

Valosaasteen ekologiset vaikutukset –  
Keinotekoisien valaistuksen vaikutukset hyönteisten käyttäytymiseen

Aliina Hyttinen

LuK-seminaari ja -tutkielma  
790351A  
Maantieteen tutkinto-ohjelma  
Oulun yliopisto  
13.5.2021

## Tiivistelmä

Keinotekoinen valaistus on lisääntynyt viime vuosisadan aikana niin tilallisesti ja ajallisesti kuin laadullisesti, uusimpien valaisinteknologioiden, kuten ledien, tuottaessa entistä laajemmin eri aallonpituuksia. Valosaasteesta eli haitallisesta keinotekoisesta valosta on tullut yksi yleisimmistä ja nopeimmin lisääntyvistä ympäristömuutoksen muodoista. Valosaaste ulottuu lähes kaikkialle maapallolla, niin maa- kuin vesiekosysteemeihin.

Elämä maapallolla on kehittynyt auringon ja tähtien valon sekä kuusta heijastuvan auringonvalon, luonnonvalolle ominaisten voimakkuuksien ja spektrin sekä valon ja pimeyden jaksottaisuuksien vaikutuksessa. Valo ja pimeys toimivat luonnossa resursseina ja valo tiedonlähteenä ympäristöstä, säädellen eliöiden fysiologiaa ja biologisia rytmejä sekä vaikuttaen eläinten visuaaliseen havaitsemiskykyyn ja yöaikaiseen suunnistamiseen. Keinotekoinen valo on historiallisesti uusi ilmiö, joka eroaa ominaisuuksiltaan luonnonvalosta ja häiritsee luonnollisia valon ja pimeyden vaihteluita.

Keinotekoisella valolla on merkittäviä biologisia ja ekologisia vaikutuksia luonnonvaraisiin eliöihin, ulottuen yksilöistä ekosysteemien tasolle. Yöaikainen keinotekoinen valo vaikuttaa hyönteisten käyttäytymiseen muuttamalla niiden aktiivisuutta ja suunnistamista, vetämällä hyönteisiä puoleensa sekä häiritsemällä bioluminesoivien hyönteisten viestintää ja lisääntymistä. Muutokset hyönteisten käyttäytymisessä voivat vaikuttaa edelleen lajien väliseen vuorovaikutukseen, kuten peto-saalis-vuorovaikutukseen ja hyönteispölytykseen.

Valosaasteella voi olla merkittäviä ympäristövaikutuksia, kuten elinympäristöjen pirstoutuminen ja luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen. Valosaasteen uskotaan lisäksi olevan yksi hyönteisten runsauden maailmanlaajuisen vähenemisen taustalla vaikuttavista tekijöistä. Hyönteiset ovat vallitseva eliöryhmä maailmassa ja merkittävä osa ekosysteemejä, minkä vuoksi hyönteisten vasteet ympäristömuutoksiin voivat vaikuttaa dramaattisesti ekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan, sekä ihmisten kannalta merkittäviin ekosysteempalveluihin.

## Sisällys

1 Johdanto .....	4
2 Teoria ja kirjallisuuskatsaus .....	6
2.1 Keinotekoinen valo ja valosaaste .....	6
2.2 Valon ominaisuudet ja visuaalinen havaitseminen.....	7
2.3 Luonnonvalo ja pimeys .....	8
2.4 Valosaasteen vaikutukset luonnonvaraisiin eliöihin.....	9
2.5 Hyönteisten fysiologia ja ekologia .....	12
3 Keinotekoisien valaistuksen vaikutukset hyönteisten käyttäytymiseen.....	15
3.1 Aktiivisuus.....	15
3.2 Suunnistaminen .....	15
3.3 Valon puoleensavetävyys .....	16
3.4 Viestintä ja lisääntyminen .....	19
3.5 Lajien välinen vuorovaikutus .....	20
4 Pohdinta.....	21

## 1 Johdanto

Valosaaste eli haitallinen keinotekoinen valo on yksi yleisimmistä ja nopeimmin lisääntyvistä ympäristömuutoksen muodoista. Valaistusteknologian jatkuva kehittyminen ja yhteiskuntien vaurastuminen ovat johtaneet keinotekoisesta valaistuksesta merkittävään kasvuun viime vuosisadan aikana. Kasvu oli suurinta 1900-luvun jälkipuoliskolla, arviolta 3–6 % vuodessa (Kyba ym. 2017). Vuosina 2012–2016 sekä maailman valaistu alue että ennestään jatkuvasti valaistujen alueiden kirkkaus lisääntyivät maailmanlaajuisesti noin 2,2 % vuodessa (Kyba ym. 2017). Keinotekoisesta valaistuksesta on tullut lisäksi entistä yhtäjaksoisempaa, jatkuen kaupungeissa (Gaston ym. 2013: 913) ja kaupunkimaisilla alueilla usein vuorokauden ympäri.

Valosaaste on lisääntynyt paitsi tilallisesti ja ajallisesti myös laadultaan, uusimpien valaisinteknologioiden tuottaessa entistä laajemmin eri aallonpituuksia (Gaston ym. 2013). Yksi uusimmista valaisinteknologioista, laajaspektriset (n. 400–700 nm) LED (light-emitting diode) -valot eli ledit tuotiin markkinoille viimeisen vuosikymmenen aikana (Zissis & Bertoldi 2018). Zissis & Bertoldin (2018) mukaan ledit ovat vallanneet valaisinmarkkinat kokonaisuudessaan 2020 mennessä. Ledien markkinaosuuden katuvalaisimissa odotetaan kasvavan 93,8 % vuoteen 2023 mennessä, laskevien hintojen jouduttaessa maailmanlaajuisesta siirtymää vanhemmista valaisinteknologioista entistä energiatehokkaampiin sekä monimuotoisempiin ja -käyttöisempiin ledeihin (Zissis & Bertoldi 2018). Kehityksen seurauksena maailma on laajalti menettänyt yöllisen pimeyden.

Valosaastetta esiintyy erityisesti leveyspiirien 75°N ja 60°S välillä, jonka maanpinnasta 23 % altistuu keinotekoiselle ilmakehästä heijastuvalle ( $\geq 8$  % luonnonvaloa kirkkaammalle) hohdevalolle, mukaan lukien 88 % Euroopasta ja 47 % Yhdysvalloista (Falchi ym. 2016). Sitä esiintyy kuitenkin enemmän tai vähemmän lähes kaikkialla maapallolla (Falchi ym. 2016). Valosaasteen lähteet keskittyvät kaupunkiin, ja valosaasteen määrä on yhteydessä taloudellisen toiminnan määrään sekä väestötiheyteen (Gallaway ym. 2010). Valosaaste ja sen vaikutukset ulottuvat kuitenkin laajalti kaupunkien ulkopuolelle. Yksittäisiä kaupunkeja ja kaupunkimaisia asutuskeskittymiä yhdistävät useimmiten valaistut liikenneväylät. Kaupunkien ylle muodostuva hohdevalo voi puolestaan levitä öisin kauas lähteistään (Falchi ym. 2016).

Valosaaste ulottuu maaekosysteemien lisäksi makean veden (Moore ym. 2006) ja merten (Davies ym. 2014) vesiekosysteemeihin, rakennetun ympäristön ulottuessa merten rannikoille ja sivutessa tai ympäröidessä vesistöjä ja kosteikkoja. Valosaaste vaikuttaa laajalti ekosysteemien ylläpitämään elämään. Keinotekoinen valaistus on historiallisesti uusi ilmiö ja häiritsee merkittävästi valon ja pimeyden luonnollisia vaihteluita, joiden vaikutuksessa elämä

maapallolla on kehittynyt, ja joita eliöt käyttävät eri tavoin hyväkseen (Gaston ym. 2013). Valaistus peittää lisäksi näkymän yötaivaalle, jonka taivaankappaleita monet eliöt käyttävät suunnistamiseen (Gaston ym. 2013). Keinotekoisella yöaikaisella valaistuksella on tutkittu olevan merkittäviä biologisia ja ekologisia vaikutuksia luonnonvaraisiin eliöihin, ulottuen yksilöistä ekosysteemien tasolle. Keinotekoinen valo voi muuttaa yksilöiden biologiaa ja käyttäytymistä, yhteisöjen vuorovaikutusta ja rakennetta, ja edelleen kokonaisten ekosysteemien toimintaa (Longcore & Rich 2004).

Valosaaste on ainoastaan yksi monesta ihmisperäisestä ympäristömuutoksen ja -kuormituksen muodosta, mutta vuorovaikutuksessa muiden ympäristökuormituksen muotojen kanssa sillä voi olla merkittäviä ympäristövaikutuksia. Owensin ym. (2020) mukaan valosaaste on elinympäristöjen pirstoutumisen, torjunta-aineiden käytön ja ilmastonmuutoksen lisäksi, yksi hyönteisten runsauden maailmanlaajuisen vähenemisen taustalla vaikuttavista tekijöistä. Hyönteiset ovat vallitseva eliöryhmä maailmassa ja merkittävä osa ekosysteemeistä, minkä vuoksi hyönteisten vasteet ympäristömuutoksiin voivat vaikuttaa dramaattisesti ekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan (Schowalter 2006).

Tutkielmani tarkoituksena on tutkia valosaasteen eli keinotekoisesta valaistuksesta aiheutuvia vaikutuksia yleisesti luonnonvaraisiin eliöihin sekä tarkemmin hyönteisiin. Teoria-osuudessa käyn läpi keskeisimpiä käsitteitä ja kirjallisuutta, ja tarkastelen keinotekoisesta valaistuksesta havaittuja vaikutuksia luonnonvaraisiin eliöihin. Tapauksellisessa tutkimuksessa selvitan, miten keinotekoinen valaistus vaikuttaa hyönteisten käyttäytymiseen, erityisesti hyönteisten aktiivisuuteen, suunnistamiseen, liikkumiseen, viestintään ja lisääntymiseen sekä hyönteisten ja muiden eliölajien väliseen vuorovaikutukseen. Tutkielmani tarkoituksena on lisäksi selvittää vaikuttaako käynnissä oleva valaisinteknologinen siirtymä valosaasteen vaikutuksiin hyönteisten osalta. Tutkimuskysymykseni ovat:

- 1) Miten keinotekoinen valo vaikuttaa luonnonvaraisiin eliöihin?
- 2) Miten yöaikainen keinotekoinen valo vaikuttaa hyönteisten käyttäytymiseen?
- 3) Miten ledit vaikuttavat valosaasteen vaikutuksiin hyönteisten osalta?

