamics of periphytic communities. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 5 – 10. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Robinson, G. G. C. 1983: Methodology: The key to understanding periphyton. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 245 – 252. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Sand-Jensen, K.1977: Effect of epiphytes on eelgras photosynthesis. - Aquat. Bot. 3: 55-63.

Sand-Jensen, K. & Borum. J. 1984: Epiphyte shading on its effect on photosynthesis and diel metabolism of *Lobelia dortmanna L.* during the spring bloom in a Danish lake. - Aquat. Bot. 20: 109-119.

Sand-Jensen, K. & Söndergaard, M. 1981: Phytoplankton and epiphyte development and their shading effect on submerged macrophytes in lakes of different nutrient status. Int. Rev. Ges. Hydrobiologie 66: 529-552.

Sand-Jensen, K., Revsbech, N. P. & Jorgensen, B.B. 1985: Microprofiles in epiphyte communities on submerged macrophytes. - Marine Biology 89: 55-62.

Sand-Jensen, K. & Revsbech, N. P. 1987: Photosynthesis and light adaption in epiphyte-macrophyte associations measured by oxygen microelectrodes. - Limnol. Oceanogr. 32 (2): 452-457.

Sheldon, M.D. & Boylen, C. W. 1975: Factors affecting the contribution by epiphytic algae to the primary productivity of an oligotrophic freshwater lake. - Appl. Microbiol. 30: 657-667.

Siver, P.A. 1978: Development of diatom communities on *Potamageton robbinsii* Oakes. - Rhodora 80: 417 - 430.

Sorensen, J. & Revsbech, N.P. 1990: Denitrification in stream biofilm and sediment: in situ variation and control factors. Kirjassa: Sorensen, J. & Revsbech, N.P. (toim.), Denitrification in Soil and Sediment: 277-290. Plenum Press, New York.

Straskraba, M. & Piezynska, E. 1970: Field experiments on shading effect by emergents on littoral phytoplankton and periphyton production. - Rozpravy Ceskol. Akad. Ved. Rada. Matem. Prir. Ved 80: 7-32

Suomen standardisoimisliitto 1994: Veden ammoniumtypen määritys, Standari SFS 3032. Vesi- ja ympäristöhallitus.

Suomen standardisoimisliitto 1994: Veden fosfaatin määritys, Standari SFS 3025. Vesi- ja ympäristöhallitus.

Suomen standardisoimisliitto 1994: Veden kokonaisfosforin määritys, Standari SFS 3026. Vesi- ja ympäristöhallitus.

Suomen standardisoimisliitto 1994: Veden kokonaistypen määritys, Standari SFS 3031. Vesi- ja ympäristöhallitus.

Suomen standardisoimisliitto 1994: Veden nitriitti- ja nitraattitypen määritys, Standari SFS 3030. Vesi- ja ympäristöhallitus.

Tanimizu, K., Miura, T. & Higashi, M. 1981: Effect of water movement on the photosynthetic rate of an algal community attached to the reed stems. - Verh. Int. Ver. Limnol. 21: 584-549.

Weisner, S. E. B., Erikson, P. G., Graneli, W. & Leonardson, L. 1994: Influence of macrophytes on nitrate removal in wetlands. - Ambio 23: 363-366.

Wetzel, R. G. 1983 a: Limnology. Saunders College publishing. 767 s.

Wetzel, R. G. 1983b: Attached algal-substrata interactions: fact or myth, and when and how. Kirjassa: Wetzel, R. G. (toim), Periphyton in freshwater ecosystems: 201 – 218. Dr W. Junk Publishers. The Hague. 346 s.

Wetzel, R. G. 1993: Microcommunities and microgradients: Linking nutrient regeneration and high sustained aquatic primary production. - Netherlands J. Aquat. Ecol. 27: 3-9.

Wium-Andersen, S., Anthoni, U., Chistophersen, C. & Houen, G. 1982. Alleophatic effects on phytoplankton by substances isolated from aquatic macrophytes (Charales). - Oikos 39: 187-190.

LIITTEET.

LIITE 1. Päiväinkubointien eri parametrien testitulokset koepäivien vertailussa

NITRAATTITYPPI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

Model 1: NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika

	Res.Df	Res.Sum Sq	Df	Sum Sq	F value	Pr(>F)
1	15	44802				
2	**17**	**53329**	**-2**	**-8527**	**1.4274**	**0.2707**

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

call:
lm(formula = NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-113.107	-28.433	7.512	41.455	76.363

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)	
(Intercept)	-53.64	17.84	-3.008	0.00793	**
poly(lnno3, 2)1	-26.51	61.88	-0.428	0.67368	
poly(lnno3, 2)2	192.38	59.78	3.218	0.00504	**
aika6	**38.70**	**24.64**	**1.571**	**0.13472**	

Signif. codes: 0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 56.01 on 17 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.456, Adjusted R-squared: 0.36
F-statistic: 4.751 on 3 and 17 degrees of freedom, p-value: 0.01389

