



Tummuvien järvien jäljillä

– Hippicap-hankkeessa kehitetään paleolimnologista menetelmää järvivesien tummumisen biogeokemian tutkimiseen

HENRIKKA KIVILÄ, RIPSA SOININEN JA MINNA HILTUNEN

Kuva/Photo: Minna Hiltunen

Suomen Akatemian rahoittamassa (2024–2028) Hippicap-hankkeessa “Daphnia ephippia as time capsules – using dormant eggs to detect browning-induced shifts in lake biogeochemistry” tutkitaan pienten järvien tummumista yhdistäen paleolimnologisia ja kokeellisen biologian menetelmiä. Hankkeen päätavoite on kehittää uutta paleolimnologista menetelmää, jolla voidaan rekonstruoida järveden kemiallista koostumusta. Menetelmä perustuu sedimentoituneiden vesikirppujen lepomunien alkuainekoostumuksen analysointiin ja mallintamiseen. Hankkeessa tutkitaan myös, miten alueelliset poikkeamat tummumisen taustatekijöissä vaikuttavat biogeokemiaan ja miten metsätalous on vaikuttanut pienten boreaalisten järvien tummumiskehitykseen.

Tummunen ja sen taustatekijät

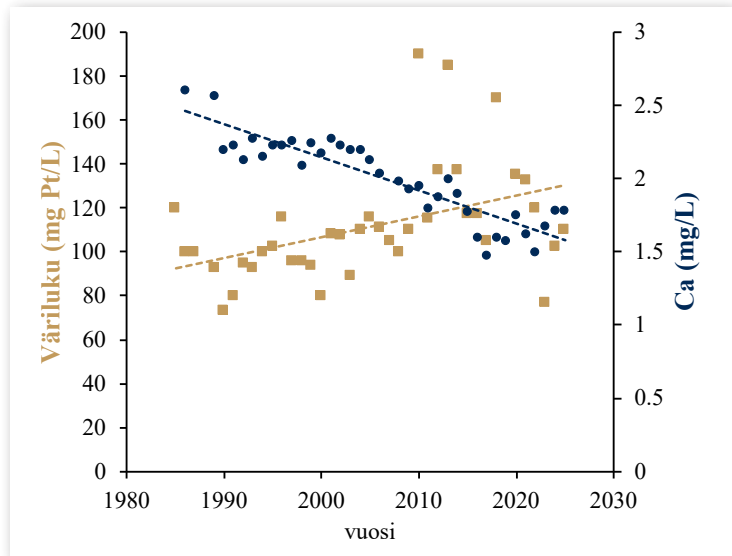
Järvivesien tummuminen johtuu ensisijaisesti värillisten, liukoisten hiilyyhdisteiden lisääntyneestä kulkeutumisesta valuma-alueiden maaperästä järviin. Samalla järviin päätyy muun muassa ravinteita, jotka yhdessä valo-olosuhteiden kanssa vaikuttavat perustuotannon määrään (Seekell ym. 2015). Tummunen vaikuttaa laajasti järvien ekologiaan, kuten lajiston koostumukseen ja monimuotoisuuteen (Blanchet ym. 2022, Estlander & Horppila 2023). Kalojen on myös todettu olevan tummissa järvissä ravinnollisesti heikkolaatuisempia kuin kirkkaissa (Taipale ym. 2016). Järvien virkistyskäyttöominaisuudet kärsivät tum-

mumisesta, ja pintaveden käyttö talousveden tuotannossa vaikeutuu, koska hiilen, kuten humusyhdisteiden, poistaminen siitä on kallista (Kritzberg ym. 2020). Tummat järvet voivat myös tuottaa enemmän kasvihuonekaasupäästöjä (Yang ym. 2015). Esimerkiksi nämä seikat tekevät tummumisesta varteenotettavan ympäristöongelman, josta ovat tutkijoiden ohella huolissaan vesistöjen käyttäjät.

