

Vesihyönteisten sopeutuminen ilmastonmuutokseen makean veden alueilla

Alina Rekilä

LuK-seminaari ja tutkielma

790351A

Maantieteen tutkinto-ohjelma

Oulun yliopisto

12.5.2023

Tiivistelmä

Tämän tutkielman lähtökohtana on vastata tutkimuskysymyksiin, jotka ovat miten vesihyönteiset sopeutuvat ilmastonmuutokseen makean veden elinympäristöissä sekä millaiset ominaisuudet auttavat vesihyönteisiä sopeutumaan ilmaston muutoksiin. Tutkielmassa käydään läpi ilmastonmuutoksen vaikutukset vesistöihin ja sitä kautta myös vesihyönteisiin. Näiden tietojen perusteella tutkitaan vesihyönteisten sopeumia erilaisiin muuttuviin elinoloihin yleisesti sekä esimerkkialueella Suomessa.

Keskeisimpiä tuloksia työssä ovat ilman ja veden lämpötilan muutosten vaikutukset vesihyönteisten aineenvaihduntaan ja kehon koon muutoksiin, sekä toiminnalliset sopeumat erityisesti vesihyönteisten elinkaaren muutoksessa. Tärkeä huomio tutkielmassa on myös se, kuinka paljon myös muut tekijät kuin ilmastonmuutoksen vaikutukset, aiheuttavat muutoksia vesistöissä ja vesihyönteisissä. Voidaan myös todeta parhaiten lämpötilojen muutoksiin sopeutuvan niiden lajien, joilla elinkaaret ovat pitkiä, tai jotka voivat reagoida ilmastoon elinkaaren muutoksilla. Lisäksi ne lajit, joilla on hyvät mahdollisuudet muuttaa levinneisyysaluettaan, ovat paremmassa asemassa verrattaessa vain yhdellä alueella pärjääviin vesihyönteisiin. Kokonaisuudessaan siis paremman kelpoisuuden sekä paremmat sopeutumiskeinot omaavilla lajeilla ilmastonmuutokseen sopeutuminen on helpompaa.

Tutkielman aineiston perusteella voidaan päätellä ilmastonmuutoksen jo vaikuttavan vesihyönteisiin voimakkaasti, ja tulevan vaikuttamaan vielä voimakkaammin tulevaisuudessa. Voidaan myös todeta monilla vesihyönteisillä jo olevan sopeutumismekanismeja tämän hetken ilmastoon, mutta on vaikea ennustaa voivatko ne kehittää uusia sopeumia ilmaston edelleen muuttuessa. Kokonaisuudessaan paremman kelpoisuuden sekä paremmat sopeutumiskeinot omaavilla lajeilla ilmastonmuutokseen sopeutuminen on helpompaa.

Sisällysluettelo

1 Johdanto	4
2 Ilmastonmuutoksen vaikutukset vesistöihin ja vesiyönteisiin	5
2.1 Ilman ja veden lämpötila	7
2.2 Sadanta ja vedenlaatu	8
2.3 Kuivuus	10
2.4 Tulokaslajit ja ravinnonhankinta	11
3 Vesiyönteisten sopeutuminen muuttuvaan ympäristöön	13
3.1 Toiminnalliset muutokset	13
3.2 Perinnölliset sopeumat	17
3.3 Suunniteltu sopeutuminen	17
4 Suomi esimerkkialueena	18
5 Pohdinta.....	20
6 Lähteet.....	23

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on yksi vakavimmista ympäristöön kohdistuvista stressitekijöistä (Harvey ym. 2023). Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan ilmaston maailmanlaajuisia lämpenemistä, mikä johtuu kasvihuonekaasujen voimakkaasta kasvusta ilmakehässä (Jonsson ym. 2015). Ilmastonmuutos vaikuttaa muun muassa ilman ja veden lämpötilaan, sadantaan ja vedenlaatuun, kuivuuteen sekä tulokaslajeihin ja ravinnonhankintaan (Heino ym. 2009; Jonsson ym. 2015; Macadam ym. 2022; Harvey ym. 2023). Ilmastonmuutos vaikuttaa suoraan vesistöjen biologiseen monimuotoisuuteen ja pahentaa myös muita ihmisten aiheuttamien uhkien vaikutuksia (Harvey ym. 2023; Macadam ym. 2022). Biologisen monimuotoisuuden väheneminen on yksi huolestuttavimpia ja vakavimpia ongelmia, sillä se voi johtaa ekologisten yhteisöjen hajoamiseen, ja sitä kautta vaikuttaa laajasti luonnon tilaan (Harvey ym. 2023; Timoner ym. 2021). Ilmastonmuutoksen vaikutuksen biologiseen monimuotoisuuteen on ennustettu ennennäkemättömäksi, ja suuren määrän lajeja on ennustettu kuolevan sukupuuttoon (Heino ym. 2009). Makean veden lajeille on ennustettu yhtä synkkää tulevaisuutta, ja niiden kokemat uhat ovat todennäköisesti jopa suuremmat kuin maalla elävillä lajeilla (Heino ym. 2009; Timoner ym. 2021).

Makean veden lajeista vesihyönteiset ovat yksi tärkeimmistä osista luontoa ja ekosysteemien toimimista (Starr & Wallace 2021; Steward ym. 2022). Vesihyönteiset ovat herkkiä muutokselle, ja indikoivat selkeästi asuttamiensa vesistöjen tilaa (Priawandiputra ym. 2018; Grigoropoulou ym. 2023). Vesihyönteisten reagoinnista muuttuvaan ilmastoon voidaan siis seurata esimerkiksi ilmastonmuutoksen vaihteita ja seurauksia. Kasvava määrä empiiristä kirjallisuutta myös osoittaa, että monet vesihyönteispopulaatiot vähenevät nopeasti eri puolilla biosfääriä mahdollisesti ilmastonmuutoksen vaikutuksesta (Harvey ym. 2023). Vesiekosysteemien muutoksilla on laajoja seurauksia myös maanpäällisiin ekosysteemeihin, sillä vesihyönteiset edustavat resurssivirtaa vesiympäristön ja maaympäristön välillä täyttämällä toiminnallisia rooleja, olemalla sekä detritivoreja että petoja (Jonsson ym. 2015: 78; Starr & Wallace 2021). Ne toimivat myös ensisijaisena ravintona monille kalalajeille ja petoeläimille (Priawandiputra ym. 2018; Starr & Wallace 2021). Niinpä vesistöjen tila vaikuttaa vedessä elävien hyönteisten lisäksi myös muihin hyönteisiin ja ekosysteemeihin sekä luonnon monimuotoisuuteen.

Ilmastonmuutoksen odotetaan vaikuttavan merkittävästi myös Suomen hydrologiaan ja vesihyönteisiin (Olsson ym. 2015; Hildén ym. 2022). Tieto vesihyönteisistä auttaa seuraamaan ilmastonmuutoksen tilaa Suomessa, mikä on tärkeää pohdittaessa esimerkiksi Suomen tulokaslajien seuraamista (Ilmastonmuutos näkyy... 2023). Siksi tutkimuksessani käsitellään vesihyönteisten sopeutumista muuttuvaan ilmastoon myös Suomessa.

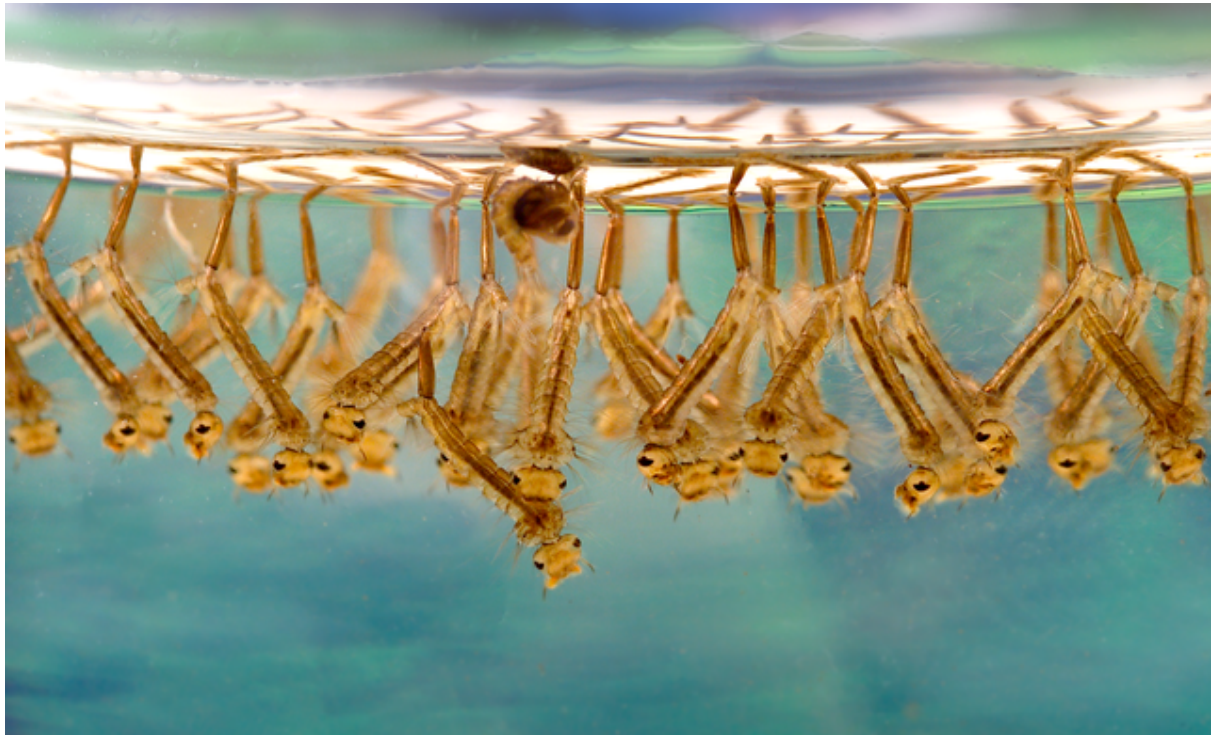
Vesihyönteisiin liittyvä tutkimus on tärkeää vesihyönteisten itsensä suojelussa sekä muun luonnon suojelussa. Vesihyönteisiä on tutkittu hyvin vähän (Starr & Wallace 2021), ja erityisesti yleistietoa kaikista lajeista tuntuu puuttuvan paljon. Tällä hetkellä riittämätön tieto on suuri este ilmastonmuutoksen ja muiden luonnon stressitekijöiden analysoinnissa ja erityisesti taksonomista tietoa tarvitaan lisää (Hering ym. 2009). Parempi tieto siitä, miten ilmastonmuutos vaikuttaa tiettyihin lajeihin auttaa toimimaan ja kohdistamaan sopeutumistoimenpiteitä ilmastonmuutokseen tehokkaammin (Macadam ym. 2022: 6). Vesihyönteisiä koskevan tiedon kehittäminen on välttämätöntä, jotta voidaan parantaa ymmärrystä niiden rooleista koskien esimerkiksi veden laatua, tautien ekologiaa ja luonnon monimuotoisuutta (Starr & Wallace 2021). Siksi tieto vesihyönteisistä auttaa myös muun ympäristön ja luonnon tutkimisessa sekä suojelussa. Tässä työssä tutkin miten erilaiset ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät makean veden ympäristöissä ja vesihyönteisissä sekä miten ne vaikuttavat vesihyönteisten sopeutumiseen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Tutkimuskysymykseni ovat miten vesihyönteiset sopeutuvat ilmastonmuutokseen makean veden elinympäristöissä sekä millaiset ominaisuudet auttavat vesihyönteisiä sopeutumaan ilmaston muutokseen.