AMMONIUMTYPPI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value  Pr(>F)
1     16     110456
2     18     170731 -2 -60275  4.3655 0.03069 *
--
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
call:
lm(formula = NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-163.02  -60.65   20.62   52.13  145.16

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -134.07      29.72  -4.511  0.00027 ***
poly(lnno3, 2)1    28.50     107.32   0.266  0.79361
poly(lnno3, 2)2   186.22     103.44   1.800  0.08860 .
aika6             103.53      41.96   2.468  0.02386 *
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 97.39 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3685,   Adjusted R-squared: 0.2632
F-statistic: 3.501 on 3 and 18 degrees of freedom,    p-value: 0.03692
```

FOSFAATTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value Pr(>F)
1     15    18122.4
2     17    19329.1 -2 -1206.7  0.4994 0.6166
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
call:
lm(formula = PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-72.0553 -10.1546  -0.6736   5.6193 102.8585

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)       -2.732     10.824  -0.252    0.804
poly(lnno3, 2)1    2.041     37.531   0.054    0.957
poly(lnno3, 2)2    5.294     36.968   0.143    0.888
aika6             -3.423     14.876  -0.230    0.821

Residual standard error: 33.72 on 17 degrees of freedom
Mlyultiple R-Squared: 0.004139,     Adjusted R-squared: -0.1716
F-statistic: 0.02355 on 3 and 17 degrees of freedom,  p-value: 0.9949
```

LIUENNUT EPÄORGAANINEN HIILI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: Dic ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: Dic ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value Pr(>F)
1     18    18.0803
2     20    19.6042 -2 -1.5238  0.7585 0.4827
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
call:
lm(formula = Dic ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-1.9041 -0.8042  0.1425  0.8215  1.5606

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -1.3460     0.2858  -4.709 0.000134 ***
poly(lnno3, 2)1  -1.6884     0.9901  -1.705 0.103607
poly(lnno3, 2)2   1.5556     0.9901   1.571 0.131812
aika6             0.6159     0.4042   1.524 0.143200
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 0.9901 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.278,    Adjusted R-squared: 0.1697
F-statistic: 2.566 on 3 and 20 degrees of freedom,    p-value: 0.08324
```

HAPPI

```
REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS
Analysis of Variance Table

Model 1: happid ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: happid ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value Pr(>F)
1     17     53.315
2     19     53.630 -2 -0.315  0.0502 0.9512


REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

Call:
lm(formula = happid ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-2.5273 -1.1240 -0.0787  0.9121  3.5920

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)       2.4423     0.4850   5.036 7.34e-05 ***
poly(lnno3, 2)1   0.9696     1.7370   0.558    0.583
poly(lnno3, 2)2  -0.2981     1.7608  -0.169    0.867
aika6            -0.7098     0.7038  -1.008    0.326
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 1.68 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.06278,  Adjusted R-squared: -0.0852
F-statistic: 0.4242 on 3 and 19 degrees of freedom,   p-value: 0.7378
```

TOTAALIFOSFORI, PÄIVÄINKUBOINTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: totPd ~ poly(lnno3, 2) + aika
Model 2: totPd ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value Pr(>F)
1     16    3817976
2     14    3381450  2  436526  0.9037 0.4275
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = totPd ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
   Min     1Q Median     3Q    Max
-932.8 -269.6 -148.3  203.9  858.9

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)        914.2      164.8   5.548 4.42e-05 ***
poly(lnno3, 2)1    303.3      516.3   0.587   0.5651
poly(lnno3, 2)2    103.2      537.3   0.192   0.8501
aika6             -595.7      221.6  -2.688   0.0161 *
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 488.5 on 16 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3336,   Adjusted R-squared: 0.2087
F-statistic:  2.67 on 3 and 16 degrees of freedom,    p-value: 0.08261
```

TOTAALITYPPI, PÄIVÄINKUBOINTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: totNd ~ poly(lnno3, 2) + aika
Model 2: totNd ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value Pr(>F)
1     16     573934
2     14     412995  2 160939  2.7278 0.0999 .
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = totNd ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-342.33  -96.19  -21.84   43.56  438.76

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)        51.04      61.06   0.836    0.416
poly(lnno3, 2)1    17.24     209.61   0.082    0.935
poly(lnno3, 2)2  -110.73     216.76  -0.511    0.616
aika6              45.51      84.97   0.536    0.600

Residual standard error: 189.4 on 16 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.031,    Adjusted R-squared: -0.1507
F-statistic: 0.1706 on 3 and 16 degrees of freedom,   p-value: 0.9147
```

LIITE 2. YÖINKUBOINTIEN ERI PARAMETRIEN TESTITULOKSET KOEPÄIVIEN VERTAILUSSA

NITRAATTITYPPI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value    Pr(>F)
1     16     119118
2     18     303360 -2 -184242  12.374 0.0005651 ***
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = NO3 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-256.75  -78.70   19.60   77.22  230.62

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)        14.53      39.22   0.371   0.7153
poly(lnno3, 2)1   239.50     130.40   1.837   0.0828 .
poly(lnno3, 2)2   -31.22     133.62  -0.234   0.8179
aika6             -62.52      55.37  -1.129   0.2737
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 129.8 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.2051,    Adjusted R-squared: 0.07266
F-statistic: 1.548 on 3 and 18 degrees of freedom,    p-value: 0.2364
```

