



**TURUN  
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen  
tiedekunta

**Yöperhosten lukumäärän ja biomassan ajalliset muutokset subarktisen alueen  
muuttuvassa ilmastossa sekä yhteydet kirjosiepon pesimämenestykseen**

Betty Marjamäki

Ekologia ja evoluutiobiologia

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

Ohjaaja(t):

Kari Saikkonen

Tapio Eeva

Tommi Andersson

21.7.2022

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

**Pääaine:** Ekologia ja evoluutiobiologia

**Tekijä(t):** Betty Marjamäki

**Otsikko:** Yöperhosten lukumäärän ja biomassan ajalliset muutokset subarktisen alueen muuttuvassa ilmastossa sekä yhteydet kirjosiepon pesimämenestykseen

**Ohjaaja(t):** Kari Saikkonen, Tapio Eeva ja Tommi Andersson

**Sivumäärä:** 54 sivua

**Päivämäärä:** 21.7.2022

---

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat erityisen voimakkaita pohjoisilla leveysasteilla sekä talviaikaan. Sen seurauksena on jo havaittu merkittäviä muutoksia arktisissa ekosysteemeissä ja eliöyhteisöissä, kuten lajien runsaussuhteiden muutoksia ja levinneisyysalueiden pohjoissuuntaista kasvua, sekä muuttuneita elinkierron ominaisuuksia. Ilmastonmuutoksen myötä arktisille alueille voi levitä uusia lajeja olosuhteiden muuttuessa niille suotuisammiksi, mutta paikallisiin olosuhteisiin sopeutuneet lajit vähenevät ja voivat paikon ajautua sukupuuttoon.

Tämän gradututkielman tavoitteena on selvittää, esiintyykö pohjoisessa yleisillä yöperhoslajeilla muutoksia runsaudessa ja biomassassa ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Tarkastelen myös, onko yöperhosten runsaudella ja sen mahdollisella muutoksella vaikutusta kirjosiepon pesintämenestykseen sen levinneisyysalueen pohjoisrajalla. Aineistoina toimivat Kevon tutkimuslaitoksella valorysäpyynneillä kerätty yöperhosaineisto, tiedot kirjosiepon pesintämenestyksestä Lapissa sekä tiedot tutkimusalueen säästä vuosien aikana. Lisäksi punnitsin perhosnäytteitä valorysäpyynneistä biomassan muutoksen määrittämiseksi. Tutkin ilmastomuuttujien vaikutusta yöperhosiin ja kirjosiepon pesintään regressiomallien avulla.

Tutkimusalueen ilmastossa on havaittavissa muutos lähes kaikkien säätekijöiden osalta: muun muassa lämpötilat olivat nousseet ja sadanta kasvanut niin kesä- kuin talviaikaan. Yöperhosten yksilömäärät olivat pääosin kasvaneet tutkimusvuosien aikana. Kahden yöperhoslajin massa oli pienentynyt. Muuttuneet ilmasto-olosuhteet vaikuttivat pääosin positiivisesti yöperhosten runsauteen, vain muutaman lajin reagoidessa negatiivisesti. Yöperhosten runsas lukumäärä kasvatti kirjosiepon pesyeiden kokoa, runsas sadanta kesäkuun aikana puolestaan vähensi lentopoikasten määriä.

Analyysien tulokset vastaavat melko hyvin aiempaa kirjallisuutta. Parhaiten menestyneet yöperhoset olivat munina talvehtivia ja myöhään lentäviä lajeja, toukkana talvehtivien menestys oli heikompaa. Tulevissa tutkimuksissa on tärkeää huomioida lajien elinkierto-ominaisuudet ilmastonmuutoksen vaikutusten ymmärtämiseksi. Kirjosiepon pesimämenestys sen elinalueen pohjoisrajoilla saattaa parantua, mikäli hyönteisten määrä kasvaa ilmastonmuutoksen kuluessa.

---

**Avainsanat:** Ilmastonmuutos, Lappi, yöperhoset, kirjosieppo, elinkierto-ominaisuudet, yksilömäärät, biomass, pesintä



## Sisällys

<b>1. Johdanto</b> .....	1
1.1. Arktisten alueiden, ekosysteemien ja eliöiden yleisiä ominaisuuksia? .....	1
1.2. Pohjoiset elinympäristöt lajien levinneisyyden rajoina .....	2
1.3. Ympäristön ja ruumiin koon suhde pohjoisilla hyönteisillä .....	3
1.4. Pohjoisten hyönteisten ekologiset- ja elinkierto-ominaisuudet .....	4
1.5. Yöperhosten rooli ja hyönteisherbivoria pohjoisissa ekosysteemeissä .....	5
1.6. Yöperhosten sopeutuminen arktisiin olosuhteisiin .....	6
1.6.1. Sopeutuminen alhaisiin lämpötiloihin: talvehtiminen ja lyhyen kesän hyödyntäminen .....	7
1.7. Ilmastonmuutoksen voimakas vaikutus arktisilla alueilla ja ekosysteemeissä .....	8
1.7.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset yöperhosiin ja muihin hyönteisiin .....	9
1.7.2. Talven aikaisten muutosten vaikutus .....	10
1.7.3. Muutokset hyönteisten levinneisyydessä ja runsaudessa .....	11
1.7.4. Muutokset hyönteisten elinkierto-ominaisuuksissa .....	14
1.8. Kirjosiepon pesintä arktisilla alueilla .....	15
1.9. Gradututkielman tavoitteet ja hypoteesit .....	16
<b>2. Aineisto ja menetelmät</b> .....	17
2.1. Tutkimuslajit .....	17
2.2. Tilastolliset analyysit .....	19
2.3. Sääaineisto ja sen tilastollinen analysointi .....	19
2.4. Perhosaineisto, näytteiden käsittely ja tilastollinen analysointi .....	20
2.4.1. Perhosten biomassan mittaaminen .....	22
2.4.2. Yöperhosten lukumäärä- ja punnitusaineiston analysointi .....	22
2.5. Kirjosiepon pesimäaineisto ja sen tilastollinen analysointi .....	24
2.5.1. Pesyekoko .....	24
2.5.2. Kuoriutuneiden poikasten määrä .....	25
2.5.3. Lentopoikasten määrä .....	25
<b>3. Tulokset</b> .....	26
3.1. Muutokset tutkimusalueen ilmastossa .....	26
3.2. Yöperhosten lukumäärien muutos tutkimusvuosien aikana .....	28
3.3. Tiheyden ja vuoden vaikutus yöperhosten massaan .....	31
3.4. Pyynti- ja talvikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten lukumääriin .....	33
3.5. Kirjosiepon pesimämenestys Kevolla .....	36

<b>4. Tulosten tarkastelu</b> .....	39
4.1. Havaitut muutokset tutkimusalueen ilmastossa .....	39
4.2. Muutokset tutkittavien yöperhoslajien lukumäärissä.....	41
4.3. Vuoden ja populaation tiheyden vaikutus yöperhosyksilöiden massaan .....	43
4.4. Pyyntikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten yksilömääriin.....	44
4.5. Talvikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten yksilömääriin.....	45
4.6. Kirjosiepon pesimämenestys Kevolla .....	47
4.7. Yhteenveto .....	49
<b>5. Kiitokset</b> .....	49
<b>6. Lähteet</b> .....	50

## 1. Johdanto

### 1.1. Arktisten alueiden, ekosysteemien ja eliöiden yleisiä ominaisuuksia?

Arktisiksi alueiksi luetaan maantieteelliset alueet Napapiirin pohjoispuolella, ja niillä on useita tyypillisiä piirteitä, kuten alhainen lämpötila, lyhyt kasvukausi ja suhteellisen yksinkertaiset ekosysteemit (Phoenix & Lee, 2004; Strathdee & Bale, 1998)

Alhainen lämpötila, sadanta sekä hiilen ja ravinteiden määrä vaikuttavat arktisten alueiden kasvillisuuden rakenteeseen ja funktionaalisten ryhmien määrään. Kasvillisuus vaihtuu borealisesta metsästä puuttomaksi tundrakasvillisuudeksi siirryttäessä kohti pohjoista (Callaghan ym. 2004b; Strathdee & Bale, 1998). Puuvartisten kasvien koko pienenee pohjoiseen siirryttäessä, ja kasvillisuus on hidaskasvuista, matalaa ja tiivistä. Puuvartiset kasvit vaikuttavat ekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan eniten, muun muassa varjostamalla pohjakerrosta, hidastamalla ravinteiden kiertoa ja vaikuttamalla karikkeen laatuun. Puuvartiset kasvit myös monipuolistavat ekosysteemien vertikaalista rakennetta, luoden ekolokeroita esimerkiksi hyönteisille. Erityisesti pensaikot ovat tärkeitä elinympäristöjä esimerkiksi kasvissyöjähyönteisille (Callaghan ym., 2004b; Callaghan ym., 2011).

Hyönteiset ovat arktisten ekosysteemien lajirikkain ryhmä, ja niistä 10 % on perhosia. (Callaghan ym., 2004a) Perhoset ovat hyviä malliorganismeja muun muassa ilmastonmuutoksen vaikutuksia tarkastellessa, koska ne ovat monimuotoinen ja hyvin tunnettu ryhmä, lajien välillä ja sisällä on paljon fenologista vaihtelua, muutoksia lajeissa on jo havaittu ilmastonmuutoksen seurauksena, ja ne ovat tärkeitä primäärikuluttajia, sekä ravintoa muille eliöille (Altermatt, 2010; Fox, 2013).

Monet arktisten alueiden eläinlajit ovat generalisteja (Callaghan ym., 2004a). Eri eläinlajien toiminta muokkaa pohjoista kasvillisuutta: esimerkiksi tunturimittarien (*Epirrita autumnata* Borkhausen) kymmenen vuoden välein tapahtuvat massaesiintymät sekä porojen laidunnus ovat muuttaneet metsää tundraksi erityisesti Suomessa. Perhosten massaesiintymät jättävät tunturikoivut (*Betula pubescens ssp czerepanovii* (N. I. Orlova) Hämet-Ahti) lehdettömiksi, ja koivikoilla kestää noin 70 vuotta tuhoista palautumiseen (Callaghan ym., 2004b).

Kasvukausi on hyvin lyhyt arktisilla alueilla, minkä vuoksi myös ekosysteemien perustuotanto on alhaista (Callaghan ym., 2011; Strathdee & Bale, 1998). Alhainen lämpötila ja lyhyt kasvukausi ovat tärkeimpiä monien lajien levinneisyyttä ja menestystä rajoittavia tekijöitä pohjoisessa (Phoenix & Lee, 2004). Lajirikkaus on suhteellisen alhaista pohjoisissa ekosysteemeissä, mutta yksittäisillä paikallisilla alueilla se voi olla yhtäläistä borealisen ja lauhkean vyöhykkeen lajirikkauden kanssa. Tyypillistä on, että lajirikkaus vähenee gradienttina

kohti korkeampia leveysasteita ja alhaisempia lämpötiloja. Pohjoisessa yleiset lajit ovat usein laajalle levinneitä, ja niillä on usein korkea plastisuus, ja ne kykenevät elämään monenlaisissa elinympäristöissä. Näillä lajeilla voi olla myös suuria vaikutuksia ekosysteemien prosesseihin (Callaghan ym., 2004a).

Talvella arktisilla alueilla kasvillisuus on pitkälti peittynyt ja albedo, eli auringon säteilyn heijastuminen maasta, on suurta lumipeitteen vuoksi. Kasvillisuus vaikuttaa paikallisesti lämpötiloihin ja lumen määrään. Pensaikko lisää lumen syvyyttä, ja heikentää esimerkiksi tuulen vaikutusta. Maaperä on jopa 2 °C lämpimämpää pensaikkojen alueella (Callaghan ym., 2011). Metsäisillä alueilla puiden latvusto tasoittaa vaihtelua lumen määrässä, lämpötilassa sekä lumipeitteen sulamisessa keväällä (Keret ym., 2020).