2 Ilmastonmuutoksen vaikutukset vesistöihin ja vesihyönteisiin

Vesihyönteiset eivät muodosta erillistä taksonomista yksikköä, vaan ovat monimuotoinen kokonaisuus, joka koostuu useista hyönteislahkoista (Staniczek 2011). Osa vesihyönteislajeista on sitoutunut makean veden elinympäristöihin, ja hyödyntää siis aina vesielinympäristöä jossain elinkaarensa vaiheessa (Staniczek 2011). Näitä ovat esimerkiksi päivänkorenon (*Ephemeroptera*) ja vesiperhosen (*Trichoptera*) toukat (Staniczek 2011). Lisäksi muun muassa luteisiin (*Heteroptera*), kovakuoriaisiin (*Coleoptera*) ja kärpäsiin (*Diptera*) kuuluu myös monia suuria heimoja, jotka esiintyvät vain vesiympäristöissä (Staniczek 2011).

Vesihyönteisiä esiintyy pääasiassa seisovan veden ekosysteemeissä eli järvissä, lammikoissa, kosteikoissa ja soissa sekä virtaavan veden ekosysteemeissä eli lähteissä, joissa

ja puroissa (Mazzucco ym. 2015; Starr & Wallace 2021). Harvat vesihyönteiset taas esiintyvät aidosti merellisissä ympäristöissä (Starr & Wallace 2021). Vesihyönteisten elinkaari koostuu pitkästä, jopa vuosia kestävästä toukkavaiheesta vedessä, ja suhteellisen lyhyestä elinajasta lentävinä aikuisena veden ulkopuolella (Mazzucco ym. 2015). Lyhytikäisen aikuisen tehtävänä on usein vain löytää kumppani, munia ja kuolla. Kun taas pitkäikäisellä toukalla (Kuva 1) on tärkeä rooli vesien ravintoverkossa (Mazzucco ym. 2015).



Kuva 1. Ryhmä hyttysentoukkia (*Culex*) vedessä (Gathan 2006).

Vesihyönteisiin vaikuttavat sekä pitkän ajan kuluessa muuttuvat tekijät että äärimmäiset ilmasto-olosuhteet (Harvey ym. 2023). Pitkäaikaisia tapahtumia ovat esimerkiksi ilmaston ja veden lämpeneminen, jotka vaikuttavat vesihyönteisten elinalueen muutoksiin, fenologiaan eli toiminnan vuosittaiseen vaihteluun sekä eliöiden vuorovaikutussuhteisiin (Harvey ym. 2023). Äärimmäisiä ja nopeita tapahtumia taas ovat esimerkiksi äärimmäiset lämpötilat, rankkasateet, kuivuus ja tulipalot, jotka vaikuttavat vesihyönteisten kelpoisuuteen, patogeeneihin eli taudinaiheuttajiin, ravinnonlähteisiin sekä hedelmällisyyteen (Harvey ym. 2023).

Vedessä elävillä hyönteisillä on huomattavasti erilaisia vaatimuksia kuin maalla elävillä hyönteisillä, joten ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvät todennäköisesti erilaisina maalla elävien hyönteisten ja vesihyönteisten välillä (Harvey ym. 2023: 11). Esimerkiksi ääri-ilmiöt näkyvät vesistöissä eri tavoin kuin maa ympäristössä. Samoin hapensaanti,

ravinnonhankinta ja elinalueen koko ovat hyvin erilaisia (Starr & Wallace 2021). Useimpien vesihyönteisten elinkaareen kuitenkin kuuluu myös maaympäristön hyödyntäminen esimerkiksi talvehtimisessa tai ravinnon hankkimisessa (Danks 2007), ja monet hyönteiset siirtyvät toukkavaiheensa jälkeen aikuistuttuaan maalle (Hering ym. 2009: 4). Vesialueen maaympäristöön kohdistuvat muutokset ovat siis myös tärkeässä asemassa pohdittaessa ilmastonmuutoksen vaikutuksia vesihyönteisiin (Danks 2007).

Vesihyönteiset ovat miljoonien vuosien aikana muodostuneet erittäin monimuotoiseksi eläimistöksi, ja jokaisella vesihyönteisellä on tietyt lajikohtaiset tarpeet (Graf ym. 2009: 7). Erilaisia lajeja on siis entistä enemmän ja lajit tarvitsevat omaan elämiseen soveltuvan elottoman ja elollisen ympäristönsä (Graf ym. 2009). Makean veden lajit voidaan esimerkiksi jakaa lämpimän ja kylmän veden tyyppeihin suositeltavien lämpötilaolosuhteiden mukaan (Heino ym. 2009). Lajit voivat myös suosia joen eri vyöhykkeitä, alueita aina pienistä lähteistä suuriin jokiin tai erilaisia mikroelinympäristöjä kuten kivistöä tai hiekkaa (Graf ym. 2009). Monilla lajeilla on myös tarkka ruokavalio ja ne ovat kehittäneet erilaisia ruokintastrategioita laiduntajista petoeläimiin. Ne suosivat usein tiettyjä lämpötilajärjestelmiä ja virtanopeuksia, ja niillä on erilaisia elinkaarikuvioita. Jotkut lajit sietävät monenlaisia ekologisia olosuhteita, kun taas toiset ovat paljon tarkempia (Graf ym. 2009). Lämpötilan nousu ja lämpötilojen vaihtelun muutokset vaikuttavat erityisesti niihin lajeihin, joilla elintilan tarpeet ovat tarkat (Harvey ym. 2023: 11).

2.1 Ilman ja veden lämpötila

Kuten maahyönteisiä, myös vesihyönteisiä uhkaavat lämpötilojen nousu ja lämpötilan jatkuva muutos sekä äärimmäiset lämpötilamuutokset (Harvey ym. 2023: 11). Ilman ja veden lämpötila vaikuttavat muun muassa vesihyönteisten kasvuun, kehitykseen ja lisääntymiseen (Danks 2007). Lämpötila stimuloi kasvua, kehitystä ja lisääntymistä optimaaliseen lämpötilaan asti. Lämpötilan nousu saattaa aluksi helpottaa joidenkin lajien kasvua ja kehitystä, ja lajien määrä saattaa myös ilmaston lämmitessä hetkellisesti kasvaa ja monimuotoistua (Danks 2007). Kuitenkin optimilämpötilan ylittyessä aineenvaihduntakustannukset kasvavat ja lämpövaurioita kertyy suhteettomasti (Danks 2007; Harvey ym. 2023). Tämä johtaa lopulta kehityksen epäonnistumiseen, heikentyneeseen hedelmällisyyteen ja leviämiskykyyn sekä viimeisenä alentuneeseen kuntoon ja lisääntyneeseen kuolleisuuteen (Harvey ym. 2023).

Vesihyönteisten ollessa ektotermisiä, eli riippuvaisia ympäristön lämmönlähteistä, korkeat lämpötilat vaikuttavat kasvuun yleensä negatiivisesti eli hyönteisten koko pienenee (Urbanski ym. 2012; Stoks ym. 2014: 44–45). Pienempi kehon koko taas vaikuttaa negatiivisesti hedelmällisyyteen, pitkäikäisyyteen ja leviämiseen (Harvey ym. 2023). Pienempi koko heikentää sietokykyä ilmastonmuutoksen edessä, mikä voi pahimmassa tapauksessa johtaa kokonaisen populaation tuhoutumiseen (Harvey ym. 2023). Kehon koon muutoksia ei voi kuitenkaan olettaa aina automaattisesti, sillä vaikka pienemmät eliöt voivat selviytyä paremmin pitkän aikavälin keskilämpötilan noususta, suurempien eliöiden odotetaan selviävän paremmin lämpöaalloista (Stoks ym. 2014: 44–45).