Tummunen tutkimista vaikeuttaa se, ettei sitä mitaavia muuttujia rutiininomaisesti seurata tällä hetkellä. Suomessa pintavesien seuranta toteutetaan EU:n vesipuitte-direktiivin mukaisesti – luokittelu perustuu rehevöitymisen mittareihin, eikä se näin ollen ota huomioon tummumista (Horppila ym. 2024). Pitkäaikaisten trendien selvittämistä

Kuva 1. Hämeenlinnan Evola sijaitsevan Valkea-Kotisen seuranta-aineistossa nähdään selkeästi kalsiumpitoisuuden lasku järven tummumisen yhteydessä. Aineisto noudettu Hertta-tietokannasta.

Figure 1. Declining calcium concentrations are coupled with a browning trend in Lake Valkea-Kotinen (Evo, Hämeenlinna). Data is from the Hertta database.



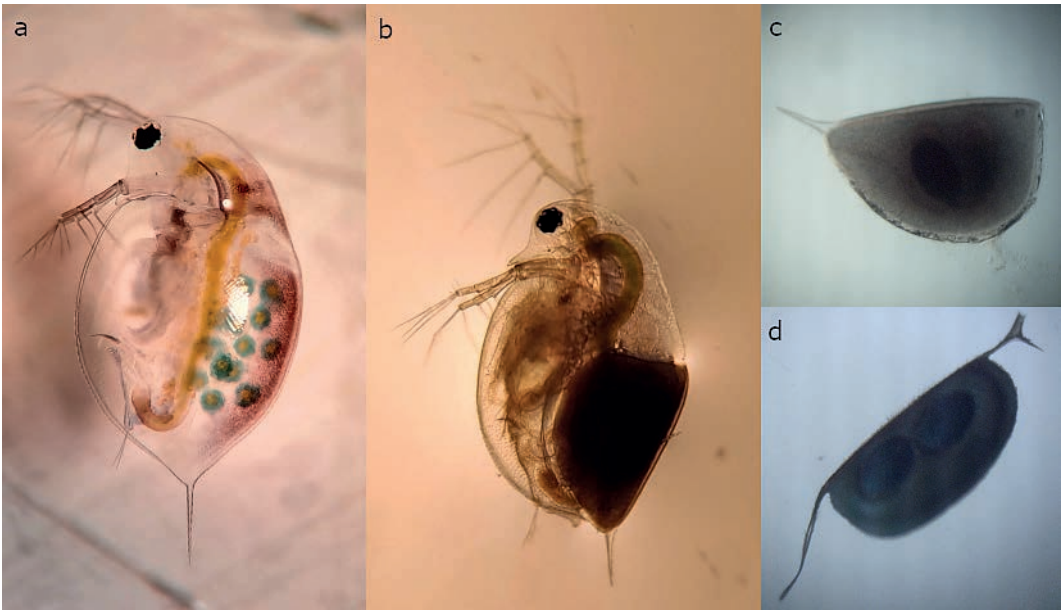
hankaloittavat lisäksi seuranta-aineistojen pirstaleisuus ja hajanaisuus. Pienet järvet ja lammet ovat ympäristöseurannassa aliedustettuja, vaikka ne kokonsa vuoksi reagoivat nopeammin muutoksiin valuma-alueellaan ja ovat siksi herkempiä tummumiselle (Blanchet ym. 2022).

Tummumisella katsotaan olevan kolme keskeistä taustatekijää: ilmastonmuutos, maankäytön muutokset ja happamoitumisesta toipuminen (Kritzberg ym. 2020, Blanchet ym. 2022). Kaksi ensimmäistä lisäävät aineksen huuhtoutumista järviin valuma-alueelta. Mekanismeja on useita, esimerkiksi maankäytön muutoksiin liittyvät turvemaiden ojitus ja muu maannosta rikkova toiminta, kuten metsien avohakkuu, maatalous tai rakennusprojektit. Ilmastonmuutos vuorostaan vaikuttaa hydrologiaan (muun muassa sadantaan) sekä valuma-alueen kasvillisuuden tuottavuuteen, ja sitä kautta maannosten hiilivarastoihin, muuttaen valuma-alueen hiilen varantoja ja kulkeutumista järviin. Arktisilla alueilla myös ikiroudan sulaminen vapauttaa hiilyhdisteitä vesistöihin.