## **1.2. Pohjoiset elinympäristöt lajien levinneisyyden rajoina**

Useat ympäristötekijät, kaikista merkittävimpänä ilmasto, rajoittavat hyönteisten menestystä pohjoisessa, ja arktiset alueet ovatkin monien lajien levinneisyyden pohjoisrajoja (Callaghan ym., 2004a; Danks, 2004; Strathdee & Bale, 1998; Virtanen & Neuvonen, 1999a). Ympärivuotinen alhainen lämpötila, talven kovat pakkaset ja lyhyt kasvukausi rajoittavat hyönteisten levinneisyyttä, kehitystä ja lisääntymistä sekä heikentävät talvesta selviytymistä (Strathdee & Bale, 1998). Alhainen lämpötila voi esimerkiksi jättää yöperhoset pienikokoisemmiksi, mikä heikentää niiden lisääntymismenestystä. Generalistit hyötyvät ilmastonmuutoksesta eniten, mutta lajit eivät voi levitä pysyvästi isäntäkasviensa levinneisyyden ulkopuolelle. Perhoslajit, joiden elinkierto kestää vain yhden vuoden, ovat herkimpiä kasvukauden rajoitteille (Keret ym., 2020). Levinneisyyden lisäksi perhosten lajirikkaus korreloi voimakkaasti ilmastotekijöiden mukaan, ja lajirikkaus onkin suurempaa etelässä, perhosille suotuisammissa lämpötiloissa. Esimerkiksi Pohjois-Suomessa makroperhoslajeja, huomioiden sekä päivä- että yöperhoset, esiintyy vain viidesosa Lounais-Suomeen verrattuna (Virtanen & Neuvonen, 1999a). Lisäksi populaatioiden tiheydet ovat usein alhaisia (Strathdee & Bale, 1998). Myös monien perhosten ravintokasvit vähenevät kohti pohjoista, mutta lajien vähenemisen gradientti on perhosilla merkittävästi jyrkempi kuin kasveilla (Virtanen & Neuvonen, 1999b).

Uusien hyönteislajien kolonisaatio sekä lajiutuminen ovat erittäin hitaita prosesseja pohjoisessa, ja sukuuutot ovat yleisiä. Populaatioiden vakiintuminen ja kasvaminen on vaikeaa ankarissa olosuhteissa, muun muassa alhaisen lämpötilan, valon määrän ja kasvien lajirikkauden vuoksi. Esimerkiksi joillakin hyönteislajeilla elinkierron vaiheiden alkaminen vaatii tarpeeksi auringonvaloa, mikä ei ole pohjoisessa riittävää. Monien kasvien levinneisyysalueen pohjoisraja ei ulotu tarpeeksi kauas, mikä estää erityisesti spesialistihyönteisten kolonisaation. Sopeutuminen vaihtoehtoiseen isäntäkasvilajiin ei usein ole mahdollista (Strathdee & Bale, 1998).

### 1.3. Ympäristön ja ruumiin koon suhde pohjoisilla hyönteisillä

Ruumiin koko on merkittävä ominaisuus, jolla voi olla vaikutusta niin yksilön elinkierto-ominaisuuksiin, kuten elinalueen laajuuteen ja moniruokaisuuteen, kuin populaatiotason ominaisuuksiin, kuten populaation tiheyteen. Ruohovartisia kasveja ja pensaita ravintonaan käyttävät lajit ovat pienempiä kuin puuvartisilla kasveilla ruokailevat lajit (Lindström ym., 1994). Pienet ruohovartisia ja pensaita ravintonaan käyttävät perhoslajit ovat usein specialisteja ravintonsa suhteen. Puissa ruokailevat lajit ovat puolestaan yleensä moniruokaisia (Lindström ym., 1994). Arktiset selkärangattomat ovat usein eteläisiä pienempiä: esimerkiksi perhosilla on havaittu negatiivinen suhde leveysasteiden ja ruumiin koon välillä. Lajeilla, joiden levinneisyysalue on laaja, pohjoisten populaatioiden yksilöt ovat pienempiä. Erityisesti naaraiden siivettämyys lisääntyy myös pohjoista kohden. Kylmien alueiden hyönteisillä elinkierrot ovat usein pidempiä. Yksilöt kehittyvät useiden vuosien aikana, ja sukupolvia on vuoden aikana vähemmän kuin etelässä. Pohjoiset lajit ovat kylmänkestäviä, ja niiden aineenvaihdunta on tehokasta "normaalilämpötiloissa", minkä ansiosta ne kykenevät vastaamaan kohonneeseen lämpötilaan nopeasti (Strathdee & Bale, 1998).

Populaation tiheyden ollessa suuri, perhosyksilöt jäävät usein pienemmiksi. Naaraat ovat yleensä koiraita suurempia kaikissa elinkierron vaiheissa, sillä niiden kasvu-aika on pidempi ja niiden rasva- ja vesipitoisuus on suurempi (Scriber & Slansky, 1981). Tunturimittarilla vuonna 2004 toteutetussa tutkimuksessa on havaittu, että yksilöiden koko ja hedelmällisyys pienenee populaatioon ja tiheyden kasvaessa. Tämä on seurausta muun muassa ravintokasvin laadun heikkenemisestä vasteena lisääntyneeseen herbivoriaan, sekä toukkien reagoimisesta korkeaan tiheyteen. Toisin kuin tunturimittarilla, monilla lajeilla on havaittu lisääntymismenestyksen ja ruumiin koon kasvua populaatiokoon kanssa. Tämä on kuitenkin seurausta ympäristötekijöiden vaikutuksesta (Klemola ym., 2004). Hyönteislajit, joiden levinneisyys on laaja, ovat yleensä pienikokoisia, niiden paikallispopulaatiot runsaita ja niiden populaatiokoko saattaa vaihdella enemmän kuin pienten levinneisyysalueiden lajeilla (Gaston & Lawton, 1988).

Laajalle levinneet lajit ovat todennäköisimmin tehokkaita ja joustavia eri resurssien hyödyntämisessä. Runsaat lajit ovat usein pieniä, sillä ne käyttävät vähemmän rajallisia resursseja. Pienemmät lajit ovat myös alttiimpia populaatiokoon vaihteluihin. Pienten lajien populaatiokoon kasvu on suurta nopeampaa, ja niiden sukupuuttoalttius uusia alueita kolonisoidessa ei ole niin suuri (Gaston & Lawton, 1988).

#### 1.4. Pohjoisten hyönteisten ekologiset- ja elinkierto-ominaisuudet

Lajien ekologiset ja elinkierto-ominaisuudet vaikuttavat niiden sukupuuttoriskiin (Fox, 2013). Myös ilmastonmuutos vaikuttaa lajien kykyyn selvitä mahdollisista häiriötekijöistä (Mattila ym., 2006). Yksilömäärien vähenemiselle ja sukupuuttoriskille altistavia tekijöitä ovat muun muassa, suuri ruumiin koko, pieni maantieteellinen levinneisyysalue, alhainen populaatiokoko ja -tiheys, erikoistuminen ravinnon suhteen, lyhyt lentoaika ja toukkana talvehtiminen. Sukupuuton riski on usein samankaltainen läheistä sukua olevilla, tai ekologisesti samankaltaisilla lajeilla. (Gaston & Lawton, 1988; Mattila ym., 2006). Esimerkiksi mittarit ja yökköset, joiden lentoaika on lyhyt, ovat vähentyneet eniten, ja niiden sukupuuttoriski on suuri. Yöperhosten talvehtimisvaihe on levinneisyyden muutosta parhaiten ennustava elinkierto-ominaisuus. Koska levinneisyys on tärkein mittareiden sukupuuttoriskin määrittäjä, syntyy korrelaatio isäntäkasvin levinneisyyden ja sukupuuttoriskin kanssa. Elinalueensa pohjoisrajoilla elävät lajit lentävät suhteellisen lyhyen ajan, ja niiden levinneisyyskyky ei ole kovin hyvä (Mattila ym., 2008).

Talvehtimismuodot muuttuvat leveysasteiden mukana (Virtanen & Neuvonen, 1999b). Pohjoisessa suuri osa yöperhosista talvehtii toukkana, muut muodot ovat yleisempiä etelämmässä. Puilla ruokailevat lajit usein myös talvehtivat puissa, ja esimerkiksi munina talvehtivat lajit, kuten tunturimittari, ovat alttiita, sillä lumipeite ei suojaa niitä. Tämän vuoksi ne hyötyvät lämpenemisestä eniten. Munina talvehtivat lajit usein myös lentävät myöhemmin kesällä, joten ne hyötyvät pidentyneestä kasvukaudesta. Kotelona ja toukkana talvehtivat lajit kärsivät eristävän lumipeitteen vähenemisestä (Mattila ym., 2008).

Perhosten fenologiset ja elinkierto-ominaisuudet ovat voimakkaasti kytköksissä ympäristötekijöihin ja ekologiin vuorovaikutuksiin, mistä seuraa vaihtelua ominaisuuksissa eri populaatioiden ja lajien välillä (Altermatt, 2010). Muun muassa ravintokasvit vaikuttavat levinneisyyteen perhosten elinkierto-ominaisuuksien kautta, sillä niiden elinkierto-ominaisuudet liittyvät ravintokasvien ominaisuuksiin, kuten niiden rakenteeseen, runsauteen ja kausittaiseen saatavuuteen. Kotelona, munana tai aikuisena talvehtivat lajit käyttävät ravintokasveinaan useimmiten puita, mutta kotelona talvehtivat lajit hyödyntävät myös yksivuotisia ruohovartisia kasveja. Monivuotisia ruohokasveja ja pensaita hyödyntävät puolestaan useimmiten toukkana talvehtivat lajit. Monivuotisten kasvien hyödyntäminen on yleisempää Suomen pohjoisemmissa osissa, missä monet lajit hyödyntävät erityisesti *Vaccinium* -suvun kasveja (Virtanen & Neuvonen, 1999b).

Kasvillisuuden monipuolinen rakenne lisää kasvinsyöjähyönteisten lajiversiteettiä, sillä runsaampi ravintokasvien määrä ja lajisto, sekä kasvien monimuotoiset fysiologiset ominaisuudet, tarjoavat ekologisia lokeroita suuremmalle määrälle hyönteislajeja. Esimerkiksi lehtipuilla kasvinsyöjähyönteisten, erityisesti perhosten lajirikkaus on usein runsasta jo aikaisin



kasvukaudella (Lawton, 1983). Arktisten perhoslajien levinneisyys on usein hyvin paikallista, ja keskittyy esimerkiksi niiden isäntäkasvien kasvupaikoille (Kozlov & Kullberg, 2008).

Spesialistiloiset saattavat aiheuttaa isäntähyönteisten populaatiokokojen syklisyyttä. Tunturimittarissa loisivat lajit ovat pääosin spesialisteja, sillä vaihtoehtoisia isäntälajeja on pohjoisilla alueilla vähän. Tunturimittarin massaesiintymien jälkeisen populaatiokoon romahtamisen myötä myös loisten populaatiokoot romahtavat. Tunturimittaria saalistavat pedot ovat puolestaan generalisteja, ja ne eivät aiheuta populaatiokokojen syklisyyttä, mutta voivat ainakin paikoitellen estää massaesiintymien syntyä (Virtanen & Neuvonen, 1999c).

### **1.5. Yöperhosten rooli ja hyönteisherbivoria pohjoisissa ekosysteemeissä**

Eliöiden ominaisuudet ja monet ympäristötekijät vaikuttavat ravinnon saatavuuteen, laatuun ja hyödynnettävyyteen, ja näin ollen myös hyönteisten kasvuun ja biomassaan. Jotkin hyönteislajit kykenevät esimerkiksi kasvamaan nopeasti, kun lämpötila on tarpeeksi korkea ja ravinto on laadukasta, minkä avulla ne pystyvät ohittamaan herkät elinkierron vaiheet nopeasti. Sukupolvien määrä vuoden aikana voi myös kasvaa sopivissa olosuhteissa ja ravinnon ollessa hyvälaatuista (Scriber & Slansky, 1981). Lisäksi isäntäkasvin laatu voi vaikuttaa yöperhosten lisääntymismenestykseen, jolloin ravinnon ollessa heikkolaatuista myös jälkeläistuotanto on heikompaa. Monet lehtiä ravinnokseen käyttävät perhostoukat, esimerkiksi hallamittari (*Operophtera brumata* L.), kykenevät kompensoimaan ravinnon heikkoa laatua pidemmällä kehitysajalla. On todennäköistä, että hallamittarin levinneisyysalue laajenee kauemmas pohjoiseen, mikäli talvilämpötilat eivät rajoita sitä, sillä sen kyky sopeutua isäntäkasvien eroavaisuuksiin on suuri (Ammunét ym., 2011; Tanhuanpää ym., 2001).