Veden ominaislämpökapasiteetti on paljon suurempi kuin ilmalla, jolloin veden lämpenemiseen tarvitaan suurempi määrä energiaa kuin ilman lämpenemiseen (Harvey ym. 2023). Tämän takia lämpötilavaihtelu on vedessä hitaampaa, ja vesihyönteiset ovat todennäköisesti kehittäneet kapeammat lämpötehokäyrät kuin maan hyönteiset (Harvey ym. 2023). Tämä tarkoittaa, että vesihyönteiset ovat sopeutuneet lievempiin ja hitaampiin lämpötilavaihteluihin, jolloin vesihyönteiset voivat olla herkempiä keskilämpötilan nousulle ja saavuttavat nopeammin optimaalisten lämpötilojen ylärajat (Harvey ym. 2023).

Vesihyönteisillä on myös huonompi lämmönsietokyky kuin maahyönteisillä (Harvey ym. 2023), ja tähän voi vaikuttaa esimerkiksi vesihyönteisten hengityskyky. Hengitys on merkittävä prosessi, joka on aiheuttanut evoluutiossa vesihyönteisille olennaisen ongelman niiden menestyäkseen vesiympäristöissä (Starr & Wallace 2021). Vedellä on pienempi happikapasiteetti kuin ilmalla, jolloin aerobinen, eli happea käyttävä hengitys on vedessä vaikeampaa (Harvey ym. 2023). Tämä ongelma voi olla vesihyönteisten alhaisten lämmönsietokykyjen taustalla, sillä lämpenevissä vesissä hapen saatavuus heikkenee, mutta aineenvaihdunta kasvaa (Harvey ym. 2023).

2.2 Sadanta ja vedenlaatu

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa sateiden tiheyteen ja voimakkuuteen sekä vedenlaatuun (Harvey ym. 2023). Vesistöissä sadannan muuttuminen näkyy virtaamassa ja tulvaherkkyudessa sekä suola-, ravinne- ja happipitoisuudessa (Stoks ym. 2014: 44; Mazzucco ym. 2015). Koska sademäärä vaikuttaa pääasiassa kaikkiin makean veden ekosysteemien hydrologisiin tiloihin, kaikki merkittävät muutokset sateen määrässä ja ajoituksessa vaikuttavat

todennäköisesti sekä suorasti että epäsuorasti makean veden ekosysteemien ominaisuuksiin sekä näissä ekosysteemeissä asuviin eliöihin (Heino ym. 2009).

Vesihyönteisiin vaikuttaa suoraan vedenpaljous, joka voi aiheuttaa hyönteisen hukkumisen tai siirtymisen veden mukana kauemmas sen elinympäristöstä (Harvey ym. 2023: 15–18). Tällöin haavoittuvaisia ovat erityisesti pienet, maalla elävät lajit (Harvey ym. 2023: 15–18). Suuret vesimäärät voivat vaikuttaa kuitenkin myös vesihyönteisiin, sillä virtaamat ja tulvat ovat yksi tärkeimmistä vesihyönteisten elinympäristöjen abioottisista tekijöistä (Mazzucco ym. 2015). Voimakas sade vaikuttaa veden virtaukseen, mikä voi häiritä vesihyönteisiä pois elinympäristöstään (Priawandiputra ym. 2018). Myös lumen nopea sulaminen ja sulamisveden virtaus vesihyönteisten elinympäristöihin voi aiheuttaa ongelmia (Danks 2007). Lumen sulamisvesi aiheuttaa muutoksia virtavesissä ja voi sisältää saasteita kuten happosadetta, mikä virratessaan vesistöihin vaikuttaa myös hyönteisiin (Danks 2007), sillä vedessä elävät hyönteiset ovat myös erityisen herkkiä saasteille ja ravinteiden muutokselle (Harvey ym. 2023:14). Saasteiden aiheuttamia ongelmia myös pahentaa entisestään ilmastonmuutoksen aiheuttama vesihyönteisten kehon koon pieneneminen, pienemmän koon ollessa herkempi muutoksille (Harvey ym. 2023: 14).

Epäsuorasti hyönteisiin tulevat vaikuttamaan ympäristön abioottiset muutokset kuten tulvan muokkaaman maaperän fysikaalis- kemialliset ominaisuudet (Harvey ym. 2023). Nämä taas koskettavat enemmän myös vedessä eläviä lajeja, sillä maaperän kemialliset ainekset voivat rankkasateiden ja tulvien kautta valua vesistöihin (Danks 2007). Maaperän kautta leviävien saasteiden lisäksi veden laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa rehevöityminen, orgaanisten aineiden lisääntyminen, happitason muutokset ja vesistöjen tummuminen (Hering ym. 2009; Jonsson ym. 2015; Härkönen ym. 2023). Lämpötilojen nousu pidentää kasvukautta ja yhdessä lisääntyneiden sateiden kanssa aiheuttaa rehevöitymistä sekä orgaanisten aineiden lisääntymistä vesistöissä, jolloin rantakasvillisuus runsastuu (Hering ym. 2009; Jonsson ym. 2015). Silloin vesistöjen happipitoisuus vähenee ja voi ilmetä jopa happikatoa. Hapen ollessa jo valmiiksi niukkaa vesistöissä, sen väheneminen aiheuttaa lisää ongelmia vesihyönteisille aiheuttaen lajiston vähenemistä tai jopa lajien sukupuuttoa (Harvey ym. 2023).

Lisääntyneen haihtumisen ja muuttuneiden sademäärien odotetaan lisäävän veden suolapitoisuutta (Stoks ym. 2014: 44). Makean veden selkärangattomien tyypillisiä reaktioita suolapitoisuuden nousuun ovat kasvunopeuden, kehitysvauhdin ja hedelmällisyyden väheneminen sekä kuolleisuuden lisääntyminen (Stoks ym. 2014: 44). Korkeampi suolapitoisuus yhdessä pidempien kuivuusjaksojen kanssa voivat potentiaalisesti johtaa jopa

paikallisiin sukupuuuttoihin vesihyönteisten ollessa herkkiä suolapitoisuuden kasvulle (Stoks ym. 2014: 44).

Makeat vedet ovat myös viime vuosikymmeninä kokeneet lisääntyntä tummumista, joka enimmäkseen johtuu lisääntyneistä orgaanisesta hiilestä ja rautapitoisuuksista (Härkönen ym. 2023). Tummuminen liitetään usein ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin lämpötilassa, kasvillisuudessa ja valuma-alueiden muutoksissa. Viime aikoina tummumisen on katsottu johtuvan myös maankäytön muutoksista, ja erityisesti turvemaiden ojituksista (Härkönen ym. 2023). Tummuminen voi aiheuttaa haitallisia muutoksia vesiekosysteemeissä, sillä se vaikuttaa ekosysteemin kemiaan, fysiikkaan ja ekologiaan. Se muun muassa laskee vesistöjen lämpötilaa, happitasoa ja valon määrää (Härkönen ym. 2023). Lisäksi tummuminen voi lisätä vesistöjen kasvihuonekaasupäästöjä ja heikentää vesistöjen virkistysarvoa (Härkönen ym. 2023). Tummumisella on siis vahva yhteisvaikutus vesihyönteisiin ja niiden elinympäristön muutoksiin.

2.3 Kuivuus

Ilmastonmuutos voi vähentää sadantaa paikoitellen, mikä aiheuttaa kasvavan haihdunnan kanssa ongelmia vesihyönteisille, sillä ne lisäävät kuivuutta yhdessä lämpötilan nousun kanssa (Stoks ym. 2014). Kuivuus vaikuttaa muun muassa vedessä elävien saaliiden saatavuuteen (Steward ym. 2022), ajallisiin tottumuksiin (Wellborn ym. 1996) sekä ääri-ilmasto-olojen kautta vesihyönteisten lepotiloihin (Harvey ym. 2023). Kuivuus jaetaan kahteen tyyppiin, jotka ovat pitkittynyt kuivuus ja pulssittainen kuivuus. Kuivuuden kesto voi siis olla jatkuvaa pitkällä ajanjaksolla tai kuivuus voi olla pulssittaista, jonka voimakkaat sateet keskeyttävät hetkittäin (Harvey ym. 2023). Molemmilla kuivuustyypeillä voi olla suoraan kielteisiä sekä epäsuoria vaikutuksia vesihyönteisiin (Harvey ym. 2023). Suora vaikutus voi olla esimerkiksi vesistöjen pinnan korkeuden laskeminen, jolloin veden laatu voi huonontua, ja epäsuora taas muun muassa kuivuuden vaikuttaminen hyönteisten hyödyntämiin kasveihin, joista hyönteiset ovat riippuvaisia (Harvey ym. 2023).

