

Luonnon Tutkija

Nro 1 2021 124. vsk.



Pääkirjoitus

Luonnon Tutkija uudistuu

Luonnon Tutkija on yksi Suomen vanhimpia yhä julkaistavia tieteellisiä lehtiä. Sitä on julkaistu vuodesta 1897 Luonnon Ystävän ja vuodesta 1947 Luonnon Tutkijan nimellä. Se on yhä ainoa suomenkielinen yleisbiologinen tiedelehti.

Maailma muuttuu, niin myös Luonnon Tutkija. Muutos on ajankohtainen nyt, kun seuran pitkäaikainen päätoimittaja Juhani Mänttari jää eläkkeelle. Suomen Biologian Seura Vanamo ry. kiittää Juhania työstään lehden hyväksi. Uudeksi päätoimittajaksi on valittu filosofian tohtori Pasi Reunanen.

Mikä muuttuu? Luonnon Tutkijan pitää palvella sekä Vanamon jäsenlehtenä että yleisbiologisen tiedonvälittäjänä. Me toimitusneuvostossa haluamme korostaa lehden yleisbiologista luonnetta entisestään. Lehti haluaa palvella kaikkia biologeja solu- ja molekyylibiologeista yhteisö- ja ekosysteemibiologeihin. Yhtä lailla haluamme, että Luonnon Tutkija tarjoaa ikkunan biologian tutkimukseen Suomessa, unohtamatta tutkimusten taustalla puurtavia biologeja. Tätä edistämme monimuotoistamalla artikkelityyppejä.

Luonnon Tutkijassa on vuosien saatossa julkaistu vertaisarvioituja artikkeleita, mutta ne eivät ole erottuneet muista artikkelityypeistä. Vertaisarvioitu-leima auttaa lukijaa arvioimaan artikkelin luotettavuutta ja toivon mukaan lisää kiinnostusta kirjoittaa lehteen. Henkilökuvat valottavat tutkijoiden ja tutkimusten arkea. Yleistajuiset katsaukset ja tiedonannot palvelevat lukijoita laajalti, mutta niiden hankinnassa pitää aktivoitua. Vanamo ja Luonnon Tutkija haluavat myös lisätä näkyvyyttään sosiaalisessa mediassa.

Luonnon Tutkijan tärkeä tehtävä on ylläpitää ja edistää Suomen kielen asemaa biologian tietealalla. Mutta jotta voimme palvella kansainvälistä lukijakuntaa ja Suomessa asuvia ulkomaisia biologeja, joihinkin artikkelityyppeihin voidaan lisätä englanninkielinen tiivistelmä.

Ja lopuksi se suurin muutos: Luonnon Tutkija siirtyy verkkoon. Tämä osaltaan edistää yllä esitettyjen tavoitteiden saavuttamista ja mahdollistaa myös modernin tiedeviestinnän, kuten videoiden julkaisemisen. Lehden lopullinen muoto ja sisältö muotoutuu Vanamon hallituksen, Luonnon Tutkijan toimitusneuvoston ja päätoimittajan yhteistyönä jäsenkuntaa kuunnellen.

Atte Komonen, Luonnon Tutkijan toimitusneuvoston puheenjohtaja



Luonnon Tutkija

Suomen Biologian Seura Vanamo ry on julkaissut Luonnon Tutkija -lehteä vuodesta 1897 (vuoteen 1946 asti Luonnon Ystävä). Luonnon Tutkija julkaisee yleistajuisia luonnontieteellisiä biologian alaan keskittyviä artikkeleita. Luonnon Tutkija vastaanottaa ja julkaisee mielellään kaikenlaisia kirjoituksia aihepiiristä.

Päätoimittaja: Pasi Reunanen (luonnontutkija@vanamo.fi)

Kansikuva: Keskitalven aurinko valaisee metsän seinää vain puoliväliin. Valok. Pasi Reunanen

Sisältö

Luonnon Tutkija uudistuu <i>Atte Komonen</i>	2
Uuden päätoimittajan esittely	4
Miksi toiminnan tutkimus (fysiologia) on oleellinen osa ympäristöbiologiaa? <i>Mikko Nikinmaa</i>	7
Tohtori Keittiömestarin keitokset <i>Ilkka Markkula</i>	17
Kirjoittaisinko Luonnon Tutkijaan	25

Luonnon Tutkija

Toimitusneuvosto:

Atte Komonen (puh. joht.)
(atte.i.komonen@jyu.fi)

Annina Kantelinen
(annina.kantelinen@helsinki.fi)

Panu Kunttu
(panu.kunttu@iki.fi)

Anna-Liisa Ruotsalainen
(annu.ruotsalainen@oulu.fi)

Carita Lindstedt-Kareksela
(carita.a.lindstedt@jyu.fi)

Ilmoitushinnat

Kokosivu 400 euroa, puolisivu 250 euroa, takakansi 600 euroa.

Vuonna 2022 ilmestyy neljä numeroa.

Lehden taitto ja ulkoasu:

Pasi Reunanen

ISSN 0024-7383

Vanamon jäsenyys

Vanamon jäseneksi voi liittyä maksamalla jäsenmaksun ja täyttämällä lomake seuran verkkosivuilla (www.vanamo.fi). Vanamon jäsenmaksu on 37 euroa, opiskelijajäsenmaksu 30 euroa ja puolisojäsenmaksu 10 euroa. Jäsenmaksu maksetaan Vanamon tilille Danske Bank FI51 80001100070250 .

Vanamon jäsenet saavat lehden jäsenetuna. Muille vuosikerran tilaushinta on 42 euroa. Lehden voi tilata maksamalla tilaushinnan Vanamon tilille Danske Bank FI51 80001100070250. Maksun tiedotteeksi merkitään tilaajan osoite sekä tilauskausi.

Vanamon kotivut www.vanamo.fi.

Henkilökuva

Uuden päätoimittajan esittely

Luonnon Tutkija -lehden päätoimittajana aloitti vuoden 2021 lopulla FT Pasi Reunanen. Pasilla on monipuolinen tutkija- ja kirjoittaja-tausta, mutta vastailkoon hän itse omin sanoin toimitusneuvoston esittämiin kysymyksiin.

Kuka olet ja mistä tulet?

Olen aika tavallinen keski-ikäinen, harmaa-päinen suomalainen mieshenkilö. Et erottaisi minua mitenkään muista Helsingin neljän ruuhkassa vastaan astelevista samanlaisista suomalaisista miehistä. Olen alun alkaen 1960-lukulainen, paljasjalkainen helsinkiläinen, vaikka vietinkin suuren osan nuoruusvaiheistani Keravalla. Koulut kävin Helsingissä. Vasta yliopisto-opinnot erottivat minut pääkaupungin taikavoimasta ja otin suunnan pohjoiseen kohti Oulua, Perämeren valkoista kaupunkia.

Mistä ja milloin sait biologisen herätyksen?

Linnuista. Ihmisen luontoherääminen alkaa nuorena, ja silloin yksilön luontosuhde rakennetaan tukevimmalle mahdolliselle perustukselle, joka kantaa pitkälle tulevaisuuteen. Linnut ovat luontokappaleista helpoin ja kiehtovin kohde innostua tarkkailemaan luontoa. Luontoinnostus tarvitsee myös mentorin. Vanhan sukupolven luonnonystäville tärkein innoittaja oli Luonto-Liitto, minulle Suomen luonnonsuojeluliiton pääsihteeri, entinen luontoliittolainen Esko Joutsamo. Kun luonto tulee varhain nuoren lähelle, ei siitä halua pysytellä kaukana vanhempanakaan.

Opiskeluhistoriasi?

Menin Helsingin yliopistoon alun perin opiskelemaan matemaattisia luonnontieteitä, mutta aika pian elottomien numeroiden tarkkailu sai vaihtua elävän luonnon tutkimiseen, kun

vaihdoin pääaineen biologisiin tieteisiin. Tämä muutos tarkoitti myös tavaroiden pakkaamista ja muuttoa Ouluun. Tasaisella opiskeluvauhdille sain maisterin paperit neljässä vuodessa. Pääopintojen lisäksi kuuntelin välipalaksi myös filosofian luentoja. Oulussa oli tuohon aikaan hyvä ote ympäristöfilosofiin aiheisiin.

Miten kuvailisit tutkijanuraasi?

Rion ympäristökokous 1992 avasi monelle nuorelle tutkijanalulle mahdollisuuden päästä kiinni tutkijanuraan. Luonnon monimuotoisuus nousi raketin lailla yleiseen tietoisuuteen, ja biodiversiteetitutkimukseen virtasi aikaisempaa enemmän rahoitusta. Kansallinen FIBRE-hanke oli monen nykyisen tutkijan ja professorin ponnahduslauta alalle. Näistä varoista maksettiin minunkin palkka neljäksi vuodeksi, kun aloin kierrellä Koillismaan vanhoja valtion metsiä liito-oravien perässä. Väitöskirjassa selvitin lajin esiintymiseen vaikuttavia tekijöitä, tutkimus oli luonteeltaan maisemaekologista. Olin kaksi vuotta tutkijavaihdossa Pohjois-Amerikassa, minkä jälkeen juutuvin vuosiksi tutkijantöihin erilaisiin, usein ministeriöiden rahoittamiin hankkeisiin. Tutkimustyön ulkopuolella tein alustavia opintoja ympäristölainsäädäntössä ja kansantaloustieteessä. Ympäristötutkijan on hyvä olla perillä näiden kahden alan perusteeseistä.

Mitä olet puuhailut viime aikoina?

Viime vuosina olen kuluttanut paljon aikaa luonnonsuojelun lähimenneisyyttä tutkivan tietokirjan kirjoittamiseen. Olin erehtynyt kuvittelemaan, että olisin hyvin kärryillä mistä suomalaisessa luonnonsuojelussa on kysymys. Nyt tiedän, että olin katsellut historian rintakuvaa, mutta loput patsaasta oli jäänyt piiloon.



Luonnon Tutkijan toimitus siirtyi Kumpulän vehmaasta kartanomiljöstä Keski-Suomen jylyihin kuusimetsäisiin vuorimaisemiin.

Yritän kirjassani kertoa luonnonsuojelun koko kuvan yhden vuosikymmenen (1962-1972) ajalta, jolloin käsityksemme luonnonsuojelusta ja ihmisen paikasta luonnonkierrossa mullistettiin ja siirryttiin ympäristönsuojelun aikaan.

Mitkä ovat aiemmat kokemuksesi Vanamosta ja Luonnon Tutkijasta?

Minun ikäpolveni biologit värvättiin yliopistossa Vanamon jäseniksi jo ensimmäisten luentojen aikana. Jos värväyksessä onnistuttiin Luonnon Tutkija alkoi ilmestyä postiluukkuun. Mutta koska Vanamon kokoukset järjestettiin aina tieteiden talolla Helsingissä, eivät oululaiset kuukausikokouksiin osallistuneet. Vanamo jäi vieraaksi yhdistykseksi. Jos vaivautuu silmäilemään Luonnon Tutkijan/Ystävän vanhoja vuosikertoja, niin saa heti huomata, että Luonnon Tutkija on meidän kaikkien biologien oma lehti, ja ollut sellainen aina. Kaikki alalla toimineet ovat kirjoitelleet lehteen vuorollaan.

Mitkä näet Luonnon Tutkijan suurimpina haasteina?

Jos perinteen kahleen antaa vaikuttaa laahusankkurin lailla liian kauan, kaikkea toimintaa uhkaa ennen pitkää väljähtyminen. Luonnon Tutkijalla on kunniakas perinne biologian alan tärkeänä julkaisuna, jota kannattaa vaalia, mutta samalla lehden on vastattava uuden ajan huutoon. Lehden ilmettä ja jutturakennetta on kehitettävä lujan entisen julkaisulinjan päälle. Pitkiä, eri aiheita taustoittavia ja suurelle yleisölle selittäviä artikkeleita on suosittava edelleen, mutta ajan henki vaatii myös toisenlaisien sisältöjen tuottamista lehteen. Ehkä vaikein edessä oleva tehtävä on lukijakunnan laajentaminen ja uusien biologisukupolvien ja muiden biologisista aiheista kiinnostuneiden innostaminen kirjoittamaan lehteen. Luonnon Tutkija on aina suosinut juttujen aihepiirien moninaisuutta, eikä sitä saa unohtaa nytkään.

Mitkä näet biologian isoina kysymyksinä Suomessa ja maailmalla?

Biologi eikä moni muukaan kansalainen voi olla tuntematta voimattomuuden ja/tai toivottomuuden tunnetta lukiessaan päivälehtiä. Ympäristökysymys vyöryy kaiken ylle mustan pilven lailla. Ympäristöasia liittyy nykyään niin lujasti kaikkeen biologiseen tutkimukseen, että se jättää varjoonsa monia tutkimusaiheita jotka ovat yhtä tärkeitä. Biologian ja lääketieteen rajapinnassa tehtävä tutkimustyö on ihmisen hyvinvoinnille tärkeä sarka, genetiikka ratkoo ruoantuotannon mahdollisuuksia. Monet biologian ja yhteiskunnan pulmakysymykset ovat globaaleja luonteeltaan, mutta suureen osaan niistä voidaan tarttua kotimaassa jos riittävää tahtoa vain löytyy. Etupihan siivoaminen ja julkisivun kohentaminen ulkomailla ei ole uskottavaa, jos kotimaassa takapiha rehoittaa retuperänä.