## 2 Teoria ja kirjallisuuskatsaus

### 2.1 Keinotekoinen valo ja valosaaste

Valosaaste on tarkoitukseensa sopimatonta tai liiallista keinotekoisista valaistusta, jota aiheutuu tehottomasta, liian kirkkaasta, huonosti kohdennetusta tai väärin suojatusta, ja usein täysin tarpeettomasta valaistuksesta (Light Pollution). Sen lähteitä ovat esimerkiksi erilaisten rakennusten sisä- ja ulkovalaistus, valomainokset, katuvalaistus ja valaistut urheiluareenat (Light Pollution). Valosaasteella voidaan käsittää kaikki keinovalon haitalliset vaikutukset, mukaan lukien epäsuorat haitat, kuten valaistuksen vaatima energiantuotanto (Light Pollution).

Valosaasteen eri muotoja ovat liiallisesta kirkkaudesta johtuva häikäisevä valo, kaupunkien ylle syntyvä hohdevalo, valon kohdentuminen väärin tai tarpeettomasti, ja yksittäisten valonlähteiden yhteisvaikutuksena syntyvä sekava valo (Light Pollution). Valosaasteen ilmeisin muoto hohdevalo syntyy keinotekoisien valon heijastuessa ilmakehän hiukkasista takaisin maanpinnalle (Kyba ym. 2011a). Hohdevalo on sitä voimakkaampaa, mitä enemmän ilmakehässä on hiukkasia, minkä vuoksi se on voimakkaampaa kaupungeissa kuin maaseudulla ja voimakkaimmillaan pilvisinä öinä (Kyba ym. 2011a). Kyban ym. (2011a) tutkimuksessa Berliinin yötaivaan havaittiin olevan pilvisinä öinä neljä kertaa kirkkaampi kuin kuunvalo kirkkaimmillaan. Hohdevalon vaikutusten havaittiin ulottuvan yli 30 km päähän Berliinin ulkopuolelle. Pilvettöminä öinä hohdevalo peittää näkymän yötaivaalle, estäen esimerkiksi yli kolmannesta maailman väestöstä, mukaan lukien 60 % Yhdysvaltain ja 80 % Euroopan väestöistä, havaitsemasta Linnunrataa (Falchi ym. 2016).

Valosaaste voidaan jakaa astronomiseen ja ekologiseen valosaasteeseen. Astronominen valosaaste viittaa ihmisten havaitseman yötaivaan ja sen taivaankappaleiden näkyvyyden heikkenemiseen kaupunkien ylle heijastuvan hohdevalon vaikutuksesta (Longcore & Rich 2004). Ekologialla tarkoitetaan eliöiden suhdetta ympäristöönsä eli eliöiden ja eliölajien vuorovaikutusta toistensa ja niitä ympäröivän elottoman luonnon kanssa. Longcore & Rich (2004: 191) määrittelee ekologisen valosaasteen keinotekoiseksi valoksi, joka muuttaa luonnollisia valon ja pimeyden vaihteluita ekosysteemeissä. Longcore & Richin (2004: 191–192) mukaan ekologinen valosaaste ilmenee suorana häikäisynä, yhtäjaksoisena lisääntyneenä valaistuksena tai jaksoittaisena, odottamattomana muutoksena valaistuksessa. Sen lähteitä ovat muun muassa hohdevalo, valaistut rakennukset ja tornit, katuvalaistus, ajoneuvojen valot, kalastusalukset ja öljynporauslauttojen soihdut (Longcore & Rich 2004: 192). Tässä tutkimuksessa valosaasteella viitataan pääasiassa ekologiseen valosaasteeseen.

## 2.2 Valon ominaisuudet ja visuaalinen havaitseminen

Valo käyttäytyy partikkeleina eli fotoneina ja aallonpituuksina (Owens & Lewis 2018: 11339). Valon voimakkuutta mitataan fotonien lukumääränä pinta-alayksikköä kohti (Owens & Lewis 2018: 11339). Aallonpituuksia mitataan nanometreissä (nm), joista ihmisen havaitsema näkyvän valon spektri vastaa aallonpituuksia 400–700 nm (Owens & Lewis 2018: 11339). Valon kirkkaus tarkoittaa valaistusvoimakkuuden subjektiivista havaitsemista, mihin vaikuttaa yksilön lajikohtainen spektriherkkyys (Owens & Lewis 2018: 11339).

Keinotekoinen valo eroaa ominaisuuksiltaan luonnonvalosta eli auringonvalosta, hämärästä ja kuun heijastamasta auringonvalosta. Erilaisten keinotekoisien valaistusmuotojen tuottama valo vaihtelee sekä voimakkuudeltaan että spektriltään, rajoittuen suppealle aallonpituusalueelle tai loistaen laajalti eri aallonpituuksia (Gaston ym. 2013: 913–914). Keinotekoiset valonlähteet eroavat luonnollisista valonlähteistä lisäksi etäisyydeltään, vaikuttaen valon voimakkuuteen ja havaittuun kirkkauteen.

Eläimet aistivat valoa eri tavoin. Eläinten valoa vastaanottavat elimet eli fotoreseptorit tai silmät ovat sopeutuneet hyödyntämään heijastuvan valon eri voimakkuuksia ja aallonpituuksia ympäristönsä visuaalisessa havaitsemisessa (Gaston ym. 2013: 921–922). Havaitut värit ovat yhteydessä objektien heijastaman valon eri aallonpituuksiin ja niiden laajuuteen (Land & Nilsson 2012), ja eläinten värinäkö vaihtelee erityyppisten fotoreseptorien lukumäärän ja spektriherkkyysien mukaisesti (Gaston ym. 2013: 922). Ihmisillä on esimerkiksi trikromaattinen eli kolmivärinäkö, ja siniselle, vihreälle ja punaiselle herkistyneet fotoreseptorit (Owens & Lewis 2018: 11339), joiden yhdistelmistä aivot muodostavat ihmisten havaitsemat värit eli näkyvän valon spektrin.

Lukuisten eläinten, kuten lintujen, kalojen ja niveljalkaisten, havaitsema spektri ulottuu ultraviolettialueelle (< 400 nm) (Land & Nilsson 2012: 32). UV-säteilyn lisäksi monet eläimet, mukaan lukien piikkinahkaiset, niveljalkaiset, hyönteiset, kalat, linnut, matelijat ja sammakkoeläimet, aistivat valon polarisaatiota. Valon polarisaatio tarkoittaa valon lähettämisen sähkö- ja magneettikentän lineaarista värähtelyä valon heijastuessa tummilta, kiiltäviltä pinnoilta tai sirotessa, eli vaihtaessa etenemissuuntaansa, ilma- ja vesikehässä (Horváth ym. 2009). Luonnossa yleisimpiä valon polarisaationlähteitä ovat tummien vesien pinnat (Horváth ym. 2009: 319). Valaisinteknologioiden kehittymisen ja valosaasteen lisääntymisen myötä myös UV-säteilyn ja polarisoituneen valon määrät ovat lisääntyneet luonnonympäristöissä.

Horváthin ym. (2009) mukaan polarisoitunut valosaaste tarkoittaa polarisoitunutta valoa, jota esiintyy luonnollisesta poikkeavina aikoina tai epäluonnollisissa paikoissa.

Polarisoituneen valosaasteen lisääntyminen johtuu kaupungistumisen, tiestöjen ja teollisen maanviljelyn nopeasta kehityksestä ja kasvusta, ja sen lähteitä ovat muun muassa maanviljelyssä käytetyt mustat muovipeitteet, asfaltoidut tiet, öljyvuodot ja ulkona säilytettävät jäteöljysäiliöt, tummat maalipinnat esimerkiksi autoissa, mustat hautakivet ja lasiruudut (Horváth ym. 2009: 319). Valosaaste voi lisätä polarisoituneen valosaasteen määrää esimerkiksi katuvalaistuksen heijastuessa rakennetusta ympäristöstä ja sirotessa vesikehässä (Horváth ym. 2009: 324).

### 2.3 Luonnonvalo ja pimeys

Luonnossa esiintyy eri pituisia valon ja pimeyden jaksoja, jotka johtuvat maapallon kiertämisestä oman akselinsa ja auringon ympäri, akselin kallistuskulmasta ja kuun kiertämisestä maapallon ympäri (Gaston ym. 2013: 913). Elämä maapallolla on kehittynyt näiden jaksottaisuuksien vaikutuksessa, ja ne vastaavat usein läheisesti eliöiden osoittamia vuorokautisia, kuun vaiheiden mukaisia ja vuosittaisia biologista rytmejä (Saunders ym. 2002: 1–2). Eliöiden biologinen rytmi on sisäsyntyistä, mutta se mukautuu jatkuvasti ympäristötekijöihin, kuten valo- ja lämpötilaolosuhteisiin (Saunders ym. 2002: 2).

Valo ja pimeys toimivat luonnossa resursseina. Valo on olennainen osa auringonvaloa energianlähteenään käyttävien eliöiden energiantuotantoa, kuten vihreiden kasvien yhteytystä (Gaston ym. 2013: 917). Valo säätelee lisäksi eliöiden aktiivisuutta, jonka perusteella ne voidaan jakaa päivä-, yö- ja hämäräaktiivisiin (Saunders ym. 2002: 7). Valo ja pimeys jakavat eläinten aktiivisuuden eri vuorokaudenaikoihin ja vähentävät lajien välistä kilpailua (Gaston ym. 2013: 917). Pimeyden jaksojen on esitetty edistävän eliöiden fysiologisen toiminnan korjautumista ja palautumista (Gaston ym. 2013: 918).

Valo toimii luonnossa tiedonlähteenä ympäristöstä. Luonnonvalon ja pimeyden jaksot ja niiden ajoitus sekä valon voimakkuus ja spektri tarjoavat merkkejä, joiden avulla eliöt säätelevät vuorokausirytmensä, vuodenaikaista toimintaa ja käyttäytymistä sekä ilmasun vaihtelun ilmentymistä (Bennie ym. 2016: 611). Päivittäiset valo-olosuhteiden muutokset säätelevät biologista rytmiä eli sisäistä kelloa, joka puolestaan säätelee eliöiden fysiologiaa ja käyttäytymistä (Saunders ym. 2002). Päivän pituus ajoittaa erityisesti korkeammilla leveyspiireillä kasvien ja eläinten elinkiertoon liittyviä vuosittain toistuvia tapahtumia, kuten kasvua, kehitystä, lisääntymistä ja muuttoa (Gaston ym. 2013: 921). Kuunkierron mukaiset valo-olosuhteiden muutokset voivat vaikuttaa eliöiden rytmeihin ajoittamalla esimerkiksi



lisääntymistä, sekä vaikuttamalla eläinten visuaaliseen havaitsemiskykyyn ja siten aktiivisuuteen (Kronfeld-Schor ym. 2013).