Hyönteisherbivoria on merkittävä tekijä pohjoisten ekosysteemien toiminnassa. Erityisesti joidenkin yöperhoslajien, kuten tunturimittarin, massaesiintymillä on pitkäaikaisia vaikutuksia kasvillisuuteen. Tunturimittari on ekologisesti merkittävä yöperhoslaji pohjoisessa, missä sillä havaitaan noin kymmenen vuoden välein syklisiä massaesiintymiä, joiden aikana ne aiheuttavat laajoja tuhoja tunturikoivuille syömällä niiden lehtiä. Massaesiintymiä ei kuitenkaan havaita kaikissa tunturimittarin levinneisyysalueen osissa vaan ainoastaan pohjoisessa. Vastaava ilmiö on havaittu myös muilla lajeilla (Callaghan ym. 2004b; Virtanen & Neuvonen, 1999c). Populaatioiden syklisyyttä esiintyy myös muilla pohjoisilla yöperhoslajeilla, kuten metsäpohjanmittarilla (*Entephria caesiata* Denis & Schiffermüller) ja mustikkamittarilla (*Eulithis populata* L.) (Lawton, 1983; Tanhuanpää ym., 2001).

Syklisesti esiintyvien hyönteislajien populaatiodynamiikkaa säätelevät ympäristön negatiiviset palautejärjestelmät. Nämä tekijät ovat bioottisia, kuten petojen, loisten ja sairauksien vaikutukset

sekä ravintokasvien laatu. Abioottiset tekijät puolestaan voivat synkronoida massaesiintymiä laajoilla maantieteellisillä alueilla (Virtanen & Neuvonen, 1999c). Tunnetuimpia näistä tekijöistä ovat tunturimittareiden sykliset populaatiokoot, mihin vaikuttaa tunturikoivun perhosten massaesiintymien indusoima kemiallinen puolustus, mikä tekee lehdistä huonolaatuisempaa ravintoa. Lisäksi edellisen kesän alhaisen lämpötilan on havaittu olevan massaesiintymien takana (Itämies ym., 1993). Ilmaston lämpeneminen voi lisätä kasvien tuotantoa ja biomassaa, mikä voi aiheuttaa muutoksia hyönteisten ja kasvien dynamiikkaan. Lisäksi lisääntynyt UV-B -säteily muuttaa myös koivunlehtien rakennetta ja kemialla, mikä tekee niistä heikompilaatuista ravintoa perhostoukille. Ilmastonmuutoksen kokonaisvaikutuksia hyönteisten ja ravintokasvien suhteeseen ei vielä tunneta (Callaghan ym., 2004b; Virtanen & Neuvonen, 1999c).

## **1.6. Yöperhosten sopeutuminen arktisiin olosuhteisiin**

Koska arktiset elinympäristöt ovat olosuhteiltaan erittäin ankaria, vain hyvin sopeutuneet lajit kykenevät selviytymään. Lajeille kehittyneet sopeutumukset ovat usein samankaltaisia läheisten lajien ja ryhmien kesken (Danks, 2004).

Oikeanlainen elinympäristön valinta on oleellista talvesta selviytymiseksi. Hyönteisten on valittava talvehtimispaikka, jossa ne ovat suojassa pakkaselta, mutta mikä mahdollistaa niille mahdollisimman pitkän suotuisan kauden. Paksu lumikerros eristää tehokkaasti pakkaselta, mutta ohut lumikerros sulaa nopeammin, tarjoten pidemmän kasvukauden (Strathdee & Bale, 1998).

Sopeutumia arktisiin olosuhteisiin on kehittynyt useita. Koska monien selkärangattomien aktiivisuus on lämpötilariippuvaista, useat niistä ovat tummapigmenttisiä ja karvaisia lämmönoton maksimoimiseksi, ja lisäksi ne lämmittelevät auringonvalossa. Ne ovat kylmänkestäviä, ja monilla lajeilla on siivettäviä muotoja. Lyhyt kasvukausi vähentää sukupolvien vuotuista määrää ja yksilöiden ruumiin kokoa, ja lajien elinkierrot ovat yksinkertaisia ja voivat kestää kauan. Kasvukaudella yksilöt kykenevät hyödyntämään lyhyen lämpimän ajan tehokkaasti ja kasvamaan nopeasti (Callaghan ym., 2004a; Danks, 2004; Strathdee & Bale, 1998). Lyhyt kesä ei välttämättä mahdollista yksilönkehityksen loppuun saattamista, joten pohjoisimmat lajit talvehtivat usein kahdesti toukkana. Kotelona talvehtiminen on yleistä, koska ne kestävät kylmyyttä varsin hyvin. Pohjoisen kylmä talvi rajoittaa munina talvehtivien lajien levinneisyyttä sekä niiden massaesiintymiä, koska munina talvehtivat ovat tyypillisesti kasvien pinnalla, eikä eristävä lumipeite suojaa niitä pakkaselta. Toukkien ruokailu monivuotisilla kasveilla on pohjoisessa yleistä (Virtanen & Neuvonen, 1999b).

### **1.6.1. Sopeutuminen alhaisiin lämpötiloihin: talvehtiminen ja lyhyen kesän hyödyntäminen**

Pohjoisen kylmät lämpötilat ovat monen hyönteislajin levinneisyyden rajoittavana tekijänä. Esimerkiksi tunturimittarin koivun oksilla talvehtivat munat eivät kestä  $-36^{\circ}\text{C}$  kylmempää lämpötiloja, ja ne kuolevat pääosin alhaisten talvilämpötilojen vuoksi (Callaghan ym., 2004b; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Talvesta selviytymiseen vaikuttavat muun muassa pakkasen määrä ja kesto sekä lumipeitteen kesto ja syvyys. Hyönteiset ovat vaihtolämpöisiä eläimiä, joten ne ovat hyvin alttiita ympäristönsä lämpötilalle jopa mikroilmaston mittakaavassa, minkä vuoksi arktisten alueiden hyönteisille on kehittynyt sopeutumia alhaisista lämpötiloista selviämiseksi (Bale & Hayward, 2010; Danks, 2004; Sinclair ym., 2003). Näitä ovat esimerkiksi oikeanlaisen talvehtimispaikan valinta, diapaussi ja kylmänkestävyys (Bale & Hayward, 2010; Danks, 2004; Sinclair ym., 2003).

Kylmänkestävyyskyky on erilainen eri lajeilla, mutta voi vaihdella paljon myös lajien sisällä. Esimerkiksi lajit, joiden maantieteellinen levinneisyys on laaja, kylmänkestävyys voi vaihdella levinneisyysalueen eri osissa. Joidenkin kylmien ja lauhkeiden alueiden hyönteislajien on mahdollista selviytyä lämpimämmissä olosuhteissa fenotyypin plastisuuden ansiosta, mikä voi edistää niiden menestystä ilmaston lämmitessä (Bale & Hayward, 2010; Danks, 2004; Sinclair ym., 2003).

Jäätymistä sietävät hyönteiset (freeze tolerant) syntetisoivat syksyllä yhdisteitä, joiden avulla jääkiteet muodostuvat solujen ulkopuolelle turvallisiin kudoksiin. Jäätymistä välttävillä lajeilla (freeze avoidant) ruumiinnesteet pysyvät nestemäisenä tavallista alhaisemmissa lämpötiloissa, esimerkiksi poistamalla ruumiista mahdolliset jäätymisytimet, kuten tyhjentämällä ruuansulatuskanavan sisällön täysin (Bale & Hayward, 2010; Sinclair ym., 2003). Monet hyönteiset selviävät ankarasta talvesta diapaussin avulla. Diapaussi on lepotila, joka on geneettinen kehityksellinen vaste vuodenaikojen muutokseen ja epäsuotuisiin olosuhteisiin, ja se esiintyy suurimmalla osalla korkeiden leveysasteiden hyönteislajeista. Selviytymisen mahdollistamisen lisäksi diapaussin avulla hyönteiset voivat ajoittaa kehityksen sellaiseen ajankohtaan, jolloin ympäristöolosuhteet ovat niille suotuisat, ja saman lajin yksilöt voivat kehittyä samanaikaisesti. Lauhkealla ja polaarilla vyöhykkeellä diapaussin alun indusoiva ympäristövihje on yleensä päivän pituus, mikä on indikaattorina evolutiivisesti vakaa, mutta ilmastonmuutos saattaa muuttaa sen merkittävyyttä (Bale & Hayward, 2010; Danks, 2004).

Perhoslajien talvehtimisvaiheella on myös merkittävä vaikutus niiden kykyyn levittäytyä ja selviytyä pohjoisessa. Levittäytymiskykyyn vaikuttavat merkittävästi perhoslajien elinkierto-ominaisuudet: missä elinkierron vaiheessa ne talvehtivat tai minkälaisia kasveja ne käyttävät ravinnokseen. Perhosten elinkierto-ominaisuudet ovat kytköksissä ravintokasvien

ominaisuuksiin, kuten niiden runsauteen, kausittaiseen saatavuuteen ja niistä saatavan ravinnon laatuun. Munina talvehtivien lajien levinneisyys keskittyy Suomen eteläisempiin osiin, sillä erittäin kylmä talvi heikentää munien selviytymistä, ja näin ollen rajoittaa lajien pohjoista levinneisyyttä ja mahdollisia massaesiintymiä. Aikuisena talvehtivia lajeja on vähän, ja niiden levinneisyys on rajoittunut etelään, sillä niiden kylmänsietokyky on heikoin kaikista talvehtimismuodoista. Toukkana talvehtiminen on yleistä koko Suomessa, mutta sen yleistyy selkeästi pohjoisemmilla levinneisyysalueilla. Talvehtivat toukat ovat maan alla ja lumipeitteen suojaassa, missä lämpötilat ovat merkittävästi korkeammat ja tasaisemmat kuin lumipeitteen pinnalla. Monet pohjoisimman Suomen perhoset talvehtivat toukkana kahden tai useamman talven ajan, ensimmäisen kerran pienenä, ja toisen täysikokoisena toukkana. Koska pohjoisen kesät ovat lyhyitä ja esimerkiksi sääolosuhteidensa puolesta erittäin vaihtelevia, toukat voivat odottaa suotuisampia kasvuolosuhteita talvehtimalla useampana vuonna. Kotelona talvehtimista esiintyy koko Suomessa, mutta se on yleisintä eteläisemmissä osissa. Pohjoisessa kotelona talvehtivat perhoslajit kuuluvat mittariperhosiin (Geometridae), jotka hyödyntävät talvehtimisessä myös lumipeitteen suojaavaa vaikutusta (Danks, 2004; Virtanen & Neuvonen, 1999b).

Myös pohjoisen viileä kesä ja lyhyt kasvukausi vaativat hyönteisiltä erilaisia sopeutumia. Useiden arktisten hyönteislajien aktiivisuuskyynykset ovat varsin alhaisissa lämpötiloissa, minkä ansiosta ne kykenevät liikkumaan aikaisin keväällä ja myöhään syksyllä pidentäen niille suotuisaa aikaa vuodesta. Monet hyönteiset ovat aktiivisia silloin kun lämpötila on niille tarpeeksi korkea. Esimerkiksi yöperhoset ovat aktiivisia myös päiväsaikaan. Monien lajien naaraat, kuten tunturimittarit, kykenevät kehittämään munat ilman aikuisvaiheen ruokailua, mikä parantaa lisääntymismenestystä arvaamattomassa elinympäristössä. Talvehtimismuodon avulla perhoset voivat varmistaa, että uusi sukupolvi ehtii kehittyä kasvukauden aikana. Ekologisia adaptaatioita lyhyeen kesään ovat esimerkiksi elinalueiden valinta: hyönteiset voivat suosia aikaisin keväällä lumen alta sulavia talvehtimispaikkoja, sekä kesäisin mahdollisimman aurinkoisia, lämpimiä ja suojaisia alueita. Kehityksen synkronointi isäntäkasvin lehtien avautumisen kanssa maksimoi hyönteisten lisääntymismenestyksen (Danks, 2004).

