

Vesijärven Enonselän ulapan eläinplankton ja vedenlaatu 2021

KVY Tutkimus Oy



TUTKIMUSRAPORTTI

2022

Nro 347/22

Tiivistelmä

Eläinplanktonyhteisöä tutkimalla voidaan kustannustehokkaasti tehdä päätelmiä järven kalastosta, ravinteikkuudesta ja ekologisesta tilasta sekä arvioida järvien hoitotoimenpiteiden, kuten kalaston säätelyn vaikuttavuutta. Siksi Vesijärven Enonselällä on tutkittu eläinplanktonyhteisön rakennetta ja biomassaa jo vuodesta 1991. Alku- ja keskikesällä 2021 eläinplankton, etenkin *Daphnia*-vesikirput säätelivät kasviplanktonia, mutta levämäärät lähtivät reippaaseen kasvuun elokuussa, jolloin vesikirppubiomassa ja siten myös laidunnusteho heikkeni. Syyskuussa kasviplanktonin määrä väheni jyrkästi samaan aikaan kun vesikirput jälleen runsastuivat. Toisin kuin useimpina aiempina vuosina, loppukesällä ja syksyllä 2021 vesikirppujen yksilökoko kasvoi sekä lähellä pintaa että syvemmissä vesikerroksissa. Tämä heijastui koko kasvukauden aikaiseen vesikirppujen keskimääräiseen kokoon, joka oli suurempi kuin edellisvuosina. Tämä johtui heinäkuun puolivälissä tapahtuneesta kuoreiden joukkokuolemasta, jonka aiheutti korkea lämpötila yhdessä heikon happitilanteen kanssa. Kuore on Enonselän merkittävin eläinplanktonia ravinnokseen käyttävä kala, jonka tiheyden muutokset ovat heijastuneet vesikirppuyhteisössä paitsi kesällä 2021 myös useita kertoja aiemminkin. Vesikirppujen yksilökoko toimii siis hyvänä indikaattorina ja auttaa parantamaan koekalastuksen kautta saatavaa tietoa planktonsyöjäkalastosta, etenkin kuoreesta, jota verkko pyytää heikommin kuin muita kaloja.

Tehokkaasti ja suhteellisen valikoimattomasti leviä suodattavien suurten ja keskikokoisten *Daphnia*-vesikirppujen runsastuminen on yksi rehevöityneiden järvien kunnostuksen keskeisistä tavoitteista, johon pyritään säätelämällä kalaston rakennetta mm. hoitokalastuksella. Lisäksi ne sitovat biomassaansa huomattavasti fosforia, joka on siten poissa levien käytöstä. Enonselällä suurten ja keskikokoisten kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen, etenkin avainlajiksi kutsutun *Daphnian*, sekä niin ikään planktonleviä ravinnokseen suodattavan kookkaan *Eudiaptomus gracilis* -hankajalkaisen biomassat olivat 1990-luvulla noin kaksinkertaisia verrattuna 2000-lukuun. Vastaavasti 1990-luvun puolivälissä mitattiin alhaisimmat klorofylli a -pitoisuudet, jotka kuitenkin ne lähtivät jälleen kasvamaan 2000-luvulla, huolimatta siitä että ravinnepitoisuudet ovat olleet laskusuunnassa. Tämä viittaa siihen, että eläinplanktonilla on suuri merkitys kasviplanktonbiomassojen säätelijänä ja että ns. trophic cascade -ilmiö eli ravintoverkon eri tasojen väliset vuorovaikutussuhteet heijastuvat vedenlaadussa. Viimeisinä parina vuonna suurten ja keskikokoisten vesikirppujen biomassat ovat kasvaneet samalla kun levämäärät ja myös ravinnepitoisuudet ovat vähentyneet, joten Enonselällä tilanne vaikuttaa kehittyvän suotuisaan suuntaan.

Vesijärven Enonselän ulapan eläinplankton ja vedenlaatu 2021

Tutkimusraportti nro 347/22, 3.3.2022

Tekijä:

KVVY Tutkimus Oy / Tampere

Kirsi Kuoppamäki, FT, Dos., ympäristöasiantuntija, tutkija

Tilaaja:

Päijät-Hämeen Vesijärvisäätiö

Kansikuva:

Daphnia cucullata (pituus 0,9 mm; ns. silmämitta joka ei huomioi päähuppua) 7.9.2021 Vesijärvestä otetussa planktonnäytteessä. Lisäksi vasemmassa yläkulmassa *Chydorus sphaericus* (pituus 0,3 mm).

SISÄLTÖ

1.	Johdanto	3
2.	Aineisto ja menetelmät	4
2.1	Näytteenotto	4
2.2	Eläinplanktonnäytteiden analysointi ja tulosten käsittely	4
2.3	Vedenlaatuaineiston käsittely	4
3.	Tulokset ja tulosten tarkastelu	5
3.1	Vuoden 2021 tilanne	5
3.2	Pitkän aikavälin kehitys	9
4.	Johtopäätökset	11
5.	Kirjallisuus	12
	Liite 1.	

Vesijärven Enonselän ulapan eläinplankton ja vedenlaatu 2021

1. Johdanto

Eläinplanktonilla on merkittävä strateginen asema järviekosysteemin ravintoverkossa perustuottajien ja petojen välissä, missä se siirtää energiaa alemmilla tasoilta kasvi- ja bakteeriplanktonista ylemmille tasoille, kuten kaloihin. Kasviplanktonia eli järven tärkeintä perustuottajaryhmää laiduntamalla ja ravinteita eri suhteissa sitomalla ja kierrättämällä planktiset eläimet säätelevät leväyhteisön määrää ja koostumusta. Ne ovat planktonia syövien kalojen ja poikasvaiheessa kaikkien kalalajien tärkeä ravinnonlähde. Koska kalat etsivät ravintoa näkönsä avulla, ne valikoivat ensisijaisesti suurikokoisimpia vesikirppuja ja siten säätelevät tehokkaasti eläinplanktoniyhteisön rakennetta (O'Brien 1987, Gliwicz 2003). Järven rehevöityessä planktonia syövät kalat, tyypillisesti särkikalat runsastuvat voimakkaasti, jolloin petokalat eivät enää pysty säätelemään niiden määrää. Ravintoverkon toiminnassa tapahtuvat muutokset (trophic cascade) kiihdyttävät järvessä tapahtuvia muutoksia monimutkaisten suorien ja epäsuorien mekanismien kautta (Carpenter 2003). Eläinplanktoniyhteisössä pienikokoiset vesikirput ja rataseläimet runsastuvat, kun ravintokilpailussa vahvemmat suurikokoiset vesikirput saalistetaan pois. Samansuuntainen vaikutus on myös ravinteisuuden lisääntymisellä (Hietala ym. 2004, Vakkilainen ym. 2004; Hulot ym. 2014). *Daphnia*-suvun suurikokoiset vesikirput ovat tehokkaina laiduntajina ns. avainlajeja järviekosysteemissä, koska ne suodattavat suhteellisen valikoimattomasti monen kokoisia leviä (Gliwicz 2003). Niiden runsastuminen onkin yksi rehevöityneiden järvien kunnostuksen keskeisistä tavoitteista, johon pyritään säätelemällä kalaston rakennetta mm. hoitokalastuksella. Kun kaloja on vähän ja suurikokoiset vesikirput vallitsevat eläinplanktoniyhteisössä, kasviplanktonin biomassa on ravinnetasoon nähden pienempi kuin jos vallitsevina ovat pienikokoinen äyriäisplankton ja rataseläimet (Mazumder 1994).