Kronfeld-Schorin ym. (2013) mukaan muutokset visuaalisessa havaitsemiskyvyssä voivat vaikuttaa eläinten viestintään, suunnistamiseen sekä kilpailu- ja peto-saalisvuorovaikutukseen. Lisääntynyt valaistus voi helpottaa petojen kykyä paikallistaa saalista ja parantaa saalistusmenestystä. Petojen parantunut saalistusmenestys puolestaan lisää saaliiden saalistetuksi tulemisen riskiä. Peto- ja saalislajien aktiivisuuden on vastaavasti tutkittu olevan yhteydessä kuunkierron mukaisiin valaistusolosuhteisiin (Kronfeld-Schor ym. 2013: 3). Saalistusmenestys voi vaihtoehtoisesti olla yhteydessä muutoksiin saaliin aktiivisuudessa vasteena kuunkiertoon (Kronfeld-Schor ym. 2013: 3).

Luonnonvalo ohjaa eläinten suunnistamista eri tavoin. Eläimet voivat suunnistaa yöllisten valo-olosuhteiden sekä yöllisten taivaankappaleiden eli kuun ja tähtien ja niiden polarisoituneen valon perusteella (Gaston ym. 2013: 922). Eläimet voivat lisäksi pyrkiä kohti valoa tai vältellä valoa ja pyrkiä kohti pimeyttä, mitä kutsutaan fototaksiaksi (Gaston ym. 2013: 923).

## 2.4 Valosaasteen vaikutukset luonnonvaraisiin eliöihin

Valosaaste muuttaa luonnonympäristöjä laajalle levinneen keinotekoisien valaistuksen ja kaupunkien hohdevalon vähentäessä luonnollista hämärää ja pimeyttä. Merkittävä osa eläimistä, noin 30 % selkärangkaisista ja 60 % selkärangattomista, on erikoistunut yöelämään, ja valosaaste muodostaa merkittävän uhkan ennen kaikkea yöaktiivisille eläimille ja niiden elinympäristöille (Hölker ym. 2010). Yöaikaisen keinotekoisien valon on tutkittu vaikuttavan laajalti myös muihin luonnonvaraisiin eliöihin.

Keinotekoinen valo voi vaikuttaa eliöiden vuorokausirytmiiin mukauttamalla ja siirtämällä tai peittämällä luontaista rytmiä (Gaston ym. 2013). Keinotekoinen valo hämärän jälkeen tai ennen aamunkoittoa voi siirtää vuorokausirytmiiä myöhästyttämällä tai aikaistamalla sitä (Gaston ym. 2013: 919). Valoärsyke voi vaihtoehtoisesti ohittaa sisäisen kellon, jolloin yöaikainen keinotekoinen valo voi lisätä päivä- ja hämäräaktiivisten lajien ja vähentää yöaktiivisten lajien aktiivisuutta (Gaston ym. 2013: 921) Sisäisen kellon ja fysiologian häiriintymisen on tutkittu olevan yhteydessä yksilöiden terveyteen (Gaston ym. 2013).

Keinotekoinen valo voi vaikuttaa vuorokausirytmien lisäksi eliöiden vuosittaisiin rytmeihin. Kaupunkimaisilla alueilla elävien lehtipuiden on havaittu pudottavan lehtensä syksyisin tavallista myöhemmin, ja kasvien silmujen puhkeavan keväisin tavallista

aikaisemmin (Bennie ym. 2016). Keinotekoinen valo voi vaikuttaa myös kasvien kasvuun ja kukkimiseen (Bennie ym. 2016). Vaikutukset voivat kohdistua lisäksi vaihtolämpöisiin eläimiin, joiden talvehtiminen on yhteydessä päivän pituuteen (Gaston ym. 2013: 921).

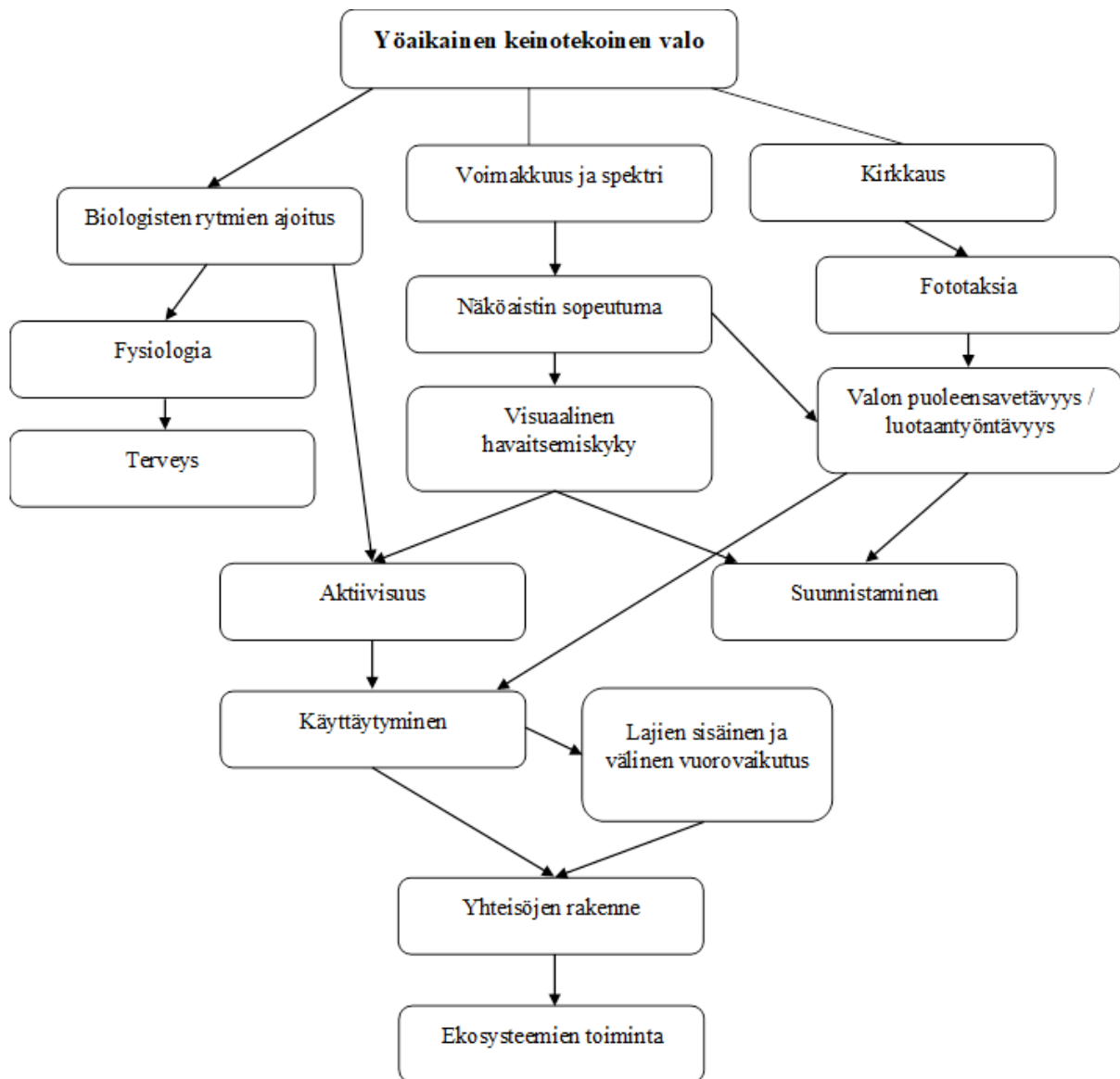
Muutokset kasvien vuodenaikaisissa rytmeissä voivat vaikuttaa edelleen lehtipuiden pakkasvaurioihin ja kasvien ja muiden eliöiden väliseen vuorovaikutukseen, kasvien rytmien vastatessa lämpötilan sijaan ympäristön valo-olosuhteisiin ja ollessa epätahdissa muihin eliölajeihin verrattuna (Bennie ym. 2016). Valosaaste voi vaikuttaa esimerkiksi kasvien ja taudinaiheuttajien, kasvinsyöjien, pölyttäjien ja siementen levittäjien väliseen vuorovaikutukseen (Bennie ym. 2016). Muutokset vuodenaikaisissa rytmeissä ja vuorovaikutussuhteissa voivat vaikuttaa edelleen kasvien terveyteen, selviytymiseen ja lisääntymiseen (Bennie ym. 2016).

Yöaikainen keinotekoinen valo voi todennäköisesti vaikuttaa eläinten visuaaliseen havaitsemiskykyyn (Gaston ym. 2013). Vaikutukset riippuvat valon voimakkuudesta ja spektristä sekä eläimen näköaistin sopeutumasta (Gaston ym. 2013: 921). Daviesin ym. (2013) mukaan viime vuosikymmeninä yleistyneet laajaspektriset valaistusteknologiat, kuten suurpainenatrium-, LED- ja monimetallilamput, parantavat eläinten kykyä havaita yöaikaisen ympäristönsä objekteista heijastuvia aallonpituuksia, ja lisäävät entisestään eläinkunnan sisäisiä eroja spektrin havaitsemisessa eli värienerottelukyvystä. Muutokset havaitsemiskyvyssä vaikuttavat todennäköisesti edelleen eläinten käyttäytymiseen, muuttamalla aktiivisuuden ajoittumista ja laajentamalla tai pirstouttamalla eläinten elinympäristöjä (Davies ym. 2013). Eläinluokkien entistä suuremmat erot havaitsemiskyvyssä voivat puolestaan muuttaa lajien välistä vuorovaikutusta (Davies ym. 2013).