AMMONIUMTYPPI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value Pr(>F)
1     17     119105
2     19     129085 -2  -9980  0.7122 0.5046
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = NH4 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-167.962  -23.319    7.705   29.281  208.084

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)        -16.88      25.15  -0.671    0.510
poly(lnno3, 2)1     41.27      90.73   0.455    0.654
poly(lnno3, 2)2     50.03      85.38   0.586    0.565
aika6               10.65      34.62   0.308    0.762

Residual standard error: 82.43 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.03278,  Adjusted R-squared: -0.1199
F-statistic: 0.2147 on 3 and 19 degrees of freedom,   p-value: 0.885
```

FOSFAATTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value Pr(>F)
1     14    10535.5
2     16    12900.3 -2 -2364.8  1.5712 0.2423
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = PO4 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-32.986 -18.041  -5.113  13.863  84.914

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -0.2965     8.5806  -0.035    0.973
poly(lnno3, 2)1 -13.3933    29.5705  -0.453    0.657
poly(lnno3, 2)2 -39.5567    31.2723  -1.265    0.224
aika6           -11.2375    12.8180  -0.877    0.394

Residual standard error: 28.39 on 16 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.1411,   Adjusted R-squared: -0.01991
F-statistic: 0.8764 on 3 and 16 degrees of freedom,   p-value: 0.474
```

LIUENNUT EPÄORGAANINEN HIILI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: DIC ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: DIC ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value Pr(>F)
1     17     28.343
2     19     32.128 -2 -3.785  1.1351 0.3446
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = DIC ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
   Min      1Q  Median      3Q     Max
-3.5259 -0.4396 -0.1455  0.5403  3.0740

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -0.9967     0.3928  -2.537  0.02010 *
poly(lnno3, 2)1  -2.5052     1.3006  -1.926  0.06918 .
poly(lnno3, 2)2   0.2130     1.3304   0.160  0.87449
aika6             1.6456     0.5434   3.029  0.00691 **
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 1.3 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.405,    Adjusted R-squared: 0.3111
F-statistic: 4.311 on 3 and 19 degrees of freedom,    p-value: 0.01767
```

HAPPI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

```
Model 1: O2 ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: O2 ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value Pr(>F)
1     16    129.349
2     18    146.464 -2 -17.116  1.0586   0.37
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = O2 ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-5.4799 -1.3543 -0.3327  1.2320  6.4748

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)       4.1171     0.8619   4.777 0.000151 ***
poly(lnno3, 2)1   6.1128     2.9493   2.073 0.052843 .
poly(lnno3, 2)2  -3.3257     3.0645  -1.085 0.292135
aika6            -5.7619     1.2255  -4.702 0.000178 ***
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 2.853 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.5872,   Adjusted R-squared: 0.5184
F-statistic: 8.535 on 3 and 18 degrees of freedom,    p-value: 0.0009721
```

TOTAALIFOSFORI, YÖINKUBOINTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: totPy ~ poly(lnno3, 2) + aika
Model 2: totPy ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df   Sum Sq F value   Pr(>F)
1     17   96829715
2     15   51509337  2 45320378  6.5989 0.008792 **
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = totPy ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-4982.9 -1150.4  -572.4  1013.3  4740.1

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)        933.9      761.1   1.227    0.237
poly(lnno3, 2)1  -4212.1     2667.7  -1.579    0.133
poly(lnno3, 2)2  -3366.7     2496.3  -1.349    0.195
aika6             -233.3     1051.1  -0.222    0.827

Residual standard error: 2387 on 17 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.1946,   Adjusted R-squared: 0.0525
F-statistic: 1.369 on 3 and 17 degrees of freedom,    p-value: 0.2858
```

TOTAALITYPPI, YÖINKUBOINTI

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: totNy ~ poly(lnno3, 2) + aika
Model 2: totNy ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df   Sum Sq F value   Pr(>F)
1     17   54059911
2     15   25493408  2 28566503  8.4041 0.003562 **
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = totNy ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-4425.9  -711.8  -152.5  1432.9  3300.5

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -3164.1      568.7  -5.564 3.43e-05 ***
poly(lnno3, 2)1  -3854.0     1993.3  -1.933 0.070009 .
poly(lnno3, 2)2  -1287.6     1865.2  -0.690 0.499308
aika6             3383.7      785.4   4.309 0.000476 ***
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 1783 on 17 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.5527,   Adjusted R-squared: 0.4737
F-statistic: 7.001 on 3 and 17 degrees of freedom,    p-value: 0.002849
```

LIITE 3. TESTITULOKSET VIIKON AIKANA KEHITTYNEIDEN PÄÄLLYSLEVÄYHTEISÖJEN KLOROFYLLIPITOISUUKSIEN TASOEROSTA ERI KOEVIIKKOINA

Viikot 1 ja 2