## **1.7. Ilmastonmuutoksen voimakas vaikutus arktisilla alueilla ja ekosysteemeissä**

Ilmastonmuutoksella, mihin lukeutuvat muun muassa muutokset lämpötilassa, sadannassa, ja uv-säteilyn määrässä, on monimuotoisia vaikutuksia pohjoisille alueille sekä niiden ekosysteemeille ja eliöyhteisöille. Suuria muutoksia arktisilla alueilla on havaittu jo 1980 -luvun puolivälistä lähtien (Box ym., 2019). Muutoksia esiintyy muun muassa lumen ja jään määrässä ja ajallisessa

kestossa, kasvukauden pituudessa sekä eliöyhteisöissä ja ekologisissa vuorovaikutuksissa (Post ym., 2009).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat voimakkaimmillaan korkeilla leveysasteilla, minkä seurauksena arktisten hyönteisten biologinen vaste ympäristönmuutoksiin on erittäin voimakas (Phoenix & Lee, 2004; Strathdee & Bale, 1998). Arktisilla alueilla ilmaston lämpeneminen on ollut jopa 2 - 3 kertaa voimakkaampaa kuin muualla maapallolla. Havaittuja muutoksia ovat muun muassa lumipeitteen syvyyden ja keston vähentyminen ja sadannan lisääntyminen erityisesti talven aikana (Post ym., 2009). Vasteet ilmastonmuutokseen voivat vaihdella eri arktisilla alueilla, ja paikoitellen voi ilmentyä myös ilmaston viilenemistä (Phoenix & Lee, 2004).

Ilmastonmuutos sekä lisääntynyt UV-säteily vaikuttavat yksilötasosta kokonaisuksiin ekosysteemeihin ja jopa kasvillisuusvyöhykkeisiin. Ekosysteemien toiminta voi häiriintyä ympäristönmuutoksen myötä. Merkittävimpiä vaikutuksia ovat esimerkiksi lajien levinneisyysalueiden ja runsaussuhteiden muutokset, lajien ja trofiatasojen välisten vuorovaikutusten muuttuminen, sekä muutokset kasvillisuuden rakenteessa ja eliöyhteisöjen kokoonpanossa. Ilmastonmuutoksen ennustetaan vaikuttavan erityisesti ekosysteemien perustuotantoon, kestävyteen häiriötekijöitä kohtaan sekä paikalliseen ja alueelliseen ilmastoon. Perustuotannon ennustetaan lisääntyvän ja kasvien respiraation kasvavan, minkä seurauksena arktiset alueet vihertyvät (Box ym., 2019; Callaghan ym., 2011; Phoenix & Lee, 2004; Post ym., 2009). Kasviyhteisöjen rakenne on muuttunut ilmastonmuutoksen myötä. Pensaikkojen biomassa tundralla on lisääntynyt, millä on paikallinen vaikutus ilman lämpötilaan, maaperän kosteuteen, lumipeitteeseen sekä paikallisiin kasvinsyöjähyönteisten populaatioihin (Box ym., 2019). Arktisille alueille ja niiden eliöille tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset ovat riippuvaisia siitä, kykenevätkö eliöt vastaamaan ympäristönsä muutoksiin ja uusien lajien tuomaan kilpailuun (Callaghan ym., 2004a; Callaghan ym., 2011). Kaikki ilmastonmuutoksen vaikutukset eivät kuitenkaan ole helposti havaittavissa, ja niiden merkitystä voi olla vaikea arvioida (Post ym., 2009).

### **1.7.1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset yöperhosiin ja muihin hyönteisiin**

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia perhosiin ja muihin hyönteisiin voi olla vaikea arvioida tai ennustaa, sillä muun muassa perhosten vaihtelevat elinkierto-ominaisuudet, sekä isäntäkasvien laatu ja fenologia mutkistavat asiaa. Nämä tekijät vaikuttavat myös esimerkiksi muutosten voimakkuuteen ja tyyppiin. Voimakkain perhosiin vaikuttava ympäristötekijä on lämpötila, ja sen vaikutus on suurin myöhäisessä toukkavaiheessa sekä kotelovaiheessa. Kohonnut lämpötila voi muun muassa nopeuttaa yksilönkehitystä sekä muuttaa aikuisvaiheen ajoitusta (Altermatt, 2010; Bale & Hayward, 2010; Pitts ym., 2005; Sparks ym., 2006). Biologisten vasteiden seuraukset

voivat riippua vuodenajasta: esimerkiksi kevään korkeammat lämpötilat voivat aiheuttaa hyönteistoukkien kuoriutumisen ja ravintokasvien lehtien puhkeamisen ajallisen epäsuhtaisuuden, mikä heikentää toukkien menestystä (Callaghan ym., 2004b). Toisaalta joidenkin hyönteislajien populaatiodynamiikka voi muuttua, ja joidenkin lajien massaesiintymien odotetaan lisääntyvän pohjoisessa. Perhosten loiset saattavat myös lisääntyä ja olla aktiivisempia lämpenemisen myötä, mikä voi rajoittaa populaatioiden kasvua. Tällä voi olla merkittäviä vaikutuksia pohjoisiin ekosysteemeihin, sillä kasvillisuuden toipuminen hyönteisherbivorian jäljiltä voi kestää pitkään (Callaghan ym., 2004b). Fenologian muutoksilla voi olla merkittäviä ekologisia vaikutuksia, sillä esimerkiksi yöperhosten toukat ovat tärkeitä kasvinsyöjähyönteisiä, ja lisäksi ravintoa linnuille. Ekologisten muutosten arviointi voi kuitenkin olla vaikeaa, sillä fenologisia muutoksia voi tapahtua samanaikaisesti, ja niiden vaikutukset voivat olla päinvastaisia. Monet ennusteet ilmastonmuutoksen vaikutuksista perustuvat pääosin suppeaan määrään kokeita niin laboratoriossa kuin luonnossa (Altermatt, 2010; Bale & Hayward, 2010).

### **1.7.2. Talven aikaisten muutosten vaikutus**

Ilmaston lämpeneminen ja muut muutokset ovat havaitusti erityisen voimakkaita talviaikana (Box ym., 2019; Phoenix & Lee, 2004). Box ym. vuonna 2019 julkaistussa tutkimuksessa vertailtiin erilaisia ilmastonmuutoksesta kertovia indikaattoreita, kuten ilman lämpötilan ja sadannan muutoksia vuosien 1971 – 2017 aikana. Ilman lämpötila oli noussut vuosikymmenien aikana noin +2,7 °C vuotuisella tasolla. Kylmänä vuodenaikana ilman lämpötilan nousu oli huomattavampaa, keskimäärin +3,1 °C. Lämpimänä vuodenaikana lämpötilan nousu oli puolestaan +1,8 °C. Sadannan määrä on kasvanut, erityisesti talviaikaan, mikä tulee jatkumaan myös tulevaisuudessa. Kohonneet lämpötilat viivästyttävät merijään muodostumista talvella, ja merestä kulkeutuva kosteus nostaa syksyn ja talven lämpötiloja, erityisesti alueilla, jotka ovat lähellä merenrantaa. Talven aikainen lämpeneminen voi johtaa kasvien vaurioitumiseen, mikä voi heikentää niiden tuottavuutta kasvukaudella (Box ym., 2019; Phoenix & Lee, 2004; Post ym., 2009).

Pohjoisilla alueilla talven yli pysyvä lumipeite eristää talvehtivia hyönteisiä kylmältä, sekä tarjoaa lämpötilaltaan tasaisen mikroilmaston. Korkeammat talvilämpötilat voivat lisätä hyönteisten kuolleisuutta, sillä lumipeite voi olla ohuempi ja sen kesto lyhyempi, jolloin talvehtivat hyönteiset ovat alttiita sateelle, kylmyydelle sekä useille sulamis- ja jäätymissykleille. Lämpenemisen seurauksena voidaan ennustaa talven sadannan tapahtuvan enenevässä määrin vesisateena. Koska arktiset eliöt ovat sopeutuneet käyttämään lyhyen lämpimän ajan tehokkaasti, ne voivat aktivoitua liian aikaisin lyhyen lämpimän jakson aikana. Pidempään kestävä lumeton aika voi myös osaltaan muuttaa paikallisen eliöyhteisön rakennetta (Bale & Hayward, 2010; Box ym., 2019; Phoenix & Lee, 2004; Sinclair ym., 2003).

Ilmastonmuutoksen aiheuttama talvilämpötilojen nousu saattaa myös parantaa hyönteisten selviytymistä. Talven aikainen kuolleisuus on merkittävä perhosten tiheyttä säätelevä tekijä. On havaittu, että talven korkeampi minimilämpötila korreloi positiivisesti populaatioiden kasvunopeuden kanssa (Bale & Hayward, 2010; Virtanen & Neuvonen, 1999c). Erityisesti munina tai aikuisina talvehtivat lajit hyötyvät lämpimämmistä talvista. Kotelona talvehtivat lajit saattavat puolestaan tuottaa useampia sukupolvia vuodessa lämpenemisen seurauksena. Pohjoisten elinympäristöjen alkuperäiset lajit saattavat kuitenkin vähentyä niiden elinympäristöjen pienentyessä lämpenemisen myötä (Pitts ym., 2005; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Talvien lämpenemisistä voivat hyötyä myös erittäin kylmänkestävät lajit, sillä ohuempi lumipeite sulaa nopeammin ja tarjoaa näin pidemmän kasvukauden hyönteisten ravintokasveille. Pidempi kasvukausi voi tarjota lajeille mahdollisuuden esimerkiksi aikaisempaan ilmaantumiseen, pidempään lentoaikaan ja useampien sukupolvien tuottamiseen, mikäli lajien elinkierto-ominaisuudet mahdollistavat muuttuneiden olosuhteiden hyödyntämisen (Bale & Hayward, 2010; Post ym., 2009).

### **1.7.3. Muutokset hyönteisten levinneisyydessä ja runsaudessa**

Ilmastonmuutos on muuttanut maailmanlaajuisesti monien lajien levinneisyysalueita, runsauksia, lajitojen kokoonpanoja ja lajien fenologioita. Myös haitalliset vieraslajit ovat lisääntyneet (Fox, 2013; Sinclair ym., 2003; Woiod, 1997).

Arktiset alueet ovat monien kasvien ja eläinten levinneisyyksien raja-alueita, ja eri funktionaalisten ryhmien kasveja on löydettävissä harvakseltaan pääesiintymisalueensa pohjoispuolella. Ilmastonmuutoksen myötä useiden lajien levinneisyysalueet, ja jopa kasvillisuusvyöhykkeiden rajat ovat kuitenkin laajentuneet kohti pohjoista (Box ym., 2019; W. E. Bradshaw & Holzapfel, 2006; Callaghan ym., 2004b) Lajien sietokyvyn rajoissa tapahtuva lämpeneminen voi lisätä lajien mahdollisuuksia menestyä muun muassa laajentamalla levinneisyysalueita. Vaikka eteläisemmät lajit voivat levittäytyä kohti pohjoista, ne eivät välttämättä kykene perustamaan pysyviä populaatioita, sillä talvikaudet ovat lyhenemisistä huolimatta silti varsin kylmiä, ja uudella alueella ei välttämättä ole saatavilla sopivia isäntäkasveja. Levinneisyysalueet voivat siirtyä myös korkeussuunnassa. Paikallisille ja uusille lajeille sopivat elinympäristöt voivat myös muuttua kyseisille lajeille sopimattomiksi, ja esimerkiksi hyönteisten synkronia isäntäkasvien kanssa saattaa ajoittua väärin (Bale & Hayward, 2010; Danks, 2004; Fox, 2013; Phoenix & Lee, 2004; Pitts ym., 2005; Woiod, 1997). Ilmastonmuutokselle herkimpiä lajeja ovat habitaattispesialistit ja lajit, joiden dispersiokyky on heikko. Pohjoisten lajien elinalueet voivat pienentyä, ja Jäämeri rajoittaa niiden levinneisyyden pohjoista siirtymistä. Kesäkausien lämpenemisellä ja perhosten lajirikkaudella on havaittu

positiivinen korrelaatio (Phoenix & Lee, 2004; Post ym., 2009; Virtanen & Neuvonen, 1999b; Woiwod, 1997).