Perus- vai soveltava tutkimus?

Molemmat. Ilman korkeatasoista perustutkimusta ei voi olla käytännön ongelmia ratkovaa soveltavaa tutkimustakaan. Gravitaatiota ei

keksitty ennen kuin omena putosi maahan eikä ennen kuin utelias ihminen alkoi pohtia tätä eriskummallista tapahtumaa. Omenasta seurasi se, että tänä päivänä yksinäinen satelliitti lähettää maahan tietoja aurinkokunnan perukoilta. Silloin kun perustutkimus ja soveltava tutkimus lyövät kättä hedelmällisellä tavalla, voi odottaa mielenkiintoisia ja kauas kantavia tutkimustuloksia.

Maksalaatikko: rusinoilla vai ilman?

Ei kumpikaan. Jos kysymyksellä viitataan ruokatottumukseen, niin vastaus on, että maksasta voi tehdä parempaakin ruokaa kuin laatikon. Jos taas kysymys on vertauskuvallinen, niin rusina vai ei on liian kaavamainen ja vaihtoehdoton tapa ratkaista mitään kysymyksiä. Kun maksanpala nostetaan keittiön pöydälle, päätetään ensin, mitä ruokaa siitä tehdään, vaihtoehtoja on lukemattomia. Kun rakentava keskustelu on käyty ryhdytään teroittamaan veistä. Mustavalkoinen joko-tai-ajattelu on liiankin tyypillistä meidän ajallemme. Meidän on opittava noudattamaan vanhaa ja viisasta käräjätuomarin ohjetta: *Audiat et altera pars*, kuunnelkaamme myös toista osapuolta.

Miksi toiminnan tutkimus (fysiologia) on oleellinen osa ympäristöbiologiaa?

Mikko Nikinmaa

Ilmastomuutos ja ympäristön pilaantuminen ovat nostaneet ympäristöbiologian yhdeksi keskeisistä luonnontieteiden tutkimusaloista. Perinteisesti ympäristöbiologia on mielletty ekologisteksi tutkimukseksi, joka on sujuvasti ottanut mukaan evoluution ja perinnöllisyyden näkökulmat. Kuitenkin ympäristö voi vaikuttaa eliöihin vain niiden toimintojen (fysiologian) kautta, joten myös elintoimintojen tutkimuksen pitäisi olla oleellinen osa ympäristöbiologiaa. Tässä kirjoituksessa perustelen, miksi näin on.

Johdanto

Biologia on oppi elämästä. Elollisen luonnon erottaa kivikunnasta toiminta. Vaikka elottomalla kivenmurikalla olisi täsmälleen samat DNA- ja proteiinimolekyylit kuin eliöllä, ilman toimintaa se olisi vain kivi. Lisääntyminen, liikkuminen, syöminen, yhteytys, hengitys – kaikki ne ovat elolliselle luonnolle ominaisia toimintoja. Biologian peruspilari on evoluutio, minkä ansiosta on syntynyt nykyinen biologinen lajikirjo – monimuotoisuus. Evoluutio on eliöiden perinnöllisten ominaisuuksien muutos sukupolvien saatossa. Jotta evoluutiota voisi olla, eliöiden on lisääntyttävä. Eliöt muodostavat yhteisöjä, joissa ne lisääntyvät, muuntuvat ja lajiutuvat.

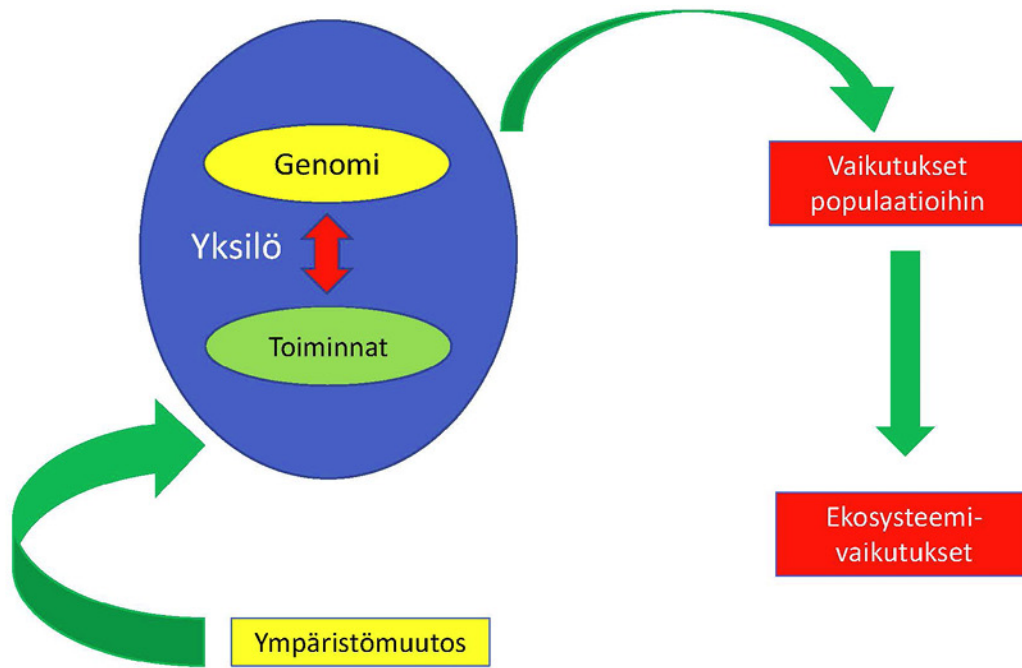
Ekologinen tutkimus selvittää eliöiden vuorovaikutuksia toistensa sekä niitä ympäröivän elottoman ympäristön kanssa. Kaikki vuorovaikutukset niin elollisen kuin elottoman ympäristön kanssa perustuvat toimintoihin: linnun muutto on aivotoimintoihin perustuvaa suunnistusta ja lentolihasien energia-ainevaihduntaa; peto-saalissuhteet ovat pakoreaktioita ja saalistusta eli aistintoimintoja ja lihaksen fysiologiaa; käyttäytymisen takana ovat monimutkaiset hermoverkot; selviytyminen eri lämpötiloissa perustuu pitkälti sydämen ja verenkierron toimintaan; sopeutuminen vähähappiseen ympäristöön riippuu hengityksen ominaisuuksista ja hapenkulutuksesta jne.

Siksi niin evoluutiobiologia kuin ekologinen

tutkimus edellyttää syvällistä eliöiden toimintojen (fysiologian) tuntemusta. Kuva 1 kuvaa periaatteellisella tasolla eri biologian alojen riippuvuuden toiminnasta. Tässä kirjoituksessa käsitelen sitä, miten eläinten vasteita ja sopeutumia muuttuvaan ympäristöön voi selvittää kunnolla vain eläinfysiologiaa ymmärtäen. Kirjoituksessa en käsittele kasvien ja mikro-organismien fysiologiaa.

Geenien ilmeneminen: mihin ympäristömuutokset voivat vaikuttaa?

Kuvassa 2 esitetään geenien ilmenemisen eri vaiheet. Eliöiden rakentumiseen tarvittava informaatio sisältyy tumassa olevaan DNA:han. Vain pari prosenttia DNA:sta on solujen valkuaisaineita koodaavia geenejä. Ennen ajateltiin, että loppu DNA olisi merkityksetöntä, mutta parin viime vuosikymmenen aikana on selvinnyt, että se tuottaa ei-koodaavia RNA-molekyylejä (mikroRNA, miR; long non-coding RNA, lncRNA), jotka vaikuttavat mRNA:n kohtaloon ja translaation tehokkuuteen, ja sisältää geenien säätelyalueita, jotka määräävät geenien luennan (transkription) tehokkuuden. Täten se osa DNA:ta, joka ei sisällä valkuaisaineita koodaavia geenejä, säätelee koodaavien geenien ilmenemistä aiheuttaen osaltaan esimerkiksi sen, että eri solutyypin valkuaisaineet ja sitä kautta ominaisuudet poikkeavat merkittävästi toisistaan.



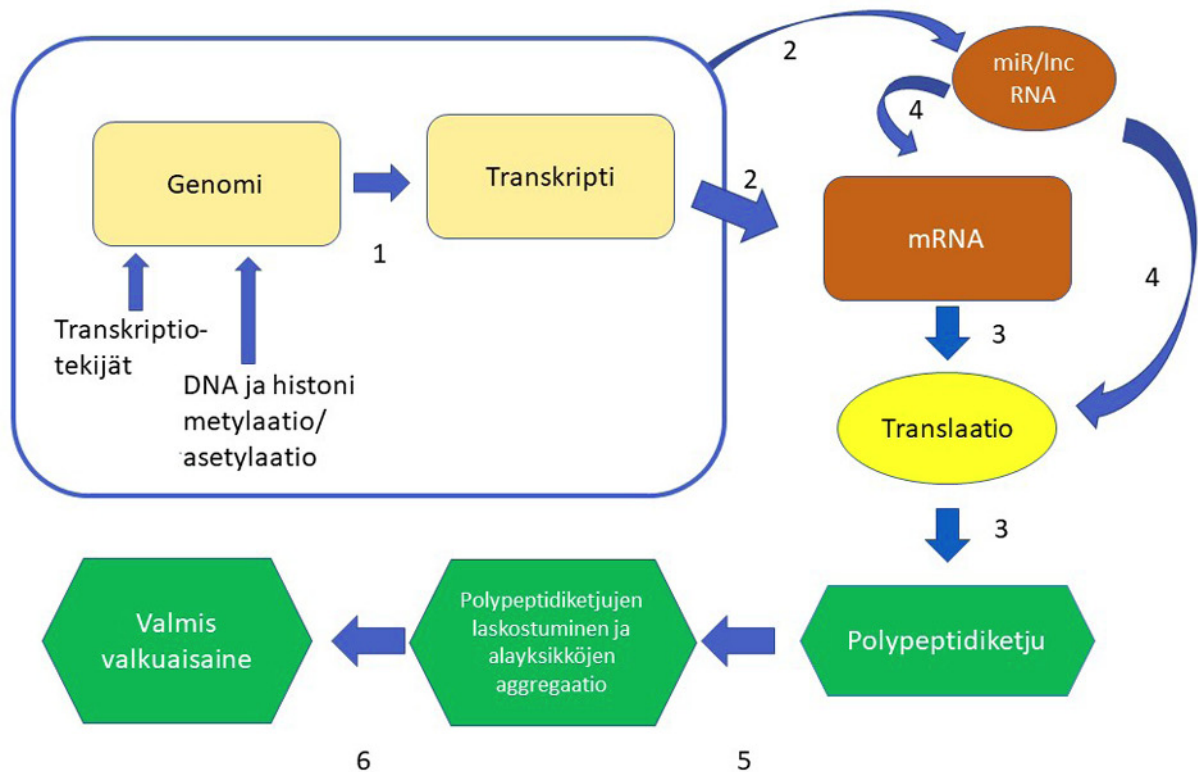
Kuva 1. Ympäristömuutoksien vaikutusreitti. Ympäristön muuttuminen vaikuttaa suoraan joko yksilöiden perimään tai niiden toimintaan. Jos vaikutus on genomiin, populaatio- ja ekosysteemi-vaikutuksia on vain, jos yksilön tai sen jälkeläisten toiminta muuttuu kelpoisuutta muuttavasti. Yksilön (ja sen jälkeläisten) toiminnan muutokset heijastuvat populaatiotasolle ja populaatioiden muutokset näkyvät ekosysteemin muutoksina.

Ensimmäisessä vaiheessa geeni luetaan. Luennan (transkription) tehokkuuteen vaikuttavat mm. epigeneettiset (DNA:n ja histonien metylaatio ja asetylaatio) ja transkriptiotekijät. Transkriptiotekijät ovat valkuaisaineita, jotka sitoutuvat geenien säätelyalueille (promoter ja enhancer). Ympäristömuutoksiin liittyen eniten on tutkittu Ah-reseptoria, hypoksian indusoimaa tekijää (HIF) ja lämpöshokkitekijää (HSF), mutta transkriptiotekijät säätelevät myös vuorokausirytmien syntyyn osallistuvia sekä metallipitoisuuksista ja hapetus-pelkistystasapainosta riippuvia geenejä. Tässä geenien ilmenemisen (geeniekspression) ensimmäisessä vaiheessa fysiologiaa ja genetiikkaa on vaikea erottaa toisistaan, koska solufysiologiset säätelymekanismit vaikuttavat geenien luentaan. Fysiologian ja genetiikan erottaminen on vaikeaa muissakin geeniekspression vaiheissa.