Eläinplanktoniyhteisöä tutkimalla voidaan arvioida järvien hoitotoimenpiteiden vaikuttavuutta. Sen perusteella pystytään kustannustehokkaasti tekemään päätelmiä järven kalastosta, ravinteikkuudesta ja ekologisesta tilasta. Huolimatta näin merkityksellisestä roolistaan järven "avainyhteisönä" eläinplankton ei kuulu vesipuitedirektiivin mukaisen ekologisen tilaluokittelun laatukriteereihin (Jeppesen ym. 2011), ainakaan toistaiseksi. Vesijärven Enonselällä eläinplanktoniyhteisöä on kuitenkin vaihtelevasti seurattu jo vuodesta 1991 (Luokkanen 1995, Vakkilainen & Kairesalo 2005, Anttila ym. 2013, Ruuhijärvi ym. 2020). Lisäksi sitä edeltävien 6 vuoden ajalta on saatu tietoa tutkimalla vesikirppujen jäänteitä sedimentissä (Nykänen ym. 2010). Pitkät aikasarjat ovat korvaamattoman arvokkaita, jotta voidaan tutkia ekosysteemien vasteita paitsi kunnostustoimenpiteisiin myös erilaisiin häiriöihin kuten ravinnekuormitukseen ja ilmastonmuutokseen (Lindenmayer & Likens 2009).

Rehevöityneen Vesijärven Enonselän kunnostustoimien ansiosta sinileväkukinnat hävisivät 1990-luvulla ja vesi kirkastui ravintoverkon rakenteessa ja ravinnedynamiikassa tapahtuneiden monenlaisten muutosten myötä. Yksi keskeisistä tekijöistä oli vesikirppujen yksilökoon kasvu, mikä vahvisti niiden kykyä säädellä kasviplanktonia (Anttila ym. 2013). 2000-luvulla tilanne on kuitenkin heikentynyt uudelleen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on arvioida eläinplanktonin merkitystä osana Enonselän tilan kehitystä.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Näytteenotto

Eläinplanktonaineisto on kerätty Enonselän Lankiluodon syvännepisteeltä vuosina 1991-2021 lukuun ottamatta vuotta 2014, jolloin ei ollut näytteenottoa. Näytteenottoajankohta on ollut aina aamupäivällä klo 9-12. Kuten lähes kaikkina aiempina vuosina, myös vuonna 2021 näytteitä haettiin kahden viikon välein kesäkuun alusta lokakuun puoliväliin, yhteensä kymmenen kertaa. Vettä on nostettu metrin pituisella Limnos-noutimella (tilavuus 6.94 litraa) kokoomanäytteiksi 0-5, 5-10, 10-20 ja 20-30 m syvyyksiltä. Ensin 0-5 m ja 5-10 m näytteistä on otettu 1 litran osanäyte klorofylli a -pitoisuuden (chl a) määrittämistä varten. Sen jälkeen loppu vesi on suodatettu 50 µm planktonhaavin läpi. Haaville kertynyt eläinplankton (ja muu seston) on huuhdottu 250 ml näytepurkkiin ja säilötty etanoliin (lopullinen konsentraatio 70 %). Eläinplanktonnäytteenoton yhteydessä on aina mitattu myös näkösyvyys secchi-levyllä sekä veden happipitoisuus ja lämpötila metrin välein pinnasta pohjaan (optinen YSI Pro ODO vuodesta 2011).

2.2 Eläinplanktonnäytteiden analysointi ja tulosten käsittely

Eläinplanktonnäytteet yhdistettiin kokoomanäytteiksi kahdesta vesikerroksesta: 0-10 m ja 10-30 m. Aluksi molemmat puolitettiin ja toinen puolikas arkistoitiin talteen. Toinen puolikas analysoitiin ja sen jälkeen heitettiin pois. Näytteitä laimennettiin tarvittaessa osittamalla ne 1/4-, 1/8-, 1/16- ja/tai 1/32-osanäytteiksi. Lähinnä leväkukinnat olivat syynä ajoittain suureen ositusten tarpeeseen. Laimentaminen oli välttämätöntä, jotta näytteet pystyttiin analysoimaan käänteis-mikroskoopilla (Olympus IX50). Runsaimpina esiintyviä vesikirppuja pyrittiin laskemaan vähintään 100 yksilöä/laji, mikä käytännössä tarkoittaa useiden osanäytteiden käsittelyä. Eläimet laskeutettiin planktonkyvetteihin ja laskettiin koko kyvetin alalta. Hankajalkaisia (erikseen Calanoida ja Cyclopoida) mitattiin 3 yksilöä/kehitysvaihe ja aikuisista lajikohtaisesti 3 koirasta ja 3 naarasta. Runsaimpina esiintyvien vesikirppulajien pituudet mitattiin 30 yksilöstä ja muita, vähälukuisempia lajeja niin monta kuin niitä oli kaikissa laskeutetuissa osanäytteissä. *Leptodora kindtii*- ja *Bythotrepes longimanus* -petovesikirput laskettiin ja mitattiin preparointimikroskoopilla (Leica S4E) koko puolikkaasta näytteestä.

Äyriäiseläinplanktonin lajikohtaiset biomassat laskettiin lajikohtaisilla pituus:hiili-regressioyhtälöillä huomioiden mahdolliset munat ja embryot (Vasama & Kankaala 1990, Luokkanen 1995, Anja Lehtovaaran julkaisematon aineisto). Rataseläinten hiilisisältö otettiin kirjallisuudesta (Latja & Salonen 1978, Telesh ym. 1998) ja alkueläinten biomassa arvioitiin tilavuuden perusteella. Tulokset laskettiin erikseen 0-10 m ja 10-30 m syvyyksiltä sekä lisäksi koko vesipatsaasta kahden vesikerroksen tilavuuksilla painottaen. Vesikirppujen laidunnusteho laskettiin yhtälöllä $F = 11.695 * L^{2.48}$, jossa F = suodatusteho ml/eläin/päivä ja L = eläimen pituus, mm (Knoechel & Holtby 1986).

Eläinplanktonnäytteitä on analysoitu vuosilta 1991, 1993, 1994, 1997 (jolloin poikkeuksellisesti vain 5 näytettä), 1999, 2001-2006, 2009, 2011, 2013 ja 2015-2021.

2.3 Vedenlaatuaineiston käsittely

Klorofylli a -näytettä varten otettua vettä suodatettiin 300-1000 ml GF/C-lasikuitusuodattimen läpi. Suodattimet säilöttiin pakastimessa ja 2 kk kuluessa näytteenotosta niille kertyneestä kasviplanktonista uutettiin klorofylli etanoliin lämpöhauteessa (75 °C 5 min) ja määritettiin spektrofotometrisesti (SFS

5772). Saatuja tuloksia on täydennetty ympäristöhallinnon Hertta-tietokannasta haetulla aineistolla. Samasta lähteestä on haettu myös muut kasviplanktonit. Näytteenoton yhteydessä mitatun näkösyvyyden perusteella laskettiin tuottavan kerroksen syvyys yhtälöllä: $ZEU = 3.22 * ZSD^{0.83}$, jossa ZEU = tuottava kerros ja ZSD = näkösyvyys (French ym. 1982).