```
lm(formula = chl12 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.331e-04 -3.507e-05 -2.285e-05  2.317e-05  1.619e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.066e-04  2.345e-05   4.546 0.000197 ***
poly(lno3, 2)1  2.170e-04  8.123e-05   2.671 0.014682 *
poly(lno3, 2)2 -4.344e-05  8.123e-05  -0.535 0.598711
aika6           2.174e-05  3.316e-05   0.656 0.519594
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 8.123e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.2819,    Adjusted R-squared: 0.1741
F-statistic: 2.617 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.07928
```

Viikot 1 ja 4

```
lm(formula = chl14 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.215e-04 -3.513e-05 -1.047e-05  3.495e-05  1.651e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.066e-04  2.011e-05   5.300 3.47e-05 ***
poly(lno3, 2)1  1.783e-04  6.967e-05   2.559   0.0187 *
poly(lno3, 2)2 -4.729e-05  6.967e-05  -0.679   0.5050
aika6          -3.139e-05  2.844e-05  -1.104   0.2829
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 6.967e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.2914,    Adjusted R-squared: 0.1852
F-statistic: 2.742 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.07018
```

Viikot 1 ja 5

```
lm(formula = chl15 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.111e-04 -3.662e-05 -5.104e-06  2.812e-05  1.756e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.066e-04  1.773e-05   6.011 7.06e-06 ***
poly(lno3, 2)1  1.172e-04  6.142e-05   1.907  0.07092 .
poly(lno3, 2)2 -3.259e-05  6.142e-05  -0.531  0.60154
aika6          -8.624e-05  2.508e-05  -3.439  0.00260 **
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 6.142e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.4405,    Adjusted R-squared: 0.3566
F-statistic: 5.249 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.007785
```

Viikot 1 ja 6

```
lm(formula = chl16 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.072e-04 -3.893e-05 -8.165e-06  4.010e-05  1.795e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.066e-04  1.911e-05   5.578 2.22e-05 ***
poly(lno3, 2)1  1.019e-04  6.621e-05   1.540  0.14015
poly(lno3, 2)2 -2.377e-05  6.772e-05  -0.351  0.72948
aika6          -8.182e-05  2.766e-05  -2.958  0.00808 **
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 6.62e-05 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3734,    Adjusted R-squared: 0.2745
F-statistic: 3.774 on 3 and 19 degrees of freedom,   p-value: 0.02798
```

Viikot 2 ja 4

```
lm(formula = chl24 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.165e-04 -4.375e-05 -1.655e-05  3.331e-05  1.534e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.283e-04  2.164e-05   5.931 8.42e-06 ***
poly(lno3, 2)1  1.549e-04  7.495e-05   2.067   0.0519 .
poly(lno3, 2)2 -1.058e-05  7.495e-05  -0.141   0.8892
aika6          -5.313e-05  3.060e-05  -1.736   0.0979 .
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 7.495e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.2676,    Adjusted R-squared: 0.1578
F-statistic: 2.436 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.09459
```

Viikot 2 ja 5

```
lm(formula = chl25 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-9.609e-05 -3.878e-05 -1.311e-06  1.540e-05  1.727e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.283e-04  1.902e-05   6.749 1.45e-06 ***
poly(lno3, 2)1  9.382e-05  6.587e-05   1.424 0.169776
poly(lno3, 2)2  4.125e-06  6.587e-05   0.063 0.950682
aika6          -1.080e-04  2.689e-05  -4.015 0.000679 ***
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 6.587e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.4758,    Adjusted R-squared: 0.3972
F-statistic: 6.052 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.004188
```

Viikot 2 ja 6

```
lm(formula = chl26 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min        1Q    Median        3Q       Max
-9.261e-05 -4.215e-05 -1.206e-05  1.943e-05  1.762e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     1.283e-04  2.021e-05   6.348 4.32e-06 ***
poly(lno3, 2)1  7.875e-05  7.004e-05   1.124  0.27488
poly(lno3, 2)2  1.456e-05  7.164e-05   0.203  0.84113
aika6          -1.042e-04  2.926e-05  -3.562  0.00208 **
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 7.002e-05 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.4228,   Adjusted R-squared: 0.3317
F-statistic:  4.64 on 3 and 19 degrees of freedom,   p-value: 0.0134
```

Viikot 3 ja 1

```
lm(formula = chl31 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min        1Q    Median        3Q       Max
-1.454e-04 -5.482e-05 -2.397e-05  5.113e-05  2.000e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.636e-04  3.398e-05   7.759 5.53e-07 ***
poly(lno3, 2)1  2.412e-04  1.223e-04   1.972  0.06511 .
poly(lno3, 2)2 -4.197e-05  1.154e-04  -0.364  0.72068
aika6          -1.535e-04  4.688e-05  -3.275  0.00446 **
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.0001066 on 17 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.4423,   Adjusted R-squared: 0.3439
F-statistic: 4.494 on 3 and 17 degrees of freedom,   p-value: 0.01696
```

Viikot 3 ja 2.