Happamoitumisesta toipumisen vaikutusmekanismi poikkeaa edellisistä. Teolli-

suuden ja liikenteen päästöistä johtunut hapan laskeuma, erityisesti 1970–80-luvuilla, vaikutti niin vesien, metsien kuin maaperän pH-tasapainoon aiheuttaen muutoksia aineiden liukoisuudessa. Vesistöissä happamoituminen aiheutti vesien kirkastumista, ja palautumisen yhteydessä puhutaankin toisinaan uudelleen tummumisesta (*re-browning*) (Meyer-Jacob ym. 2019). Valuma-alueella helposti happamissa oloissa liukenevien aineiden, kuten kalsiumin, varannot kuuluivat vähiin, mikä johtaa palautumisen aikana näiden aineiden rajoitettuun saatavuuteen vesistöissä (Houle ym. 2006). Tämä on havaittavissa selvästi esimerkiksi Hämeenlinnan Evon alueella sijaitsevan Valkea-Kotisen seuranta-aineistosta (kuva 1), jossa kalsiumin määrä laskee samalla kun veden väri nousee.

Eri taustatekijöiden merkittävyys vaihtelee alueellisesti: esimerkiksi arktisilla alueilla ilmastonmuutos on merkittävin tekijä tummumisen taustalla, mutta borealisella vyöhykkeellä maankäytöllä on suurempi rooli. Happamoitumisen vaikutus keskittyy voimakkaimmin teollistuneiden alueiden läheisyyteen, yltäen kuitenkin laajalle pohjoisella pallonpuoliskolla. Taustatekijöiden vaihtelu



Kuva 2. a) *Daphnia longispina* -vesikirppu, jolla on selässään tavallisia munia, b) *D. pulex*, jonka selässä kasvaa lepomuna, ephippium, sekä lepomunat lajeilta c) *D. pulex* ja d) *D. magna*. Kuvat: Minna Hiltunen

Figure 2. Korvataan: "a) *Daphnia longispina* water flea with regular eggs developing on her back, b) *D. pulex* with an ephippium developing on her back, and ephippia of c) *D. pulex* and d) *D. magna*." Minna Hiltunen

aiheuttaa alueellisia eroja tummumisen biogeokemiallisissa vaikutuksissa, mutta aihetta ei ole juurikaan tutkittu. Näiden yhteyksien selvittämiseksi Hippicap-projektin tutkimusalueisiin kuuluu boreaalisia (Tvärminne, Evo ja Keski-Suomi), subarktisia (Kilpisjärvi) ja arktisia (Cambridge Bay, Nunavut, Kanada) kohteita.

Vesikirput ympäristön ilmentäjinä

Vesikirput (*Cladocera*) ovat yleisiä makean veden äyriäisiä, joiden jäänteet säilyvät hyvin sedimentissä. Tyypillisiä jäänteitä ovat vesikirppujen kuoret sekä kovakuoriset lepomunat, ephippiat (*ephippia*) (kuva 2). Monet paleoekologiset menetelmät perustuvat vesikirppujen yhteisökoostumukseen, mutta myös jäänteiden kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten isotooppikoostumukseen tai melanisaatioon (mm. Eggermont &

Martens 2011, Nevalainen & Rautio 2014, Schilder ym. 2015). Hippicap-hankkeessa selvitetään vesikirppujen sekä niiden lepomunien kemiallisen koostumuksen yhteyttä järiveden kemialliseen koostumukseen. Tarkemmaksi tutkimuskohteeksi on valittu *Daphnia*-suvun vesikirput, sillä ne ovat melko kookkaita (n. 1–5 mm), esiintyvät yleisesti boreaalis-arktisella alueella pienissä lammissa ja niitä on tutkittu paljon myös laboratorio-olosuhteissa.