Eläinplanktonitutkimuksen ohessa mitattujen klorofyllipitoisuuden, näkösyvyyden, lämpötilan ja happipitoisuuden lisäksi Enonselän kahden syvänealueen näytenäytteen (Lankiluoto 10 ja Enonselkä 79; ks. Kuva 1) vedenlaatuaineisto haettiin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä Hertta-tietokannasta. Tarkempaan tarkasteluun tietokannan aineistosta tähän raporttiin otettiin kokonaisfosforipitoisuus sekä näkösyvyys ja klorofyllipitoisuus, joiden tuloksilla täydennettiin tämän tutkimuksen yhteydessä saatuja tuloksia.

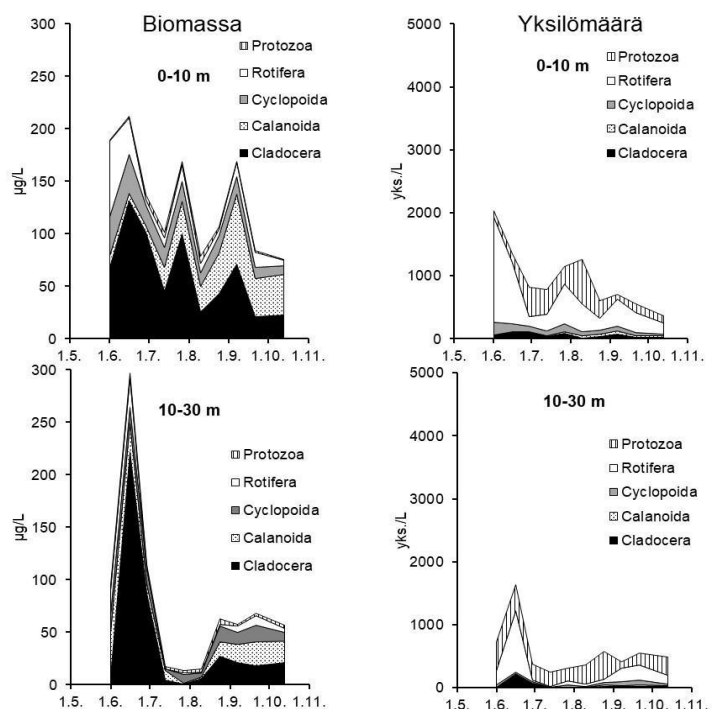
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Vuoden 2021 tilanne

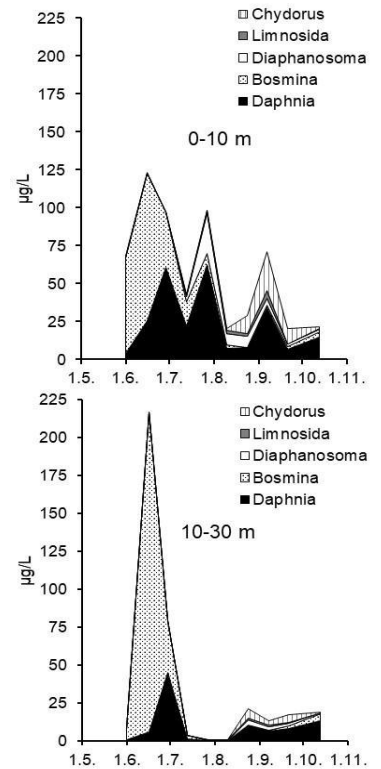
Kasvukaudella 2020 eläinplanktonin biomassa koostui lähes kokonaan äyriäisistä, mutta yksilömäärillä mitattuna vallitsevia ryhmiä olivat ratas- ja alkueläimet (Kuva 1). Rataseläinten biomassa oli suurin alkukesällä, minkä jälkeen niiden osuus eläinplanktonyhteisössä oli vaatimaton. Ylimmässä 10 m vesipatsaassa (ns. päällysvedessä) oli kasvukauden mittaan kolme biomassahuippua: kesäkuun puolivälissä ja heinäkuun lopulla, jolloin vallitseva ryhmä oli vesikirput, sekä syyskuun alussa, jolloin vesikirppujen ohella biomassaansa kasvatti *Eudiaptomus gracilis* -hankajalkainen (aikuiset yksilöt 1,1 mm pituisia). 10-30 m syvyisessä vesipatsaassa (ns. alusvedessä) vesikirpuilla oli biomassahuippu kesäkuun lopulla ja toinen matalampi elokuusta näytteenottokauden loppuun asti lokakuuhun. *Limnocalanus macrurus* -petohankajalkaisen aikuisia yksilöitä (1,5 mm) esiintyi harvalukuisena (enimmillään 4 yks./L) alusvedessä heinäkuun puoliväliin, minkä jälkeen ne hävisivät eikä yhtään yksilöä nähty enää loppukesän eikä syksyn näytteissä.

Vuonna 2021 tunnistetut eläinplanktonilajit on listattuna Taulukossa L1 (Liite 1).

Kuva 1. Vesikirppujen (Cladocera), keijuhankajalkaisten (Calanoida), kyklooppihankajalkaisten (Cyclopoida), rataseläinten (Rotifera) ja alkueläinten (Protozoa) biomassat (vasemmalla) ja yksilömäärät (oikealla) 0-10 m ja 10-30 m syvyyksillä vuonna 2021.

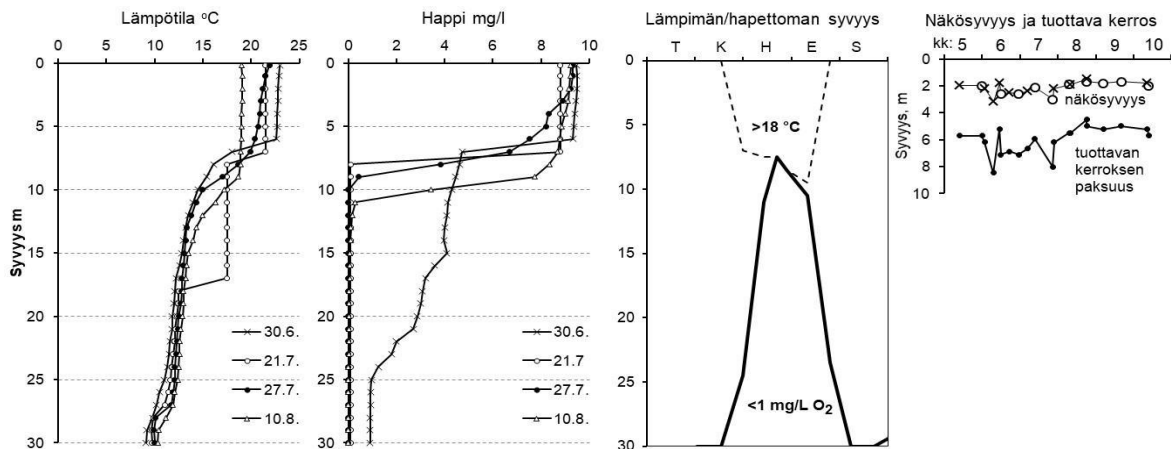


Alkukesän vesikirppumaksimien muodosti valtaosin *Bosmina*-suvun lajit (Kuva 2), etenkin alusvedessä runsaana esiintynyt *B. longirostris* (enimmillään 123 yks./L). Kesä-heinäkuun vaihteessa kohtalaisen suuren biomassan kasvattivat myös *Daphnia cucullata*, *D. cristata* ja lähinnä alusvedessä esiintynyt *D. longiremis*. Sen jälkeen vesikirput käytännössä hävisivät 10 m syvemmistä vesikerroksista aina elokuun alkupuolelle saakka, jolloin *D. cucullata* alkoi jälleen runsastua sekä pinta- että alusvedessä. Loppukesän biomassaan vaikuttivat lisäksi pienikokoinen (aikuisena vain 0.3 mm) *Chydorus sphaericus* ja keskikokoiseksi kasvava *Diaphanosoma brachyurum* (aikuisena 0.7-0.9 mm).