```
lm(formula = chl32 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min        1Q    Median        3Q       Max
-1.444e-04 -6.026e-05 -2.827e-05  5.261e-05  1.894e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.640e-04  3.473e-05   7.602 5.03e-07 ***
poly(lno3, 2)1  2.274e-04  1.210e-04   1.879  0.07649 .
poly(lno3, 2)2 -1.661e-05  1.131e-04  -0.147  0.88489
aika6          -1.357e-04  4.685e-05  -2.897  0.00961 **
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1

Residual standard error: 0.0001089 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3904,   Adjusted R-squared: 0.2888
F-statistic: 3.842 on 3 and 18 degrees of freedom,   p-value: 0.02748
```

Viikot 3 ja 4

```
lm(formula = chl34 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.481e-04 -7.031e-05 -7.053e-06  4.658e-05  1.819e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.627e-04  3.183e-05   8.254 1.57e-07 ***
poly(lno3, 2)1  1.792e-04  1.109e-04   1.617 0.123327
poly(lno3, 2)2 -2.517e-05  1.036e-04  -0.243 0.810879
aika6          -1.875e-04  4.293e-05  -4.367 0.000371 ***
---
Signif. codes:  0 `***'  0.001 `**'  0.01 `*'  0.05 `.'  0.1 ` '  1

Residual standard error: 9.981e-05 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.5423,    Adjusted R-squared: 0.466
F-statistic:  7.11 on 3 and 18 degrees of freedom,   p-value: 0.00238
```

viikot 3 ja 5

```
lm(formula = chl35 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.522e-04 -3.465e-05  1.788e-06  3.145e-05  1.732e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.612e-04  2.973e-05   8.787 6.28e-08 ***
poly(lno3, 2)1  1.055e-04  1.036e-04   1.019    0.322
poly(lno3, 2)2 -1.627e-05  9.680e-05  -0.168    0.868
aika6          -2.409e-04  4.010e-05  -6.007 1.11e-05 ***
---
Signif. codes:  0 `***'  0.001 `**'  0.01 `*'  0.05 `.'  0.1 ` '  1

Residual standard error: 9.324e-05 on 18 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.6723,    Adjusted R-squared: 0.6177
F-statistic: 12.31 on 3 and 18 degrees of freedom,   p-value: 0.0001289
```

Viikot 3 ja 6

```
Call:
lm(formula = chl36 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-1.534e-04 -4.038e-05 -6.736e-06  3.934e-05  1.739e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.608e-04  3.210e-05   8.124 4.54e-07 ***
poly(lno3, 2)1  9.218e-05  1.124e-04   0.820 0.424212
poly(lno3, 2)2 -2.101e-05  1.122e-04  -0.187 0.853851
aika6          -2.321e-04  4.582e-05  -5.065 0.000115 ***
---
Signif. codes:  0 `***'  0.001 `**'  0.01 `*'  0.05 `.'  0.1 ` '  1

Residual standard error: 0.0001006 on 16 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.6312,    Adjusted R-squared: 0.5621
F-statistic: 9.128 on 3 and 16 degrees of freedom,   p-value: 0.0009362
```

Viikot 4 ja 5

```
lm(formula = chl45 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-6.425e-05 -2.364e-05 -5.073e-06  1.328e-05  1.412e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     7.520e-05  1.334e-05   5.635 1.63e-05 ***
poly(lno3, 2)1  5.515e-05  4.623e-05   1.193  0.24684
poly(lno3, 2)2  2.694e-07  4.623e-05   0.006  0.99541
aika6          -5.485e-05  1.887e-05  -2.906  0.00873 **
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 4.623e-05 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3304,    Adjusted R-squared:  0.23
F-statistic:  3.29 on 3 and 20 degrees of freedom,   p-value: 0.04181
```

Viikot 4 ja 6

```
lm(formula = chl46 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-6.001e-05 -2.855e-05 -1.508e-05  1.330e-05  1.454e-04

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     7.520e-05  1.452e-05   5.181 5.32e-05 ***
poly(lno3, 2)1  4.004e-05  5.029e-05   0.796   0.4358
poly(lno3, 2)2  1.035e-05  5.144e-05   0.201   0.8427
aika6          -5.095e-05  2.101e-05  -2.425   0.0254 *
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 5.028e-05 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.2551,    Adjusted R-squared: 0.1375
F-statistic: 2.169 on 3 and 19 degrees of freedom,   p-value: 0.1252
```

Viikot 5 ja 6

```
lm(formula = chl56 ~ poly(lno3, 2) + aika)

Residuals:
       Min         1Q     Median         3Q        Max
-2.843e-05 -9.136e-06 -1.322e-06  4.852e-06  6.105e-05

Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     2.035e-05  5.853e-06   3.477  0.00252 **
poly(lno3, 2)1 -2.104e-05  2.028e-05  -1.038  0.31241
poly(lno3, 2)2  2.547e-05  2.074e-05   1.228  0.23443
aika6           3.724e-06  8.471e-06   0.440  0.66521
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 2.027e-05 on 19 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.1299,    Adjusted R-squared: -0.007456
F-statistic: 0.9457 on 3 and 19 degrees of freedom,  p-value: 0.4383
```

LIITE 4. 3 JA 6 VIIKKOA VANHOJOEN PÄÄLLYSLEVÄYHTEISÖJEN BIOMASSOJEN VERTAILUN TESTITULOKSET

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: chl ~ poly(lnno3, 2) + aika + poly(lnno3, 2):aika
Model 2: chl ~ poly(lnno3, 2) + aika
  Res.Df Res.Sum Sq Df  Sum Sq F value  Pr(>F)
1     18     5.6889
2     20     8.1256 -2 -2.4367  3.8549 0.04042 *
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
> tulos1 <- lm (chl ~ poly(lnno3,2) + aika)
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
Call:
lm(formula = chl ~ poly(lnno3, 2) + aika)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-1.2721 -0.3452 -0.1106  0.3540  1.1962

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)       0.8849     0.1840   4.809 0.000107 ***
poly(lnno3, 2)1   1.9427     0.6374   3.048 0.006352 **
poly(lnno3, 2)2   1.1027     0.6374   1.730 0.099039 .
aika6             0.2747     0.2602   1.055 0.303787
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1

Residual standard error: 0.6374 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.4011,   Adjusted R-squared: 0.3113
F-statistic: 4.465 on 3 and 20 degrees of freedom,    p-value: 0.0148
```

LIITE 5. VEDEN PLANKTONIN JA ALTAIDEN SEINÄMIEN PÄÄLLYSLEVÄSTÖJEN KOKONAISKLOROFYLLI A - PITOISUUDEN TILASTOLLINEN VERTAUS KOEVIIKOILLA 3 JA 6

Viikko 3. Plankton ja päällyslevästö

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

```
Analysis of Variance Table

Model 1: vko3 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe
Model 2: vko3 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe + poly(lnpo4, 2):plpe
  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value  Pr(>F)
1     20     3201.2
2     18     2215.8  2  985.4  4.0022 0.03648 *
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
```

REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
lm(formula = vko3 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe)
Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-21.9759  -6.5087  -0.7756   6.0659  31.7933
Coefficients:
                 Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept)         7.713      8.166   0.944  0.35623
poly(lnpo4, 2)1    14.503     12.651   1.146  0.26517
poly(lnpo4, 2)2    36.062     12.651   2.850  0.00989 **
plpe                2.420      1.722   1.406  0.17513
---
Signif. codes:  0  `***'  0.001  `**'  0.01  `*'  0.05  `.'  0.1  ` '  1
Residual standard error: 12.65 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.3634,   Adjusted R-squared: 0.2679
F-statistic: 3.805 on 3 and 20 degrees of freedom,    p-value: 0.02622
```

Viikko 6. Plankton ja päällyslevästö

REGRESSIOSUORIEN MUODON ERILAISUUS

Analysis of Variance Table

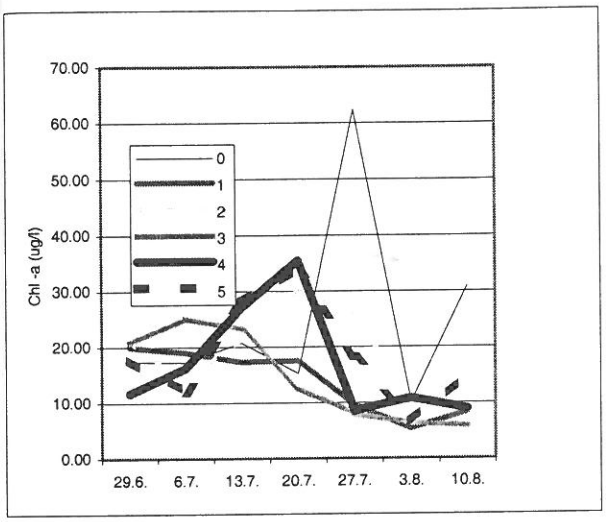
```
Model 1: vko6 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe
Model 2: vko6 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe + poly(lnpo4, 2):plpe

  Res.Df Res.Sum Sq Df Sum Sq F value  Pr(>F)
1     20     3228.9
2     18     2423.2  2  805.7  2.9923 0.07552 .
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
```

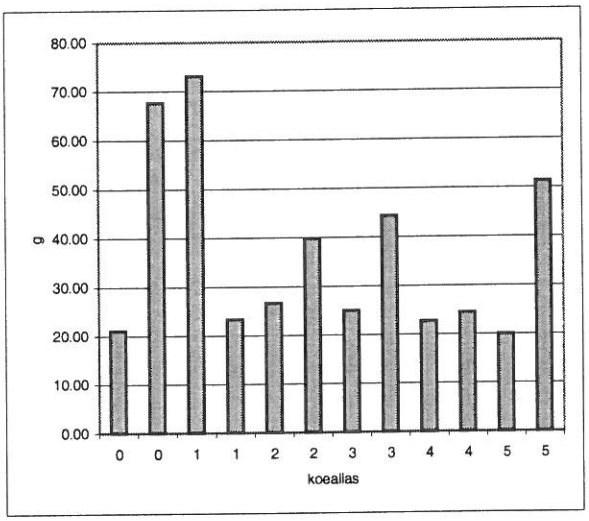
REGRESSIOSUORIEN ERO TASOSSA