Yöaikaisella keinotekoisella valolla on merkittäviä ekologisia vaikutuksia eläinten käyttäytymiseen ja populaatioihin (Longcore & Rich 2004). Longcore & Richin (2004) mukaan vaikutukset johtuvat kokonaisuudessaan keinotekoisesta valon tuomista muutoksista suunnistamiseen, suuntavaiston menettämisestä tai väärin suunnistamisesta, sekä sen puoleensavetävydestä tai luotaantyöntävydestä, vaikuttaen edelleen eläinten ravinnonhankintaan, lisääntymiseen, muuttoliikkeisiin ja viestintään. Yöaikainen keinotekoinen valo voi vaihtoehtoisesti parantaa tai heikentää eläinten kykyä suunnistaa, riippuen siitä, miten se vaikuttaa eläinten näkökykyyn, heikentäen erityisesti pimeässä suunnistamaan tottuneiden ja yöaktiivisten eläinten suunnistuskykyä (Longcore & Rich 2004). Valon puoleensavetävyys ja luotaantyöntävyys ovat yhteydessä eläinten fototaksiaan, ja vaste keinotekoisesta valon kirkkauteen (Longcore & Rich 2004).

Longcore & Richin (2004) mukaan yksittäisten eläinlajien käyttäytymisvaste valosaasteeseen vaikuttaa edelleen lajien väliseen vuorovaikutukseen ja yhteisöjen rakenteeseen. Yöaikaisen keinotekoisien valon aiheuttamat muutokset eläinten visuaalisessa havaitsemiskyvyssä ja aktiivisuudessa voivat vaikuttaa edelleen lajien sisäiseen ja väliseen kilpailu- ja peto-saalisvuorovaikutukseen (Longcore & Rich 2004; Gaston ym. 2013). Yöaikainen keinotekoinen valo voi muuttaa eri ajankohtiin ja valo-olosuhteisiin perustuvia ekologisia lokeroita ja lajien sisäistä ja välistä kilpailua, mahdollistamalla päivä- ja hämäräaktiivisten lajien aktiivisuuden ja ravinnonhankinnan yöaikaisessa ympäristössä (Longcore & Rich 2004; Gaston ym. 2013). Keinotekoinen valo voi, kuunvalon tavoin (Kronfeld-Schor ym. 2013), lisätä sekä petojen saalistusmenestystä että saaliiden saalistetuksi tulemisen riskiä ja vähentää saalislajien aktiivisuutta (Gaston ym. 2013).

Valosaaste vaikuttaa yhteisöjen rakenteeseen saalistuksen kohdistuessa voimakkaammin positiivisesti fototaksisiin, valoa kohti pyrkiviin lajeihin (Longcore & Rich 2004). Vaikutukset kohdistuvat lisäksi kokonaisuudessaan voimakkaammin valoa vältteleviin yöaktiivisiin lajeihin ja eläimiin verrattuna hämärä- ja päiväaktiivisiin eläimiin (Longcore & Rich 2004). Longcore & Rich (2004) mukaan muutokset yhteisöjen rakenteessa voivat vaikuttaa edelleen ekosysteemien toimintaan. Valosaasteen vaikutuksia luonnonvaraisiin eliöihin on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Keinotekoisin valon vaikutukset luonnonvaraisiin eliöihin

## 2.5 Hyönteisten fysiologia ja ekologia

Hyönteiset (*Insecta*) ovat suurimman biologisen pääjakson niveljalkaisten (*Arthropoda*) suurin biologinen luokka (Insect). Hyönteisillä on jakautunut ruumis, nivelikkäät jalat ja ulkoinen tukiranka (Insect). Runsaslukuisimpia hyönteislahkoja ovat kovakuoriaiset (*Coleoptera*), perhoset (*Lepidoptera*), pistiäiset (*Hymenoptera*) ja kaksisiipiset (*Diptera*) (Insect). Hyönteiset ovat vallitseva eliöryhmä käytännössä kaikissa maa- ja makean veden ekosysteemeissä ja tärkeä osa merten rannikkojen ekosysteemejä (Schowalter 2006: 1). Hyönteisten suuret populaatiokoot ja monimuotoisuus ovat yhteydessä hyönteisten pieneen kokoon ja korkeaan lisääntymisasteeseen sekä sopivien ravinnonlähteiden saatavuuteen (Insect).

Hyönteisten elämänsykliin kuuluu useimmiten muna-, toukka- ja täysikasvuinen aikuisvaihe (Insect). Hyönteisten kehittyminen täysikasvuiseksi tapahtuu nahanluontien avulla osittaisen tai täydellisen muodonvaihdoksen kautta (Insect). Täydellinen muodonvaihdos sisältää toukkavaiheen jälkeisen kotelovaiheen eikä toukka muistuta aikuista hyönteistä, kuten osittaisessa muodonvaihdoksessa (Insect). Hyönteisten elinympäristö ja hyönteisten vaatimat resurssit vaihtelevat eri elämänvaiheiden mukaisesti (Schowalter 2006: 16). Vesihyönteiset, kuten sudenkorennot ja päivänkorennot, esimerkiksi siirtyvät aikuisena maaekosysteemeihin, ja monien perhosten toukkien ravintoa ovat kasvien lehdet ja täysikasvuisten perhosten ravintoa mesi (Schowalter 2006: 16). Aikuisten hyönteisten tehtävänä on ensisijaisesti lisääntyä (Insect).

Lentokyky mahdollistaa hyönteisten nopeat pitkän matkan liikkeitä ja helpottaa sekä uusien resurssien löytämistä että pakenemista saalistajilta ja epäsuotuisilta olosuhteilta (Schowalter 2006: 16). Jotkin lentokykyiset hyönteiset, erityisesti sudenkorentoihin, kovakuoriaisiin ja perhosiin kuuluvat lajit, voivat liikkua kausittain pitkiä, jopa tuhansien kilometrien matkoja yleensä suurina parvina (Upadhyay ym. 2018: 89). Muuttomatkat eivät liity ensisijaisesti resurssien saatavuuteen, vaan esimerkiksi lisääntymiseen ja talvehtimiseen (Upadhyay ym. 2018: 89).

Hyönteisillä on piste- tai verkkosilmät (Insect), ja suhteellisen pitkälle kehittynyt näköaisti (Warrant & Dacke 2011). Yöaktiivisilla hyönteisillä on päiväaktiivisia herkempi näköaisti, jonka ansiosta yöaktiivisten hyönteisten havaitsema visuaalinen maailma ei eroa merkittävästi päiväaktiivisten havaitsemasta (Warrant & Dacke 2011: 241). Hyönteisillä on useimmiten ultravioletille (350 nm), siniselle (440 nm) ja vihreälle (530 nm), eli spektrin keskivaiheille ja sitä lyhyemmille aallonpituuksille, herkistyneet fotoreseptorit (Briscoe & Chittka 2001: 478). Joillain sudenkorennoilla, pistiäisillä, perhosilla ja kovakuoriaisilla on lisäksi punaiselle (> 565 nm) herkistynyt fotoreseptori (Briscoe & Chittka 2001: 478–479). Monet kukat heijastavat ultraviolettia, hyödyttäen hyönteispölytystä (Land & Nilsson 2012: 32).

Hyönteiset suunnistavat sekä maanpäällä että taivaalla sijaitsevien visuaalisten merkkien perusteella (Warrant & Dacke 2011: 242). Monet päiväaktiiviset hyönteiset suunnistavat auringon ja auringon polarisoituneen valon ja yöaktiiviset hyönteiset vastaavasti kuun ja kuun polarisoituneen valon perusteella (Warrant & Dacke 2011: 242). Hyönteiset suunnistavat lisäksi ympäristönsä piirteiden ja maamerkkien avulla (Warrant & Dacke 2011: 243). Lentävät hyönteiset suunnistavat optisen virran eli ympäristön visuaalisesta liikkeestä saatavan tiedon perusteella, jonka avulla ne kykenevät hallitsemaan lentoaan ja välttävät törmäyksiä elinympäristössään (Baird ym. 2011).

Valo on muun muassa lämpötilan, kosteuden ja sademäärän lisäksi yksi hyönteisten ekologiaan vaikuttavista ympäristötekijöistä (Upadhyay ym. 2018: 48). Valo voi vaikuttaa muun muassa hyönteisten kasvuun, kehitykseen, hedelmällisyyteen ja munimiseen, aktiivisuuteen ja väritykseen (Upadhyay ym. 2018: 47–48). Useimpia hyönteisiä valo vaihtoehtoisesti vetää puoleensa tai työntää luotaan (Upadhyay ym. 2018: 48). Jotkin hyönteiset kykenevät tuottamaan itse valoa biologisen valontuotannon eli bioluminesenssin avulla (Upadhyay ym. 2018: 48).

Hyönteiset, kuten muutkin eliöt, voidaan jakaa päivä-, yö- ja hämäräaktiivisiin (Saunders ym. 2002: 7). Hyönteisten aktiivisuus ja vuorokausirytmii määräytyy valo- ja lämpötilaolosuhteiden tai päivän pituuden mukaisesti, mitä kutsutaan valojaksoisuudeksi tai fotoperiodismiksi (Saunders ym. 2002). Fotoperiodismiin liittyy diapaussi eli lepotila, jonka aikana hyönteisten elintoiminnot hidastuvat merkittävästi, ja jonka ansiosta hyönteiset selviytyvät talven yli (Saunders ym. 2002).

Päivittäisten biologisten rytmien, kuten liikkumisen ja ravinnonhankinnan, lisäksi kertaluontoiset kehitykseen liittyvät tapahtumat, kuten munasta kuoriutuminen, nahanluonti, koteloituminen ja kotelosta kuoriutuminen, ajoittuvat valo- ja lämpötilaolosuhteiden mukaisesti (Saunders ym. 2002). Kuukautiset tai vuosittaiset rytmit, kuten koteloituminen, kotelosta kuoriutuminen, parittelu ja muniminen, ajoittuvat kuun vaiheiden mukaisten valo-olosuhteiden tai päivän pituuden ja lämpötilan perusteella (Saunders ym. 2002; Kronfeld-Schor ym. 2013). Vuosittaisiin, päivän pituuden ajoittamiin rytmeihin lukeutuvat lisäksi eri kehitysvaiheisiin liittyvän diapaussin ja muuttomatkojen ajoittuminen (Saunders ym. 2002).

Hyönteisillä on merkittävä rooli ekosysteemeissä ja niiden toiminnassa. Hyönteiset ovat ravinnonlähteitä ja taudinlevittäjiä, ja ne kykenevät vaikuttamaan energian ja aineen virtauksiin esimerkiksi kasvinsyöjinä, pölyttäjinä, kuolleen eloperäisen aineksen syöjinä eli hajottajina ja petoina (Schowalter 2006). Hyönteisiin vaikuttavat lukuisat ympäristötekijät, ja ympäristömuutokset voivat vaikuttaa monien hyönteislajien runsauteen tavoilla, jotka muuttavat ekosysteemien toimintaa ja mahdollisesti maailmanlaajuisia kehityskulkuja (Schowalter 2006).