Tutkimukseen sisältyy kontrolloituja laboratorioskokeita, joissa *Daphnia*-vesikirppuja kasvatetaan järvivedellä simuloivassa kasvatusliuoksessa. Tämä mahdollistaa yhden alkuaineen manipuloinnin kerrallaan kasvatusliuoksissa muiden tekijöiden pysyessä vakiona, jolloin voidaan tehokkaasti tutkia kyseisen aineen yhteyttä vesikirppujen, niiden lepomunien ja veden välillä eri konsentraatioissa. Näihin yhteyksiin perustuvia malleja verrataan luonnosta kerättyyn aineistoon.



Kuva 3. Vesi- ja pintasedimenttinäytteenottoa tutkimuslammella Kilpisjärvellä elokuussa 2025. Kuva: Minna Hiltunen

Figure 3. Sampling a tundra pond for water and surface sediments in Kilpisjärvi area, August 2025. Photo: Minna Hiltunen

Kesällä 2025 kerättiin 40 pientä järveä tai lampea kattava vesi-, eläinplankton- ja pintasedimenttiaineisto (kuva 3), jota käytetään laboratorioaineistoon perustuvien mallien validoimiseen. Myöhemmin menetelmää sovelletaan myös pidempiin sedimenttiaineistoihin, joista tutkitaan tummumiseen liittyviä alkuainekiertoja. Menetelmän odotetaan toimivan erälle yksittäisille alkuaineille, kuten kalsiumille, joka on keskeinen vesikirppujen kuorten ja lepomunien rakennusaine. Kalsiumia vesikirput ottavat myös suoraan vedestä, siinä missä osan alkuaineista, kuten fosforin, hiilen ja typen, ne saavat ensisijaisesti ravinnon kautta. Yksittäisten alkuaineiden ja alkuainesuhteiden ohella projektissa kartoitetaan lisäksi koko alkuainespektrin laajuisia muutoksia. Tähän mennessä saadut tulokset osoittavat kalsiumin ja

liuenneen orgaanisen hiilen (DOC, *dissolved organic carbon*) pitoisuuksien vaikuttavan vesikirppujen ekologiaan, kuten selviytymiseen ja poikastuotantoon. Sekä laboratorio- että kenttänäytteiden alkuainekoostumuksia analysoidaan parhaillaan. Alkuainekoostumusta on selvitetty ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) -analytiikkaan pohjautuvalla menetelmällä, jota on optimoitu vesikirppunäytteille yhdessä Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen tutkijoiden kanssa.

Paleolimnologiset menetelmät

Vesikirppujen jäänteiden alkuainekoostumukseen perustuvan menetelmän kehittämisen ohella järvien tummumishistoriaa tutkitaan sedimenttiaineistoista muilla va-



Kuva 4. Sedimenttinäytteenottoa Hämeenlinnan Evon alueella maaliskuussa 2026. Nopeasti etenevä kevät meinaisi yllättää tutkijat, mutta näytteet saatiin turvallisesti noudettua. Kuva: Minna Hiltunen

Figure 4. Collecting sediment cores in Evo (Hämeenlinna) in March 2026. The rapidly proceeding spring surprised the researchers but did not hinder safe sampling. Photo: Minna Hiltunen

kiintuneilla ja moderneilla menetelmillä. Näistä keskeisimmät ovat perustuotantoa ja veden hiilikuormaa selventävät klorofylli- ja DOC-rekonstruktio, jotka perustuvat sedimentin VNIR (*visible-near infra red*) -spektroskooppisiin ominaisuuksiin (Michelutti & Smol 2015, Meyer-Jacob ym. 2016), sekä hiilen ja typen isotooppi- ja alkuaineanalyysit, jotka auttavat sedimentin orgaanisen aineksen koostumuksen määrittämisessä (McGowan ym. 2016). Liuenneen hiilen alkuperää pyritään selvittämään soveltamalla sedimenttiin pintavesissä paljon käytettyä spektrofluorometristä menetelmää yhdistettynä PARAFAC (*parallel factor analysis*) -mallinnukseen (Wolfe ym. 2002, Murphy ym. 2013). Hyödynnämme myös paleoekologisia menetelmiä, jotka perustuvat vesikirppujen, mahdollisesti myös piilevien