Kuivuus aiheuttaa aikarajoituksen vedessä elävien selkärangattomien kehitykselle, sillä niiden on saavutettava kuivumista kestävä vaihe tai siirryttävä maanpäälliseen vaiheeseen ennen kuin niiden elinympäristö kuivuu (Wellborn ym. 1996; Stoks ym. 2014: 44). Tällöin vesihyönteisten tulisi reagoida nopeasti veden määrän laskuun tai keksittävä jokin muu tapa sopeutua jopa yllättävään kuivuuteen. Vesihyönteisiin ja ilmastonmuutokseen liittyvissä

kokeissa ainoastaan joidenkin hyttyslajien naaraiden kehitys nopeutui veden määrän pienentyessä (Juliano & Stoffregen 1994; Stoks ym. 2014). Kuivuus siis lyhentää sitä aikaa, jolloin maaperässä tai vesistöissä on vettä, ja tämä voi alustavasti viitata siihen, että vesihyönteiset ovat erityisessä vaarassa, kun vesijaksot lyhenevät ilmaston lämpenemisen seurauksena (Stoks ym. 2014: 44).

Kuivuminen vaikuttaa vesihyönteisiin erityisesti jo valmiiksi hyvin kuivilla alueilla (Steward ym. 2022). Kuivuus on kuitenkin myös yhä yleisempää kosteilla alueilla ilmastonmuutoksen ja kasvavan veden tarpeen takia (Loskotová ym. 2023). Useilla alueilla pitkittynyt kuivuuden kesto ja voimakkuus lisäävät myös helleaaltoja ja tulipaloja (Harvey ym. 2023). Tulipaloilla voi olla hyvin kauaskantoisia seurauksia vesihyönteisille, ja erityisesti lajeille, jotka ovat riippuvaisia maaympäristöstä osan elinkaarensa aikana (Harvey ym. 2023). Esimerkiksi joidenkin seisovan veden ekosysteemien munat ovat lepotilassa pintamaan kerroksissa, mikä tekee niistä erityisen haavoittuvaisia tulipalojen kuumentuessa ja uhatessa niitä (Harvey ym. 2023).

Kuivuuden vaikeuttaessa vesihyönteisten elämää, voidaan kuitenkin huomata myös poikkeuksia. Esimerkiksi malluainen (*Notonectidae*) joka suosii matalaa vettä, voisi jopa hyötyä hetkellisesti vesien madaltumisesta (Priawandiputra ym. 2018). Myös virtojen kuivumisen voidaan olettaa vaikuttavan vesihyönteisiin negatiivisesti, mutta esimerkiksi Loskotová ym. (2023) tutkimuksessa vesistöjen kuivumisen ja ravinteiden rikastumisen yhteisvaikutuksesta huomattiin kuivuudesta olevankin hyötyä vesieliölle, sillä vesihyönteiset eivät joutuneet silloin suoraan kosketukseen haitallisten ravinteiden kanssa.

2.4 Tulokaslajit ja ravinnonhankinta

Tulokaslajilla tarkoitetaan lajia, joka on siirtynyt luontaiselta elinalueeltaan toiselle alueelle (Tulokas ja... 2023). Ne voivat vaikuttaa alueella lajien väliseen kilpailuun ja saalistukseen sekä loisten ja sairauksien leviämiseen (Heino ym. 2009). Ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan muuttuvien ilmasto-olosuhteiden kautta kotoperäisiin lajeihin ja lisäämään tulokaslajien leviämisen potentiaalia (Heino ym. 2009). Ilmastonmuutoksen seurauksena monet makean veden ekosysteemit voivat tulla sopiviksi erilaisten tulokaslajien pesimäpopulaatioille, millä on usein dramaattisia vaikutuksia kotoperäisiin lajeihin, biotettiin yhteisöihin ja ekosysteemiprosesseihin (Heino ym. 2009). Tulokaslajien negatiiviset vaikutukset ovat vakavia varsinkin, jos ne kohdistuvat avainlajeihin, eli elinympäristölle tärkeille, koko alueeseen

vaikuttaviin lajeihin. Tällöin tulokaslajit voivat johtaa yleiseen biologisen monimuotoisuuden vähenemiseen tai muuttavat lajien välisiä suhteita vastaanottavassa ekosysteemissä (Heino ym. 2009).

Uudelle alueelle siirtyvät tulokaslajit aiheuttavat kilpailua lajien välillä ruoan hankinnassa, saalistuksessa ja elintilassa. Muuttoliikkeet puolestaan voivat vaikuttaa maan kuluttajapopulaatioihin, jotka luottavat vesihyönteisiin saaliina (Jonsson ym. 2015). Tällöin maalla elävät hyönteiset eivät saa hankittua niille tyypillistä ravintoa vesihyönteisistä, ja vesihyönteisten muuttoliikkeet vaikuttavat myös maahyönteisiin (Jonsson ym. 2015).

Ilmastonmuutos voi siis vaikuttaa makean veden hyönteisten ravinnon hankintaan muuttamalla valuma-alueiden maanpeitettä ja rantavyöhykkeiden ominaisuuksia (Heino ym. 2009). Jopa hallitseva kasvillisuus voi muuttua lähitulevaisuudessa, ja nämä muutokset voivat olla seurausta sekä luonnollisista maanpeitteen muutoksista että ihmisten ja ilmastonmuutoksen aiheuttamista maanpeitteen muutoksista (Heino ym. 2009). Esimerkiksi pohjoisten alueiden havupuiden hallitsevat metsät voivat korvautua lehtipuilla, jotka ovat tällä hetkellä tyypillisempiä eteläisemmille metsille (Heino ym. 2009). Tällaisilla muutoksilla hallitsevissa metsäpuissa voi olla huomattavia vaikutuksia yhteisön rakenteeseen ja ekosysteemin toimintaan makean veden ekosysteemeissä (Heino ym. 2009). On osoitettu, että rantakasvillisuuden lehdet muodostavat vesistöissä yhden tärkeimmistä ravinnonlähteistä selkärangattomille kuluttajille (Heino ym. 2009), ja vedessä elävien toukkien yhden ruokintastrategioista ollessa lehtien ja puun hajottaminen sekä ajelehtivien materiaalien kerääminen (Hering ym. 2009), niille voi olla hyötyä esimerkiksi lehtipuiden paremmasta selviämiskyvystä ilmastonmuutoksessa. Siten ottaen huomioon, että lehtipuiden lehdet ovat parempia ravintolähteitä kuin havupuiden neulaset, rantakasvillisuuden dominanssimallien muutos voi johtaa todennäköisesti kasvuun ainakin hajottajien toiminnallisessa ryhmässä (Heino ym. 2009).

Aina ilmastonmuutoksen aiheuttamat olosuhteet eivät kuitenkaan suoraan vaikuta tutkittaviin vesihyönteisiin. Esimerkiksi Jonsson ym. (2015) eivät huomanneet suoraa yhtäläisyyttä tutkimiensa lajien sekä vesistöjen lämpenemisen ja tummumisen välillä, mutta pystyivät toteamaan toisen lajin (*Chironomidae*) vähenneen merkittävästi ilmastonmuutoksen seurauksesta. *Chironomidae* lajin eli surviaissääskien määrän vähenemisen voitiin huomata vaikuttavan myös muuhun yhteisön muuttumiseen muun muassa saalistuksen kautta (Jonsson ym. 2015). Surviaissääskien lukumäärän väheneminen ja sitä seuraava keskimääräisen ruumiinkoon kasvu vaikuttavat todennäköisesti maanpäällisiin kuluttajiin, jotka luottavat

saaliina esiin tuleviin vesihyönteisiin. Tässä tilanteessa surviaissääski on alueen avainlaji, jolla on suuri merkitys niitä ympäröivään ekosysteemiin.

3 Vesihyönteisten sopeutuminen muuttuvaan ympäristöön

Muuttuva ilmasto pakottaa vesihyönteiset sopeutumaan haasteisiin, joita ympäristö tuottaa (Danks 2007: 443–445). Tämän seurauksena vesihyönteiset joutuvat turvautumaan erilaisiin sopeutumiskeinoihin, joiden avulla ne selviävät muuttuvasta elinympäristöstä. Sopeutumiskeinoja ovat muun muassa ympäristön aiheuttamat toiminnalliset muutokset sekä perinnölliset sopeumat (Stoks ym. 2014). Ympäristön aiheuttamia muutoksia voivat olla esimerkiksi elinkaarten vaihtelut, muuttoliikkeet ja lajirunsaus sekä joustava ravinnonkäyttö. Perinnöllisiä sopeumia ovat taas nimensä mukaan periytyvät ominaisuudet. Lisäksi ihmiset voivat toiminnallaan auttaa vesihyönteisten sopeutumisessa ilmastonmuutokseen.

Ilmastonmuutokseen sopeutuminen on jaettu kahteen tyyppiin (Heino ym. 2009). Vaikka kyseinen jakaminen on tehty lähinnä maaekosysteemeihin nojaten, voidaan sen kautta pohtia myös vesiekosysteemien sopeutumista. Ensimmäinen on autonomista eli itsenäistä sopeutumista, mikä on ekosysteemien ja organismien tyypillisesti osoittama sopeutumistyyli (Heino ym. 2009). Toisena on suunniteltu sopeutuminen, mikä on ihmisten avustamaa sopeutumista, joka edellyttää suojelualueiden perustamista, elinympäristöjen hoitoa, leviämiskäytävien suunnittelua eri lajeille ja ihmisperäisten vaikutusten, kuten saastumisen, elinympäristöjen tuhoutumisen ja eksoottisten lajien leviämisen vesiekosysteemeihin minimoimista (Heino ym. 2009).