Geeniluennassa syntyy esi-mRNA, joka koostuu eksoneista ja introneista. Näistä intronit silmukoidaan pois, joten lopullinen mRNA

muodostuu vain eksoneista. Sama geeni voi tuottaa useita valkuaisaineita vaihtoehdoisen silmukoinnin avulla, jossa intronien lisäksi myös eri eksoneita poistetaan mRNA:sta. Silmukointi tapahtuu tumassa, minkä jälkeen transkripti siirtyy solulimaan valmiina lähetti RNA:na (mRNA).

Solulimassa mRNA:n sisältämä informaatio käännetään valkuaisaineeksi (translaatio). Translaatiota säätelevät esimerkiksi miR:t ja lncRNA:t ja ne voivat vaikuttaa joko mRNA:n pysyvyyteen tai itse translaation tehokkuuteen. Ympäristömyrkyt ja abioottiset ympäristötekijät voivat vaikuttaa translaatioon joko suoraan translaation tehokkuutta muuttamalla tai epäsuorasti miR tai lncRNA toimintaan vaikuttaen. Seuraavassa vaiheessa tapahtuu valkuaisaineen laskostuminen ja alayksikköjen yhdistyminen toiminnalliseen muotoon. Vasta tällöin geeni on ilmentynyt. Ympäristömuutokset voivat vaikuttaa valkuaisaineen muuttamiseen toiminnalliseen muotoon samoin kuin



Kuva 2. Geenien ilmenemisen vaiheet. Aluksi genomien geenit luetaan ja syntyy esi-mRNA (transkripti); 1). Luennan tehokkuutta säätelevät transkriptiotekijät ja epigeneettiset tekijät (DNA- ja histonimetylaatio ja asetylaatio). Transkripti siirtyy tumasta solulimaan valmiina lähetti-RNA:na (mRNA) tai mikro-RNA:na (miR) ja lnc RNA:na (2). Soluliman ribosomeissa mRNA:n informaatio käännetään polypeptidiketjuksi (translaatio; 3). MiR ja lncRNA voivat vaikuttaa translaation tehokkuuteen joko suoraan tai vaikuttamalla mRNA:n pysyvyyteen (4). Polypeptidiketju laskostuu oikeaan avaruudelliseen muotoonsa ja useiden valkuaisaineiden alayksiköt kerääntyvät yhteen (5) muodostaen lopullisen toiminnallisen geenituotteen, valmiin valkuaisaineen (6).

valmiin valkuaisaineen pysyvyyteen.

Viimeisessä vaiheessa ympäristömuutokset ja -myrkyt voivat vaikuttaa valmiin valkuaisainemolekyylin aktiivisuuteen. Mikäli ympäristömuutos vaikuttaa molekyylin toimintaan, eläinsolu voi reagoida tähän geeniluennan ja sitä seuraavan valkuaisainetuotannon muutoksilla. Tällöin on mahdollista, että kun esimerkiksi entsyymiaktiivisuus aluksi laskee ympäristömuutoksen vaikutuksesta, geeniluenta kiihtyy, mRNA taso nousee ja entsyymiä tuotetaan enemmän, jotta sen kokonaisaktiivisuus säilyisi yksittäisen valkuaisainemolekyylin aktiivisuuden laskemisesta huolimatta.

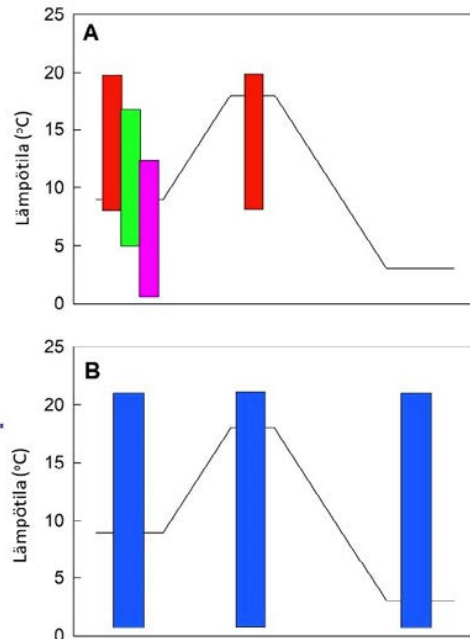
Usein on tullut tavaksi mitata mRNA:n määrä ja tehdä tästä johtopäätöksiä siitä, miten ympäristömuutos vaikuttaa eläimen toimintaan. Koska kaikki toiminnat perustuvat valkuaisai-

neiden ominaisuuksiin ja koska mRNA-tason jälkeen geenien ilmenemisessä voi tapahtua merkittävää säätelyä, tämä voi tuottaa aivan väärä tulkintoja, jos vasteena syntyviä toimintoja ei mitata. Valkuaisaine- ja mRNA-määrien muutoksien korrelaatio vaihtelee valkuaisaineesta riippuen täydestä riippumattomuudesta tiukkaan yhteyteen (Nikinmaa & Rytönen, 2011, Nikinmaa, 2014, Schwanhauser ym., 2011, Greenbaum ym. 2003). Menetelmien kehittyminen on johtanut mRNA-määrän valitettavan yleiseen käyttöön toimintojen kuvaajina. Koko genomien mRNA-määrä tietyllä hetkellä voidaan mitata RNA-sekvensoinnilla (tai aiemmin geenilastuilla) ja yksittäisten geenien tai pienten geenijoukkojen mRNA määrä kvantitatiivisen polymeraasiketjureaktion (qPCR:n) avulla. Nykyisin myös jopa tuhansien proteiini-

nien esiintyminen ja määrä voidaan mitata yhdestä näytteestä (Kang ym. 2019). Sen sijaan edelleenkin voidaan mitata yhtäaikaaisesti vain muutaman valkuaisaineen toimintaa. Lisäksi useat toimintojen mittaukset integroivat monien geenien toimintaa, jolloin useat eri reitit voivat johtaa samaan lopputulokseen (Nikinmaa & Waser 2007) – huomiota pitää kiinnittää muun muassa hermostollisiin ja hormonaalisiin vaikutuksiin sekä muihin solujen ja kudosten välisiin vuorovaikutuksiin. Esimerkiksi usein ympäristömuutoksien yhteydessä mitattava hapenkulutus riippuu satojen tai jopa tuhansien geenituotteiden toiminnasta, joten yhden geenin luennan ja hapenkulutuksen yhteyden löytäminen on sangen epätodennäköistä.

Yksilöiden välinen vaihtelu: merkittävä tekijä ympäristövasteissa

Jokaisen populaation yksilöiden ominaisuudet vaihtelevat. Perinteisesti tämän on ajateltu johtuvan populaation eri yksilöiden geneettisestä erilaisuudesta. Ympäristömuutoksiin sopeutumisen ja populaation geneettisen vaihtelun välillä onkin osoitettu olevan selvä yhteys (Powers ym. 1991). Yleensä ympäristömuutokset vähentävät populaatioiden geneettistä monimuotoisuutta. Viime vuosikymmenien aikana on kuitenkin tullut selväksi, että yksittäisen genotyypinkin yksilöiden ilmiasu vaihtelee; niillä on evoluution kannalta tärkeää fenotyypistä plastisuutta (Thompson 1991). Klonaalisia eläimiä (jotkut kalat, vesikirppu, joiden populaation kaikkien yksilöiden perimä [genomi] on täsmälleen sama) käyttäen on osoitettu, että ilmiasun vaihtelulla (fenotyypisellä plastisuudella) voi olla merkittävä osuus ympäristösopeutumisissa (Nikinmaa & Anttila 2019, Nikinmaa ym. 2019). Itse asiassa (Kuva 3) yhden genotyypin ilmiasun suuri vaihtelu on parempi strategia selviytymiselle vaihtelevissa ympäristöoloissa kuin samansuuruiseen vaihteluun alkuoloissa johtava geneettinen monimuotoisuus. Ilmiasun vaihtelu voi olla joko palautuvaa (akklimaatio) tai palautumatonta.



Kuva 3. Hypoteettinen kuva lämpötilamuutoksista selviämisestä, jos eläinpopulaatiossa esiintyvä vaihtelu on suurelta osin eri genotyyppien esiintymiseen perustuvaa (A) tai jos se johtuu yhden genotyypin ilmiasun vaihtelusta (fenotyypisestä plastisuudesta; B). A. Kaikki kolme genotyyppiä, joista populaatio koostuu, pystyvät selviytymään ja lisääntymään alkuperäisessä lämpötilassa (9 °C), mutta kun lämpötila nousee 18 °C:een vain yksi genotyyppi säilyy elossa. Lämpötilan laskiessa 3 °C:een, tämä genotyyppi ei pysty lisääntymään, jolloin laji katoaa kokonaan. B. Kun eläimen yhden genotyypin fenotyypin plastisuus on suurta, se selviää jokaisessa lämpötilassa, joten lajilla on elinvoimainen populaatio kaikkien lämpötilamuutosten jälkeen.

Yksilöiden välistä vaihtelua aiheuttavat samalla genotyypillä ainakin kehityksenaikaisten ympäristöolosuhteiden erilaisuus (johtaen yleensä palautumattomiin eroihin yksilöiden välillä), maternaaliset tekijät, joina pidän emosta munasoluun erittyviä kasvutekijöitä, hormoneja ym., ja epigeneettiset tekijät, jotka mielestäni tarkoittavat sukupolvien välisiä eroja geeniluennassa, RNA-käsittelyssä tai translaatiossa ja jotka eivät johdu emon hedelmöityneeseen munasoluun erittämistä tekijöistä. Se, miten nämä tekijät vaikuttavat vaihteluun, ymmärretään tällä hetkellä huonosti. Huonosti on selvillä myös se, missä määrin ilmiasun vaihtelu riippuu eliön geneettisestä pohjasta.

Näihin puutteisiin on pääasiallisena syynä se, että toimintojen tutkimus on jäänyt vähälle huomiolle. Hyvin vähän on tutkittu esimerkiksi sitä, miten eläimen kehityksen aikana kokema lämpötila tai happipitoisuus heijastuu aikuisen eläimen toimintoihin kuten energiankulutukseen.

Riippumatta siitä, millä mekanismeilla samanlaisen perimän omaavien eläinten vaihtelu syntyy, sen olemassaolo merkitsee sitä, että ympäristömuutoksien vaikutuksia ei voida kunnolla selvittää ilman toiminnan mittauksia. Toiminnot kun voivat reagoida ympäristömuutokseen, vaikka geneettisiä eroja eläinten välillä ei olisikaan.

Lajien väliset erot

Perinteisesti lajit on eroteltu morfologisten ominaisuuksien perusteella. Viimeaikainen molekyyli-systematiikan kehittyminen on johtanut siihen, että molekyyli-menettelmin on löydetty lajeja, joita perinteisen systematiikan keinoin ei voi erottaa. Usein näiden kryptisten lajien elinvaatimukset poikkeavat huomattavasti. Esimerkiksi Itämeren pohjassa elävien *Marzelleria*-monisukaismatolajien erottaminen toisistaan on lähes mahdotonta morfologisten ominaisuuksien perusteella, mutta onnistuu helposti viivakooditunnistuksen (DNA-barcoding) avulla. Lajien välillä on myös merkittävä ero suolapitoisuuden siedossa (Blank ym. 2004). Koska olosuhteiden sietoero voi estää lajien lisääntymisen keskenään (lisääntymisisolaatio), tämänkaltaista toimintojen eroa pitäisi käyttää nykyistä enemmän yhtenä lajimäärittelyn perusteena – se voi olla yhtä tärkeä kuin helposti havaittavat morfologiset erot (Nikinmaa & Götting 2015)

Kryptisten lajien toiminnallisilla eroilla voi olla suuri merkitys ympäristön tilan arvioinnissa. Arvioinnissa käytetään usein hyväksi yhteisöjen lajikoostumuksen ja lajien yleisyyden selvittelyä. Mikäli yhteisön merkittävä laji on oikeasti kryptinen (ja onkin kaksi toisistaan hankalasti erotettavaa lajia, joista esimerkiksi

toinen sietää alhaista happipitoisuutta hyvin ja toinen huonosti), happipitoisuuden lasku ei näytä heikentävän morfologisesti tunnistettavan lajin esiintymistä lainkaan, vaikka molekyyli-systematiikan keinoin voitaisiin osoittaa yhden lajin hävinneen ja toisen tulleen tilalle (Nikinmaa & Götting, 2015).

Ympäristömuutokset voivat vaikuttaa lajikoostumukseen, yksilöiden väliseen perinnölliseen vaihteluun, yksilöiden ilmiasun vaihteluun sekä geenien ilmenemiseen. Kun ympäristöbiologiassa perinteisesti selvitetty lajitason, ekologiset ja geneettiset muutokset voivat johtua eliöiden toiminnan muutoksista, esitän muutamia esimerkkejä ajankohtaisista ympäristömuutoksista ja siitä, miten ekologiset ilmiöt selittyvät toiminnallisilla muutoksilla. Esimerkkini ovat kaloista, joiden ympäristösopeutumia olen tutkinut yli 40 vuotta.