ja surviaissäskentoukkien, jäänteisiin. Tutkimme lisäksi sedimentin pigmenttikööstümusta, joka kertoo kasviplanktonin yhteisökoostumuksesta (McGowan 2013). Näitä menetelmiä yhdistämällä muodostetaan kokonaiskuva tummumiseen liittyvistä biogeokemiallisista ja ekologisista muutoksista.

Taustatekijöiden vaikutuksen erottelu

Vesistöjen tummumisen ehkäisemisen kannalta yksi merkittävä haaste on, ettei tummumisen taustatekijöiden suhteellista vaikutusta ole kyetty kiistattomasti osoittamaan, mikä on vaikeuttanut vesiensuojelun ohjausta (Kritzberg ym. 2020). Suomessa yleisin maanmuokkauksen muoto on metsätalous, jonka vesistövaikutuksia on viime

aikoina tutkittu enenevässä määrin (mm. Nieminen ym. 2018, Finér ym. 2021, Härkönen ym. 2023). Metsätalouden rooliin pienten boreaalisten järvien tummumisehityksessä pureutuu Ripsa Soinin väitöskirja, jossa paleolimnologisia aineistoja tutkitaan yhdessä valuma-aluehistorian kanssa. Valuma-alueen metsätaloustoimien, kuten ojitusten ja avohakkuiden, historiaa selvitetään paikkatietoaineistojen ja vanhojen ilmakuvien avulla. Näiden aineistojen avulla myös valittiin kohdejärvet, joista noudettiin pitkät sedimenttisarat kevättälvellä 2026 (kuva 4). Metsätalouden vaikutuksen alaisia järviä verrataan kontrollijärviin, joiden valuma-alueella ei ole ollut merkittävää maankäyttöä. Kontrollijärvistä tutkitaan lisäksi tarkemmin ilmastomuutoksen vaikutuksen ja happamoitumisesta palautumisen eroavaisuuksia tummumisen biogeokemiallisissa kierroissa. Sedimenttiaineistoja järvisistä, joissa maankäytönmuutosten vaikutus on suljettu pois, kootaan eri alueilta, joissa tummumisen taustatekijät poikkeavat toisistaan (boreaalinen, subarktinen ja arktinen). Aineistoja vertailemalla pyritään erottelemaan myös happamoitumisesta toipumisen ja ilmastomuutoksen biogeokemiallisia vaikutuksia sekä selvittämään näiden alueellisia ominaispiirteitä.

FT HENRIKKA KIVILÄ
(henriikka.e.kivila@jyu.fi)

FM RIPSA SOININEN
(ripsa.r.b.soininen@jyu.fi)

FT, DOS. MINNA HILTUNEN
(minna.m.hiltunen@jyu.fi)

Bio- ja ympäristötieteen laitos
Jyväskylän yliopisto

Kirjoittajat työskentelevät Hippicap-hankkeen parissa Jyväskylän yliopistossa. Henriikka Kivilän tausta on paleolimnologiassa ja biogeokemiassa, ja hän toimii projektissa tutkijatohtorina. Ripsa Soinin tekee väitöskirjatutkimusta keskittyen metsätalouden vaikutuksiin pienten boreaalisten järvien tummumisehityksessä. Akatemiatutkija Minna Hiltunen johtaa hanketta, ja hänen taustansa on planktonekologiassa.