Kuva 2. Kasviplanktonia laiduntavien vesikirppusukujen biomassat 0-10 m ja 10-30 m syvyyksillä kesäkuusta lokakuun puoliväliin 2021.

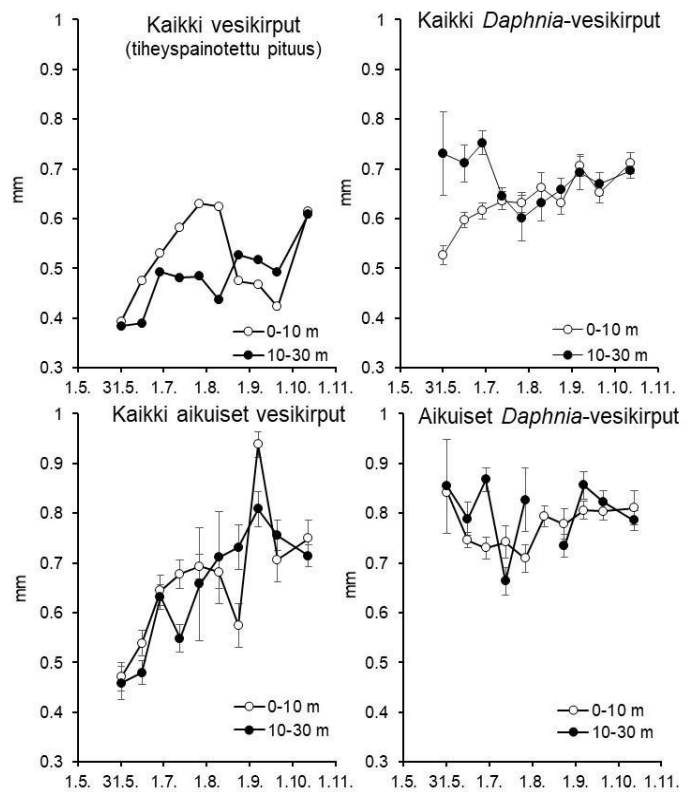
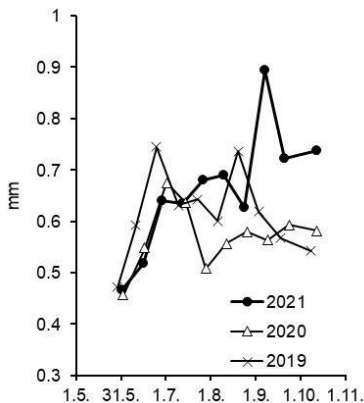
Syy biomassan romahdukseen alusvedessä heinä-elokuussa oli todennäköisesti heikko happitilanne. Vähähappisen/hapettoman alusveden paksuus kohosi pahimmillaan n. 7,5 m syvyyteen (Kuva 3). Monet vesikirput kykenevät kuitenkin selviytymään ainakin lyhytaikaisesti niukkahappisessa vedessä, koska niiden elimistössä on hemoglobiinia (Weider & Lampert 1985). Esimerkiksi *Daphnia longiremis* ja *Bosmina longirostris*, jotka molemmat ovat olleet tyypillisiä lajeja Enonselän 10 m alapuolisesta vesikerroksesta kerätyissä näytteissä, sietävät ja hyödyntävät niukkahappisia (>1 mg/L) syviä vesikerroksia, joskin kalat voivat tehdä sellaisiinkin olosuhteisiin ruokailupyrahdyksiä (Vanderploeg ym. 2009). Näkönsä avulla ruokailevien kalojen tulee kuitenkin havaita saaliseläimensä eli vähähappiseen vesikerrokseen pitää tunkeutua riittävästi valoa. Esimerkiksi kesällä 2021 näkösyvyyden perusteella laskettu valaistu ja siten tuottava kerros ulottui enimmillään 7-9 m syvyyteen eli niukkahappiseen/hapettomaan kerrokseen (Kuva 3).



Kuva 3. Vasemmalta oikealle: veden lämpötila ja liuenneen hapen pitoisuus pinnasta pohjaan 30.6., 21.7., 27.7. ja 10.8.2021 sekä kesäkuusta syyskuuhun mitatuista tuloksista lasketut syvyydet, joiden yläpuolella lämpötila oli yli 18 °C ja joiden alapuoliset vesikerrokset ovat vähähappisia tai hapettomia ja oikeanpuoleisimpana vuoden 2021 näkösyvyyksimittaukset. Eläinplanktonnäytteenoton yhteydessä tehdyt näkösyvyyksimittaukset on merkitty ympyröillä ja Hertta-fietokannasta haetut ruksilla.

Lämmin, yli 18 °C asteinen (korkeimmillaan 13.7. mitattiin pintavedessä 26 °C) ja vähähappinen ympäristö (Kuva 3) aiheuttaa sekä viileää että hapekasta vettä tarvitsevalle kuoreelle stressiä ja voi lisätä kuolevuutta (Malinen & Vinni 2018). Heinäkuun puolivälissä 2021 Enonselällä dokumentoitiinkin kuoreiden joukkokuolema (ESS 2021, YLE 2021). Kuolleisuutta aiheutti todennäköisesti myös kuhan ja ahvenen saalistus, mitä kuoret eivät kyenneet välttämään pakenemalla alusveteen hapettomuuden vuoksi, kuten vastaavassa tilanteessa vuosina 2002-2003 (Ruuhijärvi ym. 2005). Kuorekannan romahdus heijastui jo samana kesänä vesikirppuyhteisössä: etenkin aikuisten yksilöiden ja *Daphnia*-suvun vesikirppujen koko kasvoi loppukesän ja syksyn mittaan (Kuva 4). Tavallisesti Enonselällä vesikirppujen koko kasvaa alkukesällä, lähinnä pienten *Bosmina*-vesikirppujen vähenemisen ja suurempien *Daphnia*-vesikirppujen runsastumisen myötä. Loppukesällä-syksyllä yksilökoko taas pienenee, kun kuoret, niiden kesänvanhat poikaset ja pienet ahvenet käyttävät vesikirppuja ravinnokseen (Ruuhijärvi ym. 2020). Tällainen yksilökoon kehitys voidaan havaita esimerkiksi vuosina 2019 ja 2020, kun sen sijaan vuonna 2021 yksilökoko jatkoi kasvuaan loppukesällä ja alkusyksyllä (Kuva 5). Loppukesällä 2021 näytteissä esiintyi useita 1 mm mittaisia ja sitäkin suurempia *Daphnia*-yksilöitä (Kuva 6), kun yleensä vastaavana ajankohtana suurimmat yksilöt ovat saavuttaneet n. 0,7 mm pituuden. Näytteissä oli harvalukuisina mutta aiempiin vuosiin verrattuna runsaampina muitakin isokokoisia vesikirppuja, kuten *Limnoscida frontosa* (1,1-1,3 mm) ja *Bythotrepes longimanus* (1,5 mm; Kuva 7), joista jälkimmäistä ei monina aiempina vuosina ole välttämättä nähty yhtään yksilöä.