Lämpötilamuutokset

Muutaman viime vuosikymmenen aikana pintaveden lämpötila on noussut koko maapallolla, mutta erityisen paljon lauhkealla ja varsinkin arktisella vyöhykkeellä. Kaikki elintoiminnot riippuvat lämpötilasta. Vaihtolämpöisten eläinten hapenkulutus kasvaa lämpötilan noustessa ja lämpötilamuutosten sieto ja niihin sopeutuminen perustuvat ennen kaikkea toisaalta eläimen kykyyn kuljettaa happea kudoksiin ja toisaalta kudosten hapenkulutukseen. Sydämen ja verenkierron toiminta ja veren hapenkuljetuskyky ovat tässä ratkaisevassa asemassa (Anttila ym. 2015, Portner & Peck 2010, Nikinmaa 1981). Suurimpia luonnon ihmeitä ovat ruutanan kaltaiset kalat, joiden ruumiinlämpö voi vuodenaikaisesti vaihdella 0:n ja 30:en asteen välillä ja yhden vuorokaudenkin kuluessa yli 10 °C. Ihmisellä se merkitsisi, että eläisimme ruumiinlämmön vaihdellessa 15:stä 45:een celsiusasteeseen. Tähän verrattuna ilmaston muutoksessa toistaiseksi tapahtunut vähän yli asteen lämpötilan nousu on mitätön. Sen aiheuttamia elintoimintojen muutoksia voidaan tuskin havaita tarkoillakaan mittauksilla – itse

asiassa useimpien säätelyjärjestelmien tarkkuus lämpötilan suhteen on 0.5 °C suuntaansa, joten tähän mennessä mitattua ympäristön lämpötilan nousua ei voisi täysin varmasti edes toistaa kokeellisesti.

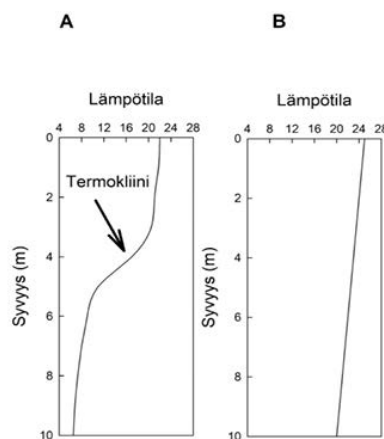
Tästä yleistyksestä tekevät poikkeuksen kaksi tilannetta, joissa jo nykyisillä oloilla voi olla merkittäviä (toiminnan muutoksista johtuvia) ekologisia vaikutuksia: helleaallot yleistyvät nostaten pintaveden lämpötilan monen kalalajin sietokykyä korkeammaksi. Kalakuolemia onkin parin viime kesän aikana ollut matalissa järvissä, koska kalat eivät ole pystyneet pumppaamaan riittävästi verta kudoksiinsa turvatakseen niiden hapensaannin. Vaikka varsinaista helleaaltoa ei olisikaan, pitkään jatkuessaan vähäinenkin ilman lämpötilan nousu voi estää termokliinin (veden lämpötilakerrostuneisuuden) synnyn (Kuva 4). Tällöin lämmintä vettä huonosti sietävät lajit eivät pääse kylmään veteen, joten niiden elinympäristön lämpötila nousee äkillisesti useilla asteilla. Tämän takia niiden sydän ei pysty pumppaamaan ja verenkierto kuljettamaan riittävästi happea elimistöön.

Todennäköisintä on kuitenkin, että ilmastonmuutoksen vaikutukset kalojen luonnonpopulaatioihin johtuvat siitä, että valaistusolosuhteiden ja lämpötilan yhteys muuttuu. Se on tähän asti ollut ehkä merkittävin toimintoja säätelevä tekijä, sillä esimerkiksi lisääntymisen säätely perustuu suurimmaksi osaksi päivän pituuden ja lämpötilan yhteyteen. Ilmastonmuutos vaikuttaa valon määrään tietyssä lämpötilassa muuttaen esimerkiksi sukupuolihormonien pitoisuuksia tietyssä aikana (Prokkola & Nikinmaa 2018, Cowan ym., 2017). Vielä ei tiedetä, miten tapahtuvat muutokset vaikuttavat luonnonpopulaatioihin; ilmastonmuutoksen voikin sanoa olevan suurimittakaavainen luonnonkoe valo-lämpötilayhteyden muutoksien vaikutuksista luonnonpopulaatioihin.

Happipitoisuuden lasku

Muutokset veden happipitoisuudessa lisää-

tyvät vesien rehevöityessä ja saastuessa sekä ilmastonmuutoksen seurauksena. IPCC julkaisi äskettäin raportin, jossa kiinnitettiin erityistä huomiota valtamerien happipitoisuuden laskuun ilmastonmuutoksen haitallisena vaikutuksena (IPCC 2019). Hapekkaassakin vedessä hapen määrä on sama kuin ilmassa yli 20 km:n korkeudessa ja happimolekyylit liikkuvat tuhansia kertoja hitaammin vedessä kuin ilmassa. Lisäksi vettä on paljon raskaampi hengittää kuin ilmaa. Lämpötilamuutoksiin verrattuna veden happipitoisuuden muutokset ovat nopeita ja suuria, koska veden lämpökapasiteetti on paljon suurempi kuin ilman mutta happikapasiteetti paljon pienempi. Näistä syistä happi on ollut ja on edelleen kalojen sopeutumista ja evoluutiota voimakkaasti määräävä tekijä. Kalat ovatkin paljon parempia hapen hyväksikäyttäjiä kuin nisäkkäät: siinä missä nisäkäkäs käyttää ehkä 15 % hengittämänsä il-



Kuva 4. A. Normaalina kesänä 10 metriä syvän järven (y-akseli, syvyys m) lämpötila (x-akseli, °C) laskee nopeasti neljän metrin syvyydessä (termokliini, nuoli) ja termokliinin alapuolella veden lämpötila säilyy jokseenkin vakiona. **B.** Hellekesänä jyrkkää lämpötilan laskua ei tapahdu missään syvyydessä.

man hapesta, kala pääsee jopa 70 % tehokkuuteen ympäröivän hapen käytössä. Evoluution tuloksena jotkut kalat selviytyvät täysin hapetomassa ympäristössä jopa kuukausitolkulla. Happipitoisuuden laskiessa vesistön kalojen lajikoostumus muuttuu. Siiat ja ahvenet häviä-

vät korvautuen särkikaloilla ja hauilla. Talvisin täysin hapettomissa pikkulammikoissa elää vain ruutanoita.

Happipitoisuuden laskun aiheuttamat lajikoostumuksen muutokset voidaan selittää eri kalalajien hapen saannin, kuljetuksen ja elimistön hapen tarpeen eroilla. Paljon happea vaativien lajien veri luovuttaa hapen korkeassa hapen osapaineessa, jolloin hapen kuljetus esimerkiksi happea tarvitseviin lihaksiin on nopeaa mahdollistaen solujen korkean hapenkulutuksen. Tämän ansiosta ne voivat olla hyvin aktiivisia pitkään, kuten lohien vaellus ja turskan jatkuva uinti osoittavat. Hauen kaltainen vaanija tulee taas toimeen vähällä hapella, koska solujen alhainen hapenkulutus ei kaipaa nopeaa hapenkuljetusta. Tarvittavan hapen hemoglobiini sitoo tehokkaasti. Ruutana on sitten asia erikseen: se pystyy säätelemään niin kidustensa kaasunvaihtopinta-alaa (Solid ym. 2003) kuin solujensa hapenkulutusta hapen saatavuuden mukaan. Se selviytyy talviaikana jopa useita kuukausia täysin ilman happea tuottamalla solujensa aineenvaihdunnassa etanolia. Tällöin se käyttää hyväkseen mitokondrioiden entsyymeistä muutamia, jotka normaalioloissa tuottavat energiaa hapestä riippuvaisesti.

Happipitoisuuden lasku voi olla joko pitkäaikainen kuten valtameren happiminimialueilla ja Itämeren pohjassa tai noudattaa matalissa rehevissä vesissä vuorokautisia syklejä (valoisalla happipitoisuus on korkea yhteytyksen ansiosta ja pimeällä matala hengityksen takia). Solujen toimintaa vähähappisessa ympäristössä säätelää ennen kaikkea hypoksian indusoima transkriptiotekijä (HIF). Se kuuluu samaan proteiiniperheeseen kuin vuorokausirytmia säätelävät CLOCK ja BMAL. HIF:in toiminnankin on osoitettu olevan rytmistä (Pelster & Egg 2018). Lisäksi se, onko kyseessä yksittäinen vai toistuva vähähappisuusjakso, vaikuttaa HIF-geeni(e)n luontaan (Rytönen ym., 2012). Vähähappisuuden lisäksi myös lämpötila vaikuttaa HIF-proteiinin määrän sää-

telyyn vaihtolämpöisillä kaloilla (Rissanen ym. 2006). Siksi solujen aineenvaihdunnan säätely rehevöityneessä ympäristössä, jossa lämpötila voi olla korkea ja happipitoisuus alhainen, on monimutkainen ilmiö, jonka selvittäminen edellyttää monipuolista elintoimintojen ymmärrystä.

Vesien saastuminen

Monet orgaaniset yhdisteet ja metallit pilaavat vesistöjä. Tämän takia on jokseenkin mahdollista sanoa, että vesistön saastuminen yleisesti aiheuttaisi jonkin yksittäisen muutoksen kalojen toiminnassa siten, että saastuminen voitaisiin kytkeä toiminnan muutoksen kautta esimerkiksi kalakannan muutoksiin. Periaatteessa voidaan kuitenkin todeta, että saastumisella voi olla vaikutuksia vain, jos saaste vaikuttaa ainakin jonkun lajin elintoimintoihin. Mikäli saasteen aiheuttama muutos on sellaisessa geenissä tai genomin osassa, joka ei vaikuta eläimen lisääntymismenestykseen tai kuolleisuuteen, geenivaikutuksella ei ole ekologista merkitystä. Saasteiden suoria vaikutuksia elintoimintoihin on tutkittu kaloilla yli 50 vuotta. Vaikka vaikutukset riippuvatkin kalalajista ja saasteesta, kaksi yleistä vaikutusreittiä ovat orgaanisten yhdisteiden detoksifikoinnissa tärkeä Ah-reseptoreitti, jossa myrkkä aiheuttaa geeniluennan muutoksia (Schlenk ym. 2008), ja oksidatiiviset stressit, jossa monet metallit ja orgaaniset yhdisteet häiritsevät soluviesintää ja aiheuttavat biomolekyylien vaurioita (Lushchak 2011). Molemmille on luonteenomaista, että saasteiden ja vuorokausirytmien, hapenpuutteen sekä lämpötilan välillä on läheinen vuorovaikutus (Prokkola & Nikinmaa 2018). Suorien vaikutusten lisäksi saastumisen vaikutukset voivat olla epäsuoria: tutkitavan lajin toiminta muuttuu sen vuoksi, että kemikaali vaikuttaa johonkin toiseen eliöön. Kemikaali on esimerkiksi haitannut vesikasvien kasvua, mikä näkyy saaliin piiloutumismahdollisuuksissa ja sen seurauksena peto-saalisuhteessa, vaikka kemikaalilla ei olisi mitään

vaikutuksia tutkittaviin eläimiin.

Merien happamoituminen

Kun 30–40 vuotta sitten Pohjolan sisävedet happamoituvat pääasiassa teollisuuden ja energiantuotannon päästöjen aiheuttaman haposateen vaikutuksesta, luonnonvesien pH saattoi laskea jopa 3 pH-yksikköä, eli vesi oli tuhat kertaa happamampaa kuin kontrollilanteessa. Sadeveden voimakas happamoituminen johti myrkyllisen alumiini-ionin vapautumiseen maaperästä ja kiviaineksesta vesiin. Erityisen alhaisessa pH:ssa (4–5) alumiini aiheuttaa suoria myrkyvaikutuksia ja pH:ssa 5–7 saostuu kudoslehdyköiden pinnalle hidastaen hapen diffuusiota kuolettavasti (Freda & McDonald 1988). Näitä alumiinin myrkyvaikutuksia, jotka tiedetään vain, jos kalojen toiminta tunnetaan hyvin, ei juurikaan mainita, kun alumiinisulfaattia käytetään rehevien järvien veden kirkastamiseksi.

Kolmenkymmenen vuoden takaiseen järvien happamoitumiseen verrattuna merien happamoitumisessa havaitut ja ennustetut pH-muutokset ovat pieniä, vain 0,3–0,5 pH-yksikköä, eli satoja kertoja happaman sateen makeassa vedessä aiheuttamia vähäisempiä. Lisäksi muutokset ovat paljon hitaampia kuin tutkimuksien kesto yleensä. Vaikka työssä selvitettäisiin, miten vuodeksi 2050 ennustettu pH-muutos vaikuttaa, useimmiten seurataan äkillisen tai muutaman päivän muutoksen vaikutuksia korkeintaan kuukauden ajan, vaikka luonnonoloissa muutokseen kuluu 30 vuotta.