```
lm(formula = vko6 ~ poly(lnpo4, 2) + plpe)
Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max
-14.238  -7.406  -2.089   2.150  38.542
Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     -18.4783     8.2017  -2.253 0.035645 *
poly(lnpo4, 2)1  26.9428    12.7060   2.120 0.046663 *
poly(lnpo4, 2)2  -0.4774    12.7060  -0.038 0.970400
plpe               7.9358     1.7291   4.590 0.000178 ***
---
Signif. codes:  0 `***' 0.001 `**' 0.01 `*' 0.05 `.' 0.1 ` ' 1
Residual standard error: 12.71 on 20 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.561,    Adjusted R-squared: 0.4952 plj
F-statistic: 8.521 on 3 and 20 degrees of freedom,    p-value: 0.0007615
```

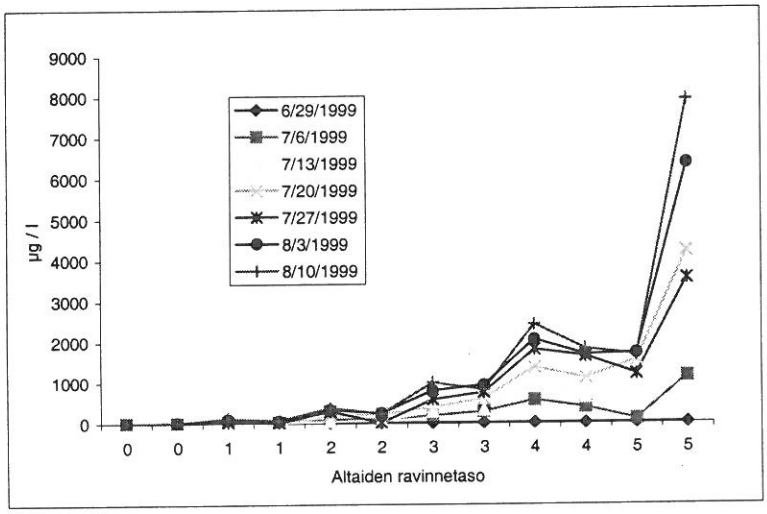
LIITE 6. SWALE-NÄYTTEENOTON TULOKSIA.



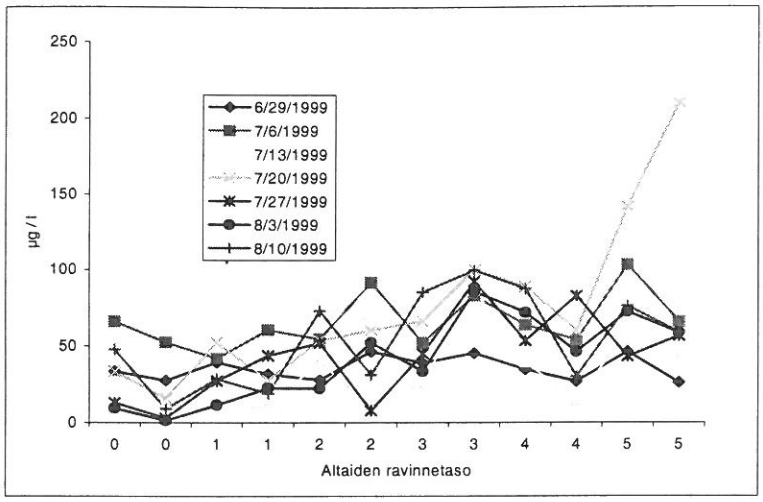