Kuva 4. Ylhäällä kaikkien kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen tiheyspainotettu yksilökoon keskiarvo ja kaikkien *Daphnia*-suvun vesikirppujen yksilökoon keskiarvo (\pm keskivirhe) ja alhaalla kaikkien aikuisten vesikirppujen yksilöiden sekä erikseen aikuisten *Daphnia*-vesikirppujen yksilökoon keskiarvo (\pm keskivirhe) 0-10 m ja 10-30 m syvyyksillä vuonna 2020. Huom! y-akselin pienin arvo on 0,3 mm (vesikirpun koko ei voi olla 0,0 mm).



Kuva 5. Kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen aikuisvaiheen yksilöiden tiheyspainotettu ja koko 0-30 m vesipatsaaseen tilavuuspainotettu pituuden keskiarvo kasvukaudella vuosina 2019, 2020 ja 2021. Huom! y-akselin pienin arvo on 0,3 mm (vesikirpun koko ei voi olla 0,0 mm).



Kuva 6. Valokuva 10.8.2021 otetusta 0-10 m näytteestä. Mm. siitä löytyi ajankohdalle epätyypillisen suuria vesikirppuja, kuten kuvassa näkyvä 1 mm pituinen *Daphnia* (vieressä puolen millin pituinen *Cyclopoida*-hankajalkaisen 4. vaiheen kopeodiittitoukka). Lisäksi tällä kuten monilla muillakin *Daphnia*-vesikirpuilla oli tavanomaista enemmän munia selkäpuolella näkyvässä sikiökammiossa. Yleensä loppukesällä niitä on vain 1-2 kpl, mutta 4 kpl, kuten kuvan yksilöllä, ei ollut tavaton näky vuonna 2021, mitä saattaa selittää yhtäältä hyvälaatuisen ravinnon saatavuus toisaalta heikentynyt kalojen saalistuspaine.

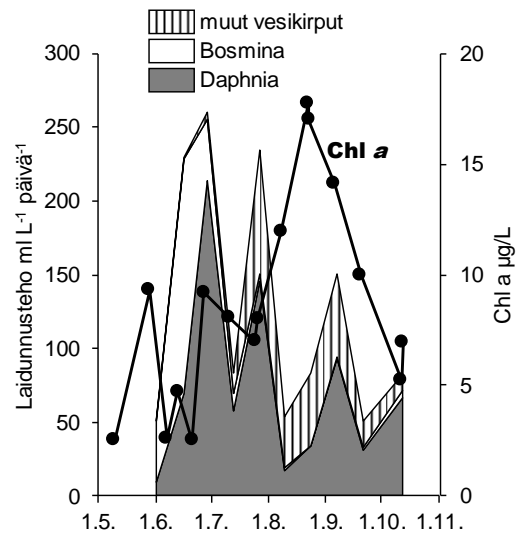


Kuva 7. *Bythotrepe longimanus* –petovesikirppu (yksilön pituus 1,5 mm, peräpiikin pituus 3 mm) 27.7.2021 otetussa päällysveden (0-10 m) näytteessä.

Kasviplanktonin säätelyn kannalta olennainen tekijä, vesikirppujen laidunnustehokkuus eli suodatusteho (engl. filtering rate, grazing rate) oli korkeimmillaan kesä-heinäkuun vaihteessa ja pienen notkahduksen jälkeen taas heinäkuun lopulla, lähinnä *Daphnian* ansiosta (Kuva 8). Heinäkuussa kasviplanktonin säätelyä tehostivat myös *Limnosida frontosa* ja *Diaphanosoma brachyurum*. Sen jälkeen heinä-elokuun alusta kasviplanktonin säätely heikkeni ja klorofylli *a* -pitoisuus lähti kasvuun, mutta yhtä jyrkästi se lähti laskemaan syyskuussa, kun vesikirppujen biomassa jälleen kasvoi ja siten laidunnus voimistui. Asiaa edisti myös vesikirppujen koon kasvu. Vesikirpun koko vaikuttaa suuresti tehokkuuteen suodattaen vedestä kasviplanktonia, sillä yksilökoon ja suodatustehokkuuden välinen suhde ei ole lineaarinen (Knoechel & Holtby 1986; ks. sivu 8). Esimerkiksi siinä missä 0.4 mm mittainen *Daphnian* nuoruusvaihe kykenee laiduntamaan leviä alle 2 ml vesitilavuudesta päivässä, 1 mm mittainen aikuinen suodattaa yli 10 ml päivässä. Vaikka *Bosmina*-vesikirppujen biomassa oli suuri alkukesällä, niiden pienen yksilökoon vuoksi laidunnus oli vaatimatonta *Daphnia*-sukuun verrattuna.

Bosminan kyky säädellä kasviplanktonia on heikompi myös siksi että se pystyy valikoivammin suodattamaan ravintoaan kuin *Daphnia*.

Kuva 8. *Daphnia*-, *Bosmina*- ja muiden vesikirppujen laidunnusteho (vasen y-akseli) laskettuna tilavuuspainotetusti koko vesipatsaasta vuonna 2021 ja esitettyinä kumulatiivisesti vesikirppuryhmittäin rasteridiagrammina. Viivadiagrammi näyttää kasviplanktonin biomassan klorofylli a -pitoisuutena (Chl a) mitattuna 0-10 m syvyydessä (oikea y-akseli). Ryhmän "muut vesikirput" merkittävimmät lajit olivat *Limnoscida frontosa* ja *Diaphanosoma brachyurum*.