Makean veden pH:n laskun aiheuttaneet haposateet johtuivat savukaasujen rikin ja typen oksideista veden kanssa muodostuneista rikkihaposta, -hapokkeesta ja typpihaposta, kun taas merien happamoituminen johtuu hiilidioksidista. Merien happamoitumisen ongelma ei varsinaisesti olekaan happamoitumisongelma – sillä pienet pH-muutokset eivät

vaikuta kaloihin juuri lainkaan ilman hiilidioksidin (hiilihapon) pitoisuuden nousua (Esbaugh 2018). On huomattava, että kokeellisessa tutkimuksessa on käytetty ja kalanviljelylaitaissa esiintyy paljon suurempia hiilidioksidipitoisuuden muutoksia kuin meressä mitatut tai ennustetut ovat. Merien happamoitumisen suorat vaikutukset happo-emästasapainoon ja hengityksen eri vaiheisiin näyttävätkin suhteellisen vähäisiltä (Nikinmaa & Anttila 2015, Lefevre 2016). Sen sijaan havaitut hajuaistin ja kylkiviiva-aistin toiminnan häiriöt voivat aiheuttaa käyttäytymisen muutoksia (Porteus ym. 2018, Tresguerres & Hamilton 2017), jotka näkyvät ekologisina vaikutuksina.

Yhteenveto

Koska eliöitä ei ole ilman toimintaa, ympäristömuutoksien tutkimuksessa on välttämätöntä ottaa huomioon toiminnan muutokset, varsinkin kun toiminta saattaa muuttua, vaikka eläimen perimä säilyy ennallaan. Lisäksi toiminnan muutos saattaa olla päinvastainen kuin geneettisen muutoksen perusteella tehty johtopäätös antaisi ymmärtää. Myös ekologisissa tutkimuksissa voidaan päätyä täysin väärin johtopäätöksiin ympäristömuutoksien vaikutuksista, jos mahdollisia toiminnan muutoksia ei selvitetä. Kryptisten lajien vasteet ympäristömuutoksiin voivat olla erilaisia. Lisäksi on mahdollista, ettei eläinyhteisön koostumus muutu, vaikka muutos vaikuttaisi muutokselle altistuneisiin eläimiin huomattavasti. Näin tapahtuu, jos muualta siirtyvät eläimet korvaavat saastuneen alueen eläinten heikentyneen lisääntymisen. Tarkoitukseni ei ole vähätellä muiden biologian alojen merkitystä, vaan muistuttaa siitä, että ympäristöbiologisen tutkimuksen mahdollisuus selittää eläinkantojen vasteita muuttuvaan ympäristöön lisääntyy merkittävästi, kun fysiologiset tekijät otetaan yksityiskohtaisesti mukaan tarkasteluun.

Kirjallisuus

- Anttila K, Lewis M, Prokkola J M, Kanerva M, Seppänen E, Kolari I & Nikinmaa M 2015 Warm acclimation and oxygen depletion induce species-specific responses in salmonids. *J. Exp. Biol.* 218: 1471-1477.
- Blank M, Bastrop R, Rohner M & Jurss K 2004 Effect of salinity on spatial distribution and cell volume regulation in two sibling species of *Marenzelleria* (Polychaeta : Spionidae). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 271: 193-205.
- Cowan M, Azpeleta C & López-Olmeda J F 2017 Rhythms in the endocrine system of fish: a review. *J. Comp. Physiol. B* 187: 1057-1089.
- Esbaugh A J 2018 Physiological implications of ocean acidification for marine fish: emerging patterns and new insights. *J. Comp. Physiol. B* 188: 1-13.
- Freda J & McDonald D G 1988 Physiological correlates of interspecific variation in acid tolerance in fish. *J. Exp. Biol.* 136: 243-258.
- Greenbaum D, Colangelo C, Williams K. & Gerstein M 2003 Comparing protein abundance and mRNA expression levels on a genomic scale. *Genome Biol.* 4: 117.
- IPCC 2019 IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- Kang Y J, Liu Z, Shi H N, Wang, J F, Huang J Q, Li Y J, Li J & Wang Y N 2019 Label-free quantification of protein expression in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in response to short-term exposure to heat stress. *Comp. Biochem. Physiol. D - Genom. Proteom.* 30: 158-168.
- Lefevre S 2016 Are global warming and ocean acidification conspiring against marine ectotherms? A meta-analysis of the respiratory effects of elevated temperature, high CO₂ and their interaction. *Conserv. Physiol.* 4: cow009
- Lushchak V I 2011 Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquat. Toxicol.* 101: 13-30.
- Nikinmaa M 1981 Respiratory adjustments of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) to changes in environmental temperature and oxygen availability. Väitöskirja, Helsingin yliopisto.
- Nikinmaa M 2014 An Introduction to Aquatic Toxicology. Elsevier - Academic Press. Oxford, Waltham MA
- Nikinmaa M & Anttila K 2015 Responses of marine animals to ocean acidification. Teoksessa: Botana L M, Louzao C & Vilarino N (toim.) *Climate Change and Marine and Freshwater Toxins.* 99-123. De Gruyter, Berlin.
- Nikinmaa M & Anttila K 2019 Individual variation in aquatic toxicology: Not only unwanted noise. *Aquat. Toxicol.* 207: 29-33.
- Nikinmaa M & Götting M 2015 DNA barcoding marine biodiversity - steps from mere cataloguing to giving reasons for biological differences. Teoksessa: Bourlat S J (toim.) *Marine Genomics: Methods and Protocols.* Springer. New York
- Nikinmaa M & Rytönen KT 2011 Functional genomics in aquatic toxicology-Do not forget the function. *Aquat. Toxicol.* 105: 16-24.
- Nikinmaa M, Suominen E & Anttila K 2019 Water-soluble fraction of crude oil affects variability and has transgenerational effects in *Daphnia magna*. *Aquat. Toxicol.* 211: 137-140.
- Nikinmaa M & Waser W 2007 Molecular and cellular studies in evolutionary physiology of natural vertebrate populations: influences of individual variation and genetic components on sampling and measurements. *J. Exp. Biol.* 210: 1847-1857.
- Pelster B & Egg M 2018 Hypoxia-inducible transcription factors in fish: expression, function and interconnection with the circadian clock. *J. Exp. Biol.* 221: jeb163709.
- Porteus C S, Hubbard P C, Webster T M U, Van Aerie R, Canario A V M, Santos E M & Wilson R W 2018 Near-future CO₂ levels impair the olfactory system of a marine fish. *Nature Climate Change* 8: 737.
- Portner H O & Peck M A 2010 Climate change effects on fishes and fisheries: towards a

- cause-and-effect understanding. *J. Fish Biol.* 77: 1745-1779.
- Powers D A, Lauerman T, Crawford D & Dimichele L 1991 Genetic mechanisms for adapting to a changing environment. *Annu. Rev. Gen.* 25: 629-659.
- Prokkola J M & Nikinmaa M 2018 Circadian rhythms and environmental disturbances – underexplored interactions. *J. Exp. Biol.* 221: jeb179267.
- Rissanen E, Tranberg H K, Sollid J, Nilsson G E & Nikinmaa M 2006 Temperature regulates hypoxia-inducible factor-1 (HIF-1) in a poikilothermic vertebrate, crucian carp (*Carassius carassius*). *J. Exp. Biol.* 209: 994-1003.
- Rytkönen K T, Renshaw G M C, Vainio P P, Ashton K J, Williams-Pritchard G, Leder E H & Nikinmaa M 2012 Transcriptional responses to hypoxia are enhanced by recurrent hypoxia (hypoxic preconditioning) in the epaulette shark. *Physiol. Genom.* 44: 1090-1097.
- Schlenk D, Celandier M, Gallagher E P, George S, James M, Kullman S W, Van Den Hurk P & Willett K 2008 Biotransformation in Fishes. Teoksessa Di Giulio R T & Hinton D E (toim.) *The Toxicology of Fishes*. CRC Press Boca Raton, Florida
- Schwanhauser B, Busse D, Li N, Dittmar G, Schuchhardt J, Wolf J, Chen W & Selbach M 2011 Global quantification of mammalian gene expression control. *Nature* 473: 337-342.
- Sollid J, De Angelis P, Gundersen K & Nilsson G E 2003 Hypoxia induces adaptive and reversible gross morphological changes in crucian carp gills. *J. Exp. Biol.* 206: 3667-3673.
- Thompson J D 1991 Phenotypic plasticity as a component of evolutionary change. *Trends Ecol. Evol.* 6: 246-249.
- Tresguerres M & Hamilton T J 2017 Acid-base physiology, neurobiology and behaviour in relation to CO₂-induced ocean acidification. *J. Exp. Biol.* 220: 2136-2148.

Mikko Nikinmaa on Turun yliopiston Biologian laitoksen eläinfysiologian emeritusprofessori. Hän on tutkinut ympäristömuutosten erityisesti lämpötilan ja happipitoisuuden muutosten vaikutuksia kaloihin 1970-luvun loppupuolelta alkaen. Hän toimi *Aquatic Toxicology* -lehden päätoimittajana 2005-2019.

Historian havina

Tohtori Keittiömestarin keitokset

Ilkka Markkula

Friedrich Küchenmeister (1821 – 1890) oli saksalainen lääkäri ja monipuolinen tiedemies. Hän selvitti ensimmäisenä väkäsheisimadon koko elämänkierron, ja ratkaisi samalla pitkään pohditun arvoituksen suolistoloisten alkuperästä. Monien kollegoidensa tavoin hän teki tartutuskokeita sekä eläimillä että ihmisillä ja sai hiukan kolkon jälkimaineen, koska hänen kaksi koehenkilöönsä olivat kuolemaantuomittuja vankeja. Küchenmeisterin tarinan lisäksi tässä kirjoituksessa kuvataan lyhyesti yleisimmät ihmisen heisimadot sekä lapamadon historia Suomessa.

Tuntematon tieteen sankari

Vuonna 1854 eräessä Saksin kuningaskunnan vankilassa lusikoi kuolemaan tuomittu vanki yhtä viimeisistä aterioistaan. Perinteenä oli, että tuomitun ruoka oli viimeisinä päivinä tavallista parempaa. Hyvää keitto oli nytkin, vahvaan lihaliemeen valmistettua nuudelikeittoa, hiukan hailakkaa tosin. Parina seuraavanaakin päivänä oli tarjolla kelpo muonaa, muun muassa metwurstia ja rasvaista verimakkaraa. Vanki oli tyytyväinen ja katsoi aiheelliseksi lausua kiitokset hyvistä pöydän antimistä, ennen kuin polvistui mestaajan eteen. Syy keiton haaleuteen ei hänelle koskaan selvinnyt, eikä hän muutenkaan saanut tietää osallistuneensa tieteelliseen kokeeseen, joka ratkaisi eläintieteilijöitä ja lääkäreitä kauan askarruttaneen ongelman (Küchenmeister 1855).

Elimistön salaperäiset vieraat

Loiseläinten monivaiheiset ja -mutkaiset elämänkierrat tunnettiin vielä 1800-luvun puolivälissä puutteellisesti. Nykyisin tiedämme, että esimerkiksi ihmisen suolistossa monimetreiseksi luikeroksi kasvava väkäsheisimato (*Taenia solium*) munii munia, jotka tartuttavat väli-isännän. Sellaisena toimii ihmisen ulosteella herkutteleva eläin, useimmiten sika. Väli-isännän suolistosta loiset siirtyvät munasta kuoriuduttuaan verenkierron mukana eri puo-



Friedrich Küchenmeister, † am 13. April.