Summary

On a quest for browning lakes – Developing a new paleolimnological tool to study biogeochemical shifts associated with lake browning (Hippicap project)

In the Hippicap project (2024–2028) “*Daphnia ephippia* as time capsules – using dormant eggs to detect browning-induced shifts in lake biogeochemistry”, funded by the Research Council of Finland, browning of small lakes is studied using a combination of paleolimnological methods and experimental biology. Lake browning, the darkening of water colour, is caused by an increasing flow of terrestrial carbon into lakes. It is a cause for environmental concern due to many factors, such as ecological changes, reduction in the nutritional value of fish and the recreational value of lakes, as well as economic stress on drinking water production. Despite this, browning is poorly captured by lake monitoring programs. The main aim of the Hippicap project is to develop a method which could be used to reconstruct chemical composition of lake water, thereby improving the study of browning from sedimentary archives. The method is based on models between elemental composition of lake water and sedimentary ephippia, the resting eggs of *Daphnia* water fleas (*Cladocera*). The models will be created based on controlled laboratory exper-

iments, where *Daphnia* are reared in water that has a gradient of chemical compositions. These models are further validated with natural data from small lakes, for which water and surface sediment data were collected in 2025, and will later be applied to sediment cores to detect shifts in biogeochemistry. The method will be accompanied by traditional and modern paleolimnological methods to build a comprehensive picture of biogeochemical and ecological consequences of lake browning. The project will further aim to separate drivers of browning, such as climate change, land use change, and recovery from acidification. The research lakes have been selected from boreal (South-Central Finland), subarctic (Kilpisjärvi, Finland) and arctic (Cambridge Bay, Nunavut, Canada) regions that are differently affected by these drivers of browning, making it possible to study their effects separately. One focal point is the effect of forestry practices, such as ditching and clear cutting of forests, on small boreal lakes in Finland. The dissertation of Ripsa Soininen will focus on this aspect by comparing paleolimnological archives with historical information from the catchment area, including geospatial data and aerial photos, in both lakes with and without forestry activities.

Lähdeluettelo

- Blanchet C. C., Arzel C., Davranche A., Kahilainen K. K., Secondi J., Taipale S., Lindberg H., Loehr J., Manninen-Johansen S., Sundell J., Maanan M. & Nummi P. 2022. Ecology and extent of freshwater browning – What we know and what should be studied next in the context of global change. *Science of The Total Environment* 812: 152420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152420>
- Eggermont H. & Martens K. 2011. Preface: Cladocera crustaceans: sentinels of environmental change. *Hydrobiologia* 676:1–7 <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0908-9>
- Estlander S. & Horppila J. 2023. Effects of dissolved organic carbon gradient on epilimnetic zooplankton communities in lakes. *Hydrobiologia* 850: 4015–4027. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05284-6>
- Finér L., Lepistö A., Karlsson K., Räike A., Härkönen L., Huttunen M., Joensuu S., Kortelainen P., Mattsson T., Piirainen S., Sallantausta T., Sarkkola S., Tattari S. & Ukonmaanaho L. 2021. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of The Total Environment* 762: 144098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Horppila J., Nurminen L., Rajala S. & Estlander S. 2024. Making waves: The sensitivity of lakes to brownification and issues of concern in ecological status assessment. *Water Research* 249: 120964. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120964>
- Houle D., Ouimet R., Couture, S. & Gagnon C. 2006. Base cation reservoirs in soil control the buffering capacity of lakes in forested catchments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63: 471–474. <https://doi.org/10.1139/f06-007>
- Härkönen L. H., Lepistö A., Sarkkola S., Kortelainen P. & Räike A. 2023. Reviewing peatland forestry: Implications and mitigation measures for freshwater ecosystem browning. *Forest Ecology and Management* 531: 120776 <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120776>
- Kritzberg E. S., Hasselquist E. M., Skerlep M., Löfgren S., Olsson O., Stadmark J., Valinia S., Hansson L.-A. & Laudon H. 2020. Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio* 49: 375–390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>
- McGowan S. 2013. Pigment studies. *Teoksessa: Elias S., Mock C. J. (toim.). Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier, Amsterdam, Vol. 3, 326–338. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00235-1>
- McGowan S., Anderson N. J., Edwards M. E., Langdon P. G., Jones V. J., Turner S., van Hardenbroek M., Whiteford E. & Wiik E. 2016. Long-term perspectives on terrestrial and aquatic carbon cycling from palaeolimnology. *WIREs Water* 3: 211–234. <https://doi.org/10.1002/wat2.1130>
- Meyer-Jacob C., Michelutti N., Paterson A. M., Cumming B. F., Keller W. & Smol J. P. 2019. The browning and re-browning of lakes: Divergent lake-water organic carbon trends linked to acid deposition and climate change. *Scientific Reports* 9: 16676. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52912-0>
- Meyer-Jacob C., Michelutti N., Paterson A. M., Monteith D., Yang H., Weckström J., Smol J. P. & Bindler R. 2017. *Environmental Science and Technology* 51: 13248–13255. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03147>