### 3 Keinotekoisien valaistuksen vaikutukset hyönteisten käyttäytymiseen

#### 3.1 Aktiivisuus

Yöaikainen keinotekoinen valaistus voi häiritä hyönteisten biologisia rytmejä. Saundersin ym. (2002: 27) mukaan ympäristön valo-olosuhteet voivat aiheuttaa suoria ulkoisia vaikutuksia hyönteisten käyttäytymiseen lisäämällä aktiivisuutta yleensä päiväaktiivisissa lajeissa tai estämällä aktiivisuutta yöaktiivisissa lajeissa. Valo-olosuhteet voivat tosin sanoen peittää tai ohittaa hyönteisten sisäisen kellon ja muuttaa hyönteisten vuorokausirytmisiä. Saundersin ym. (2002) mukaan yhtäjaksoinen valo ja sisäisen kellon vaimeneminen voivat lisäksi muuttaa hyönteisten kuukausittaisia tai vuosittaisia rytmejä eli elämänkiertoon liittyvien tapahtumien ajoitusta.

Keinotekoisien valon aiheuttamat muutokset hyönteisten aktiivisuudessa ja visuaalisessa havaitsemiskyvyssä voivat edelleen lisätä hyönteisten yöaikaista ravinnonhankintaa, ja siten kilpailua hämärä- ja yöaktiivisten lajien välillä sekä eri valo-olosuhteisiin perustuviin ekolokeroihin sopeutuneiden hyönteislajien sisällä (Owens & Lewis 2018). Keinotekoinen valo voi lisäksi muuttaa hyönteisten ja muiden eliöeläinten välistä molempia osapuolia hyödyttävää vuorovaikutusta, kuten hyönteispölytystä, jos osapuolten aktiivisuus on yhteydessä eri ympäristötekijöihin, esimerkiksi kukkien terälehtien sulkeutuessa valon sijaan lämpötilan mukaisesti (Owens & Lewis 2018).

Muutokset visuaalisessa havaitsemiskyvyssä ja riskissä tulla saalistetuksi voivat vähentää hyönteisten aktiivisuutta esimerkiksi vesiekosysteemeissä. Vesihyönteisten, kuten päivänkorentojen, mäkärrien, surviaissääskien ja vesiperhosten, tietyt elämänvaiheet liikehtivät öisin virran kuljettamina välttääkseen visuaalisesti saalistavia petoja, esimerkiksi kaloja (Moore ym. 2006: 375). Käyttäytyminen on yhteydessä alhaisiin valaistusolosuhteisiin (Moore ym. 2006: 375). Lisääntynyt yöaikainen valaistus voi helpottaa kalojen saalistusta ja vastaavasti viivästyttää tai vähentää hyönteisten ajalehtimiskäyttäytymistä (Moore ym. 2006: 375).

#### 3.2 Suunnistaminen

Yöaktiiviset hyönteiset suunnistavat taivaankappaleiden eli kuun ja tähtien sekä niiden polarisoituneen valon avulla (Warrant & Dacke 2011: 242). Hyönteisistä esimerkiksi muurahaisten, pihtihäntäisten, yöperhosten ja kovakuoriaisten on tutkittu suunnistavan yötaivaan kirkkaimman kappaleen eli kuun avulla (Warrant & Dacke 2011: 242).

Kovakuoriaisiin kuuluvien lantakuoriaisten (Scarabaeidae) on tutkittu suunnistavan ensisijaisesti polarisoituneen kuunvalon (Dacke ym. 2004) perusteella, paetessaan lantakasoilla syntyvää kilpailua ravinnosta. Uudenkuun aikaan lantakuoriaisten on tutkittu suunnistavan Linnunradan polarisoituneen valon perusteella (Dacke ym. 2013). Lantakuoriaisten lisäksi muidenkin hyönteislajien uskotaan suunnistavan yötaivaan polarisoituneen valon avulla (Warrant & Dacke 2011: 242).

Elinympäristöissä, joissa yötaivas ei ole selkeästi näkyvissä hyönteiset suunnistavat ympäristön piirteiden ja maamerkkien, kuten puiden latvuston tai yksittäisten puiden, piirtyessä kirkkaampaa yötaivasta vasten tai yksittäisten maamerkkien, kuten puskiensa ja puunrunkojen, avulla (Warrant & Dacke 2011: 243). Yöaktiivisten lentävien hyönteisten on osoitettu suunnistavan optisen virran eli ympäristön visuaalisen tiedon perusteella. Bairdin ym. (2011) tutkimuksen mukaan neotrooppisten sademetsien monimutkaisissa elinympäristöissä elävät yöaktiiviset mehiläiset (*Megalopta genalis*) hyödyntävät optista virtaa lentonsa hallintaan, ja suunnistavan sen perusteella pesänsä ja ympäristönsä välillä.

Valosaaste häiritsee hyönteisten yöaikaista suunnistamista. Keinotekoiset valaisimet tuovat yöaikaiseen maisemaan uusia valonlähteitä luonnollisten valonlähteiden rinnalle. Taivaankappaleiden avulla suunnistavat hyönteiset voivat sekoittaa valaisimet kuuhun ja tähtiin, minkä uskotaan olevan yhteydessä hyönteisten taipumukseen lentää kohti keinotekoisia valaisimia (Frank 2006). Hohdevalo puolestaan vähentää tähtien näkyvyyttä (Falchi ym. 2016), ja saastuttaa polarisoitunutta kuun valoa (Kyba ym. 2011b). Kyban ym. (2011b) mukaan keinotekoinen, pääasiassa polarisoimaton hohdevalo heikentää polarisoitunutta valoa siinä määrin, etteivät organismit kykene havaitsemaan ja hyödyntämään sitä suunnistamiseen, kuten valaisemattomissa ympäristöissä. Tämän lisäksi polarisoitunut valosaaste voi häiritä hyönteisten suunnistamista polarisoituneen valon perusteella (Horváth ym. 2009: 321–322). Koska yöaikainen valaistus muuttaa yöaikaista elinympäristöjä, se vaikuttaa todennäköisesti suunnistamiseen myös maanpäällisten merkkien perusteella (Owens & Lewis 2018).

### 3.3 Valon puoleensavetävyys

Valo vetää puoleensa positiivisesti fototaksisia hyönteisiä (Upadhyay ym. 2018: 48), ja keinotekoisien valon on tutkittu vetävän puoleensa niin maa- kuin makean veden ekosysteemeissä eläviä hyönteisiä. Eisenbeisin (2006: 282–283) teorian mukaan keinotekoinen valo houkuttelee puoleensa lentokykyisiä hyönteisiä seuraavien skenaarioiden mukaisesti. Keinotekoiset valonlähteet, kuten katuvalaisimet voivat häiritä hyönteisten tavanomaista



toimintaa, kuten ravinnonhankintaa. Hyönteisten lentäessä valaisimen vaikutusalueelle hyönteiset pyrkivät pakonomaisesti kohti keinotekoista valoa ja jäävät sen vankeuteen. Toisessa tapauksessa keinotekoinen valaistus, kuten katuvalojen rivi, häiritsee hyönteisten suunnistamista ja muodostaa esteen hyönteisten pitkän matkan liikkeille, kuten leviämiselle ja muuttoliikkeille. Kolmannessa tapauksessa keinotekoinen valaistus toimii pölynimurin tavoin ja imee itseensä hyönteisiä elinympäristöistään laajalti sitä ympäröiviltä alueilta, heikentäen paikallisia hyönteispopulaatioita.

Valaisimen vaikutusalueelle päätyessään hyönteiset lentävät suoraan valaisimeen ja kuolevat välittömästi, tai kiertävät valaisimen ympärillä kykenemättä jättämään sen vaikutusalueelta ja kuolevat lopulta uupumuksen, saalistuksen tai ylikuumentumisen seurauksena (Eisenbeis 2006: 283). Valaisimien kirkas valo voi vaihtoehtoisesti viedä hyönteisten toimintakyvyn ja altistaa ne saalistukselle (Eisenbeis 2006: 283). Eisenbeisin (2006: 295) arvion mukaan noin kolmasosa katuvalaisimia kohti lentävistä hyönteisistä kuolee, kun otetaan huomioon saaliiksi jääneet, pois lentäneet, kuolettavasti loukkaantuneet, ja selviytyneet, mutta lisääntymiskykynsä menettäneet hyönteiset.

Hyönteisten käyttäytymisestä on esitetty useita teorioita (Frank 2006: 308). Valokompassiteorian mukaan hyönteiset suunnistavat lentämällä tietyssä kulmassa kaukaiseen valonlähteeseen, kuten kuuun, nähden, ja päätyessään keinotekoisien valon vaikutusalueelle jatkavat suunnistusta valaisimen perusteella (Frank 2006). Keinotekoisien valon kirkkauden on ehdotettu sokaisevan valaisimia lähestyvät hyönteiset ja vaikuttavan siten hyönteisten toimintakykyyn (Frank 2006).

Keinotekoisien valon puoleensavetävä vaikutus riippuu taustavalon määrästä, ja sen vaikutusalue vaihtelee kuun vaiheiden, hohdevalon määrän ja sään mukaisesti (Eisenbeis 2006: 283–286). Valon puoleensavetävyys riippuu lisäksi valaisimien tuottamasta spektristä ja hyönteisten visuaalisesta herkkyydestä eri aallonpituuksille. Aallonpituuksista erityisesti UV-säteily houkuttelee hyönteisiä voimakkaasti puoleensa (Barghini & Souza de Medeiros 2012). Vastaavasti pienenkin määrän ultraviolettia sisältävien valaisimien on havaittu houkuttelevan puoleensa enemmän hyönteisiä kuin pidempiä aallonpituuksia tuottavien valaisintyyppien.

Wakefieldin ym. (2018) tutkimuksessa verrattiin kolmen yleisen katuvalaisintyyppin, suurpainenatrium-, LED- ja monimetallilamppujen, suhteellista puoleensavetävyyttä. Tutkimus toteutettiin Etelä-Englannissa. Ultraviolettia tuottavat monimetallilamput houkuttelivat merkittävästi enemmän hyönteisiä (yhteensä 75 %) kuin muut valaisintyyppit, jotka eivät tuota ultraviolettia. LED- ja suurpainenatriumlamppujen välillä ei havaittu merkittävää eroa kiinni jääneiden hyönteisten määrässä. Laajaspektristen valkoista valoa tuottavien monimetalli- ja

LED-lamppujen havaittiin houkuttelevan monipuolisemmin eri hyönteislajeja kuin pääasiassa pitkiä aallonpituuksia ja oranssia valoa tuottavien suurpainenatriumlamppujen.