Kuva 1. Tuntemattoman tekijän piirros Friedrich Küchenmeisteristä. Se on julkaistu Leipzigissa ilmestyneessä *Illustrirte Zeitung* -lehdessä hänen muistokirjoituksensa yhteydessä 26.4.1890.

lille elimistöä, muun muassa lihaksiin. Sinne ne koteloituvat pienikokoisina toukkina odottamaan, että pääisäntä nauttii väli-isännän kudoksia ravinnokseen, raakana tai huonosti kypsennettynä (Bylund 1986). Toukkavaihe rakkuloineen on melko helposti nähtävissä sianlihassa, mutta koska koko kiertokulkua on mahdoton havainnoida suoraan, pidettiin elämänsä eri vaiheita viettäviä heisimatoja pitkään eri lajeina. Toukkamuotoja nimitettiin

rakkulamadoiksi eli kystikerkuksiksi, väkäsheisimadon nuoruusmuoto kuvattiin lajinimellä *Cysticercus cellulosae*. Jo 1700-luvulla kiinnitettiin huomiota rakkulamatojen ja heisimatojen pään rakenteellisiin yhtäläisyyksiin otusten suuresta kokoerosta huolimatta. Kesti kuitenkin vielä satakunta vuotta, ennen kuin ne osoitettiin saman lajin edustajiksi kun sen elinkierto selvitettiin. Hämmennystä asiassa aiheutti havainnoinnin vaikeuden ohella se, että ihminen voi saada väkäsheisimatotartunnan myös suoraan madon munista, esimerkiksi syödessään ulosteiden likaamia kasviksia, ja huonon hygienian oloissa tietysti monin muinkin tavoin. Tällöin ihminen joutuu väli-isännän rooliin ja saa rakkulamatoja kudoksiinsa. Niin kauan kuin loisten reittiä kudoksiin ei ymmärretty, kenttä oli avoin monenlaisille arvailuille. Jotkut uskoivat rakkulamatojen olevan suoliston sijasta vääriin paikkoihin päätyneitä ja siksi kääpiökokoisiksi jääneitä heisimatoja. Jopa ikivanha alkusyntyteoria sai vielä kannatusta loismatojen ilmaantumisen selittäjänä (Forsius 2004, Küchenmeister 1855).

Uttera tohtori Küchenmeister

Valon tähän eläin- ja lääketieteen hämärään nurkkaan syytti Gottlieb Heinrich Friedrich Küchenmeister, lääkäri ja luonnontieteilijä Zittaun kaupungista (Kuva 1). Hän oli syntynyt 1821 Buchheimissa, joka nykyisin tunnetaan nimellä Bad Lausick. Isä oli pappi ja toivoi pojan ryhtyvän samalle uralle. Tämä oli kuitenkin kiinnostunut enemmän luonnon- ja lääketieteistä. Ankarien riitojen jälkeen poika sai lopulta tahtonsa läpi. Opintonsa hän joutui suureksi osaksi rahoittamaan itse mm. yksityisopetusta antamalla ja sisäoppilaitoksen valvojan toimessa. Uraauurtavien heisimato-tutkimustensa aikaan tohtori oli kolmissakymmenissä, ja erittäin ahkera mies. Hän teki käytännön potilastyön ohessa tutkimusta monella lääketieteen alalla ja toimitti omaa tieteellistä lehteä. Hän kirjoitti mm. kolerasta, munasarjojen sairauksista ja sydämen sivuäänistä. Ennen

kaikkea Küchenmeister oli kuitenkin parasitologi, monenlaisten loiseläimien tutkija (Anon. 1890, Huber 1900). Omien ja belgialaisen van Benedenin eläinkokeiden perusteella hän vakuuttui siitä, että rakkulamadot olivat heisimatojen nuoruusmuotoja, ja epäili *Cysticercus cellulosae* -madon olevan sama laji kuin ihmisen *Taenia solium*. Kun varma näyttö kuitenkin hänen mielestään vielä puuttui, päätyi tohtori Küchenmeister lopulta ihmiskokeisiin. Hänen ensimmäinen koehenkilönsä oli edellä mainittu vanki (Küchenmeister 1855).

Tohtorin erikoiset: metwurstia, verimakkaa ja nuudeliteittoa

Kokeensa järjestelyt ja tulokset Küchenmeister julkaisi 1855 Wiener medizinische Wochenschrift -lehdessä. Kuvaus on sangen lavea ja kaunopuheinen. Kokeen ensimmäinen yritys oli valmistella jo pari vuotta aikaisemmin, mutta syystä tai toisesta tohtori ei tuolloin päässyt syöttämään rakkulamatoja "murhajaattarelle, joka pian olisi hukkuva pyövelin miekkaan". Pian tarjoutui uusi tilaisuus, ja nyt kaikki meni nappiin. Matoja Küchenmeister sai myötämielisiltä kollegoilta. Tosin niitä oli aluksi vain muutamia, eikä yksikään kuulunut tutkijaa erityisesti kiinnostaneeseen *Cysticercus cellulosae* -lajiin. Tätäkin laatua Küchenmeister lopulta ennätti saada ja vieläpä omalta lihakauppiaaltaan. Tohtorin vaimo Klara näet huomasi onnekaasti matorakkuloita perheen illalliseksi valmistetussa sianpaistissa. Siltä istumalta Küchenmeister lähti lihakauppaan, ja pitkällisen suostuttelun jälkeen sai kuin saikin haltuunsa ruhon jäljellä olevat osat, joista löytyi vielä elossa olevia kystikerkuksia. Vankilan lääkärin ystävällisellä avustuksella ne sitten syötettiin uudelle kuolemaan tuomitulle, joka tällä kertaa oli miespuolinen. (Rikoksen laatu jäi salaisuudeksi.) Ensimmäinen annos tarjoiltiin nuudeliteitossa, joka oli tarkoitusta varten jäädytettävä ruumiinlämpöiseksi. Muutamana seuraavana päivänä tuomittu sai nauttia mm. makkaroista, joihin tohtorit olivat askar-

relleet kystikerkuksia pois kaivettujen rasvano-kareiden tilalle (Küchenmeister 1855).

Kun koehenkilö sitten oli ”miekalla reväisty elämästä kuolemaan”, kuljetettiin ruumis anatomian laitokselle, missä Küchenmeister arvovaltaisen ja asiantuntevan professorijoukon mukana tutki vainajan ohutsuolen. Suuria toiveita hän ei uskaltanut elätellä, olihan altistusaika kovin lyhyt, ja rakkulamatojen elossa säilymistäkin sopi epäillä. Mutta vaivannäkö ei rauennut tyhjiin: suolesta löytyi kuin löytyikin nuoria *Taenia solium* -heisimatoja. Pitkään uumoiltu loisen elinkierto osoittautui näin todeksi (Küchenmeister 1855). Löytö vahvistettiin vielä vuosien 1859 ja 1860 vaihteessa toisella kokeella. Siinä altistusaika oli nelisen kuukautta, jolloin madot ehtivät kehittyä sukukypsiksi (Küchenmeister 1860a).

1800-luvun tutkijoilla ei ollut vastuksenaan tutkimuseettisiä toimikuntia tai ihmisoikeusjuristeja. Mutta eivät tohtori Küchenmeisterin menetelmät saaneet varauksetonta hyväksyntää omana aikanaan, ja hän joutui toimimaan varsin vaivihkaa. Hän ei ensimmäisessä ihmiskoejulkaisussaan mainitse yhtäkään tutkimuksessa avustanutta henkilöä nimeltä, ei myöskään vankilaa eikä sitä, minkä yliopiston anatomian laitoksesta oli kyse. Küchenmeisteria itseään ei hänen teksteistään päätelleen huolettanut lainkaan kokeiden eettinen puoli, vain yleisön ja kollegoiden suhtautuminen niihin. Hän perusteli menettelyään paitsi sen lääketieteellisellä hyödyllä, myös kokeen haittomuudella koehenkilölle, koska ”siinäkin tapauksessa, että rikollinen satuttaisiin armahtamaan, olisi madoista helppo päästä eroon”. Ensimmäinen julkaisu päättyy veetoomukseen, että lehden valistuneet lukijat käyttäisivät kukin vaikutusmahdollisuuksiaan, jotta vastaavanlaiset kokeet voitaisiin jatkossa tehdä avoimesti (Küchenmeister 1855). Toisen, pidemmän altistuskokeensa yhteydessä Küchenmeister joutui enemmän pohtimaan matotartunnan haittoja koehenkilölle. Tässäkin tapauksessa hän vetosi siihen, että suolistossa

elävät aikuisen heisimadot aiheuttavat kantajalleen yleensä vain melko vähäisiä vaivoja, ja niiden häätämiseen löytyy päteviä keinoja (Küchenmeister 1860a). Hän ei uhrannut riviäkään sille, onko oikein käyttää ihmistä koehenkilönä tämän tietämättä ja luvatta. Ilmeisesti koko kysymys ei tuohon aikaan ollut millään lailla merkittävä. Samoihin aikoihin eläintieteen professori Rudolf Leuckart teki vastaavia kokeita Giessenin yliopistossa (Leuckart 1856). Myös hän kertoo antaneensa heisimadon toukkia ainakin yhdelle ihmiselle tämän tietämättä, nimeltä mainitsemattoman lääkärin avustuksella. Muut hänen koehenkilönsä olivat vapaaehtoisia. Tietämättään altistettu henkilö oli kuolemaa tekevä keuhkotuberkuloosipotilas, ja arvatenkin valittu kokeeseen pian tarjoutuvan ruumiinavausmahdollisuuden takia. Hän ei kuitenkaan saanut tartuntaa. Leuckartin vapaaehtoisista koehenkilöistä toinen sai matotartunnan, mikä aikanaan todettiin ulosteisiin ilmaantuneista madonmunista. Leuckartin havainnot siis täydensivät kauniisti Küchenmeisterin tuloksia.

Mainetta kylliksi, kunniata ei?

Küchenmeister sai ansioistaan lääkintöneuvoksen arvonimen ja kutsun arvostetun Leopoldina-tiedeakatemiaan jäseneksi. Hänen kirjojaan käännettiin myös englanniksi, jotta ne olisivat laajemmin saavutettavissa. Siitä huolimatta hän koki, ettei saanut saksalaiselta tiedeyhteisöltä ansaitsemaansa arvostusta (Küchenmeister & Zürn 1878). Hän päätyi kitkerään sananvaihtoon mm. Leuckartin kanssa, vaikka he aluksi tekivät yhteistyötä (Leuckart 1886). Nykynäkökulmasta on yllättävää, että herrat liittivät tämännäköiset kommenttinsa häpeilemättä jyhkeisiin tieteellisiin käsikirjoihinsa. Küchenmeisterin moniaalle suuntautuvaa toimintatarmoa koettu arvostuksen puute ei lannistanut. Myöhempinä vuosinaan hän toimi näkyvästi polttohautauksen puolesta, koska piti maahan hautaamista haitallisena sekä terveys- että ympäristösyistä (Anon. 1890, Huber

1900). Vaikka olikin aikanaan hylännyt isänsä ehdottaman pappisuran, uskonnolla oli hänen elämässään merkittävä sija. Vanhemmiten hän alkoi tutkia Raamatun tekstejä ja kirkkohistoriaa, usein samalla lääke- tai luonnontieteellistä asiantuntemustaan hyödyntäen. Niinpä hänen tuotantoonsa kuuluu mm. kirja Martti Lutherin elämäntavoista ja sairauksista (Küchenmeister 1881). Jo 1860 hän kirjoitti pitkähkön tutkielman siitä, minkä kukkien kuvilla Salomonin temppelin pylväät oli koristeltu. Hepreaakin taitanut Küchenmeister päätyi tavanomaisesta liljatulkinnasta poiketen valkoisiin ruusuihin (Küchenmeister 1860b).

Jos Friedrich Küchenmeister ei saanutkaan elämänsä aikana kunniaa kyllikseen, tuli jälkimaineesta pitkä. Tekemiensä ihmiskokeiden

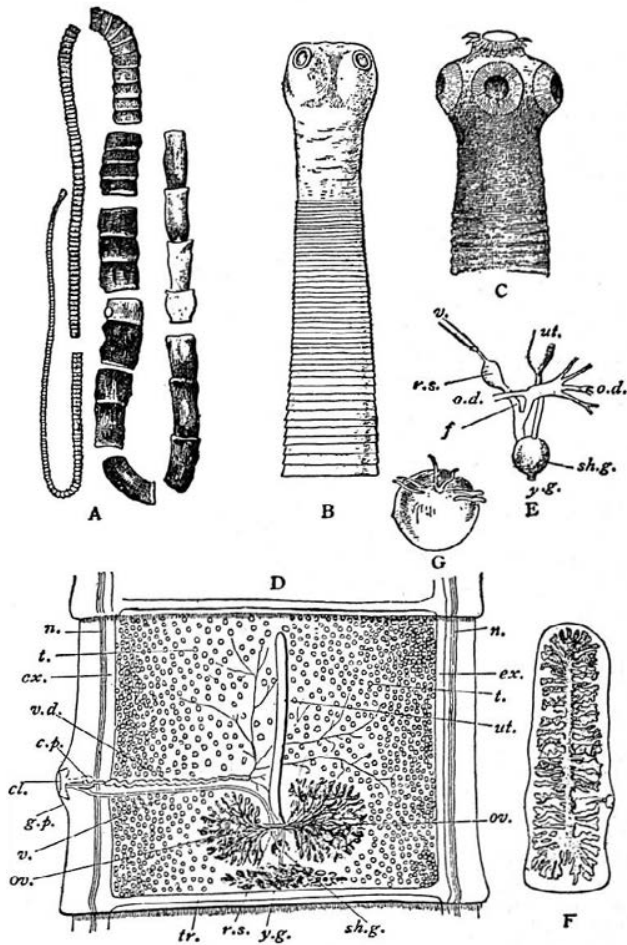
varjo seurasi hänen muistoaan sitkeästi. Osaksi se johtunee karmeiden asioiden yleisestä kiinnostavuudesta: yököttävien loismatojen tutkija ja kuolemansellissään viruva vanki tarjoavat mainion aiheen "Frankenstein-tarinoista" kiinnostuneille kirjoittelijoille. Ilmeisesti juuri kuolemaantuomittujen käyttö koehenkilöinä on ollut pitkän jälkimaineen takaaja, onhan esimerkiksi Rudolf Leuckartin koe tuberkuloosipotilaalla jo ammuin unohdettu. Sitä voi oikeastaan vain ihmetellä. Kuolemanrangaistus oli 1800-luvun puolivälissä lähes kaikkialla tavanomaiseen oikeuskäytäntöön kuuluva asia, jonka oikeutusta harva kyseenalaisti. Oliko kuolemanselli silti samalla "pyhä paikka", jonne ei olisi sopinut salatuin tarkoituksiperin astua?