Ilmaston lämpeneminen on merkittävää erityisesti pohjoisille lajeille, jotka ovat sopeutuneet hyödyntämään lyhyenkin lämpimän ajan tehokkaasti. Hyönteisten vaste ilmastonmuutokseen on nopea, sillä niiden dispersaaliokyky on suuri, elinkierron vaiheet nopeita ja sukupolvien väli lyhyt. Hyönteiset ovat tärkeä osa arktisia ravintoverkkoja, joten lajiston ja runsauden muutoksella voi olla suuria vaikutuksia arktisiin ekosysteemeihin (Danks, 2004). Jo entuudestaan herkät ja yksinkertaiset pohjoiset ekosysteemit ja ravintoverkot voivat olla alttiimpia erilaisille stressi- ja häiriötekijöille, ja äärimmäiset biologiset ilmiöt, kuten tuohyönteisten massaesiintymät, voivat yleistyä (Box ym., 2019; Callaghan ym., 2011; Callaghan ym., 2004b; Phoenix & Lee, 2004; Post ym., 2009). Esimerkiksi halla- ja tunturimittarin levinneisyysalueet ovat muuttuneet lämpimämpien talvien myötä. Hallamittari on paikoitellen tullut dominantiksi lajiksi vanhoilla tunturimittarialueilla, ja tunturimittari on puolestaan levinnyt kauemmas kylmemmille alueille (Bale & Hayward, 2010). Lämpötilan vaikutuksesta pohjoisissa ekosysteemeissä tärkeän tunturimittarin menestykseen on tehty useita hypoteeseja. On esitetty, että tunturimittarin massaesiintymiä edistää alhainen kesän lämpötila. Toisten hypoteesien mukaan korkeat kesälämpötilat puolestaan edistävät toukkien kehitystä, mikä voi jopa kolminkertaistaa populaatiokoon kasvunopeuden. Toisaalta lämpimät olosuhteet mahdollistavat petojen ja loisten tehokkaamman toiminnan, mikä rajoittaa populaatiokoon kasvua. Ilmaston lämpenemisen aiheuttamaa populaatiokokojen kasvua ja massaesiintymien lisääntymistä ennustetaan tunturimittarin lisäksi myös heikommin kylmyyttä kestäväälle hallamittarille, jonka levinneisyysalue kasvaa pohjoiseen lämpenemisen myötä. Lisäksi ilmaston lämpeneminen saattaa lisätä tunturimittarin massaesiintymien tiheyttä, sekä alueellista laajuutta (Callaghan ym., 2004b; Virtanen & Neuvonen, 1999c).

Mattila ym. vuonna 2008 julkaisemassa tutkimuksessa havaittiin, että mittareiden levinneisyys on pienentynyt jopa 21,5 %, erityisesti jo valmiiksi uhanalaisilla lajeilla. Toukkien erikoistuminen ravintokasvien suhteen, lentoaika sekä talvehtimismuoto ovat levinneisyyden muutokseen vaikuttavia ominaisuuksia. Yksiruokaiset lajit ovat vähentyneet moniruokaisia enemmän. Ruokaisuudella ja ruumiin koolla havaittiin vuorovaikutus: yksiruokaiset suurikokoiset lajit ovat vähentyneet pieniä enemmän, kun taas moniruokaisilla mittareilla vaikutus oli päinvastainen. Munina talvehtivien lajien levinneisyys on pienentynyt vähemmän kuin toukkana tai aikuisena talvehtivat lajeilla. Lajit, joiden lentoaika on lyhyt ovat myös heikentyneet levinneisyydeltään eniten (Mattila ym., 2008). Perhosten lajidiversiteetti kasvaa isäntäkasvien diversiteetin kanssa, joten ilmastonmuutoksen myötä myös perhoslajeja saattaa levitä pohjoisille alueille uusien kasvilajien myötä (Kozlov & Kullberg, 2008). Britanniassa vuonna 2013 toteutetussa tutkimuksessa havaittiin, että yöperhosten määrät ja monimuotoisuus ovat heikentyneet jo 50-luvulla, ja 35 tutkimusvuoden aikana 66% tutkimuslajeista oli negatiivinen populaatiotrendi.



Nämä lajit olivat laajalle levinneitä ja yleisiä yöperhosia. Myös pohjois-Britanniassa lajien runsaus oli heikentynyt, mutta siellä useamman lajin runsaus oli lisääntynyt (Fox, 2013).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset perhosiin ovat monimuotoiset: populaatiokokojen kasvu tai väheneminen on pitkälti riippuvaista lajien rajoittavista elinkierto-ominaisuuksista. Populaatiokokojen mielekkääseen tutkimukseen vaaditaan kuitenkin pitkiä aikasarjoja (Woiwod, 1997). Yleisenä ilmiönä on kuitenkin havaittu, että yöperhosten määrät ja lajien diversiteetti ovat vähentyneet (Pitts ym., 2005). Lämpenemisen mahdollistama nopeampi kehittyminen ja suurempi sukupolvien määrä kasvukauden aikana mahdollistaa nopeamman populaatiokoon kasvun, ja voi aiheuttaa esimerkiksi massaesiintymiä tietyillä lajeilla. Monet tähänastiset muutokset ovat olleet seurausta hyönteisten fenotyypin plastisuudesta, mutta evolutiivisia muutoksia voidaan myös tulevaisuudessa havaita (Altermatt, 2010). Herbivorien populaatiokokojen lisääntyminen voi romahduttaa kasviyhteisön vuosikymmenien ajaksi, millä voi olla erittäin suuret ja pitkäkestoiset vaikutukset ekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan (Box ym., 2019; Callaghan ym., 2011; Callaghan ym., 2004b; Phoenix & Lee, 2004; Post ym., 2009). Myös päivittäisiä vasteita voi tapahtua: on havaittu, että tunturimittarien massaesiintymät ovat kytköksissä viileämpiin kesälämpötiloihin. Lämpimämpi kesäkausi voi vaikuttaa massaesiintymien intensiteettiä vähentävästi, sillä korkeampien lämpötilojen myötä myös loisten ja petohyönteisten määrä ja aktiivisuus kasvavat, mikä voi heikentää massaesiintymiä ja tunturimittarin populaatiokoon syklistä. Lisäksi tunturimittarin mahdollinen kotelovaiheen pidentyminen altistaa kotelot saalistukselle. Tämän ansiosta myös tunturikoivikot toipuvat nopeammin (Virtanen & Neuvonen, 1999c).

Kasvukauden pituus on tärkeä ympäristötekijä hyönteisille, sillä niiden kehitys on lämpötilariippuvaista. Värriöllä toteutetussa tutkimuksessa havaittiin, että hyönteisille suotuisa kausi on pidentynyt, ja talvikauden alku myöhästynyt. Erityisesti edellisen vuoden kasvukauden pituus korreloi positiivisesti perhosten runsauden kanssa metsähabitaateissa. On muun muassa havaittu, että myöhästynyt talvi lisää perhosten runsautta seuraavana kesänä. Suotuisan kasvukauden pituus voi myös rajoittaa perhosten toteutunutta kelpoisuutta ja alueellista esiintymistä. Perhosihteisöjen rakenteessa tunturikoivalueella on myös havaittu muutoksia: kasvukauden pidentyminen on muuttanut yhteisöä samankaltaiseksi kuin männiköillä esiintyvät perhosihteisöt, johtuen pitkälti siitä, että männikköjen tyypilliset lajit ovat siirtyneet tunturikoivalueille. Yksiruokaiset lajit vastaavat yleisesti ottaen voimakkaammin muutoksiin kasvukauden pituudessa. Erityisen alttiita ovat myös suurena toukkana tai kotelona talvehtivat lajit, sillä niiden on saatava kasvukauden aikana tarpeeksi resursseja, jotta ne kykenevät selviytymään talvesta talvehtimismuodossaan. Useamman vuoden ajan talvehtiville lajeille tämä ei ole niin haitallista (Keret ym., 2020).

#### 1.7.4. Muutokset hyönteisten elinkierto-ominaisuuksissa

Monet pohjoisessa elävät hyönteiset tuottavat vain yhden sukupolven kasvukauden aikana. Ilmastonmuutoksen mahdollisena seurauksena yöperhosille saattaa kehittyä multivoltinismia, eli ne voivat kehittää useamman sukupolven lisääntymiskaudella. Kesän lämpötila ja valon määrä ovat ympäristötekijöitä, jotka määrittävät lajin sukupolvien määrän. Sukupolvien määrä kasvukauden aikana saattaa lisääntyä erityisesti lajeilla, jotka tuottavat enemmän sukupolvia suotuisissa olosuhteissa (Altermatt, 2010; Pöyry ym., 2011; Virtanen & Neuvonen, 1999a). On havaittu, että pohjoisella havumetsävyöhykkeellä eteläisillä ja pohjoisilla perhoslajeilla on eroavaisuuksia sukupolvien määrässä kesän aikana. Pohjoisilla lajeilla sukupolvia esiintyy vähemmän, ja multivoltinismi, eli useamman sukupolven tuottaminen vuoden aikana, ei ole lisääntynyt kyseisillä lajeilla ilmastonmuutoksen myötä kovin paljon. Sukupolvien määrän kasvu voi lyhyellä aikavälillä olla seurausta myös esimerkiksi fenotyypin plastisuudesta, kun hyönteiset reagoivat vuosien väliseen olosuhteiden vaihteluun. Multivoltinismien lisääntyminen on useilla lajeilla tapahtunut samanaikaisesti esimerkiksi levinneisyysalueen pohjoissuuntaisen kasvun kanssa (Pöyry ym., 2011). Sukupolvien määrän muutoksella voi olla merkittäviä vaikutuksia muun muassa kasvien ja kasvissyöjähyönteisten välisiin vuorovaikutuksiin. Perhosten populaatiokoot voivat kasvaa, mutta kasvien puolustuksen aktivoituminen vasteena lisääntyneeseen herbivoriaan voi rajoittaa kasvua uudelleen (Altermatt, 2010).

Ilmastonmuutoksen seurauksena voi syntyä epäsynkronia ympäristön ja hyönteisten elinkierron kanssa. Synkronian menettäminen heikentää lajien selviytymistä ja lisääntymismenestystä, ja sillä voi olla kokonaisuudessaan ravintoverkkoihin kohdistuvia kaskadivaikutuksia. Esimerkiksi pölyttäjähönteisten elinkierron vaiheet voivat ”myöhästyä” aikaistuneesta kukinnasta, mikä on haitallista niin hyönteisille kuin kasveillekin. Lisäksi lehtien silmut voivat aueta ennen hyönteistoukkien kuoriutumista. Valintapaine voi kuitenkin korjata epäsynkronian kasvien ja hyönteisten elinkierron vaiheiden välillä (Bale & Hayward, 2010; Box ym., 2019; Pitts ym., 2005). On myös todettu, että ilmastonmuutos on muuttanut monien perhoslajien lentoaikoja jopa viikkojen verran (Altermatt, 2010; Van Strien ym., 2008). Havaitut muutokset perhosten lentoajoissa mukailevat usein kasvien fenologiassa havaittuja muutoksia: esimerkiksi kasvien kukinta ja perhosten lentoajat ovat aikaistuneet (Altermatt, 2010; Pitts ym., 2005).