Samantapaisessa Alankomaissa toteutetussa tutkimuksessa ultraviolettia tuottava elohopeahöyrylamppu houkutteli puoleensa eniten, seitsemän kertaa enemmän hyönteisiä kuin vähiten hyönteisiä puoleensa houkuttellut LED-lamppu (Van Grunsven ym. 2014). Sen sijaan Pawson & Baderin (2014) Uusi-Seelantilaisessa tutkimuksessa ledit houkuttelivat 48 % enemmän hyönteisiä kuin suurpainenatriumlamput. Ledit eroavat suurpainenatriumlampuista painottumalla enemmän spektrin keskivaiheen vihreään ja siniseen osaan eli tuottamalla lyhyempiä aallonpituuksia (Pawson & Bader 2014: 1562). Van Grunsven ym. (2014) huomauttaakin, että tutkimustuloksia ei voida yleistää valaisintyyppien osalta, sillä spektri voi vaihdella suuresti valaisintyyppin, erityisesti monimuotoisten ledien sisällä.

Valon ja eri aallonpituuksien puoleensavetävyys vaihtelevat eri hyönteislahkojen ja -heimojen välillä (Van Grunsven ym. 2014), mikä voi selittyä eroilla hyönteisten spektriherkkyydessä (Briscoe & Chittka 2001). Tutkimusten mukaan valo houkuttelee voimakkaasti muun muassa kaksisiipisiä, vesiperhosia (*Trichoptera*), perhosia ja kovakuoriaisia (Van Grunsven ym. 2014; Pawson & Bader 2014; Wakefield ym. 2018). Manfrinin ym. (2017) rantaekosysteemeissä toteutetussa tutkimuksessa keinotekoinen valaistus houkutteli vesiekosysteemeistä lähtöisin olevia hyönteisiä enemmän kuin maaekosysteemeissä eläviä hyönteisiä. Manfrinin ym. (2017) mukaan tulokset voivat kertoa vesihyönteisten suuremmasta herkkyydestä ja haavoittuvuudesta yöaikaiselle keinotekoiselle valolle verrattuna maalla eläviin hyönteisiin, mikä voi johtua vesihyönteisten herkkyydestä polarisoituneelle valolle.

Keinotekkoisten valonlähteiden lisäksi keinotekoiset polarisaationlähteet houkuttelevat hyönteisiä puoleensa (Horváth ym. 2009). Horváthin ym. (2009) mukaan polarisoitunut valosaaste on erityisen haitallista vesiekosysteemeissä eläville hyönteisille, jotka suunnistavat ensisijaisesti polarisoidun valon perusteella etsiessään sopivia elinympäristöjä ja munintapaikkoja. Vesiekosysteemeissä elävät hyönteiset voivat sekoittaa keinotekoiset polarisaation lähteet vesistöihin, mikä voi johtaa hyönteisten kannalta haitallisiin seurauksiin (Horváth ym. 2009).

Joutuessaan kosketuksiin öljyn kanssa, tai pyrkiessään ikkunalaseihin ja joutuessaan ikkunan puitteiden väliin hyönteiset eivät kykene enää pakenemaan ja kuolevat (Horváth ym. 2009). Hyönteiset voivat lisäksi parveilla, paritella ja munia luontaisesta elinympäristöstään poikkeavissa, elinkelvottomissa paikoissa, kuten maanviljelyssä käytetyillä muovipeitteillä tai autojen ja asfaltoitujen teiden pinnoilla (Horváth ym. 2009). Hyönteiset voivat jäädä loukkuun

polarisoituneen valon vaikutusalueelle, johtaen hyönteisten uupumiseen, kuivumiseen ja kuolemaan tai altistaen ne saalistukselle ja siten kuolemaan. Monien vesihyönteisten lisääntyminen epäonnistuu muninnan tapahtuessa keinotekoisilla polarisaatiopinnoilla (Horváth ym. 2009).

### 3.4 Viestintä ja lisääntyminen

Valosaaste häiritsee hyönteisten visuaalista viestintää, ja sitä kautta hyönteisten lisääntymiskäyttäytymistä. Bioluminesoivat hyönteiset viestivät bioluminesenssin eli biologisen valotuotannon avulla. Kovakuoriaisten heimo kiiltomadot (*Lampyridae*) on yleisin maalla elävä valoa tuottava eliöryhmä (Lloyd 2006: 346). Kiiltomadot käyttävät bioluminesenssia eri tavoin hyväkseen, aikuisena erityisesti seksuaaliseen viestintään eli parittelukumppaneiden houkuttelemiseen ja paikallistamiseen (Lloyd 2006: 352).

Valosaaste häiritsee bioluminesoivien hyönteisten viestintää, peittämällä niiden tuottamat valosignaalit näkyvistä. Keinotekoinen valaistus häiritsee esimerkiksi kiiltomatojen viestintää heikentämällä valosignaalin tehoa kumppaneiden ja saaliin houkuttelemisessa sekä saalistuksen välttämiseksi (Lloyd 2006: 353). Bioluminesoivat hyönteiset ovat sopeutuneet viestimään pimeässä ympäristössä, ja vaikka osa hyönteisistä kykeneekin kilpailemaan keinovalon kanssa valosignaalin kirkkaudessa, se kuluttaa hyönteisten energiavarastoja lisääntymisen kustannuksella (Lloyd 2006: 353).

Firebaugh & Haynesin (2016) tutkimuksen mukaan valosaaste vähentää naaraspuolisten yöaktiivisten kiiltomatojen (*Photuris versicolor*) seksuaalista viestintää ja hämää aktiivisten kiiltomatojen (*Photinus pyralis*) parittelumenestystä, mikä voi vaikuttaa edelleen lisääntymisen vähentymisenä ja populaatiokasvun pienentymisenä keinotekoisesti valaistuilla alueilla. Keinotekoisin valon ei havaittu vaikuttavan urospuolisiin kiiltomatoihin, vaan parittelumenestyksen väheneminen oli seurausta muutoksesta naaraiden käytöksessä. Keinotekoinen valo ei vaikuttanut kiiltomatojen paikalliseen populaatioon yhden aikuisen sukupolven aikana, mutta Firebaugh & Haynesin (2016) mukaan vaikutukset runsauteen voivat ilmetä pidemmällä aikavälillä, jos havaittu parittelumenestyksen väheneminen estää lisääntymistä.

### 3.5 Lajien välinen vuorovaikutus

Keinotekkoisten valon- ja polarisaationlähteiden puoleensa vetämät hyönteiset ovat helppoa saalista niitä ravintonaan käyttäville pedoille, muuttaen lajien välistä peto-saalisvuorovaikutusta. Hyönteisten ja lepakoiden välillä on yhteisevoluution myötä pitkälle kehittynyt peto-saalisvuorovaikutus (Minnaar ym. 2015: 523). Hyönteisistä erityisesti yöperhosille on kehittynyt kyky aistia ultraääntä vasteena lepakoiden saalistamiseen kaikuluotauksen avulla (Minnaar ym. 2015: 523). Yöaikainen keinotekoinen valaistus paitsi houkuttelee hyönteisiä puoleensa, sen on lisäksi havaittu vähentävän ultraääntä aistivien yöperhosten puolustuskäyttäytymistä (Minnaar ym. 2015: 523). Lisääntyneen valaistuksen myötä kaikuluotauksen avulla saalistavien lepakoiden yöperhosiin kohdistuva saalistus voi lisääntyä entisestään, ja mahdollisesti pienentää yöperhospopulaatioita valoisilla alueilla (Minnaar ym. 2015: 523). Jos yöperhoset ovat ravinnonlähteenä lepakoita rajoittava resurssi, valosaaste voi muodostaa epäsuoran uhkan myös lepakoiden selviytymiselle (Minnaar ym. 2015: 523).

Lepakoiden lisäksi lintujen on tutkittu saalistavan keinotekkoisen valon ympärillä parveilevia yöperhosia (Frank 2006: 311). Yöaikainen keinotekoinen valo häiritsee lisäksi yöperhosten naamioitumista ja siten lajien välistä peto-saalisvuorovaikutusta. Suurimmalla osalla yöperhoslajeista on suojaväriytyminen (Frank 2006: 311). Frankin (2006: 311) mukaan yöaikainen keinotekoinen valo häiritsee käyttäytymistä, joka saa yöperhoset sulautumaan taustaansa. Mustat yöperhoset voivat esimerkiksi levätä aamuisin ulkovalaisimien läheisyydessä vaaleita pintoja vasten (Frank 2006: 311). Keskittämällä yöperhoset pienelle alueelle, keinotekoinen valaistus auttaa lintuja tunnistamaan perhosten siipien kuvioinnin ja voimistaa kuvioinnin yhdistämistä ruokaan, helpottaen lintujen ravinnonhankintaa (Frank 2006: 311).

Vesiekosysteemien läheisyydessä yöaikainen keinotekoinen valo voi muuttaa vesi- ja maaekosysteemien välisiä energian ja aineen virtoja houkuttelemalla puoleensa sekä hyönteisiä että hyönteisiä saalistavia petoja. Monet vesiekosysteemeissä elävät hyönteiset siirtyvät aikuisina maaekosysteemeihin, altistuen saalistukselle maaekosysteemeissä (Parkinson ym. 2020). Parkinsonin ym. (2020) tutkimuksessa keinotekkoisen valaistuksen havaittiin lisäävän sekä vesiekosysteemeistä lähtöisin olevien hyönteisten nousemista maaekosysteemeihin että hyönteisiä ravintonaan käyttävien hämähäkkien määrää ja saalistusmenestystä. Parkinsonin ym. (2020) mukaan rantaekosysteemeissä elävät hämähäkit voivat keskeyttää hyönteisten virran ekosysteemien välillä ja estää hyönteisten leviämisen maaekosysteemeihin. Lintujen ja

hämähäkkien on lisäksi havaittu ruokailevan keinotekoisien polarisaationlähteiden, kuten ikkunalasien puoleensa vetämiä vesiekosysteemeistä lähtöisin olevia hyönteisiä (Horváth ym. 2009).