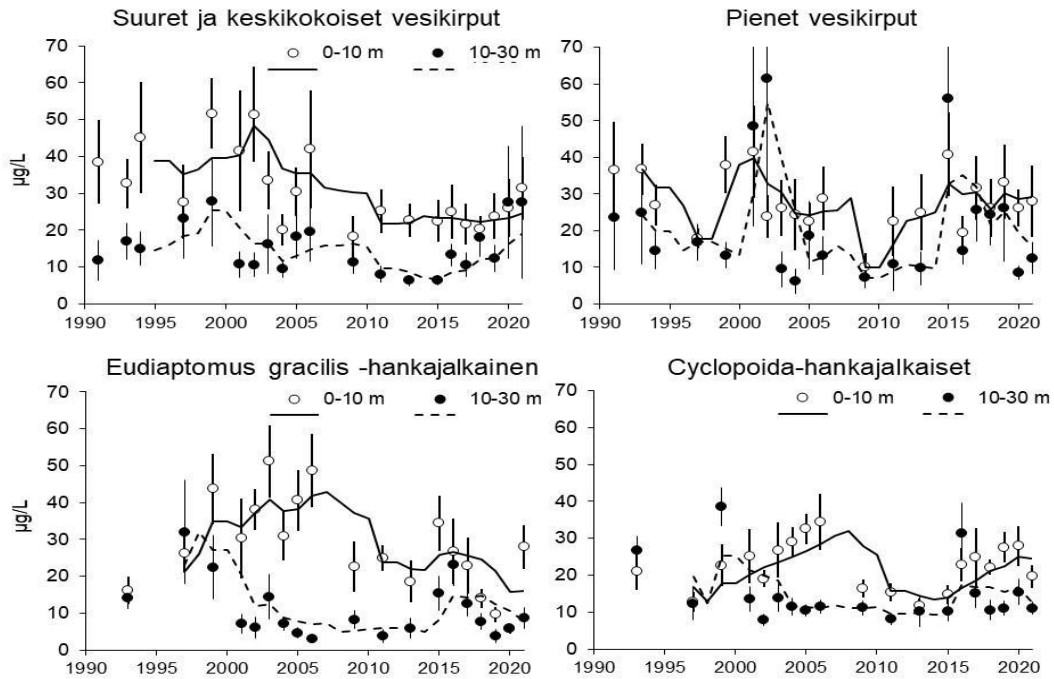


3.2 Pitkän aikavälin kehitys

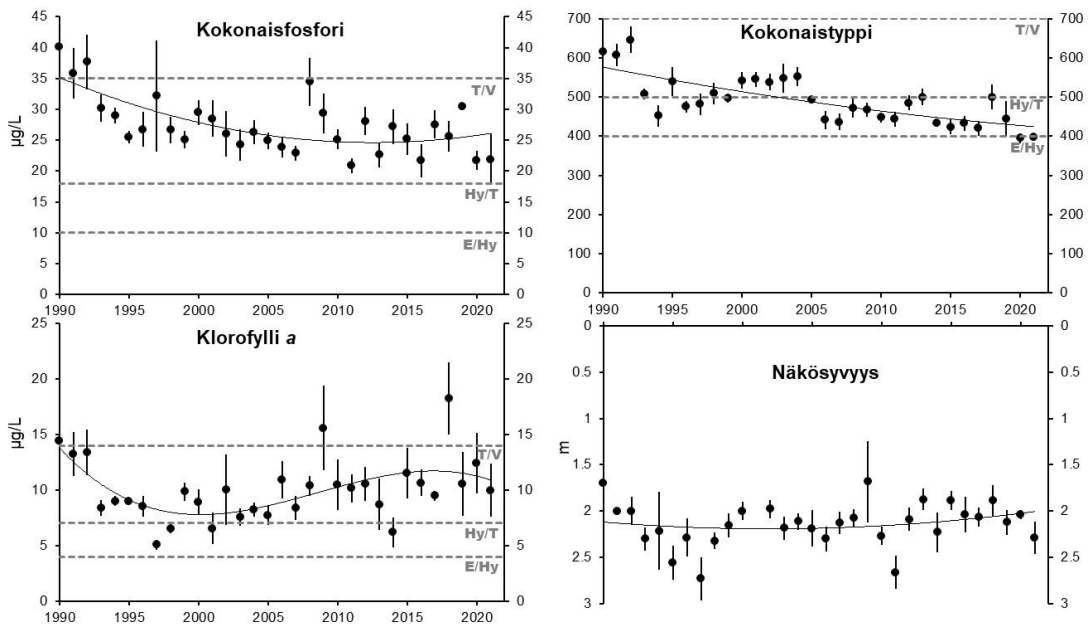
Suurten ja keskikokoisten kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen eli keskeisesti *Daphnian* sekä niin ikään planktonileviä ravinnokseen suodattavan *Eudiaptomus gracilis* -hankajalkaisen biomassossa on pitkällä aikavälillä ollut laskeva trendi. Ne ovat olleet 2000-luvulla päällysvedessä noin puolet alhaisempia kuin 1990-luvulla (Kuva 9). Sen sijaan klorofylli a -pitoisuudet olivat 1990-luvun puolivälissä alhaisimmillaan ja kohosivat jälleen 2000-luvulla, vaikka ravinnepitoisuudet ovat olleet laskusuunnassa (Kuva 12). Tämä viittaa siihen, että Enonselän ulapalla eläinplanktonilla on merkitystä kasviplanktonbiomassojen säätelijänä. Klorofyllin ja kokonaisfosforin osalta Enonselkä on yhä tyydyttävässä ekologisessa tilassa, mutta kokonaistyyppipitoisuudet ovat jo usean vuoden ajan viitanneet hyvään ekologiseen tilaan (Kuva 10).

Kun järvessä on paljon planktonia syöviä kaloja, äyriäisistä pienet vesikirput ja Cyclopoida-hankajalkaiset yleensä runsastuvat. Etenkin jälkimmäisiä on ollut viime vuosina runsaasti, mutta biomassa väheni vuonna 2021 (Kuva 9). Pienten vesikirppujen eli lähinnä *Bosminan* biomassa on vaihdellut suuresti vuosien välillä ja kuten hajontaviivoista voidaan havaita, myös vuosien sisäinen vaihtelu on ollut voimakasta eikä pitkällä aikavälillä ole havaittavissa selkeää suuntausta (Kuva 9). Enonselän ulapalla särki syö lähes yksinomaan *Bosminaa* (Ruuhijärvi ym. 2020), joten mahdollisesti suuri vaihtelu ainakin osittain selittyy särkien ajoittain voimakkaalla saalistuksella, esim. silloin kun kuoreiden määrän vähentyessä ne valtaavat elintilaa ja ravintoresurssia ulapalta (Ruuhijärvi & Ala-Opas 2018).

Enonselän veden kirkkaus näkösyvyydellä mitattuna oli suurimmillaan 1990-luvun puolivälissä, jolloin se lähenteli parhaimmillaan kolmea metriä (Kuva 12). Sen perusteella laskettu tuottavan kerroksen paksuus saattoi ulottua jopa 8 metrin syvyyteen. Sitten näkösyvyys alkoi jälleen heikentyä ja on vaihdellut 2 m molemmin puolin vailla selkeää trendiä. Siihen vaikuttaa paitsi leväsamennus myös kiintoaine, jota matalalla Enonselällä herkästi sekoittuu veteen pohjasedimentistä (Niemistö ym. 2012) ja jota huuhtoutuu ympäröivältä valuma-alueelta mm. hulevesien mukana etenkin päällystetyiltä katualueilta (Kuoppamäki ym. 2014, Valtanen ym. 2014). Tällä on suora yhteys myös fosforin sekä sisäiseen että ulkoiseen kuormitukseen.



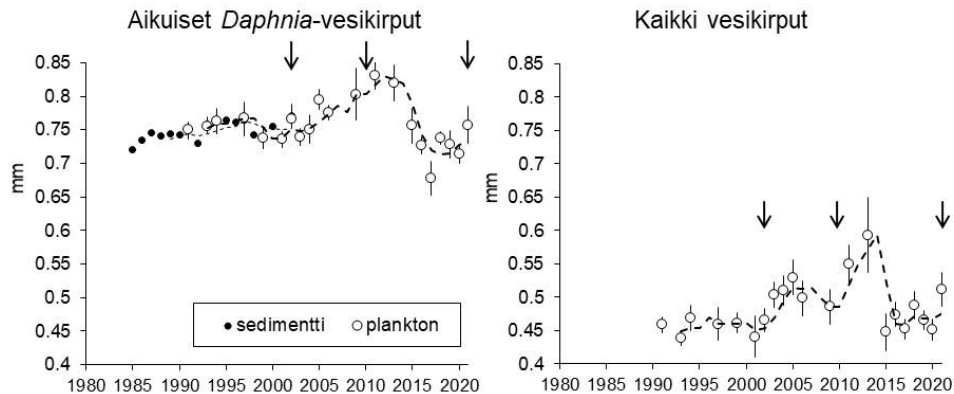
Kuva 9. Suurten ja keskikokoisten sekä pienten kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen, *Eudiaptomus gracilis* ja Cyclopoida-hankajalkaisten kesä-lokakuun vuosikeskiarvo (\pm keskivirhe) vuosien 1991 ja 2021 välillä 0-10 m ja 10-30 m syvyyksillä. Viivat osoittavat kolmen vuoden liukuvan keskiarvon.