Kuva 1. SWALE – näytteenotto. Veden planktonin klorofyllipitoisuus viikkottaisina näytteenottopäivinä



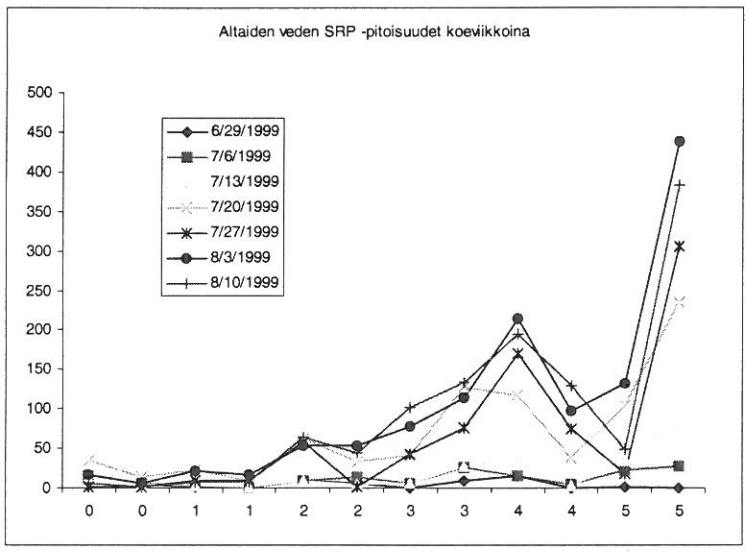
Kuva 2. SWALE – näytteenotto. Altaiden Lemna sp. kuivapainot 18.8.99



Kuva 3. SWALE – näytteenotto. Altaiden veden nitraattipitoisuudet eri näytteenottopäivinä

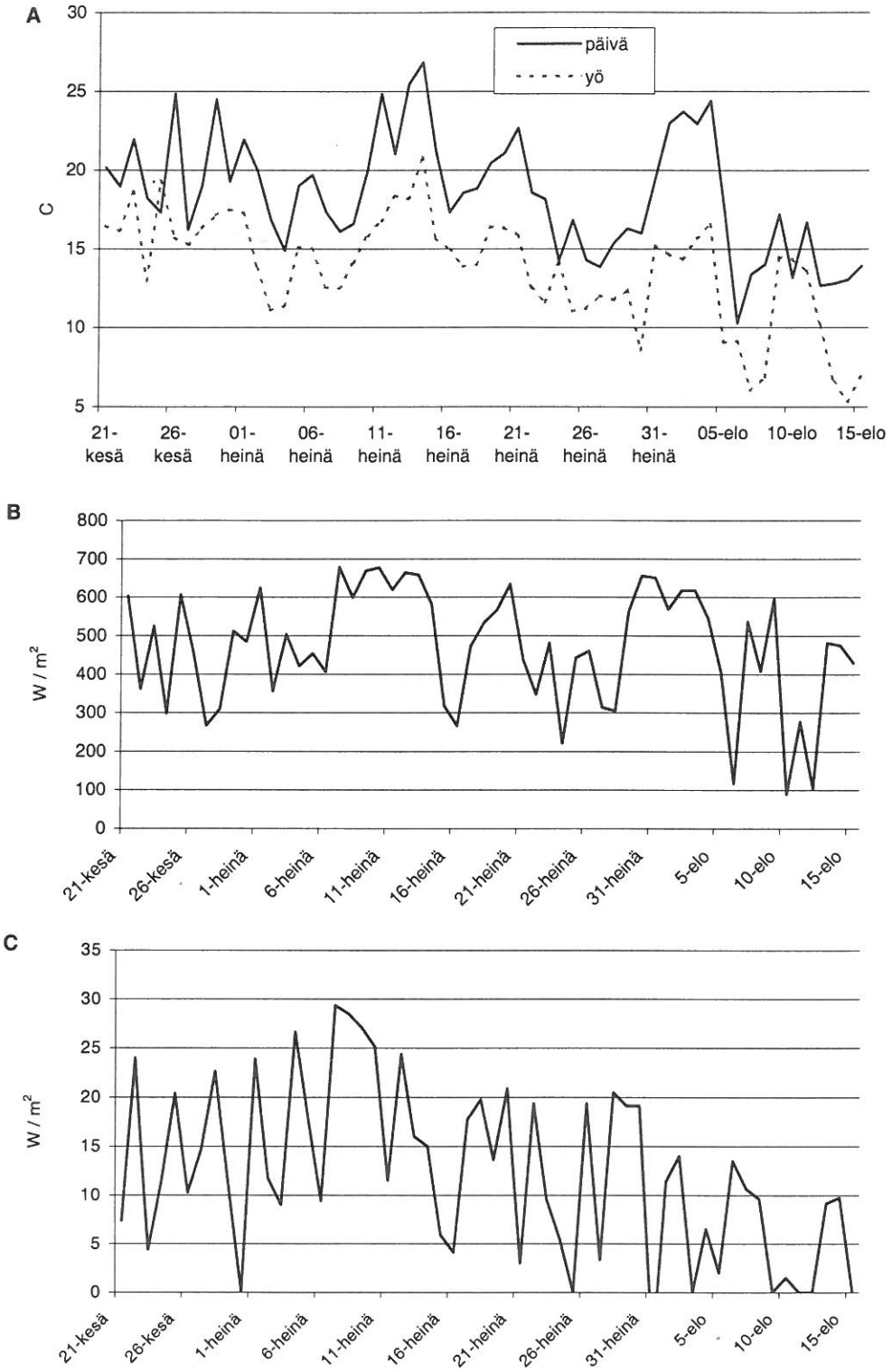


Kuva 5. SWALE – näytteenotto. Altaiden veden ammoniumpitoisuudet eri näytteenottopäivinä



Kuva 6. SWALE – näytteenotto. Altaiden veden fosfaattipitoisuudet eri näytteenottopäivinä

LIITE 7. KOEJAKSON LÄMPÖTILAT JA SÄTEILYMÄÄRÄT



Kuva 1. Keskilämpötilat (°C) 9:00 - 16:00 (päivä) ja 23:00 - 07:00 (yö) vuorokausittain koejakson aikana (A) sekä valon intesiteetin keskiarvot (W / m^2) päivällä (B) ja yöllä (C).