On todettu, että erityisesti yhden sukupolven vuodessa tuottavilla, sekä puuvartisilla kasveilla ruokailevilla perhoslajeilla esiintyy muutosta lentoajoissa. Muutokset lentoajoissa ja lentokauden pituudessa ovat hyvin lajikohtaisia, ja elinkerto-ominaisuudet vaikuttavat niihin paljon (Altermatt, 2010; Woiwod, 1997). Lauhkealla vyöhykkeellä perhosten lentoajat saattavat enenevässä määrin painottua kevääseen ja syksyyn, minkä seurauksena muun muassa hyönteissyöjälintujen tärkeänä ravintona toimivien lentävien hyönteisten määrä on merkittävästi pienentynyt lintujen pesimäaikaan kesällä. Tämä ilmiö on yleinen eri perhoslajeilla. Kesän alussa

lentävien lajien lentoaika on aikaistunut entisestään, kun taas loppukesästä lentävillä lajeilla se on siirtynyt myöhemmäksi. Puuvartisilla kasveilla ruokailevien lentoajat ovat siirtyneet enemmän, ja aikaisemmaksi kuin ruohovartisilla ruokailevilla perhosilla. Yksiruokaisilla, puuvartisia hyödyntävillä lajeilla lentoaika oli pidentynyt, kun taas moniruokaisilla puuvartisia syöville lajeilla lentoaika lyhenyi. Munana talvehtivien lajien lentoajat ovat myös aikaistuneet. Muita havaittuja muutoksia perhosissa ovat muun muassa ravintokasvien vaihtaminen, ja aikuistuminen normaalia pienempänä. Muutokset voivat olla erilaisia lajin levinneisyysalueiden reunamilla verrattuna niiden keskeisiin levinneisyysalueisiin, mikä on seurausta muun muassa saatavilla olevien ravintokasvien määrästä (Altermatt, 2010).

### **1.8. Kirjosiepon pesintä arktisilla alueilla**

Osa arktisilla alueilla pesivistä linnuista on lajeja, joiden pääasiallinen levinneisyysalue on etelämmässä, ja niiden pohjoiset pesimäalueet ovat levinneisyyden äärirajoja (Callaghan ym., 2004a). Kirjosieppo (*Ficedula hypoleuca* Pallas) on yksi tällaisista lajeista, ja erityisesti munintavaihe on kriittinen sen pesinnän onnistumisen kannalta, sillä pohjoisissa elinympäristöissä kirjosiepon munien kuoriutuminen on heikompaa kuin sen keskeisillä levinneisyysalueilla (Lifjeld, 1988).

Perhoset ja muut niveljalkaiset ovat tärkeä ravinnonlähde useille pohjoisille lintulajeille. Esimerkiksi kirjosieppo on melko uusi tulokas Lapissa, jossa se on elinalueensa pohjoisrajoilla (Lifjeld, 1988; Veistola ym., 1997). Kirjosieppo on hyönteissyöjä, joka hyödyntää ravintonaan niin toukkia kuin aikuisia lentäviä hyönteisiä useista eri hyönteislajeista. Lentävät hyönteiset ovat kirjosiepon pääasiallista ravintoa, mutta siepot pyytävät hyönteisiä myös maasta. Hyönteisten runsaus kuitenkin vaihtelee, millä on merkittäviä vaikutuksia kirjosiepon lisääntymismenestykseen Lapissa (Lifjeld, 1988; Veistola ym., 1995, 1997). Perhoset ja muut niveljalkaiset esiintyvät runsaimmillaan Lapissa vasta loppukesästä, mikä on liian myöhäinen ajankohta kirjosiepon pesimäkauden alkuun nähden. Tämän lisäksi kylmä ja sateinen kesä vähentää lentävien hyönteisten saatavuutta, mutta lisää samalla linnunpoikasten ravinnontarvetta, minkä seurauksena poikasten ruokintatiheys vähenee ja niiden kunto heikentyy (Veistola ym., 1995, 1997).

Ilmastonmuutos vaikuttaa muidenkin pohjoisessa elävien lajien tavoin myös kirjosieppoon ja muihin siellä pesiviin lintuihin. Ilmaston lämpenemisen myötä kirjosiepon pesimäkausi on pidentynyt, ja ravintoa voi olla tarjolla enemmän pohjoisissa elinympäristöissä (Altermatt, 2010).

## 1.9. Gradututkielman tavoitteet ja hypoteesit

Koska erityisesti arktisten alueiden ekosysteemit ja eliölajit ovat alttiita ilmastonmuutokselle (Box ym., 2019; Callaghan ym., 2011; Post ym., 2009), niiden monipuolinen tutkiminen on erittäin tärkeää. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat voimakkaimmillaan korkeilla leveysasteilla, erityisesti talviaikaan (Strathdee & Bale, 1998). Muutokset lajien runsauksissa ja lajiston kokoonpanossa voivat vaikuttaa merkittävästi arktisten alueiden suhteellisen yksinkertaisiin ekosysteemeihin ja niiden kykyyn vastata ilmastonmuutoksen tuomiin stressitekijöihin (Box ym., 2019; Callaghan ym., 2011; Post ym., 2009). Mittariperhosten ekologinen rooli on tärkeä: esimerkiksi eteläisemmiltä alueilta levinnyt hallamittari voi aiheuttaa merkittäviä tuhoja kasvillisuudelle massaesiintymien myötä, erityisesti yhdistettynä tunturimittarin aiheuttamien tuhojen kanssa (Ammunét ym., 2011; Bale & Hayward, 2010; Tanhuanpää ym., 2001).

Turun yliopiston biodiversiteettiyksikön subarktisella tutkimusasemalla Kevolla on kerätty dataa Kevon alueen ilmastosta ja lajistosta (aineistoista ja tilastollisista analyyseistä tarkemmin Aineisto ja menetelmät -kappaleessa) jo usean vuosikymmenen ajan, mikä on erittäin arvokasta, sillä esimerkiksi lajistossa ja lajien ominaisuuksissa tapahtuneiden muutosten havainnoimiseksi vaaditaan aineistoa pitkältä ajalta, vuosien välisen normaalin vaihtelun vaikutuksen poissulkemiseksi (Woiwod, 1997).

Tässä gradutyössä tarkastelen Kevolla yleisten yöperhoslajien runsauden ja ruumiin koon muutosta vuosien varrella. Tarkastelen ilmastonmuutoksen, kuten lämpötilan ja sadannan muutoksien, vaikutuksia näihin perhosten ominaisuuksiin. Tutkin myös kirjosiepon, joka elää Kevolla pesimäalueensa rajoilla, pesimämenestystä ja ilmaston sekä saalishyönteisten vaikutusta pesimämenestykseen. Pohjoisilla raja-alueilla pesivien lintujen lisääntymismenestys on usein heikompaa kuin keskeisillä levinneisyysalueilla, mutta ilmastonmuutoksen myötä tilanne saattaa muuttua (Lifjeld, 1988). Kevolla pyydetyistä yöperhosista ei esimerkiksi ole aiemmin tarkasteltu yksilöiden massan mahdollista muutosta, joten tämä gradutyö tuottaa uutta tietoa Suomen Lapin eliöyhteisöissä tapahtuvista muutoksista. Kolmea erillistä pitkäaikaisaineistoa keskenään vertaamalla on mahdollista saada monipuolinen kuva ilmastonmuutoksen vaikutuksista eliöihin. Lisäksi tämän gradutyön pohjalta on mahdollista tehdä jatkoanalyyseja, joiden avulla voidaan selvittää ilmastonmuutoksen vaikutuksia vielä tarkemmin ja laajemmassa mittakaavassa.

Koska ilmaston lämpenemisen myötä kasvukausi on pidentynyt pohjoisessa ja yöperhosilla on enemmän ravintokasveja (Pateman ym. 2012, Walther ym. 2002), hypoteesini on, että perhoset ovat suurempia ja yksilöitä on enemmän, eli perhosten biomassa on kasvanut vuosikymmenien aikana ja lajien runsaussuhteissa on tapahtunut muutoksia. Toinen hypoteesini on, että kirjosieppojen pesimämenestys Lapissa on parantunut ilmaston lämpenemisen myötä, jos

perhosten biomassa on lisääntynyt, ja perhoset ovat paremmin lintujen saatavilla lämpimän sään ansiosta. Lisäksi suotuisimmat sääolosuhteet, kuten korkeampi lämpötila ja vähäisempi sadanta, vähentävät poikasten kuolleisuutta ja näin ollen parantavat lisääntymismenestystä (Lifjeld, 1988; Veistola ym., 1995, 1997).

## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.1. Tutkimuslajit

Pro Gradu tutkielmassani tarkastelen 11 Kevolla yleisenä (Andersson ym., 2019b; Kozlov ym., 2010) esiintyvää yöperhoslajia, jotka ovat mittareiden (Geometridae) heimoon kuuluvat syysvarpumontari (*Dysstroma citratum* L.), metsäpohjanmittari, tunturimittari, mustikkamittari, hallamittari ja mustikkalehtimittari (*Scopula ternata* Schrank). Yökkösten (Noctuidae) heimoon kuuluvat suvirusoyökkönen (*Diarsia mendica* Fabricius), puneharmoyökkönen (*Xestia alpicola* Zetterstedt), ruskoharmoyökkönen (*Xestia tecta* Hübner), vaippayökkönen (*Xylena solidaginis* Hübner), sekä karvakehrääjien (Lasiocampidae) heimoon kuuluva hallakehrääjä (*Poecilocampa populi* L.). Lajien elinkierto-ominaisuudet, lentoaika ja ravintokasvit poikkeavat toisistaan, ja nämä ominaisuudet ovat koottu seuraavaan taulukkoon (Taulukko 1).

Taulukko 1. Tutkittavien yöperhoslajien elinkierto-ominaisuudet, ruumiin koko ja lentoajat.

Laji	Koko ♂ Siipi (mm) ♂ Massa (mg) <sup>1</sup>	Toukkien ruokaisuus Ravintokasvi(t)	Lentoaika <sup>2</sup>	Talvehtimisvaihe
<i>Diarsia mendica</i> Suvirusoyökkönen	28 – 37 mm 18,25 mg	Moniruokainen Varvut, matalat kasvit; mm. mustikka <i>Vaccinium</i> <i>myrtillus</i> , <i>Salix</i> -suku	6.7. – 19.7.	Pieni toukka
<i>Dysstroma citratum</i> Syysvarpumontari	24 – 32 mm 5,12 mg	Moniruokainen Varvut; <i>Vaccinium</i> -suku	14.8. – 12.9.	Muna
<i>Entephria caesiata</i> Metsäpohjanmittari	26 – 34 mm 5,73 mg	Moniruokainen Varvut; mm. <i>Vaccinium</i> - suku, suopursu <i>Rhododendron</i> <i>tomentosum</i>	14.7. – 3.9.	Toukka
<i>Epirrita autumnata</i> Tunturimittari	30 – 38 mm 7,32 mg	Moniruokainen Lehtipuut, varvut; mm. <i>Betula pubescens subsp.</i> <i>czerepanovii</i> , <i>Vaccinium</i> <i>myrtillus</i>	17.8. – 27.9.	Muna
<i>Eulithis populata</i> Mustikkamittari	25 – 32 mm 5,12 mg	Moniruokainen Mm. <i>Vaccinium</i> ja <i>Betula</i> - <i>suvut</i>	24.7. - 30.8.	Muna

<sup>1</sup> Laskettu perhosnäytteiden punnituksista.

<sup>2</sup> Laskettu perhosaineistoon kirjatusta esiintymisajoista.