3.1 Toiminnalliset muutokset

Toiminnallisia muutoksia ovat autonomiset muutokset eli ne vesihyönteisten muutokset, joihin ne itse vaikuttavat käyttäytymisellään oman elinkaarensa aikana. Nämä muutokset eivät ole perinnöllisiä (Danks 2007; Urbanski ym. 2012). Esimerkiksi osa lämpöä vaativista vesihyönteisistä voi toimia myös silloin kun lämpöä on rajoitetusti hankkimalla lämpöä anatomian, aineenvaihdunnan tai käyttäytymisen muutosten kautta (Danks 2007). Yleensä esimerkiksi ilmassa parittelevat aikuiset vesihyönteiset, parittelevat sen sijaan maan tai veden pinnalla, käyttäen näin vähemmän lämpöenergiaa. Lisäksi suuret, tummat ja karvaiset lajit paistattelevat auringossa nostaakseen kehon lämpötilaa (Danks 2007). Jopa aikuiset hyttyset saattavat paistatella auringossa, mikä mahdollistaa esimerkiksi munien tehostetun kehityksen

(Danks 2007). Vesihyönteiset myös viettävät talvijaksoja maalla tai valitsevat talvehtimispaikat, jotka lämpenevät keväällä ensimmäisenä (Danks 2007: 443).

Elinkaaren säätely on vesihyönteisillä tärkeä osa ilmaston sopeutumisessa. Elinkaareen kuuluu muun muassa sukupolven kesto, aktiivisten vaiheiden ja lepotilan ajoitus sekä aikuisten elinvaiheet ja lisääntyminen (Danks 2007). Elinkaaren vaiheet määräytyvät lajeilla usein lämpötilan ja valomäärän perusteella, joten todennäköisesti ilmastonmuutos vaikuttaa huomattavasti vesihyönteisiin, sillä lajien lepotilojen ajoitus saattaa vaikeutua veden lämpötilan muuttuessa (Danks 2007; Urbanski ym. 2012). Tämä johtuu siitä, että lajit ovat tottuneet tiettyyn ilmastoon ja ovat ajoittaneet elinkaarensa sen mukaan, eikä ilmasto-olojen muuttuessa elinkaaren ajoitus sitten välttämättä toimikaan. Fotoperiodismin eli valojaksoisuuden muutokset taas aiheuttavat ongelmia vesihyönteisten totuttuun vuorokausirytmiiin, sillä päivän ja yön valosuhteet muuttuvat (Urbanski ym. 2012).

Elinkaaren jokaisessa vaiheessa on omat riskinsä altistua ilmastonmuutoksen aiheuttamille vaaroille, mutta jotkin vaiheet ovat kestävämpiä erilaisissa olosuhteissa (Danks 2007). Esimerkiksi monien lajien lepotilassa olevat munat kestävät haitallisia lämpötiloja eivätkä ne ole riippuvaisia ravinnon saatavuudesta, toisin kuin niistä kuoriutuvat toukat (Danks 2007: 450). Vedessä elävien hyönteisten on myös osoitettu olevan syntyessään herkempiä veden kemian muutoksille kuin toukkavaiheessa (Jonsson ym. 2015). Siksi vesihyönteiset esimerkiksi pitkittävät elinkaarensa pituutta, jotta muna- tai toukkavaihe kestää mahdollisimman pitkään. Ne voivat myös kiihdyttää elinkaartansa, jolloin vesihyönteinen voi ehtiä pakenemaan kuivuvaa vesistöä (Danks 2007).

Sudenkorennot ovat reagoineet ilmastonmuutokseen nopeuttamalla niiden kehitystä toukasta aikuisvaiheeseen (Kuva 2). Ne reagoivat aikastressiin eli nopeutuneisiin elinkaaren muutoksiin, nopeuttamalla aktiivisuutta ja kehitystasetta (Danks 2007). Tällöin ne onnistuvat kehittymään aikuisvaiheeseen tarpeeksi nopeasti, ennen kuin ilmasto-olot vaikeuttavat niiden kehitystä liiaksi (Danks 2007). Sudenkorennoilla voisi siis olla potentiaalinen mahdollisuus selviytyä ilmaston lämpenemisen aiheuttamista ympäristön ja elinkaaren muutoksista, sillä ne sopeutuvat ilmastonmuutoksen nopeuttamiin ilmasto-oloihin. Muillakin vesihyönteisillä elinkaaren venyttäminen tai nopeuttaminen voi olla mahdollista, mutta tutkimus aiheesta on vielä puutteellista.



Kuva 2. Juuri aikuisvaiheen saavuttanut sudenkorento (*Odonata*) (Alina Rekilä 2023).

On olemassa todisteita siitä, että makean veden lajit ovat osoittaneet levinneisyysmuutoksia vastauksena ilmastonmuutokseen viime vuosikymmenten, vuosikymmenten ja vuosikymmenten aikana, jolloin vesihyönteisten ilmaantuvuusalueet muuttuvat (Heino ym. 2009; Jonsson ym. 2015). Tämä tarkoittaa, että vesihyönteiset leviävät oman elinalueensa ulkopuolelle paremman elinympäristön toivossa. Vesihyönteiset voivat myös levitä laajemmalle, koska niille suotuisat olosuhteet ovat yhä laajemmin niiden käytössä eikä niiden tarvitse pysyä niille aikaisemmin rajoitetulla alueella (Hering ym. 2009). Esimerkiksi pohjoisempien alueiden lämmetessä, eteläiset lajit siirtyvät myös pohjoisille alueille. Myös pienemmillä alueilla kuten jokialueilla lajit nousevat ylävirroille parempien olosuhteiden toivossa (Hering ym. 2009). Lajit, jotka ovat rajoittuneet vain tietyille alueille tulevat todennäköisemmin olemaan ilmastonmuutoksen vaikutuksesta uhanalaisia, koska ne eivät voi esimerkiksi liikkua ylävirtaan lämpötilojen

nousun yhteydessä (Hering ym. 2009). Jos tällaiset lajit omaavat kuitenkin hyvät levittäytymiskyvyt, kuten lentokyvyn aikuisvaiheessa, ne voivat selvitä paremmin levittäytymisen mahdollistaessaan niiden siirtymisen samankaltaiselle alueelle (Hering ym. 2009).

Vesihyönteisten muuttoliikkeet vaikuttavat myös alueiden lajirunsauteen. Lajirunsauden muutokset taas aiheuttavat myös sopeutumistoimenpiteitä vesihyönteisillä, koska niiden täytyy reagoida joko lajiston vähenemiseen tai kasvamiseen alueella. Tällöin muutoksia täytyy tehdä esimerkiksi ravinnon hankinnassa (Steward ym. 2022). Vaihtoehtoisesti myös aineenvaihdunta voi hidastua, tai koko pienentyä (Jonsson ym. 2015; Harvey ym. 2023). Ilmaston lämpeneminen ja rehevöityminen voivat johtaa makean veden hyönteisten kokonaisuuden ja biomassan kasvuun (van Klink ym. 2020; Jähnig ym. 2021). Esimerkiksi kuivuus voi vaikuttaa ravinnonhankintaan, sillä se vähentää saaliseläinten lukumäärää ja niiden saatavuutta (Steward ym. 2022). Jotkin maa- ja vesihyönteiset ovat kuitenkin kyenneet muuttamaan ruokavaliotaan vesisaaliista maasaaliiksi (Steward ym. 2022), ja näin sopeutuneet kuivuuden aiheuttamiin ravinnonhankinta ongelmiin. Vesihyönteiset voisivat siis myös mahdollisesti sopeutua ravinnon hankkimiseen muilta kuin aiemmin totutuilta alueilta. Lisäksi hapenotto on vaikeutunut ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, sillä happipitoisuus voi pudota hurjasti kasvillisuuden myötä. Useat vesihyönteiset ovat kuitenkin ratkaisseet tämän ongelman monin eri tavoin, kuten ihon läpi hengityksellä ja kiduksilla sekä ilman hyödyntämisellä kasveista (Starr & Wallace 2021).

Tulvien sietokykyyn ja vastustamiseen sopivia ominaisuuksia on tunnistettu monille rannikon hyönteislajeille kuten hämähäkeille (*Araneae*) ja maakiitäjille (*Carabidae*). Näitä ominaisuuksia voivat olla lentäminen, uinti, kelluminen, hengitys ilmakehän kautta sekä kelluvan orgaanisen aineen päälle kiipeäminen. Jotkin maakiitäjistä voivat myös selviytyä kokonaan veden alla jopa 20 tuntia (Steward ym. 2022). Tulvien lisäksi lumien sulaessa aiheutuu virtauksia ja happamoitumista, jotka aiheuttavat haittaa ekosysteemille ja vesihyönteisille. Jotkin lajit voivat kuitenkin myös hyödyntää lumen sulamisen aiheuttamia nopeita virtauksia ja niiden kuljettamaa ravintoa (Danks 2007). Suurin osa lajeista on sopeutunut myös välttämään virtauksia ja tulvia esimerkiksi pysymällä lepovaiheessa vielä niiden ajan, ja siirtyvät seuraavaan vaiheeseen vasta pahimpien tulva-aikojen jälkeen (Danks 2007). Lajit voivat myös vaihtaa ympäristöä esimerkiksi turvallisempiin sivujokiin, kunnes suurin tulva-aika on ohi (Danks 2007).