Yöaikainen keinotekoinen valo häiritsee peto-saalis-vuorovaikutusten lisäksi hyönteisten ja kasvien välistä vuorovaikutusta eli pölytystä. Knopin ym. (2017) tutkimuksessa yöaikainen keinotekoinen valaistus vähensi hyönteisten vierailuja kasveissa 62 % verrattuna luonnontilaisiin kasvi-pölyttäjä-yhteisöihin. Kukkakasvien lisääntyminen on riippuvaista eläinavusteisesta pölytyksestä, ja yöaikaisen pölytyksen väheneminen näkyi kasvien hedelmän kehityksessä, jonka havaittiin vähenevän 13 % päiväaikaisesta pölytyksestä huolimatta (Knop ym. 2017).

Hyönteispölytykseen kohdistuvat negatiiviset vaikutukset johtuvat Knopin ym. (2017) mukaan todennäköisesti keinotekoisien valon aiheuttamista muutoksista hyönteisten käyttäytymisessä, kuten pyrkimisessä kohti valoa, ja/tai hyönteisten fysiologisesta reaktiosta. Vaikutukset voivat vaihtoehtoisesti johtua muutoksista kasvien fysiologiassa (Knop ym. 2017). Knopin ym. (2017) mukaan keinotekoisien valaistuksen negatiiviset vaikutukset voivat levitä yöaktiivisten kasvi-pölyttäjä-yhteisöjen lisäksi edelleen päiväaktiivisiin yhteisöihin. Yöaikaisen pölytyksen häiriintyminen ja vaikutukset kasvien lisääntymiseen vaikuttavat edelleen kasveja ravintonaan käyttäviin päiväaktiivisiin hyönteisiin (Knop ym. 2017).

#### **4 Pohdinta**

Tutkimukseni tarkoituksena oli tutkia valosaasteen vaikutuksia yleisesti luonnonvaraisiin eliöihin ja tarkemmin hyönteisiin. Valosaaste on historiallisesti uusi, mutta laajalle levinnyt ilmiö, jota esiintyy niin maa- kuin vesiekosysteemeissä. Keinotekoinen valo muuttaa valon ominaisuuksia ja luonnollisia, pitkään muuttumattomina pysyneitä valon ja pimeyden vaihteluita, joihin elämä maapallolla on evoluutiokehityksen aikana sopeutunut (Gaston ym. 2013). Se muuttaa näin ollen luonnollisia valo- ja elinympäristöjä. Keinotekoisien valon vaikutukset luonnonvaraisiin eliöihin ilmenevät erityisesti yöaikaan ja kohdistuvat voimakkaasti yöaktiivisiin lajeihin.

Yöaikaisen keinotekoisien valon on tutkittu vaikuttavan sekä luonnonvaraisten yksittäisten eliölajien biologiaan että eliöyhteisöjen ekologiaan. Keinotekoinen valo voi vaikuttaa yksilöihin ja populaatioihin muuttamalla kasvien (Bennie ym. 2016) ja eläinten biologisia rytmejä, eläinten visuaalista havaitsemiskykyä, aktiivisuutta (Gaston ym. 2013) ja

suunnistamista, sekä vetämällä eläimiä puoleensa tai työntämällä luotaan, vaikuttaen edelleen eläinten tavanomaiseen käyttäytymiseen (Longcore & Rich 2004). Vaikutukset yksittäisten eliölajien biologisissa rytmeissä ja käyttäytymisessä voivat levitä edelleen eliölajien sisäiseen ja väliseen vuorovaikutukseen (Longcore & Rich 2004; Gaston ym. 2013; Bennie ym. 2016). Vaikutusten kohdistuminen voimakkaammin tiettyihin eliölajeihin voi puolestaan vaikuttaa eliöyhteisöjen rakenteeseen (Longcore & Rich 2004). Keinotekoisien valon biologiset ja ekologiset vaikutukset voivat vaikuttaa edelleen kokonaisten ekosysteemien toimintaan (Longcore & Rich 2004).

Yöaikainen keinotekoinen valaistus vaikuttaa hyönteisten käyttäytymiseen eri tavoin. Keinotekoinen valo voi muuttaa hyönteisten aktiivisuutta ja suunnistamista, vetää hyönteisiä puoleensa sekä häiritä hyönteisten viestintää ja lisääntymistä. Keinotekoisien valon ja polarisaationlähteiden puoleensavetävyys voi muuttaa edelleen hyönteisten tavanomaista käyttäytymistä, kuten leviämistä, muuttoliikkeitä, ravinnonhankintaa ja lisääntymistä, ja johtaa hyönteisten korkeaan kuolleisuuteen (Eisenbeis 2006). Vaikutukset ovat lajikohtaisia, ja jakautuvat epätasaisesti niin hyönteisten aktiivisuuden, spektriherkkyyden kuin elinympäristöjen mukaisesti.

Keinotekoinen valo voi vaikuttaa hyönteisten runsauteen suoraan yksilöiden kuolleisuutena, ja epäsuoraan lisääntymisen epäonnistumisena tai muutoksina sukupuolten välisessä suhteellisessa runsaudessa (Owens & Lewis 2018). Vaikutukset yksilöiden kuolleisuuteen kohdistuvat erityisesti positiivisesti fototaksisiin lajeihin ja valon polarisaatiolle herkkiin vesihyönteisiin, keinotekoisien valon- ja polarisaationlähteiden puoleensavetävyyden ja hyönteisiin kohdistuvan saalistuksen kautta. Lisääntymisen epäonnistuminen voi johtua hyönteisten ajautumisesta ja munimisesta sopimattomiin elinympäristöihin, kuten vesihyönteisten tapauksessa (Horváth 2009), tai keinotekoisien valon häiritessä lisääntymiskäyttäytymistä, kuten kiiltomatojen seksuaalista viestintää (Lloyd 2006; Firebaugh & Haynes 2016). Muutokset sukupuolten välisessä suhteellisessa runsaudessa voivat johtua eroista valon puoleensavetävyydessä naaraiden ja koiraiden välillä (Owens & Lewis 2018).

Hyönteiset ovat merkittävä osa ekosysteemejä ja niiden toimintaa (Schowalter 2006). Muutokset hyönteisten käyttäytymisessä ja runsaudessa voivat muuttaa edelleen lajien välistä vuorovaikutusta, eliöyhteisöjen rakennetta, ekosysteemien toimintaa ja mahdollisesti maailmanlaajuisia kehityskulkuja esimerkiksi ravintoverkkojen tai hyönteispölytyksen kautta.

Hyönteiset ovat merkittävä osa maa-, makean veden ja merten rannikoiden ravintoverkkoja (Schowalter 2006). Vaikka keinotekoinen valo ja valon puoleensavetävyys voivat parantaa hyönteisiä ravintonaan käyttävien petojen saalistusmenestystä, pidemmällä

aikavälillä muutokset hyönteisten eli saaliin runsaudessa tulevat todennäköisesti vaikuttamaan edelleen petojen runsauteen. Valosaasteen vaikutukset hyönteisten ja petojen runsauteen voivat levitä vastaavasti korkeammalle ravintoverkossa. Hyönteiset ovat ravinnonlähteiden lisäksi hajottajia, kasvinsyöjiä ja petoja (Schowalter 2006), minkä vuoksi hyönteisten runsaus voi vaikuttaa kokonaisvaltaisesti aineen ja energian virtoihin ekosysteemeissä.

Eläinavusteinen pölytys on tärkeä ekosysteemitointo luonnonvaraisille kasviyhteisöille, ja erityisesti koppisiemenisille kukkakasveille (Knop ym. 2017). Pölytys on lisäksi ihmisten kannalta ratkaisevan tärkeä ekosysteemipalvelu maailmanlaajuiselle ravinnon tarjonnalle ja ruokaturvalle (Knop ym. 2017). Yöaikainen keinotekoinen valo häiritsee hyönteispölytystä sekä suoraan että epäsuoraan vaikutusten levitessä edelleen päiväaktiivisiin kasvi-pölyttäjyhteisöihin ja päiväaktiivisten hyönteisten ravinnonhankintaan (Knop ym. 2017). Muutokset pölytyksessä voivat vaikuttaa edelleen hyönteisten runsauteen, eläinavusteiseen pölytykseen ja mahdollisesti ruokaturvaan (Knop ym. 2017).

Tutkimukseni tarkoituksena oli lisäksi tutkia, miten ledit vaikuttavat valosaasteen vaikutuksiin hyönteisten osalta. Nykyinen valaisinteknologiassa tapahtuva siirtymä kaasupurkauslamppuista laajaspektrisiin ledeihin tulee muuttamaan keinotekoisien valaistuksen spektrikoostumusta maailmanlaajuisesti (Zissis & Bertoldi 2018). Valon spektri on yhteydessä valon puoleensavetävyteen, ja valaisinteknologiat vaikuttavat siihen, missä määrin keinotekoinen valaistus houkuttelee hyönteisiä puoleensa.

Ledit tuottavat aallonpituuksia, jotka vastaavat hyönteisten visuaalista herkkyyttä, mutta eivät ultraviolettia, joka houkuttelee pieninäkin määrinä hyönteisiä voimakkaasti puoleensa. Näin ollen ledit eivät lisää hyönteisiin kohdistuvia ekologisia vaikutuksia yhtä paljon kuin ultraviolettia sisältävät valaisintyyppit, kuten monimetalli- tai elohopeahöyrylamput. Katuvalaisinkäytössä yleisiin suurpainenatriumlamppuihin verrattuna ledien hyönteisten puoleensavetävydestä on kuitenkin saatu ristiriitaisia tuloksia, mikä johtuu todennäköisesti ledien monimuotoisuudesta värilämpötilojen ja siten spektrin suhteen (van Grunsven 2014).

Laajaspektrisillä valaisinteknologioilla, kuten ledeillä, voi olla entistä laajempia ekologisia vaikutuksia. Laajaspektriset valaisinteknologiat voivat muuttaa eläinten visuaalista havaitsemiskykyä ja lisätä entisestään eläinluokkien välisiä eroja havaitsemiskyvyssä, minkä uskotaan lisäävän niiden ekologisia vaikutuksia verrattuna kapeaspektrisiin valaisinteknologioihin (Davies ym. 2013). Hyönteisten osalta laajaspektriset valo-olosuhteet todennäköisesti helpottavat esimerkiksi pölyttävien hyönteisten kukkivien kasvien värien havaitsemista ja kukkien tunnistamista, verrattuna suppeaspektrisiin valo-olosuhteisiin (Gaston ym. 2013). Laajaspektriset valo-olosuhteet voivat kuitenkin parantaa myös hyönteisiä

ravintonaan käytävien petojen visuaalista havaitsemiskykyä, vaikuttaen mahdollisesti hyönteisiin kohdistuvaan saalistukseen.