Heisimadot ihmisuoliston ruokavieraina

Aikuiset heisimadot ovat suolistolaisia, jotka ottavat ravintonsa isännän syömästä ja valmiiksi hajottamasta ravinnosta (Kuva 2). Madolla itsellään ei ole ruuansulatuselimiä, vaan ravintoaineet imeytyvät sen ohuen, mikrovilluksiksi järjestäytyneen pintakudoksen läpi. Madon tartuntaelimenä toimii pienikokoinen "pää" (scolex), jossa on imukuppeja ja väkäsiä suolen seinämään kiinnittymistä varten. Scolexista jatkuu kapea kaulamainen osa, joka levenee nauhamaiseksi ruumiiksi. Ruumis jakautuu jaokkeiksi, proglottideiksi, jotka sisältävät kaksineuvoiset sukuelimet. Kukin jaoke pystyy tuottamaan munia itsenäisesti, mutta hedelmöitystä voi tapahtua myös eri jaokkeiden kesken. Kypsät, valmiita munia sisältävät jaokkeet irtoavat ja hajoavat, jolloin munat poistuvat elimistöstä ulosteiden mukana. Toisinaan ulosteisiin voi joutua myös ehjiä ja tunnistettavia jaokkeita tai useamman jaokkeen mittaisia madonpätkiä (Bylund 1986, Siikamäki 2021).

Vaikka heisimadot kasvavat suolistossa monen metrin mittaisiksi ja erityisesti leveitä heisimatoja voi olla samaan aikaan suolessa useitakin, ne eivät välttämättä aiheuta kantajalleen min-käänlaisia oireita. Joskus on jopa uskottu suolistomatojen olevan hyödyksi ravinnon hajottajina. Jos tunnistettavia oireita esiintyy, ne ovat tavallisimmin vatsakipu ja ruuansulatushäiriöitä (ummetus, ripuli, ilmavaivat, pahoinvointi). Koska mato käyttää osan ihmisen ravinnosta, voi kantaja kärsiä aliravitsemuksesta ja laihtua. Leveän heisimadon kantaja saattaa olla aneeminen, koska mato absorboi tehokkaasti hemoglobiinin muodostuksessa tarpeellista B12-vitamiinia. Hyvin ilmeiseksi matotartunta käy, jos ulosteen mukana tulee paljain silmin havaittavia ja tunnistettavia madon osia. Harvinaisissa tapauksissa matoja on tullut esiin jopa oksentamisen yhteydessä (Naakka-Korhonen 2000, Siikamäki 2021).

Matojen häätämiseen suolistosta on käytetty monenlaisia myrkyllisiä aineita, etenkin kasvikkunnan tuotteita, joiden tehoa saatettiin lisätä ulostuslääkkeillä ja peräruiskeilla. Erityisesti alvejuuren juurakosta saatava filisiini oli pitkään tärkeä matolääke (kuva 6). Alvejuuren käytön tähän tarkoitukseen tunsivat jo muinaiset kreikkalaiset. Filisiinin uuttaminen juurakosta keksittiin 1800-luvun alkupuolella (Lavikainen 2018). Nykyisin käytettävät heisimatolääkkeet niklosamidi



Kuva 2. Aikuisen heisimadon rakenne. **A.** Kapean heisimadon scolex ja useana osana piirretyt kaula sekä ruumis jaokkeineen. **B. ja C.** Kapean heisimadon ja väkäsheisimadon scolex ja kaulan alkuosa suuremmissa koossa. **D.** Sukukypsä jaoke, jossa kaksineuvoiset lisääntymiselimet. **E.** Osa naaraspuolisia lisääntymiselimistä suuremmissa koossa.

Siittiöt muodostuvat hajallaan koko jaokkeessa sijaitsevista siittiörauhasista (t.) ja etenevät kuvassa vasemmalla näkyvää siittiöjohdinta (v.d.) pitkin kloaakiin (cl.). Sieltä ne jatkavat joko saman tai jonkun muun läheisen jaokkeen vaginaan (v.), siittiösäiliöön (r.s.) ja lopulta hedelmöityskanavaan (f.). Munasolut kehittyvät kahdessa pensasmaisessa munarauhasessa (ov.) ja kulkevat munanjohtimien (o.d.) kautta hedelmöityskanavaan. Hedelmöittyneet munasolut saavat ympärilleen pallomaisen kuorirauhasen (sh.g.) ja sen alapuolella olevan monilokeroisen ruskuaisrauhaseen (y.g.) eritteet ja asettuvat uterukseen (u.) **F.** Munilla täyttynyt ja monihaaraiseksi paisunut uterus. **G.** Munasta kuoriutunut alkio eli onkosfääri, jossa näkyy kuusi kiinnittymisväkistä. Kuva: Wikimedia commons.

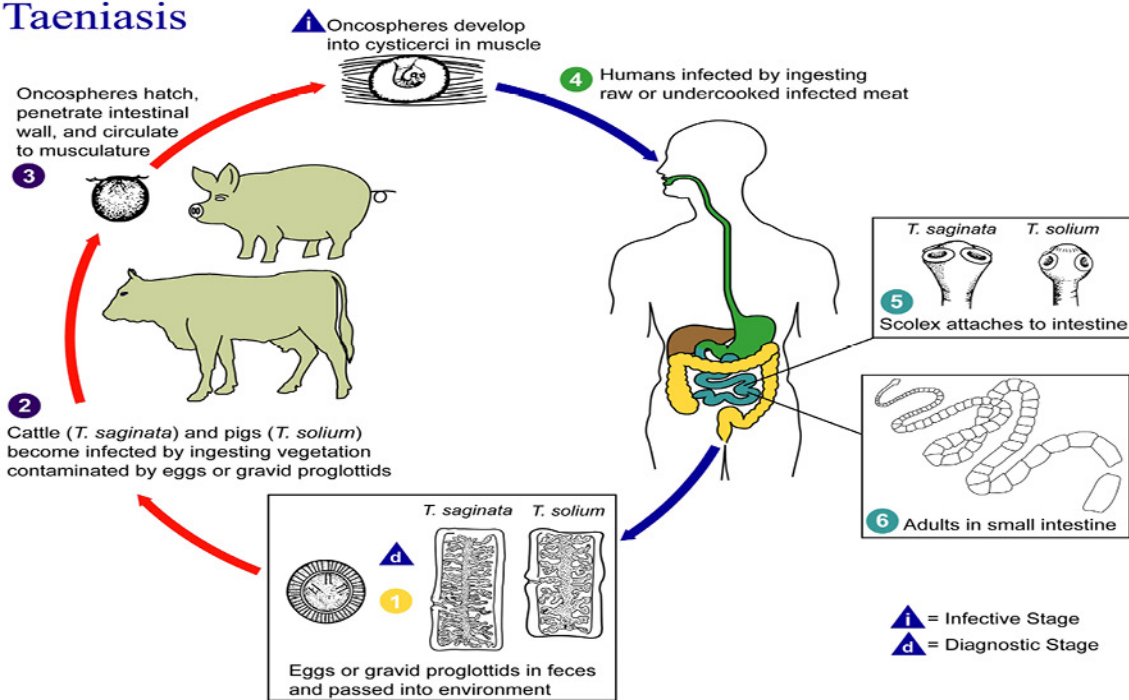
ja pratsikvanteli ovat synteettisiä yhdisteitä (Forsius 2004, Siikamäki 2021). Niklosamidi häiritsee madon energia-aineenvaihduntaa mitokondrioissa (Anon. 2021a). Pratsikvanteli aiheuttaa madon lihasten halvaantumista ja kouristuksia. Tarkkaa vaikutusmekanismia ei tunneta, mutta luultavasti se vaikuttaa solukalvon ioniläpäisevyyteen (Anon. 2021b).

Ihmisellä esiintyy pääasiassa kolmea heisimatolajia. Küchenmeisterin ja Leuckartin ihmiskoissaan käyttämän väkäsheisimadon väli-isäntä on sika, joka voi saada madon munia ihmisen ulosteista. Loisen elämänsykli täydentyy, kun ihminen syö kypsentämätöntä sianlihaa, jossa on loisen cysticercus-vaiheen toukkia (kuva 3). Kapean heisimadon (*Taenia saginata*) elämänsykli on samankaltainen, mutta väli-isäntänä on nautaeläin (kuva 3).

Ihminen voi saada tartunnan myös väkäsheisimadon munista, jolloin toukat voivat asettua kystikerkuksiksi kudoksiin. Lihaksissa niistä ei yleensä ole suurta haittaa, mutta varsinkin aivoihin tai silmiin päätyvät toukat voivat aiheuttaa vakaviakin vaurioita. Kapea heisimato on tässä suhteessa vaaraton, sillä sen toukka kehittyy hitaammin eikä ehdi siirtyä ihmisen ruuansulatuskanavasta verenkiertoon.

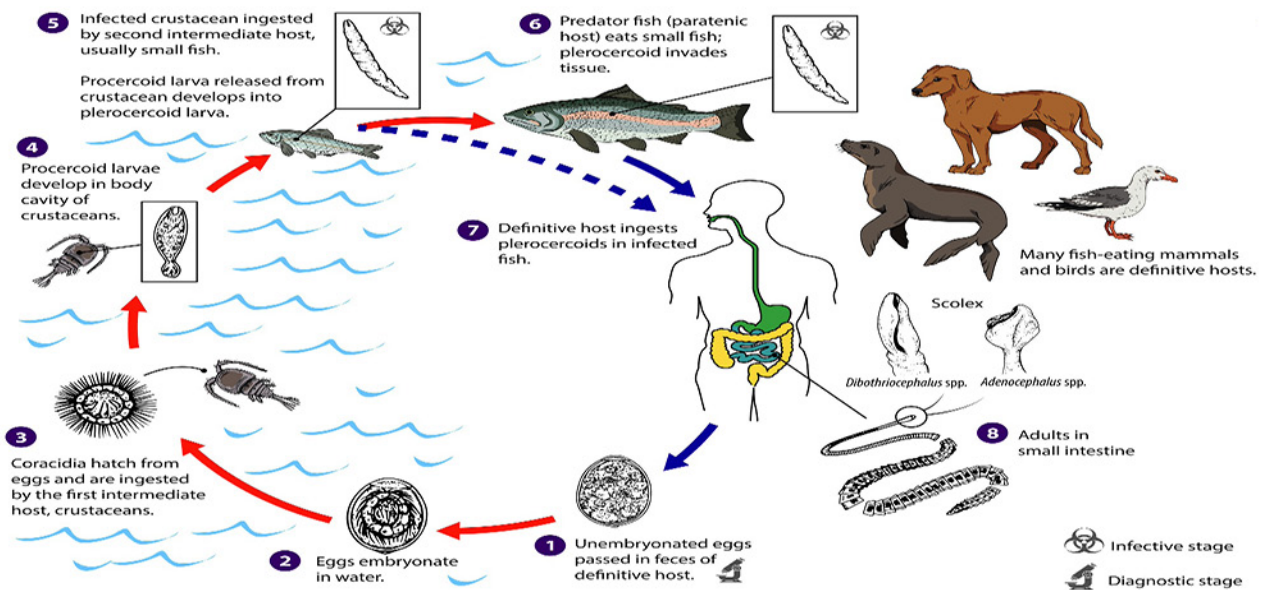
Suomessa merkittävin ihmisen heisimato on leveä heisimato eli lapamato (*Diphyllobothrium latum*). Sillä on kaksi väli-isäntävaihetta (kuva 4). Kun ihmisen suolistossa kehittyneet munat joutuvat suolattomaan tai vähäsuolaiseen vesistöön, niistä kehittyy vapaasti uivia ripsitoukkia. Ripsitoukan päätyessä hankajalkaisäyriäisen ravinnoksi, siitä kehittyy prokerkoidiksi kutsuttu toukka-aste. Kun kala syö äyriäisen, prokerkoidit kehittyvät toisen asteen toukkavaiheeseen,

Taeniasis



Kuva 3. Väkäsheisimadon ja kapean heisimadon elämänkierto. Ensin mainitun väli-isäntä on sika, toisen nautaeläin. **1.** Kypsät madon jaokkeet tuottavat munia ihmisen ohutsuolessa. Tartunta on tällöin todettavissa ulostenäytteestä. **2.** Sika tai nauta saa tartunnan syödessään madonmunia sisältävää ihmisen ulostetta tai sen saastuttamaa rehua. **3.** Munista kuoriutuu alkioita, jotka tunkeutuvat suolistosta verenkiertoon ja asettuvat kystikerkustoukiksi kudoksiin, tavallisimmin lihaksiin. **4.** Ihminen saa tartunnan syödessään raakaa tai vain osaksi kypsennettyä lihaa. **5.** Heisimatojen scolex -osia ohutsuolessa. **6.** Aikuisen heisimato ohutsuolessa. Kuva: Wikimedia commons.