<i>Operophtera brumata</i> Hallamittari	24 – 32 mm 3,22 mg	Moniruokainen Lehtipuut, varvut; <i>Betula pubescens</i> subsp. <i>czerepanovii</i> , <i>Vaccinium</i> -suku	8.9. - 1.10. Naaras ei lennä	Muna
<i>Poecilocampa populi</i> Hallakehrääjä	32 – 44 mm 47,42 mg	Moniruokainen Lehtipuut; <i>Betula</i> -suku	26.8. – 12.9.	Muna
<i>Scopula ternata</i> Mustikkalehtimittari	20 – 27 mm 3,59 mg	Moniruokainen Varvut, ruohovartiset; mm. <i>Ericaceae</i> -heimo.	6.7. – 26.7.	Toukka
<i>Xestia alpicola</i> Puneharmoyökkönen	32 – 43 mm 39,07 mg	Moniruokainen Varvut, lehtipuut, ruohovartiset; mm. <i>Ericaceae</i> -heimo	11.7. – 3.8.	1. Pieni toukka 2. Toukka
<i>Xestia tecta</i> Ruskoharmoyökkönen	33 – 44 mm 38,85 mg	Moniruokainen Pensaat, varvut; mm. <i>Betula nana</i> , <i>Vaccinium</i> -suku	16.7. - 26.7.	1. Pieni toukka 2. Toukka
<i>Xylena solidaginis</i> Vaippayökkönen	40 – 47 mm 44,67 mg	Moniruokainen Varvut, pensaat; mm. <i>Vaccinium</i> -suku	26.8. – 13.9.	Muna

Tiedot lajien elinkierto-ominaisuuksista ovat pääosin peräisin kirjallisuudesta (Albrecht & Huldén, 2000; Kozlov ym., 2010; Silvonen ym., 2014) lukuun ottamatta koiraiden keskimääräisiä kuivapainoja eli massaa, sekä lajien lentoaikoja. Kuivapainot määritin gradun yhteydessä tekemistäni perhosnäytteiden punnituksesta, ja ne ovat kunkin lajin koiraiden vuotuisten keskiarvojen yhteinen keskiarvo. Tähän taulukkoon valitsin esimerkinomaisesti vain koiraiden massan, sillä useiden lajien kohdalla koiraiden osuus näytteistä oli suurempi, ja esimerkiksi hallamittarinaaraat ovat siivettäviä, joten niitä ei ollut näytteissä mukana lainkaan. Naaraiden massa voi myös vaihdella koiraita enemmän, riippuen siitä ovatko ne ehtineet munimaan ennen valorysään päättymistä. Tilastollisissa analyyseissä tarkastelin myös naaraiden massaa.

Yöperhosten lentoajat puolestaan johdin Kevolla toteutettujen valorysäpyyntien kirjanpidosta (ks. 2.4. Perhosaineisto, näytteiden käsittely ja tilastollinen analysointi), sillä lajien lentoajat voivat vaihdella paljonkin eri osissa Suomea (Silvonen ym., 2014). Lentoajan alkamis- ja päättymisajankohdan selvitin etsimällä jokaiselta tutkimusvuodelta kunkin lajin ensimmäisen ja viimeisen havaintoviikon, ja ottamalla aina kyseisen viikon keskimmäisen juliaanisen päivän, eli päivän juoksevan numeron vuoden ensimmäisestä päivästä alkaen. Kaikkien vuosien juliaanista lentoajan alku- ja loppupäivistä laskin keskiarvon, ja tämän keskiarvoisen juliaanisen päivän muunsin kalenteripäiväksi. Karkauspäiviä en ottanut huomioon.

Gradututkimuksessa tarkastelen myös kirjosiiepon pesimämenestystä Kevolla. Kirjosieppo on tutkimuslajina mielenkiintoinen, sillä sen levinneisyysalue on laajentunut Lappiin melko hiljattain, ja siellä se on esiintymisalueensa pohjoisrajalla (Lifjeld, 1988; Veistola ym. 1997).

Lisäksi hyönteissyöjänä perhoset ovat tärkeä ravinnonlähde kirjosiepoille, ja ne käyttävät ravintonaan niin toukkia kuin aikuisia yksilöitä, joita ne pyydystävät lennosta ja maasta (Lifjeld, 1988; Veistola ym., 1995, 1997). Hyönteisten runsaus kuitenkin vaihtelee, millä on merkittäviä vaikutuksia kirjosiepon lisääntymismenestykseen Lapissa (Veistola ym., 1995, 1997).

## **2.2. Tilastolliset analyysit**

Tilastolliset analyysit toteutin Microsoft Excel 2016 ja SAS Enterprise Guide 8.2 -ohjelmilla. Muokkasin tutkittavat aineistot helposti analysoitavaan muotoon Excelillä, ja samalla loin aineistosta uusia muuttujia analyyseissa käytettäväksi. Tutkin muuttujien välisiä suhteita SAS Enterprise Guide -ohjelmalla yksinkertaisten lineaaristen regressiomallien avulla. Kuvaajat toteutin SAS Enterprise Guidella, ja taulukot Excelillä.

Ennen varsinaisia tilastollisia malleja analysoin eri aineistojen muuttujia alustavasti mm. selvittämällä muuttujien tunnusluvut, kuten otoskoon, minimi- ja maksimiarvot, keskiarvon, sekä keskihajonnan.

Muuttujien välisiä riippuvuussuhteita tutkin korrelaatioanalyysien avulla. Mikäli muuttujien välillä esiintyi voimakasta riippuvuutta, en sisällyttänyt niitä samoihin lineaarisiin malleihin. Oikeanlaisen tilastollisen mallin valitsemiseksi tarkastelin myös eri aineistojen muuttujien jakaumia vertaamalla niitä normaalijakaumaan SAS:n Distribution Analysis -työkalun avulla.

Tässä gradututkielmassa käytin analyysien tuloksissa tilastollisen merkitsevyyden rajana arvoa  $\alpha = 0.05$ .

## **2.3. Sääaineisto ja sen tilastollinen analysointi**

Gradututkielmassa tarkastelen myös ilmastonmuutosta ja sään vaikutusta yöperhosiin aikavälillä 1972 - 2017 tutkimusalueella Kevolla. Sääaineisto on peräisin Kevon tutkimuslaitoksella sijaitsevalta sääasemalta. Sääaineisto sisältää tiedot sateen ja lumen määrästä, sekä lämpötilan vuorokautiset minimi-, maksimi- ja keskiarvot. Aineistossa ovat myös mukana 0 °C, +3 °C ja +5 °C vuotuiset lämpösummat. Säätekijöistä erityisesti kesäkauden korkealla lämpötilalla on havaittu olevan merkitsevä positiivinen vaikutus, sekä talven vähäisellä sadannalla merkitsevä negatiivinen vaikutus yöperhosten runsauteen (Pitts ym., 2005). Yöperhosten aikuisuuden aikaiset sääolot vaikuttavat puolestaan niiden lentoaikoihin (Keret ym., 2020). Lämpösummien avulla voidaan arvioida muun muassa perhostoukkien kehitysajan pituutta (Ammunét ym., 2011; Ruohomäki ym., 2003).

Ilmastonmuutosta Kevolla tutkin Kevon sääasemalla kerätyn aineiston avulla. Tarkasteltavat muuttujat olivat ”lämpösumma”, ”keski- ja minimilämpötila” sekä ”sadanta” vuosilta 1972 – 2017, samalta ajanjaksolta kuin gradussa käytettävä perhosaineisto (ks. 2.4. Perhosaineisto, näytteiden käsittely ja tilastollinen analysointi). Jaoin vuoden säätiedot kahteen ajanjaksoon: talvikauteen (marras - huhtikuu) ja pyyntikauteen (touko – lokakuu, valorysien aktiivinen aika). Terminen talvi alkaa pohjoisessa jo lokakuussa (Ilmatieteen laitos, Termiset vuodenaajat, sähköinen lähde), mutta analyyseja varten sisällytin sen pyyntikauteen, jolloin tutkimuslaitoksen valorysät keräävät vielä aktiivisesti yöperhosia. Säämuuttujat muodostin määrittämällä vuotuiset keskiarvot talvi- ja pyyntikauden kuukausista, ja laskemalla näistä lopulta yhteisen keskiarvon. ”Lämpösumma” -muuttujana käytin talvikaudelle 0 °C ja pyyntikaudelle +5 °C lämpösummaa. Säätekijöiden muutosta vuosien aikana tutkin yksinkertaisilla lineaarisilla malleilla, joissa selittävänä muuttujana olivat yksitellen ”lämpösumma”, ”keskilämpötila”, ”minimilämpötila” ja ”sadanta”. Kaikissa malleissa selittävänä muuttujana oli ”vuosi”. Tein mallit pyynti- ja talvikaudelle erikseen.

#### **2.4. Perhosaineisto, näytteiden käsittely ja tilastollinen analysointi**

Kevon tutkimuslaitoksella on kerätty yöperhosaineistoa neljällä valorysällä vuodesta 1971 alkaen. Vanhin rysä, ”1 Sauna”, on ollut käytössä alusta asti. Rysät ”2 Väli” ja ”3 Aita”, otettiin käyttöön vuonna 1973, mutta ”2 Väli” lopetettiin vuonna 1976. Vuonna 1976 otettiin puolestaan käyttöön uusi rysä, ”4 Suo”, ja viimeisin valorysä, ”5 Ranta”, otettiin käyttöön vuonna 1978. Rysien määrä on kasvanut tutkimusvuosien aikana, ja vuodesta 1990 alkaen niiden määräksi vakiintui neljä kappaletta: ”1 Sauna”, ”3 Aita”, ”4 Suo” ja ”5 Ranta”. Rysissä käytetään 500 W:n sekavalolamppuja, ja vaikka Lapin yöt ovat valoisia kesäaikaan, perhoset hakeutuvat valorysiin hyvin. ”1 Sauna” ja ”5 Ranta”-rysiin lamput ovat olleet teholtaan 500 W koko rysiin toiminnan aikana, mutta ”3 Aita”-rysiin lamppu on vaihdettu 250 wattiseksi vuonna 2012, ja vuonna 2013 myös ”4 Suo”-rysiin lamppu vaihdettiin. Näiden rysiin lamppujen heikompi valoteho voi vaikuttaa rysiin pyyntitehokkuuteen ja rysiin päätyvien yöperhosten lukumääriin negatiivisesti (Andersson, 2022). Valorysät ovat kuvailtu tarkemmin mm. Kozlov ym. vuonna 2010 julkaisemassa tutkimuksessa. Rysät tyhjenetään kerran viikossa, ja niiden aktiivinen pyyntiaika on toukokuun loppupuolelta syyskuun loppuun tai lokakuun alkuun.

Havainnoidakseni vuosien välistä vaihtelua perhosyksilöiden massassa poimin aineistosta jokaiselta vuodelta 30 yksilöä jokaisesta tutkimuslajista, niin että naaraita ja koiraita on jokaisesta lajista 15 kappaletta. (Andersson ym., 2019a; Kozlov ym., 2010). Mikäli tämä ei ollut mahdollista, poimin perhosyksilöitä niin paljon kuin aineistosta löytyy. Pysin huomioimaan perhosten lentoajan sisäisen vaihtelun yksilöiden ominaisuuksissa, erityisesti massassa,



poimimalla aineistosta tasaisesti yksilöitä lentokauden eri vaiheilta. Muutoin satunnaistin yksilöiden valinnan poimimalla perhosyksilöitä näytepurkeista ”löytymisjärjestyksessä”, eli ottamalla punnitukseen mukaan ensimmäiset lajin ja sukupuolen mukaan tunnistamani yksilöt, valikoimatta niitä muiden ominaisuuksien perusteella. Jätin pois ainoastaan erittäin huonokuntoiset näytteet, esimerkiksi yksilöt, joilta puuttui takaruumis kokonaan.

Kevon tutkimuslaitoksella on jokavuotisten valorysäpyyntien yhteydessä tehty kirjanpitoa valorysiin jääneistä perhosista, ja tämä muodostaa tärkeän osan gradututkielmassa hyödynnettävästä aineistosta. Kirjanpitoa kutsun tästä edespäin perhosaineistoksi. Gradussa käytettävä perhosaineisto on kerätty vuosina 1972 – 2017. Perhosaineistoon on kirjattu kultakin rysän pyyntiviikolta rysän nimi ja numero (1 Sauna, 3 Aita, 4 Suo tai 5 Ranta), pyyntiviikko, pyyntiviikon ensimmäinen ja viimeinen juliaaninen päivä, mitä lajeja rysässä oli, ja kunkin lajin yksilöiden lukumäärät. Tein alkuperäisestä aineistosta erillisen taulukon perhosten lentoaikojen selvittämiseksi. ”Lentoajat” -taulukossa on joka vuodelta jokaisen lajin lentoajan alku, huippu ja loppu niin viikkoina kuin juliaanisina päivinä tarkastelun helpottamiseksi. Lentoajan huippu on se viikko, jolloin kaikissa rysissä on yhteensä eniten kyseisen lajin edustajia.