3.2 Perinnölliset sopeumat

Muutamit kokeelliset tutkimukset ovat osoittaneet, että perinnöllistä muutosta on jo tapahtunut tai sillä on ainakin potentiaalia tapahtua (Stoks ym. 2014). Tämä ei ole odottamatonta, sillä nopeita evoluutioreaktioita ilmastonmuutokseen on jo raportoitu pitkäikäisillä selkärangkaisilla (Stoks ym. 2014). Makean veden selkärangattomien suhteellisen lyhyt sukupolven pituus voi helpottaa tällaista muuttuvan ilmaston evoluution seuranta, sillä lyhyempiä sukupolvia on helpompi seurata, kun tahdotaan nähdä, tapahtuuko evolutiivisia muutoksia. Kuitenkin vaikka evoluutio lämpenemisen seurauksena olisikin mahdollista, tämä ei takaa, että evoluutio on riittävän nopea pysyäkseen ilmaston lämpenemisen tahdissa ilmastonmuutoksen nopeuden koko ajan kasvaessa (Stoks ym. 2014). Lisäksi perinnöllisten muutosten seuranta tietyn lajin toimesta ei välttämättä riitä, koska lajit ovat sulautuneet yhteisöihin, ja on epätodennäköistä, että kaikki bioottiset vuorovaikutustekijät kehittyisivät samalla nopeudella. Tämä voi johtaa häiriöön ekologisten vuorovaikutusverkostojen esimerkiksi fenologisten eli toiminnallisten muutosten kautta (Stoks ym. 2014). Eli ongelmana on myös ekosysteemin laajuus, jossa kaikki linkittyy kaikkeen. Eli vaikka jokin laji sopeutuisi itse hyvin muuttuviin olosuhteisiin, saattaa muu ympäristö jäädä jälkeen ja vaikeuttaa sopeutuneen lajin selviytymistä (Stoks ym. 2014).

Esimerkki perinnöllisistä sopeumista voisi olla hyönteisten värityksen muutokset, joita todennäköisesti nähdään tulevaisuudessa sekä maa- että vesihyönteisillä. Lisääntyneen lämmön takia vesihyönteisten ruumiinlämpö nousee ja se vaikeuttaa normaaleja elintoimintoja (Harvey ym. 2023). Siksi vesihyönteisten täytyy laskea kehonlämpöään ja monilla lajeilla tämä näkyy melaniinin vähenemisenä eli värien vaalenemisena (Harvey ym. 2023). Vaaleampi keho ei ime itseensä yhtä paljon lämpöä kuin tummempi keho, jolloin hyönteiset saavat viilennettyä kehoaan (Harvey ym. 2023). Tämä sopeuma voisi mahdollisesti olla periytyvä Harvey ym. 2023).

3.3 Suunniteltu sopeutuminen

Koska ilmastonmuutoksella on todennäköisesti suuria vaikutuksia makean veden organismien levinneisyyteen, tällaisiin muutoksiin on sopeuduttava ja toimenpiteitä tarvitaan (Heino ym. 2009). Ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset elinympäristöissä on ymmärrettävä laajasti, ja ne eivät sisällä vain organismien evoluution muutoksia ja sopeumia, vaan myös ihmisen avustamia keinoja sopeuttaa organismeja muuttuneisiin olosuhteisiin (Heino ym. 2009). Myös ihmiset voivat toiminnallaan helpottaa vesihyönteisten sopeutumista muuttuvaan ilmastoon. Heinon ym. (2009) mukaan suunniteltu sopeutuminen on reaktiivista eli ilmastonmuutoksen

vaikutuksiin reagoimista. Lisäksi se on myös ennakoivaa. Ennakoiva termi liittyy siihen, että ilmastonmuutokseen sopeutuminen voidaan toteuttaa ennen ennustettuja vaikutuksia. Tämä on ihmisten tehokkain keino torjua ilmastonmuutoksen mahdollisia vaikutuksia (Heino ym. 2009). Näitä toimia ovat lyhyesti suojelualueiden verkostot, tärkeiden alueiden suojelu, hajautuskäytävät, kotoperäisten lajien uudelleenistuttaminen, suojelualueiden matriisien hallinta sekä elinympäristöjen ennallistaminen ja hoito (Heino ym. 2009). Makean veden eliöiden vaatimukset tulee ottaa tarkasti huomioon tulevassa suojelualueiden määrittelyssä ja arvioinnissa. Täytyy esimerkiksi huomioida missä määrin suojelualueet mukautuvat makean veden luonnon monimuotoisuuteen muuttuvassa ilmastossa ja siihen liittyvissä ympäristön muutoksissa, ja kuinka paljon ihminen voi niihin vaikuttaa (Heino ym. 2009).

4 Suomi esimerkkialueena

Ilmastonmuutoksen seurauksena lämpötilamuutokset tulevat koettelemaan merkittäväällä tasolla Suomen maa-, vesistö- ja merialueita (Hildén ym. 2022). Kuivuus ja metsäpalovaara tulevat kasvamaan, lumisateet vähenevät ja vesisateet sekä pilvisuus ja pimeys lisääntyvät (Hildén ym. 2022). Erityisesti Suomen vesistöt ovat herkkiä ilmaston lämpenemisen aiheuttamille muutoksille, sillä Suomen vesistöt ovat Suomen ympäristökeskuksen mukaan matalia (Suomen sisävesien... 2023). Matalien vesistöjen voi olettaa olevan herkempiä muutoksille pienemmän pinta-alansa takia, sillä tilavuus puskuroi lämpötilan vaihtelua (Danks 2007: 445), jolloin muutokset näkyvät nopeammin ja ekosysteemeillä on vähemmän aikaa sopeutua muutoksiin.

Lisäksi ilmastonmuutoksen odotetaan vaikuttavan merkittävästi Suomen hydrologiaan, sillä ilmastoalueet tulevat todennäköisesti siirtymään pohjoisemmaksi ja Suomessa vallitsevasta ilmastotyypistä tulee lauhkeampi ja kosteampi (Olsson ym. 2015). Suomessa suurimmat ilmastonmuutoksen seuraukset ovat vielä vasta edessä, vaikka lämpötilojen nousu ja sademäärät ovat kasvaneet jo merkittävästi (Ilmastonmuutos näkyy... 2023).

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon paikalliset hydrologiset ominaisuudet ja ilmasto, sillä niillä voi olla suuri vaikutus hydrologiseen vasteeseen (Veijalainen ym. 2010). Suomessa sääolot vaihtelevat neljän vuodenajan mukaan. Talviajat ovat enimmäkseen kylmiä ja lumisia, ja kesäajat melko lyhyitä, viileitä ja sateisia (Olsson ym. 2015). Suomen hydrologialle, eli vesivaroille ja vedenkiertokululle on ominaista

vuodenaikojen vaihteluihin liittyvät ominaisuudet, kuten lumen kerääntyminen talvisin ja sen sulaminen keväisin (Olsson ym. 2015).

Lajien reagoiminen ilmastonlämpenemiseen tulee myös olemaan erilaista riippuen niiden elinalueesta (Hering ym. 2009), joten myös Suomen sisällä olevat elinalueiden erot täytyy ottaa huomioon. Ilmastonmuutoksen vaikutusten voidaan ennustaa eroavan laajasti määriteltyjen ekosysteemityyppien ja alueiden välillä (Heino ym. 2009). Esimerkiksi pieniin puroihin ilmastonmuutos voi todennäköisesti vaikuttaa voimakkaammin kuin suuriin jokiin, koska ilman lämpötilan ja pienten purojen veden lämpötilan välillä on vähemmän eroa (Heino ym. 2009). Pienet purot ovat myös alttiimpia pienille virtauksille ja äkillisille tulville, jotka johtuvat odotettavissa olevista sademäärien muutoksista (Heino ym. 2009). Samoin pienet lammet voivat kärsiä enemmän lämpöstressistä kuin suuret järvet (Heino ym. 2009).

Ilmastonmuutos vaikuttaa virtaamiin Suomessa (Veijalainen ym. 2010). Muuttuneet sadekuviot ennakoimattomien rankkasateiden muodossa lisäävät todennäköisesti myös äkillisten tulvien todennäköisyyttä virroissa (Heino ym. 2009). Koska tulevaisuudessa talvella lämpötila nousee useammin nollan yläpuolelle, talviviltaamat ja vedenkorkeudet nousevat, kun taas kevätlumen sulamisvirtaukset pienenevät erityisesti Etelä- ja Keski-Suomessa kertyvän lumen vähenemisen vuoksi (Olsson ym. 2015). Alueilla, joilla syys- ja talvitulvia esiintyy tällä hetkellä usein, tulvakaudet tulevat leviämään pidemmille ajanjaksoille, ja lisääntyvät talvisateet sekä lumen ja jään sulaminen lisäävät tulvia ja veden virtauksia entisestään (Danks 2007 & Veijalainen ym. 2010). Lumen sulaminen ja sen virtaamat voivat myös sisältää saasteita kuten happosadetta, mikä virratessaan vesistöihin vaikuttaa myös vesihyönteisiin (Danks 2007). Paikoin lisääntyvät tulvat voivat myös syövyttää rantoja ja huuhtoa mukanaan paljon maainesta, jolloin ravinteita pääsee veteen valtavia määriä. Pahimmillaan viemäreiden ja pumppaamojen kapasiteetti tulvavesien kanssa ylittyy ja puhdistamoilta joudutaan päästämään jätevettä suoraan vesistöön (Ilmastonmuutos lisää... 2021). Suomessa myös vesistöjen tummuminen on suuri ongelma (Räike 2017). Suomessa tummumiseen vaikuttaa humuksen lisääntyminen ja rautapitoisuuden kasvu. Tummumisen seurauksena valon pääsy vesistöön estyy ja lämpötila nousee sekä perustuotanto ja eliöstö muuttuu, mikä vaikuttaa vahvasti myös vesihyönteisiin (Räike 2017).