Ledit voivat lisätä, ekologisten vaikutusten lisäksi, valosaasteen määrää ja vastaavasti sen vaikutuksia. Falchin ym. (2016) mukaan erityisesti valkoista valoa tuottavat ledit ovat kaksi ja puoli kertaa saastuttavampia yhtä voimakkaisiin (400 K) suurpainenatriumlamppuihin verrattuna, johtuen ledien korkeammasta eli kylmemmästä värilämpötilasta. Falchi ym. (2016) ennusteen mukaan hohdevalon määrä voi vastaavasti yli kaksinkertaistua, mikäli käyttöönotettavat ledit ovat värilämpötilaltaan kylmiä. Myös Kyban ym. (2017) mukaan siirtymä ledeihin lisää hohdevalon määrää kirkkaan taivaan heijastaessa pääasiassa valon lyhyempiä aallonpituuksia. Energia- ja kustannustehokkaat ledit voivat lisätä valosaasteen määrää myös, mikäli niiden käytöstä saatavat taloudelliset säästöt johtavat katuvalaistuksen lisääntymiseen ja käyttöönottoon uusilla, ennestään valaisemattomilla alueilla (Kyba ym. 2017).

Valosaaste on yksi yleisimmistä ympäristömuutoksen muodoista, ja sillä on tutkittu olevan merkittäviä vaikutuksia luonnonvaraisiin eliöihin, ulottuen yksilöistä ekosysteemien tasolle. Valosaasteen kirkkauden ja määrän odotetaan lisäksi lisääntyvän entisestään sekä leviävän yhä uusille alueille (Kyba ym. 2017). Tästä huolimatta valosaaste ei ole herättänyt yhtä suurta huomiota kuin muut ajankohtaiset ympäristömuutoksen muodot, kuten ilmastonmuutos tai elinympäristöjen häviäminen.

Valosaasteella voi lisäksi olla odottamattomia vaikutuksia yhdessä muiden ympäristökuormituksen muotojen kanssa. Valosaaste voi esimerkiksi edesauttaa elinympäristöjen häviämistä ja pirstoutumista (Gaston ym. 2014) sekä luonnon monimuotoisuuden heikkenemistä, kohdistuen erityisesti yöaktiivisiin eläimiin ja niiden elinympäristöihin (Hölker ym. 2010). Owens ym. (2020) mukaan valosaaste on elinympäristöjen pirstoutumisen, torjunta-aineiden käytön ja ilmastonmuutoksen lisäksi yksi hyönteisten runsauden maailmanlaajuisen vähenemiseen vaikuttavista tekijöistä.

Valosaaste eroaa kuitenkin hyvällä tavalla muista ympäristömuutoksen muodoista. Valosaasteen haitallisia vaikutuksia voidaan ehkäistä yksinkertaisesti vähentämällä tarkoitukseensa sopimatonta, liiallista tai tarpeetonta sekä haitallista keinotekoisesta valaistusta, eikä siitä tule todennäköisesti aiheutumaan jälkeensä ilmeneviä seurauksia. Tulevaisuudessa yleisimmäksi valaisintyypiksi nousevat ledit ovat lisäksi monimuotoisia ja säädettävissä ominaisuuksiltaan, kuten valojen tuottamilta aallonpituuksilta, mikä voi helpottaa valosaasteen vaikutusten ehkäisemistä.



## Lähdeluettelo

- Baird, E., Kreiss, E., Wcislo, W., Warrant, E. & Dacke, M. (2011). Nocturnal insects use optic flow for flight control. *Biology letters* 7(4) 499–501. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2010.1205>
- Barghini, A. & Souza de Medeiros, B. A. (2012). UV Radiation as an attractor for insects. *Leukos* 9(1) 47–56. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2012.09.01.003>
- Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Gaston, K. J. & Swenson, N. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *The Journal of ecology* 104(3) 611–620. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- Briscoe, A. D. & Chittka, L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual review of entomology* 46(1) 471–510. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.46.1.471>
- Dacke, M., Byrne, M. J., Scholtz, C. H. & Warrant, E. J. (2004). Lunar orientation in a beetle. *Proceedings of the Royal Society. B, Biological sciences* 271(1537) 361–365. doi:10.1098/rspb.2003.2594
- Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C. & Warrant, E. (2013). Dung beetles use the milky way for orientation. *Current biology* 23(4) 298–300. doi:10.1016/j.cub.2012.12.034
- Davies, T. W., Bennie, J., Inger, R., de Ibarra, N. H. & Gaston, K. J. (2013). Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions?. *Global Change Biology* 19(5) 1417–1423. <https://doi.org/10.1111/gcb.12166>
- Davies, T. W., Duffy, J. P., Bennie, J. & Gaston, K. J. (2014). The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12(6) 347–355. <https://doi.org/10.1890/130281>
- Eisenbeis, G. (2006). Artificial night lighting and insects: Attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. Teoksessa Rich, C. & Longcore, T. (toim.) *Ecological consequences of artificial night lighting*, 281–304. Washington, DC: Island Press.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances* 2(6) e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Firebaugh, A. & Haynes, K. J. (2016). Experimental tests of light-pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal. *Oecologia* 182(4) 1203–1211. <https://doi.org/10.1007/s00442-016-3723-1>

- Frank, K. D. (2006). Effects of artificial night lighting on moths. Teoksessa Rich, C. & Longcore, T. (toim.) *Ecological consequences of artificial night lighting*, 305–344. Washington, DC: Island Press.
- Gallaway, T., Olsen, R. N. & Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological economics* 69(3) 658–665. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.10.003
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W. & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 88(4) 912–927.
- Horváth, G., Kriska, G., Malik, P. & Robertson, B. (2009). Polarized light pollution: A new kind of ecological photopollution. *Frontiers in ecology and the environment* 7(6) 317–325. <https://doi.org/10.1890/080129>
- Hölker, F., Wolter, C. P., Perkin, E. & Tockner K. (2010). Light Pollution as a biodiversity threat. *Trends in ecology & evolution* 25(12) 681–682. 10.1016/j.tree.2010.09.007
- Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörler, M. & Fontaine, C. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature (London)* 548(7666) 206–209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- Kronfeld-Schor, N., Dominoni, D., de la Iglesia, H., Levy, O., Herzog, E. D., Dayan, T. & Helfrich-Forster, C. (2013). Chronobiology by moonlight. *Proceedings of the Royal Society. B, Biological sciences* 280(1765) 20123088. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.3088>
- Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., ... & Guanter, L. (2017). Artificially lit surfaces of earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances* 3(11). DOI: 10.1126/sciadv.1701528
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J. & Hölker, F. (2011a). Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PloS one* 6(3) e17307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J. & Hölker, F. (2011b). Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116(D24) - n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JD016698>
- Land, M. F. & Nilsson, D. (2012). *Animal eyes*. 2. p. Oxford University Press.
- Light Pollution. International Dark-Sky Association. 3.3.2021. <https://www.darksky.org/light-pollution/>

- Longcore, T. & Rich, C. (2004). Ecological Light Pollution. *Frontiers in ecology and the environment* 2(4) 191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- Lloyd, J. E. (2006). Stray light, fireflies, and fireflyers. Teoksessa Rich, C. & Longcore, T. (toim.) *Ecological consequences of artificial night lighting*, 345–364. Washington, DC: Island Press.
- Manfrin, A., Singer, G., Larsen, S., Weiß, N., van Grunsven, R. H. A., Weiß, N., ... & Hölker, F. (2017). Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. *Frontiers in environmental science* 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00061>
- Minnaar, C., Boyles, J. G., Minnaar, I. A., Sole, C. L. & McKechnie, A. E. (2015). Stacking the odds: Light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. *The Journal of applied ecology* 52(2) 522–531. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12381>
- Moore, M. V., Kohler, S. J. & Cheers, M. S. (2006). Artificial light at night in freshwater habitats and its potential ecological effects. Teoksessa Rich, C. & Longcore, T. (toim.) *Ecological consequences of artificial night lighting*, 281–304. Washington, DC: Island Press.
- Owens, A. C. S. & Lewis, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and evolution* 8(22) 11337–11358. <https://doi.org/10.1002/ece3.4557>
- Owens, A. C., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E. K. & Seymoure, B. (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological conservation* 241 108259. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>
- Parkinson, E., Lawson, J. & Tiegs, S. D. (2020). Artificial light at night at the terrestrial-aquatic interface: Effects on predators and fluxes of insect prey. *PloS one* 15(10) e0240138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240138>
- Pawson, S. M. & Bader, M. K. (2014). LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological applications* 24(7) 1561–1568. <https://doi.org/10.1890/14-0468.1>
- Saunders, D. S., Steel, C. G. H., Vafopoulou, X. & Lewis, R. D. (2002). *Insect clocks*. 3. p. Elsevier.
- Schowalter, T. D. (2006). *Insect Ecology: An ecosystem approach*. 2. p. Academic Press.
- Upadhyay, S., Singh, S. B. & S. P. Singh Tomar (2018). *Insect Ecology*. Biotech Books, New Delhi.

- van Grunsven, R. H. A., Donners, M., Boekee, K., Tichelaar, I., van Geffen, K. G., Groenendijk, D., ... & Veenendaal, E. M. (2014). Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *Journal of insect conservation* 18(2) 225–231. <https://doi.org/10.1007/s10841-014-9633-9>
- Wakefield, A., Broyles, M., Stone, E. L., Harris, S., Jones, G. & Minderman, J. (2018). Quantifying the attractiveness of broad-spectrum street lights to aerial nocturnal insects. *The Journal of applied ecology* 55(2) 714–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13004>
- Warrant, E. & Dacke, M. (2011). Vision and visual navigation in nocturnal insects. *Annual review of entomology* 56(1) 239–254. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-144852>
- Wigglesworth, V. Brian (22.12.2020). Insect. Encyclopedia Britannica. 20.3.2021. <https://www.britannica.com/animal/insect>
- Zissis, G. & Bertoldi, P. (2018) *Status of LED-lighting world market in 2017*. Ispra, European Commission, 2018. JRCXXXXXX