Kuva 10. Kokonaisfosforin ja -tyypin pitoisuuksien (ylhäällä) ja klorofylli a -pitoisuuden (alhaalla vasemmalla) ja näkösyvyyden (alhaalla oikealla) kasvukauden keskiarvo (\pm keskivirhe) vuosina 1990-2021 Enonselän syvänealueella. Ekologisen tilan luokittelussa käytetyt vähähumuksisten suurten järvien raja-arvot näkyvät ravinne- ja klorofyllikuvdiagrammeissa harmailla katkoviivoina. Järvien tilasta käytetyt lyhenteet: E = erinomainen, Hy = hyvä, T = tyydyttävä, V = välttävä

Aikuisten *Daphnia*-vesikirppujen yksilökoko kasvoi 1980- ja 1990-luvuilla (Kuva 13), kun Vesijärven kunnostustoimien yhteydessä toteutetussa tehokalastuksessa planktonia syövien kalojen määrää vähennettiin yli 1200 tonnia, enimmäkseen särkiä (52 %) ja kuoretta (28 %). Heikossa happitilanteessa kuorekanta oli vuonna 2003 n. 1,4 % (560 yks./ha) siitä mitä se oli ollut vuonna 2002 (38700 yks./ha)

(Ruuhijärvi ym. 2005), mikä silloinkin heijastui nopeasti vesikirppuyhteisön yksilökoon kasvuna (Vakkilainen & Kairesalo 2005). Yksilökoko jatkoi kasvuaan vielä 2000-luvullakin (Kuva 13), mikä viittaa siihen, että kuoreen ja muiden planktonsyöjäkalojen kannat elpyivät heikosti. Kun Enonselän hapetus eli pintaveden pumppaaminen alusveteen aloitettiin syksystä 2009 alkaen, kuorekanta romahti jälleen vuonna 2010 heikon happitilanteen ja kohonneen lämpötilan vuoksi (Ruuhijärvi ym. 2020) ja vesikirppujen koko lähti kasvuun. Kesällä 2015 happitilanne oli parempi ja vaikka syvien kerrosten lämpötila oli korkea pintaveden pumppaamisen vuoksi, syntyi poikkeuksellisen suuri kuoreen vuosiluokka, joka näkyi vesikirppujen koon huomattavana pienenemisenä, kunnes kuoreiden joukkokuoleman ansiosta vuonna 2021 Enonselällä esiintyi taas kookkaampia yksilöitä (Kuva 13).



Kuva 13. Vasemmalla aikuisten *Daphnia*-suvun vesikirppujen yksilökoko sedimentistä mitattujen ephippio- eli lepomuna-subfossiilien pituuden perusteella laskettuna (=sedimentti; mustat pisteet) ja planktonnäytteistä mitattujen yksilöiden pituuden perusteella (=plankton; valkoiset pisteet, kesä-syyskuun vuosikeskiarvo \pm keskivirhe) vuosien 1985 ja 2021 välillä (Kuoppamäki & Ketola, julkaisematon aineisto). Oikealla kaikkien kasviplanktonia laiduntavien vesikirppujen (sekä aikuisten että juveniilien) yksilöpituuden kesä-syyskuun vuosikeskiarvo (\pm keskivirhe). Katkoviivat esittävät kolmen vuoden juoksevan keskiarvon. Huom! y-akselin pienin arvo on 0,4 mm (eikä 0,0 mm). Nuolet osoittavat ajankohdat, jolloin Enonselän kuorekanta romahti niille epäedullisen happi- ja lämpötilanteen vuoksi.

Enonselän 30 vuoden eläinplanktonseurannan aikana on dokumentoitu jo kolme kuorekannan romahdusta ja sen seurauksena vesikirppujen yksilökoon merkittävää kasvua – ja päinvastoin: vesikirppujen yksilökoon pieneneminen on osoittautunut etenkin kuoreiden runsastumisen seuraukseksi. Koekalastuksessa käytettävät verkot pyytävät heikosti kuoretta verrattuna muihin kaloihin, kuten ahveneeseen ja antavat siten aliarvion kuoreen todellisesta määrästä (Ruuhijärvi & Ala-Opas 2018). Vesikirppujen yksilökoko voidaan siis käyttää hyvänä planktonia syövien kalojen, etenkin runsauden indikaattorina.

4. Johtopäätökset

Enonselällä on osoitettu planktonia syövien kalojen, etenkin kuoreen säatelevän voimakkaasti eläinplanktonyhteisöä, mikä on heijastunut kasviplanktonin määrään. Vesikirppujen yksilökoko toimii hyvänä planktonsyöjäkalaston indikaattorina ja auttaa parantamaan koekalastuksella saatavaa tietoa. Nähtäväksi jää kuinka pian Enonselän kuorekanta jälleen elpyy vai kykenevätkö petokalat pitämään kuoreiden määrän matillisena vai tuleeko jälleen uusia kuoreen joukkokuolematapahtumia mahdollisesti tulevana hellekesinä. Silloin Enonselällä vallitsisi vedenlaadun kannalta suotuisa ravintoverkon rakenne ja toiminta. Enonselän ulappasysteemissä on potentiaalia rakenteeseen, jossa eläinplanktonyhteisössä vallitsevat suuri- ja keskikokoiset vesikirput ja siten yhä korkeahkosta ravintotasosta huolimatta on mahdollista vaikuttaa kalojen ja eläinplanktonin kautta planktonlevien määrään ja siten vedenlaatuun.