Suomen lämpötilojen noustessa kasvien ja eläinten elinot muuttuvat ja kasvillisuusvyöhykkeet siirtyvät pohjoisemmaksi (Olsson ym. 2015). Suomeen on jo levinnyt lajeja etelästä ja pohjoisia lajeja on uhanalaistunut (Ilmastonmuutos näkyy... 2023). Lajien siirtyessä pohjoiseen myös vektorivälitteiset taudit voivat siirtyä, ja esimerkiksi punkkien levittämien tautien muutokset ovat jo havaittavissa (Hildén ym. 2022). Hyönteisten kannalta

erityisesti viruksia levittäviä lajeja tarkkaillaan (Hildén ym. 2022). Jotta pohjoiset lajit säilyisivät ilmastonmuutoksen alla, niiden on myös kohdattava paikan päällä lämpötilan nousun lisäksi siihen liittyvät ekologiset haasteet, kuten muutokset saalistusmäärissä (Stoks ym. 2014: 42).

5 Pohdinta

Tässä tutkielmassa tavoitteena oli saada tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista vesihyönteisiin sekä vastata tutkimuskysymyksiin, jotka olivat miten vesihyönteiset sopeutuvat ilmastonmuutokseen makean veden elinympäristöissä sekä millaiset ominaisuudet auttavat vesihyönteisiä sopeutumaan ilmaston muutoksiin. Tutkielman aineiston perusteella voidaan päätellä ilmastonmuutoksen vaikuttavan jo nyt vesihyönteisiin voimakkaasti, ja tulevan vaikuttamaan vielä voimakkaammin tulevaisuudessa. Voidaan myös todeta monilla vesihyönteisillä jo olevan sopeutumismekanismeja tämän hetken ilmastoon, mutta on vaikea ennustaa voivatko ne kehittää uusia sopeumia tarpeeksi nopeasti ilmaston edelleen muuttuessa.

Vesihyönteisillä sopeumia voidaan todeta olevan toiminnallisia ja perinnöllisiä. Toiminnallisia sopeumia olivat elinkaaren säätely, kehityksen nopeuttaminen, aineenvaihdunnan muutokset, levinneisyys sekä ravinnonhankinta. Eniten tutkielmassa esiin nousivat ilman ja veden lämpötilan vaikutukset vesihyönteisten aineenvaihduntaan ja kehon koon muutoksiin. Sopeumista taas toiminnalliset muutokset saivat enemmän huomiota kuin perinnölliset muutokset, ja erityisesti elinkaaren muutoksista löytyi paljon tietoa.

Voidaan todeta, että ilmastonmuutoksessa parhaiten lämpötilojen muutoksiin sopeutuvat todennäköisesti ne lajit, joilla elinkaaret ovat pitkiä, tai jotka voivat reagoida ilmastoon elinkaaren muutoksilla. Lisäksi ne lajit, joilla on hyvät mahdollisuudet muuttaa levinneisyysaluettaan, ovat paremmassa asemassa verrattaessa vain yhdellä alueella pärjääviin vesihyönteisiin. Kokonaisuudessaan siis paremman kelpoisuuden sekä paremmat sopeutumiskeinot omaavilla lajeilla ilmastonmuutokseen sopeutuminen on helpompaa.

Ilmastonmuutoksen ja vesieliöiden suhdetta pohtiessa, on vaikea verrata kaikkia tekijöitä toisiinsa. Yksi monimutkainen tekijä, joka voi vaikeuttaa tarkkojen ennusteiden luomista on se, että luonnon valintapaineet ja niistä johtuvat evoluution muutokset voivat olla voimakkaasti kontekstista riippuvaisia (Stoks ym. 2014). Eli vaikka jonkin vesihyönteisen sopeutumismuutoksen voisi ajatella olevan yhteydessä ilmastonmuutokseen, saattaa sopeumaan liittyä myös moni muu tekijä, eikä ilmastonmuutos ehkä ollenkaan. Näiden asioiden

vertaaminen yhdessä on erittäin vaikeaa, sillä ei voida tietää varmaksi, mikä on juuri se muutos mikä vaikuttaa vesihyönteisen käytökseen tai ominaisuuteen. Esimerkiksi geneettiset muutokset voivatkin olla reaktioita paikallisiin ilmasto-oloihin ilmastonmuutoksen sijaan (Stoks ym. 2014), jolloin on vaikea tutkia, miten juuri ilmastonmuutos vaikuttaa sopeumiin.

Kaikkia pitkän aikavälin muutosten aiheuttamia sopeumia vesihyönteisissä ei myöskään aina huomata (Harvey ym. 2023). Havaittavat muutokset vesihyönteispopulaatioiden dynamiikassa, niiden jakautumisessa, fenologiassa tai runsaudessa havaitaan yleensä vasta sen jälkeen, kun kriittiset hedelmällisyyteen, eloonjäämiseen ja muihin elintärkeisiin arvoihin vaikuttavat suorituskyvykset on ylitetty (Harvey ym. 2023). Tämä tarkoittaa, että monet muutokset ovat havaittavissa vasta tulevaisuudessa, kun ilmastonmuutos on kerennyt edetä jo pitkälle. Tähän asti tehtyjen tutkimusten luotettavuutta on myös vaikea todentaa, sillä useat tutkimukset vesihyönteisistä on tehty seuraamalla pintavesien hyönteisiä, eikä pohjahyönteisiä, sillä pohjahyönteisten tunnistaminen on vaikeampaa (Jonsson ym. 2015). Tämä voi tarkoittaa, etteivät tutkimustulokset esimerkiksi levinneisyydestä tai lajirunsaudesta pidä täysin paikkaansa, kun pohjahyönteisten ominaisuuksista ei tiedetä tarpeeksi.

Pohtiessa vesihyönteisten sopeutumista ilmastonmuutokseen Suomessa, voidaan verrata muualla maailmalla huomattuja sopeumia ja Suomen ilmasto-oloja. Tulevaisuudessa Suomen vesihyönteisillä näkyvät todennäköisesti monet samat sopeumat kuin muualla maailmassa eli elinalueen, toiminnan ja vuorovaikutussuhteiden muutokset. Suomessa sopeumiin vaikuttavat todennäköisesti erityisesti matalat vesistöt, vuodenaikaisvaihtelut ja niiden muutokset sekä tulokaslajit (Hildén ym. 2022; Ilmastonmuutos näkyy... 2023). Suomessa vesihyönteisten määrä myös todennäköisesti lisääntyy ainakin hetkellisesti tulokaslajien levittäytyessä Suomeen (Ilmastonmuutos näkyy... 2023). Suomen kotoperäisten lajien määrä voi kuitenkin laskea, tulokaslajien ollessa kelpoisempia Suomen uuteen, lämpimämpään ilmastoon. Mikä voi tarkoittaa monien kotoperäisten lajien uhanalaistumista tai sukupuuttoon kuolemista joko elintilan rajallisuuden tai huonomman kelpoisuuden kautta.

Suhteellisen korkeassa lämpötilassa elävät lajit reagoivat todennäköisesti lämpötiloihin paremmin kuin alhaisiin vedenlämpötiloihin sopeutuneet lajit (Hering ym. 2009). Suomessa lämpötilojen ollessa aina suhteellisen alhaisia (Olsson ym. 2015), vesihyönteisten reagoiminen lämpötilojen muutoksiin ei ole välttämättä kaikkein helpointa, mikä tarkoittaa, että Suomen vesihyönteisten kelpoisuus ja säilyminen voivat olla negatiivisia ilmaston lämmetessä. Suomessa lajit eivät myöskään välttämättä pääse levittäytymään enää paremmille ja viileämmille alueille, jos lämpötila nousee globaalisti kaikkialla. Parhaiten

ilmastonmuutoksesta kuitenkin oletetaan selviävän niiden lajien, jotka ovat hyviä leviämään alueelta toiselle (Suomen sisävesien... 2023).

Tässä tutkielmassa esimerkiksi perinnöllisten sopeumien osuus jää vajaaksi. Kuitenkin Urbanski ym. (2012) ja Stoks ym. (2014) toteavat, että geneettisiä muutoksia on jo tapahtunut vesihyönteisillä ja muutokset osoittavat lajien potentiaalia sopeutua muuttuvaan ilmastoon, johtui se sitten ilmastonmuutoksen aiheuttamista oloista tai muista tekijöistä (Urbanski ym. 2012, Stoks ym. 2014). Tutkielmasta jää uupumaan myös muita tärkeitä osioita, ja vesihyönteisiin vaikuttavia tekijöitä sekä vesihyönteisten sopeumia, rajallisen ajan sekä lähteiden vuoksi. Tämä voitaisiin korjata laajemmalla lähteiden etsinnällä, tai niiden puutteessa uusilla tutkimuksilla. Lisäksi tutkimuksesta voitaisiin saada enemmän yksityiskohtaista tietoa, sen kohdistuessa pienemmälle alueelle tai tiettyihin vesihyönteislajeihin.