- Michelutti N. & Smol J. P. 2016. Visible spectroscopy reliably tracks trends in paleo-production. *Journal of Paleolimnology* 56: 253–265. <https://doi.org/10.1007/s10933-016-9921-3>
- Murphy K. R., Stedmon C. A., Graeber D. & Bro R. 2013. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques, PARAFAC, *Analytical Methods* 5: 6557–6566. <https://doi.org/10.1039/C3AY41160E>.
- Nevalainen, L. & Rautio, M., 2014. Spectral absorbance of benthic cladoceran carapaces as a new method for inferring past UV exposure of aquatic biota. *Quaternary Science Reviews* 84, 109e115. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.020>
- Nieminen, M., Palviainen M., Sarkkola S., Laurén A., Marttila H. & Finér L. 2018. A synthesis of the impacts of ditch network maintenance on the quantity and quality of runoff from drained boreal peatland forests. *Ambio* 47: 523–534. doi: 10.1007/s13280-017-0966-y.
- Schilder J., Bastviken D., van Hardenbroek M., Leuenberger M., Rinta P., Stötter T. & Heiri, O. 2015. The stable carbon isotopic composition of *Daphnia ephippia* in small, temperate lakes reflects in-lake methane availability. *Limnology and Oceanography* 60: 1064e1075. <https://doi.org/10.1002/lno.10079>.
- Seekell D. A., Lapierre J.-F., Ask J., Bergström A.-K., Deininger A., Rodríguez P. & Karlsson J. 2015. The influence of dissolved organic carbon on primary production in northern lakes. *Limnology and Oceanography* 60: 1276–1285. <https://doi.org/10.1002/lno.10096>
- Taipale S. J., Vuorio K., Strandberg U., Kahilainen K. K., Järvinen M., Hiltunen M., Peltomaa E. & Kankaala P. 2016. Lake eutrophication and brownification downgrade availability and transfer of essential fatty acids for human consumption. *Environment International* 96: 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.08.018>
- Wolfe A. P., Kaushal S. S., Fulton J. R. & McKnight D. M., 2002. Spectrofluorescence of sediment humic substances and historical changes of lacustrine organic matter provenance in response to atmospheric nutrient enrichment. *Environmental Science and Technology* 36: 3217–3223. <https://doi.org/10.1021/es011215r>
- Yang H., Andersen T., Dörsch P., Tominaga K., Thrane J.-E. & Hessen D. O. 2015. Greenhouse gas metabolism in Nordic boreal lakes. *Biogeochemistry* 126: 211–225. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0154-8>

Muistutus:

Kirjoita Geologi-lehden juhlanumeroon

Geologin juhlanumero 5–6/2026 juhlistaa SGS:n 140-vuotista taivalta. Toivomme lehteen monipuolisia tekstejä, inspiraationaan seuran toiminta, historia tai tulevaisuus – tai laajemmin esimerkiksi geotieteiden historia ja kehitys Suomessa.

Kirjoittaaksesi juhlanumeroon artikkelin, otathan yhteyttä päätoimittajaan (henriikka.e.kivila@jyu.fi). Ehdotuksia artikkelien aiheista toivotaan ensisijaisesti 15.5.2026 mennessä. Aineiston toimitusaikataulu on viimeistään lokakuussa.