Diphyllobothriid Tapeworms



Kuvat 4. Leveän heisimadon ja eräiden lähisukuisten lajien elämänkierto. **1.** Munat poistuvat pääisännän suolistosta ulosteiden mukana. **2. ja 3.** Munat kehittyvät vedessä ripsitoukiksi, joita hankajalkaisäyriäiset syövät. **4.** Ripsitoukasta kehittyä äyriäisen elimistössä proceroiditoukka. **5. ja 6.** Pikkukala syö äyriäisen, prokerkoiditoukka kehittyä plerokerkoidiksi ja asettuu kalan kudoksiin. Pikkukalan joutuessa suuremman saaliiksi, plerokerkoidi siirtyy petokalan kudoksiin. **7.** Ihminen saa tartunnan kalasta. Kuva: Wikimedia commons.

plerokerkoideiksi. Ne asettuvat kalan elimistöön, tavallisimmin lihaksiin, joskus myös sisäelimiin. Jos ihminen syö tällaisen kalan ilman kunnollista kypsennystä tai pakastamista, hän voi saada loismadon suolistoonsa. Pelkkä suolaus tai marinointi ei tapa toukkia. Tavallisimmat lapamato-tartunnan aiheuttajat ovat hauki, made ja ahven, myös kiiskestä voi saada tartunnan. Muissakin kalalajeissa voi olla toukkia, mutta yleensä vain niiden sisäelimeissä (Bylund 1986, Siikamäki 2021). Lapamadon monivaiheinen elämäntyyppi selvitettiin lopullisesti vasta 1900-luvun alkupuolella (Forsius 2004).

Lapamato oli viime vuosisadan puoliväliin asti Suomen runsasvesistöisillä alueilla erittäin yleinen. On arvioitu, että jopa viidennes suomalaisista oli madon kantajia. 1950-luvulla käynnistettiin voimaperäinen häätökampanja, joka tuotti myös tuloksia (Kuvat 5 ja 6). Kampanjan kärkenä oli kalaravinnon oikeaan käsittelyyn ja hygieniaan ohjannut valistustyö. Myös jätevesien puhdistustekniikan kehitys ja pakastinten yleistyminen ovat vähentäneet lapamatotartuntoja, mutta kokonaan laji ei suinkaan kadonnut Suomesta. Ihmisen ohella eräät muutkin nisäkäslajit ovat sen isäntiä ja pitävät osaltaan kantaa yllä. Jos välttämättä haluaa syödä ”matovaarallisia” kalalajeja tai niiden mätiä kypsentämättä, ne on syytä pakastaa ensin (Bylund 1986, Forsius 2004, Siikamäki 2021).



Kuva 5. Terveystyöntekijä Alli Vaittinen oli merkittävä toimija taistelussa lapamatotartuntoja vastaan Suomessa. Punaisen ristin ja myöhemmin lääketehdas Medican kustantama kampanja 1950- ja 1960-luvulla painotti madon erityisesti vaivaamaan Itä-Suomeen (Forsius 2004). Tarmokas ja sanavalmis Vaittinen sai lempinimen ”Mato-Alli”, ja virallisempaan huomionosoitukseen sosiaalivakuutusarvonimen. Työssä saavutetusta suosiosta oli kenties apua, kun hän myöhemmin ryhtyi politiikkaan ja valittiin kansanedustajaksi. Kuva: Esko Eskelinen, Pohjois-Karjalan museon kuvakokoelma.



Kuva 6. Lapamato oli aikanaan Suomessa hyvin yleinen, ehkä yleisempi kuin missään muualla maailmassa. Terveystyöntekijä synnytti merkittävää alan tutkimusta ja lääkekehitystyötä. Apteekkari Albin Koponen kehitti 1800-luvun lopulla omia teknisiä ratkaisuja filisiin uuttamiseksi alvejuuren juurakosta. Hänen tehtaansa matolääkkeestä, ”Koposen kapseleista” tuli ensimmäinen Suomessa kehitetty teollinen lääke, ja sitä myytiin myös ulkomaille. Koposen tehdas siirtyi 1960 osaksi Orionia (Lavikainen 2018). Kuva: Orionin kuva-arkisto.

Kirjallisuus

- Anon. 1890: Friedrich Küchenmeister. Illustrierte Zeitung 26.4.1890: 432. Leipzig 1890.
- Bylund G 1986 Laakamadot Platyhelminthes. Teoksessa Huhta, V. (toim.). Suomen eläimet, osa 5: Muut selkärangattomat. Weilin & Göös, Helsinki.
- Anon 2021a Niclosamide. Drugbank Online -tietokanta 2021 Päivitetty 19.6.2021. Luettu 1.12. 2021. <https://go.drugbank.com/drugs/DB06803>
- Anon 2021b Praziquantel. Drugbank Online -tietokanta 2021. Päivitetty 1.12.2021. Luettu 1.12. 2021.
- Forsius A 2004 Heisimatojen historiaa. Verkkojulkaisu <http://www.saunalahti.fi/arnoldus/heisimad.htm> Luettu 24.11.2021. Varhaisempi versio julkaistu Suomen Lääkärilehdessä 1995: 20–21: 2257 otsikolla Lapamadon historiaa.
- Huber J Ch 1900 Friedrich Küchenmeisters Selbstbiographie. Janus. Archives internationales pour l'histoire de la médecine et la géographie médicale 5: 629–634.
- Küchenmeister F 1855 Experimenteller nachweis, dass Cysticercus cellulosae innerhalb des menschlichen Darmkanales sich in Taenia solium umwandelt. Wien. Med. Wochenschr. 5:1-4.
- Küchenmeister F 1860a Erneuter Versuch der Umwandlung des Cysticercus cellulosae in Taenia solium hominis. Dtsch. Klin. 12:187–189.
- Küchenmeister F 1860b Ueber die Blume "Schuschan" an den Säulen des Salomonischen Tempels. Denkschriften der naturwissenschaftlichen Gesellschaft Isis zu Dresden. Festgabe zur Feier ihres fünfundzwanzigjährigen Bestehens. 1860: 6–19.
- Küchenmeister F 1881 Dr. Martin Luther's Krankengeschichte. Mit erläuternden Bemerkungen aus seinem Lebensweise, Schicksalen, Kämpfen und Wirken für Aerzte un Laien zusammengestellt. Verlag von Otto Wigand, Leipzig.
- Küchenmeister F & Zürn F A 1878 Die Parasiten des Menschen. Verlag von Ambrosius Abel, Leipzig.
- Lavikainen A 2018 Albin Koponen ja alvejuuri – Suomen lääketeollisuus sai alkunsa matolääkkeestä. Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim 134: 1328–33.
- Leuckart R 1856 Die Blasenbandwürmer und ihre Entwicklung zugleich ein Beritrag zur Kenntniss der cysticercusleber. J Rickersche Buchhandlung, Giessen.
- Leuckart R 1886 The parasites on man and the diseases which proceed from them. A textbook for students and practitioners. Youg J. Pentland, Edinburgh.
- Naakka-Korhonen M 2000 Kansan totuus ja tiedeyhteisön: lapamatoinfektiosta ja vähän terapiastakin. Duodecim 116: 2690–2696.
- Siikamäki H 2021 Suoliston matotaudit. Lääkärikirja Duodecim -tietokanta. Päivitetty 5.2. 2021, luettu 1.12. 2021. <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00627>.
- FK Ilkka Markkula on eläkkeellä Savonia-ammattikorkeakoulun anatomian ja fysiologian lehtorin virasta. Hän toimii tietokirjailijana aihepiireinään biologia ja historia.*

Kirjoittaisinko Luonnon Tutkijaan

Ensimmäiset tieteelliset seurat perustettiin Suomeen 1800-luvulla. Koska Suomessa ei ollut olemassa julkaisukanavia tieteellisille tutkimuksille tai tiedonannoille, seurat perustivat omia lehtiä, joissa tutkimusten tuloksia voitiin esittää ja levittää uutta tietoa jäsenkunnan keskuuteen. Tieteellisten seurojen lisäksi myös pienemmät yhdistykset julkaisivat tiedonantoja erilaisissa lehtisissä ja aviiseissa. Useilla tieteellisillä seuroilla oli oma julkaisusarja tieteellisille artikkeleille ja yleistajuisille tiedettä tunnetuksi tekeväälle kirjoittelulle. Suomen Biologian Seura Vanamo ry on julkaissut tieteellisten Annales-sarjoja lisäksi vuodesta 1897 alkaen yleistajuista, suomenkielistä julkaisua Luonnon Tutkijaa (vuoteen 1946 asti Luonnon Ystävä), jonka ensi sijainen tarkoitus oli levittää etupäässä kotimaista luonnontieteellistä tutkimustietoa jäsenkuntaan ja valistaa suurta yleisöä biologian alan valtavirrasta maailmalla. Lehti toimi Vanamon jäsenkunnan tiedonantajana, mutta se on ollut ja tulee olemaan biologian alan merkittävin julkaisukanavana, joka on tavoittanut alan laajan lukijakunnan. Luonnon Tutkija on kaikkien biologien oma lehti kautta aikojen. Lehti on avoin kaikille biologisesta tutkimuksesta kertoville kirjoituksille, mutta toivottaa tervetulleeksi myös mitä moninaisimmat kirjoitukset, joilla on liittymäkohta biologisiin ilmiöihin. Tämä tarkoittaa sitä, että myös Sinä, Hyvä Lukija, voit tarttua kynään ja kirjoittaa Luonnon Tutkijaan.

Luonnon Tutkijan Juttutyypit

Pääkirjoitus. Päätoimittaja tai toimitusneuvosto laatii tavallisesti pääkirjoituksen, mutta pääkirjoituspalsalle on perinteisesti hyväksytty myös vierailevien kirjoittajien kirjoituksia. Pääkirjoitus on pituudeltaan noin yhden liuskan pituinen (so. 3700 merkkiä välilyönteineen).

Pitkät jutut. Tutkimusartikkeli ja katsausartikkeli ovat Luonnon Tutkijan pääjuttutyyppejä. Niille ei anneta tiukkoja kirjoitusten pituusvaatimuksia, vaan kirjoituksen laajuus ratkeaa toimitustyön yhteydessä. Tutkimusartikkeli esittelee kohdennetusti yhden tutkimusaihepiirin, sen menetelmät ja aineistot. Tuloksia käsitellään pohdinnan yhteydessä. Artikkelissa esitetään tutkimuskysymys yleisellä tasolla, ei samalla tavalla tiukkaan muotovaatimukseen kangistuvasti, kuten varsinaisen tieteellisen tutkimuksen raportoinnin yhteydessä. Katsausartikkeli on laaja, tiettyä aihetta taustoittava ja vapaasti käsittelevä juttutyyppi. Tutkimusartikkeli ja katsausartikkeli lähetetään vertaisarvioon. Pitkiin juttuihin laaditaan lyhyt englannin kielinen tiivistelmä (700 merkkiä välilyönteineen).

Tiedonannot. Tiedonannot ovat liuskan mittaisia ilmoitusluonteisia kirjoituksia lukijakunnalle vapaista, biologian alan aiheista.

Kirjallisuusarvostelut. Lehteen voi toimittaa kirjallisuusarvioita uutuuskirjoista. Kirjoituksen mukaan tulee liittää skannattu kuva kirjan kannesta ja kirjan täsmälliset viittaustiedot.

Muistokirjoitukset. Luonnon Tutkijan pitkä perinne on julkaista muistokirjoitus edesmenneistä biologija luonnontutkijakunnan merkkihenkilöistä ja alan vaikuttajista.

Henkilökuvat. Henkilökuvat valottavat tutkijoiden ja tutkimusten arkea.

Ajattelun aiheet. Ajattelun aiheet on liuskan pituinen kolumnin muotoon kirjoitettu alan ajankohtaisia aiheita puiva keskustelunherättäjä.

Antikvariaatista. Antikvariaatista-kirjoitus tuo historian havinan Luonnon Tutkijan sivuille. Kirjoituksessa siteerataan tutkimusperinteiden menneiden aikojen uranuurtajien kirjoituksia muistuttamaan nykyajan tutkijakuntaa, että monilla ajatuksilla on sittenkin pitkät juuret menneisyudessa.