5. Kirjallisuus

- Anttila, S., Ketola, M., Kuoppamäki, K. & Kairesalo, T. 2013. Identification of a biomanipulation-driven regime shift in Lake Vesijärvi: implications for lake management. *Freshw. Biol.* 58: 1494-1502.
- Bandara, K., Varpe, Ø., Vijewardene, L., Tverberg, V. & Eiane, K. 2021. Two hundred years of zooplankton vertical migration research. *Biol. Rev.* 96: 1547-1589.
- ESS 2021. www.ess.fi/paikalliset/4226890
- French, R.H., Cooper, J.J. & Vigg, S. 1982. Secchi disc relationships. *Water Res. Bull.* 18: 121-123.
- Gliwicz, M. 2003. Between hazards of starvation and risk of predation: the ecology of offshore animals. *Excellence in Ecology 12*, International Ecology Institute, Germany.
- Hays 2003. A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia* 503: 163-170.
- Hietala, J., Vakkilainen, K. & Kairesalo, T. 2004. Community resistance and change to nutrient enrichment and fish manipulation in a vegetated lake littoral. *Freshw. Biol.* 49: 1525-1537.
- Hulot, F.D., Lacroix, G. & Loreau, M. 2014. Differential responses of size-based functional groups to bottom-up and top-down perturbations in pelagic food webs: a meta-analysis. *Oikos* 123: 1291-1300.
- Jeppesen, E., Nøges, P., Davidson, T.A., Haberman, J., Nøges, T., Blank, K., Lauridsen, T.L., Søndergaard, M., Sayer, C., Laugaste, R., Johansson, L.S., Bjerring, R. & Amsinck, S.L. 2011. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD). *Hydrobiologia* 676: 279-297.
- Knoechel, R. & Holtby, B.L. 1986. Construction and validation of a body-length-based model for the prediction of cladoceran community filtering rates. *Limnol. Oceanogr.* 31: 1-16.
- Kuoppamäki K., Setälä H., Rantalainen A.-H. & Kotze D.J. 2014. Urban snow indicates pollution originating from road traffic. *Env. Poll.* 195: 56-63.
- Latja R. & Salonen K. 1978. Carbon analysis for the determination of individual biomasses of planktonic animals. *Verh. Int. Verein. Limnol* 20: 2556-2560.
- Lindenmayer, D.B. & Likens, G.E. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *TREE* 24: 482-486.
- Luokkanen, E. 1995. Vesikirppuyhteisön lajisto, biomassa ja tuotanto Vesijärven Enonselällä. Helsingin yliopiston Lahden tutkimus- ja koulutuskeskuksen raportteja ja selvityksiä 25.
- Malinen, T. & Vinni, M. 2018. Vesijärven Enonselän ulapan kalayhteisön kehitys vuosina 2017 ja 2018. Tutkimusraportti, Helsingin yliopisto, Ekosysteemit ja ympäristö -tutkimusohjelma.
- Mazumder A. 1994. Phosphorus-chlorophyll relationships under contrasting herbivory and thermal stratification: predictions and patterns. *Can. J. Aquat. Sci.* 51: 390-400.
- Niemistö, J., Tamminen, P., Ekholm, P. & Horppila, J. 2012. Sediment resuspension: rescue or downfall of a thermally stratified lake? *Hydrobiologia* 686: 267-276.
- Nykänen, M., Malinen, T., Vakkilainen, K., Liukkonen, M. & Kairesalo, T. 2010. Cladoceran community responses to biomanipulation and re-oligotrophication in Lake Vesijärvi, Finland, as inferred from remains in annually laminated sediment. *Freshw. Biol.* 55: 1164-1181.
- O'Brien, W.J. 1987. Planktivory by freshwater fish: thrust and parry in the pelagia. *Teoksessa Kerfoot, W.C. & Sih, A. (toim.) Predation: direct and indirect impacts on aquatic communities.* Univ. Press of New England.
- Ruuhijärvi, J. & Ala-Opas, P. 2018. Vesijärven kalataloudellinen tarkkailu -koekalastukset vuodelta 2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Ruuhijärvi, J., T. Malinen, P. Ala-Opas & A. Tuomaala, 2005. Fish stocks of Lake Vesijärvi: from nuisance to flourishing fishery in 15 years. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 29: 384-389.
- Ruuhijärvi, J., Malinen, T., Kuoppamäki, K., Ala-Opas, P. & Vinni, M. 2020. Responses of food web to hypolimnetic aeration in Lake Vesijärvi. *Hydrobiologia* 847: 4503-4523.
- SFS 5772. Veden a-klorofyllipitoisuuden määrittäminen. Etanoliuutto. Spektrofotometrinen menetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS.
- Telesh I.V., Rahkola M. & Viljanen M. 1998. Carbon content of some freshwater rotifers. *Hydrobiologia*, 387/388: 355-360.
- Vakkilainen, K. 2005. Submerged macrophytes modify food web interactions and stability of lake littoral ecosystems. University of Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:952-10-2751-7>
- Vakkilainen, K., Kairesalo, T., Hietala, J., Balayla, D., Bécáres, E., van de Bund, W., van Donk, E., Fernández-Aláez, M., Gyllström, M., Hansson, L.-A., Miracle, M. R., Moss, B., Romo, S., Rueda, J. & Stephen, D. 2004. Response of zooplankton to nutrient enrichment and fish in shallow lakes: a pan-European mesocosm experiment. *Freshw. Biol.* 49, 1619-1632.
- Vakkilainen, K. & Kairesalo, T. 2005. Zooplankton community responses to the fish stock management of Lake Vesijärvi, southern Finland: changes in the cladoceran body size in 1999-2003. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 29: 488-490.
- Valtanen, M., Sillanpää, N. & Setälä, H. 2014. The effects of urbanisation on runoff pollutant concentrations, loadings and their seasonal patterns under cold climate. *Water Air Soil Pollut.* 225: 1977.
- Vanderploeg, H.A., Ludsin, S.A., Cavaletto, J.F., Höök, T.O., Pothoven, S.A., Brandt, S.B., Liebig, J.R. & Lang, G.A. 2009. Hypoxic zones as habitat for zooplankton in Lake Erie: Refuges from predation or exclusion zones? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 381: S108-S120.
- Vasama A. & Kankaala P. 1990. Carbon-length regressions of planktonic crustaceans in Lake Ala-Kitka (NE Finland). *Aqua Fennica*, 20, 95-102.
- Venetvaara, J. & Lammi, E. 1995: Vesijärven kasvillisuuden nykytila ja viimeaikaiset muutokset. – Teoksessa: Sammalkorpi, I., Keto, J., Kairesalo, T., Luokkanen, E., Mäkelä, M., Vääriskoski, J. & Lammi, E. (toim.) Vesijärvi-projekti 1987-1994: 101-106. Vesi- ja Ympäristöhallinnon Julkaisuja – sarja A.
- Weider, L.J. & Lampert, V. 1985. Differential response of *Daphnia* genotypes to oxygen stress: respiration rates, hemoglobin content and low-oxygen tolerance. *Oecologia* 65: 487-491.
- YLE 2021. <https://yle.fi/uutiset/3-12023326>

Liite

Taulukko L1. Vesijärven Enonselän Lankiluodon syvänteestä kerätyissä näytteissä vuonna 2021 tunnistetut eläinplanktonilajit. Tähtimerkit (*) osoittavat runsaimpina esiintyneitä lajeja.

Äyriäiset Crustacea	Rataseläimet Rotifera	Alkueläimet Protozoa
Vesikirput Cladocera kasviplanktonia, sestonia laiduntavat: <i>Bosmina crassicornis*</i> <i>Bosmina longispina</i> <i>Bosmina longirostris*</i> <i>Ceriodaphnia quadrangula</i> <i>Chydorus sphaericus*</i> <i>Daphnia cristata*</i> <i>Daphnia cucullata*</i> <i>Daphnia longiremis</i> pedot: <i>Bythotrepes longimanus</i> <i>Leptodora kindtii*</i>	kasviplanktonia ja sestonia laiduntavat lajit: <i>Ascomorpha ecaudis</i> <i>Ascomorpha ovalis</i> <i>Ascomorpha saltans</i> <i>Conochilus unicornis</i> <i>Euchlanis dilatata</i> <i>Filinia longiseta</i> <i>Gastropus stylifer</i> <i>Kellicottia bostoniensis</i> <i>Kellicottia longispina*</i> <i>Keratella cochlearis*</i> <i>Keratella cochlearis var. tecta</i> <i>Keratella hiemalis</i> <i>Keratella quadrata</i> <i>Notholca acuminata</i> <i>Polyarthra major*</i> <i>Polyarthra remata</i> <i>Polyarthra vulgaris*</i> <i>Pompholyx sulcata</i> <i>Synchaeta kitina</i> <i>Synchaeta oblonga</i> <i>Synchaeta stylata</i> <i>Trichocerca porcellus*</i> <i>Trichocerca pusilla</i> <i>Trichocerca rousseleti*</i> <i>Trichocerca similis</i> pedot/kaikkiruokaiset: <i>Asplanchna herricki</i> <i>Asplanchna priodonta</i> <i>Trichocerca capucina</i>	<i>Epistylis rotans</i> <i>Tintinnidium fluviatile</i> <i>Tinninopsis lacustris</i>
Soutajahankajalkaiset Calanoida kasviplanktonia laiduntavat lajit: <i>Eudiaptomus gracilis*</i> pedot/kaikkiruokaiset: <i>Heterocope appendiculata</i> <i>Limnocalanus macrurus</i>		
Kyklooppihankajalkaiset Cyclopoida <i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops oithonoides</i>		