Kuten myös Starr & Wallace (2021) toteavat, ilmaston lämpenemisen aiheuttamat muutokset vesiekosysteemeissä johtavat todennäköisesti muutoksiin tiettyjen hyönteisryhmien suhteellisissa osuuksissa, olivatpa ne sitten luonnollisia tai ihmisen aiheuttamia. Suhteelliset osuudet tulevat todennäköisesti vaikuttamaan paljon vesiekosysteemien toimintaan, sillä myös muut lajit ja ekosysteemin toiminta ovat riippuvaisia vesihyönteisistä. Siksi myös yleistävä tutkimus on tärkeää, ja tämä työ voi olla hyvä pohja lisätutkimukselle, sillä vesihyönteisistä tehtyä tutkimusta on vain vähän verrattuna niiden tärkeyteen ekosysteemeissä.

Vesihyönteisiin syventyvä tieto on tärkeää ennustaessa makean veden lajien reagointia ilmastomuuttujiin, sekä myös ennustaessa ilmastonmuutoksen tapahtumia ja seurauksia. Aiheesta siis tarvitaan jatkotutkimusta. Vesihyönteisten sopeumia on kokonaisuudessaan tutkittu suhteellisen vähän ja samoin ilmastonmuutoksen vaikutuksia vesihyönteisiin, kun ajatellaan, miten vahvasti vesihyönteiset esimerkiksi indikoivat vesistöjen tilaa. Tärkeää jatkotutkimuksissa olisi myös huomioida kuinka paljon myös muut tekijät kuin ilmastonmuutos vaikuttavat vesistöihin, vesihyönteisiin ja vesihyönteisten sopeumiin. Vesihyönteisistä saatu tieto voisi helpottaa monin tavoin luonnon ja sen muutosten seuraamista. Voidaan esimerkiksi pohtia osattaisiinko ilmastonmuutokseen varautua paremmin tutkimalla lisää vesihyönteisiä.

6 Lähteet

- Danks, H. V. (2007). How aquatic insects live in cold climates. *Canadian entomologist* 139(4) 443–471. <https://doi.org/10.4039/n06-100>
- Gathan, A. (2006). [valokuva]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Culex_sp_larvae.png
CDC 2.5. <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5>>, via Wikimedia Commons
- Graf, W., Lorenz, A., Tierno de Figueroa, J., Lücke, S., López-Rodríguez, M., Davies, C., . . . & Hering, D. (2009). *Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms*. eBook Academic Collection – Worldwide.
- Grigoropoulou, A., Hamid, S. A., Acosta, R., Akindele, E. O., Al-Shami, S. A., Altermatt, F., . . . & Domisch, S. (2023). The global EPTO database: Worldwide occurrences of aquatic insects. *Global ecology and biogeography* 32(5) 642–655. <https://doi.org/10.1111/geb.13648>
- Harvey, J. A., Tougeron, K., Gols, R., Heinen, R., Abarca, M., Abram, P. K., . . . & Chown, S. L. (2023). Scientists' warning on climate change and insects. *Ecological monographs* 93(1). <https://doi.org/10.1002/ecm.1553>
- Heino, J., Virkkala, R., & Toivonen, H. (2009). Climate change and freshwater biodiversity: Detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 84(1) 39-54. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00060.x>
- Hering, D., Schmidt-Kloiber, A., Murphy, J., Lücke, S., Zamora-Muñoz, C., López-Rodríguez, M. J., . . . & Graf, W. (2009). Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. *Aquatic sciences* 71(1) 3–14. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9159-5>
- Hildén, M., Tikkakoski P., Sorvali, J., Mettiäinen, I., Käyhkö, J., Helminen, M., Määttä, H., Berninger, K., Meriläinen, P., Ahonen, S., Kolstela, J., Juhola, S., Tynkkynen, O., Gregow, H., Groundstroem, F., Halonen, J. I., Munck af Rosenschöld, J., Tuomenvirta, H., Carter, T., Lehtonen, H., Luomaranta, A. & Mäkelä A. (2022). Ilmastonmuutokseen sopeutuminen Suomessa- nykytila ja kehitysnäkymät. *VALTIONNEUVOSTON SELVITYS- JA TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA* 2022:55 https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164300/VNTEAS_2022_55.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- 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>
- Ilmastonmuutos lisää vesistöjen kuormitusta (2021) Vesi.fi. 28.4.2023. <https://www.vesi.fi/vesitieto/ilmastonmuutos-lisaa-vesistöjen-kuormitusta/>
- Ilmastonmuutos näkyy jo Suomen luonnossa (2023) Ymparisto.fi. 16.4.2023. <https://www.ymparisto.fi/fi/ympariston-tila/ilmastonmuutos/ilmastonmuutos-etenee>
- Jonsson, M., Hedström, P., Stenroth, K., Hotchkiss, E. R., Vasconcelos, F. R., Karlsson, J., & Byström, P. (2015). Climate change modifies the size structure of assemblages of emerging aquatic insects. *Freshwater biology* 60(1) 78–88. <https://doi.org/10.1111/fwb.12468>
- Juliano, S., & Stoffregen, T. (1994). Effects of habitat drying on size at and time to metamorphosis in the tree hole mosquito *Aedes triseriatus*. *Oecologia* 97(3) 369-376. <https://doi.org/10.1007/BF00317327>
- Jähnig, S. C., Baranov, V., Altermatt, F., Cranston, P., Friedrichs-Manthey, M., Geist, J., ... & Domisch, S. (2021). Revisiting global trends in freshwater insect biodiversity. *Water* 8(2). <https://doi.org/10.1002/wat2.1506>
- Loskotová, B., Straka, M., Pernecker, B., Dostálová, A., Csabai, Z., Polášek, M., & Pařil, P. (2023). Combined effect of stream drying and nutrient enrichment on macroinvertebrate community: Experimental study from artificial stream mesocosms. *Aquatic sciences* 85(1) 23. <https://doi.org/10.1007/s00027-022-00924-w>
- Macadam, C. R., England, J., & Chadd, R. (2022). The vulnerability of British aquatic insects to climate change. *Knowledge and management of aquatic ecosystems* 423 3. <https://doi.org/10.1051/kmae/2022003>
- Mazzucco, R., Van Nguyen, T., Kim, D., Chon, T., & Dieckmann, U. (2015). Adaptation of aquatic insects to the current flow in streams. *Ecological modelling* 309–310 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.019>
- Olsson, T., Jakkila, J., Veijalainen, N., Backman, L., Kaurola, J., & Vehviläinen, B. (2015). Impacts of climate change on temperature, precipitation and hydrology in Finland – studies using bias corrected Regional Climate Model data. *Hydrology and earth system sciences* 19(7) 3217–3238. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3217-2015>
- Priawandiputra, W., Zakaria, F. R. N., & Prawasti, T. S. (2018). Aquatic Insect Community as Indicator of Water Quality Assessment in Situ Gede System, Bogor, Indonesia. *IOP*

- conference series. *Earth and environmental science* 197(1) 12016.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/197/1/012016>
- Räike A. (2017). Suomen vesistöjen tummuminen. *Suomen ympäristökeskus*.
<https://www.yhteinenahtarinjarvi.fi/templates/yhteinenahtarinjarvi/images/Raike.pdf>
- Staniczek, A., (2011). Aquatic Insects. *The Natural History of Santo* 251- 257.
https://www.researchgate.net/publication/315797618_Aquatic_Insects
- Starr, S. M., & Wallace, J. R. (2021). Ecology and Biology of Aquatic Insects. *Insects (Basel, Switzerland)* 12(1) 51. <https://doi.org/10.3390/insects12010051>
- Steward, A. L., Datry, T., & Langhans, S. D. (2022). The terrestrial and semi-aquatic invertebrates of intermittent rivers and ephemeral streams. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 97(4) 1408-1425. <https://doi.org/10.1111/brv.12848>
- Stoks, R., Geerts, A. N., & De Meester, L. (2014). Evolutionary and plastic responses of freshwater invertebrates to climate change: Realized patterns and future potential. *Evolutionary applications* 7(1) 42–55. <https://doi.org/10.1111/eva.1210>
- Suomen sisävesien tulevaisuus (2023) Ilmasto-opas.fi. 13.4.2023. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/suomen-sisavesien-tulevaisuus>
- Timoner, P., Fasel, M., Ashraf Vaghefi, S. S., Marle, P., Castella, E., Moser, F., & Lehmann, A. (2021). Impacts of climate change on aquatic insects in temperate alpine regions: Complementary modeling approaches applied to Swiss rivers. *Global change biology* 27(15) 3565–3581. <https://doi.org/10.1111/gcb.15637>
- Tulokas ja vieraslajit (2023) ymparisto.fi 11.5.2023. <https://www.ymparisto.fi/fi/luonto-vesistot-ja-meri/luonnon-monimuotoisuus/lajien-monimuotoisuus/tulokas-ja-vieraslajit>
- Urbanski, J., Mogi, M., O'Donnell, D., DeCotiis, M., Toma, T., & Armbruster, P. (2012). Rapid Adaptive Evolution of Photoperiodic Response during Invasion and Range Expansion across a Climatic Gradient. *The American naturalist* 179(4) 490-500.
<https://doi.org/10.1086/664709>
- van Klink, R., Bowler, D. E., Gongalsky, K. B., Swengel, A. B., & Chase, J. M. (2020). Response to Comment on "Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances". *Science (American Association for the Advancement of Science)* 370(6523). <https://doi.org/10.1126/science.abe0760>
- Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B., & Käyhkö, J. (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 391(3) 333–350. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.035>

Wellborn, G. A., Skelly, D. K., & Werner, E. E. (1996). MECHANISMS CREATING COMMUNITY STRUCTURE ACROSS A FRESHWATER HABITAT GRADIENT. *Annual review of ecology and systematics* 27(1) 337-363.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.27.1.337>