Edellä kuvaillun perhosaineiston lisäksi gradututkielmassa tarkastelen rysistä saatujen perhosnäytteiden massaa. Perhosnäytteet sijaitsevat Turun yliopiston eläinmuseossa. Vaikka tietoa perhosten esiintymisestä on 1970 -luvulta alkaen, käytän perhosnäytteitä vuosilta 1990 – 2017, sillä tätä aiemmin kerätyt näytteet eivät olleet saatavilla. Määritin yöperhosten biomassan kuten aiemmin tässä kappaleessa sekä ”2.4.1. Perhosten biomassan mittaaminen” -kappaleessa on kuvailtu.

Ruumiin koko voi monella yöperhoslajilla kertoa niiden kelpoisuudesta (fitness) ja jälkeläistuotosta eli fekunditeetista (C. J. A. Bradshaw & McMahon, 2008). Esimerkiksi paljon tutkitulla tunturimittarilla on havaittu, että naaraiden kotelopaino on merkittävä tekijä sen jälkeläistuoton kannalta (Heisswolf ym., 2009; Ruohomäki ym., 2003). Kotelon koko määrittää myös aikuisen yksilön koon, eikä aikuisen syövä ravinto juurikaan vaikuta lisääntymismenestykseen (Tammaru, Kaitaniemi, ym., 1996). Yöperhosilla siiven pituus ja kotelopaino korreloivat, joten molempia voidaan käyttää yksilön ruumiin koon mittaamisessa (Tammaru, Ruohomäki, ym., 1996). Juuri kotelosta kuoriutunut aikuinen perhonen voi olla jopa 20 - 80 % kevyempi kuin sen kotelo. Tämä on pääosin seurausta perhosen ruumiin vesipitoisuuden vähenemisestä. Koirailta painon väheneminen on yleisesti suurempaa kuin naarailta, ja tämä ero sukupuolten välillä on erityisen suuri lajeilla, joilla naaras on koirasta suurikokoisempi, ja munat ovat valmiiksi kehittyneinä niiden ruumiissa koteloitumisen aikaan. Tämän vuoksi naaraiden vesipitoisuus on korkeampi kuin koiraiden (Molleman ym., 2011).

Yöperhosten kotelopainoon ja näin ollen myös aikuisen yksilön ruumiin kokoon vaikuttaa merkittävästi populaation tiheys (Ruohomäki ym., 2003). Suurissa tiheyksissä kotelot ja täten

myös aikuiset yksilöt jäävät pienemmiksi kuin vuosina, jolloin populaation tiheys on alhainen (Ruohomäki ym., 2003). Tiheyden vaikutukset perhosyksilöiden kokoon voivat näkyä vasta seuraavassa sukupolvessa: eräässä tutkimuksessa havaittiin, että naaraiden kotelopaino ja jälkeläistuotanto oli pienempää, mikäli yksilön vanhempien kehityksen aikana sekä tunturi- että hallamittareiden tiheys oli suuri (Heisswolf ym., 2009). Vaikka naaraiden massaa usein käytetäänkin kuvaamaan perhosyksilöiden kelpoisuutta, esimerkiksi erilaiset ympäristötekijät voivat vaikuttaa jälkeläistuottoon naaraiden koosta riippumatta (Heisswolf ym., 2009).

Koirailta ruumiin koon suhde kelpoisuuteen ei aina ole yhtä yksiselitteinen kuin naarailta. Esimerkiksi tunturimittarikoirailta on havaittu, että suuremmilla koirailta liikkuvuus ja näin ollen naaraiden paikannus on tehokkaampaa kuin pienillä koirailta. Eroa esimerkiksi aikuisten yksilöiden eliniässä ei ruumiin koon perusteella havaittu (Tammaru, Ruohomäki, ym., 1996). Yöperhosilla, esimerkiksi yökkösillä, tehdyssä tutkimuksessa on kuitenkin havaittu, että koiraiden ja naaraiden painon välillä on voimakas positiivinen korrelaatio (Mattila ym., 2006), joten oletan populaation tiheyden vaikutusten koiraiden painoon olevan samankaltaiset kuin naarailta.

Saatavilla olevien saalishyönteisten, kuten yöperhosten, koolla on merkitystä saalistajille. Esimerkiksi kirjosisiepon on kannattavampaa pyytää suurempia yksilöitä, koska ne ovat pieniä hyönteisiä energiapitoisempia, ja näin ollen parempaa ravintoa poikasille (Lifjeld, 1988).

#### **2.4.1. Perhosten biomassan mittaaminen**

Mittasin yöperhosten biomassan punnitsemalla jokaisen perhosen kuivapainon erikseen tarkalla vaa'alla. Kuivapaino punnittiin milligrammoissa, milligramman sadasosan tarkkuudella. Työssä käytin Turun yliopiston ekologian laboratorion Mettler Toledo AT20 -vaakaa. Perhosten ruumiin kokoa voi mitata myös mittaamalla niiden siiven pituuden (Mattila ym., 2006; Silvonen ym., 2014), mutta koska tutkielmassa käytettävissä oleva perhosaineisto on monin paikoin haurasta ja huonokuntoista, punnitsemalla saadaan tarkempi kuva biomassasta ja riski perhosten vaurioitumiseen on pienempi. Punnitusten yhteydessä kirjasin perhosten massan lisäksi niiden lajin, sukupuolen, keräysajankohdan sekä mistä valorysästä ne ovat peräisin.

#### **2.4.2. Yöperhosten lukumäärä- ja punnitusaineiston analysointi**

Perhosaineiston alustavissa analyyseissä tarkastelin aineistossa esiintyvien yöperhoslajien otoskokoa, kokonaisuusilömäärää, minimi- ja maksimimääriä sekä esiintymistietojen keskiarvoa ja keskihajontaa. Tein alustavat analyysit perhosaineiston alkuperäisillä arvoilla (ei +1 lisäystä

vuotuisiin määriin logaritmuunnosta varten), laskemalla kullekin lajille keskiarvon kaikkien rysien yhteenlasketusta perhosmäärästä kesän aikana.

Yöperhoslajien lukumäärien muutosta tutkimusvuosien aikana tarkastelin seuraavasti: laskin jokaiselle 11 tutkimuslajille keskiarvon kaikkien valorysien keräämästä vuotuisesta yksilömäärästä. Yöperhosia on kerätty valorysillä vuodesta 1971 alkaen, mutta analyysit alkavat vasta vuodesta 1972, koska vuonna 1971 perhosyksilöitä oli kaiken kaikkiaan vain kaksi kappaletta. Aineisto loppui vuoteen 2017, mutta yöperhosten pyyntiä tutkimusasemalla on jatkettu tämän jälkeenkin. Huomioin valorysien määrän muutoksen eri keräysvuosina jakamalla vuotuisen keskiarvon rysien määrällä. Koska joillakin lajeilla yksilöiden lukumäärä voi vaihdella erittäin paljon eri vuosien välillä, aineisto ei ole normaalijakautunut. Tämän vuoksi tein kymmenkantaisen logaritmuunnoksen rysien määrällä jaetuille keskiarvoille. Jotta logaritmuunnos olisi mahdollinen, lisäsin lukumääräaineiston kaikkiin soluihin +1 nollien poistamiseksi. Yöperhosten lukumäärän muutosta vuosien aikana selittävässä lineaarisissa malleissa selitettävänä muuttujana oli siis ”lukumäärä”, eli  $\log_{10}(\text{lajin yksilömäärä} / \text{rysien määrä})$ , ja selittävä tekijänä oli ”vuosi”.

Tutkin ilmastonmuutoksen vaikutusta yöperhosten logaritmuunnettuihin lukumääriin vertaamalla Kevon sääasemalla mitattuja säämuuttujia sekä yöperhosten lukumääräaineistoa. Vaikka sää tietoa on mitattu Kevolla vuodesta 1962 alkaen, mukaan analyysiin otin vain vuodet 1972 – 2017. Otin analyysiin mukaan yöperhosten kannalta olennaiset säämuuttujat, ”lämpösunnan”, ”minimilämpötilan” ja ”sadannan”. Tarkastelin pyynti- ja talvikausien sään vaikutusta yöperhoslajeihin omissa analyysissään. Määritin pyyntikauden ajanjaksoksi, minkä aikana yöperhosia keräävät valorysät olivat aktiivisena, eli toukokuusta lokakuuhun, ja vastaavasti talvikauden ajanjaksoksi marraskuusta huhtikuuhun. Terminen talvi, jolloin lämpötila laskee pysyvämmiin 0 celsiusasteen alapuolelle, alkaa pohjoisessa jo lokakuussa (Ilmatieteen laitos, haettu 27.12.2021), mutta jätin sen analyysissä talvikauden ulkopuolelle, koska valorysät olivat tutkimusvuosien aikana tuolloin vielä aktiivisia. ”Lämpösunnan” -muuttujana käytin talvikaudella 0°C lämpösunnan, ja pyyntikaudella +5 °C lämpösunnan vuotuista keskiarvoa. Myös ”minimilämpötila” ja ”sadanta” -muuttujat koostuivat talvi- ja pyyntikauden ajalta otetuista vuotuisista keskiarvoista.

Koska lämpösunnan ja minimilämpötila korreloivat voimakkaasti keskenään, en sisällyttänyt niitä samaan lineaariseen malliin, vaan tarkastelin ilmaston vaikutusta yöperhosten lukumääriin kahden eri mallin avulla: selitettävänä tekijänä molemmissa malleissa oli yöperhosten  $\log_{10}$ -muunnettu ”lukumäärä”. Selittävinä tekijöinä olivat ensimmäisessä mallissa ”lämpösunnan” ja ”sadanta”, ja toisessa mallissa ”minimilämpötila” ja ”sadanta”. Analysoin talvi- ja pyyntikauden sään erikseen, ja tein mallit erikseen kaikille tutkittaville yöperhoslajeille.

Valittujen yöperhosyksilöiden punnituksista saadun aineiston avulla analysoin kuivapainon eli ”massan” muutosta vuosien aikana. Lisäksi tarkastelin tiheyden eli kunkin lajin vuotuisen yksilömäärän vaikutusta yksilöiden massaan, minkä avulla selvitin mahdollisia yöperhosten ruumiin koossa tapahtuneita muutoksia. Mallissa selitettävänä muuttujana oli ”massa”, joka oli kunkin lajin yksilöiden massan vuotuinen keskiarvo, ja laskin sen erikseen koiraille ja naaraille monilla lajeilla esiintyvän sukupuolten välisen kokoeron vuoksi. Selittävinä muuttujina olivat ”vuosi” ja ”tiheys”, eli yöperhoslajien (oman lajin) vuotuinen lukumäärä. Tiheyttä ei ollut tarpeen jakaa valorysien määrällä, sillä niiden määrä pysyi samana koko punnitusaineiston keräämisen aikana.

## **2.5. Kirjosiepon pesimäaineisto ja sen tilastollinen analysointi**

Kirjosieppojen pesimädataa on kerätty vuodesta 1982 vaihtelevan laajuisilta alueilta Lapissa, mutta myöhempinä vuosina keräys on keskittynyt lähinnä Kevon alueelle (Eeva, 2022). Pesimäaineisto sisältää vuotuiset tiedot kirjosieppojen pesyekoosta (munien määrä), kuoriutuneiden ja lentopoikasten määrät, sekä muninnan aloituspäivän sekä kuoriutumispäivän juliaanisenä päivänä vuoden alusta laskien. Aineistossa ovat mukana myös pesien lukumäärät sekä keskiarvon keskivirheet. Tässä gradussa käytin vuosien 1982 – 2017 aikana kerättyä lintuaineistoa.

Kirjosiepon pesimämenestystä Kevolla tarkastelin niin ilmastonmuutoksen kuin saalishyönteisten saatavuuden näkökulmasta. Pesimämenestyksessä huomioin pesyekoon, kuoriutuneiden poikasten sekä lentopoikasten määrän, ja edellä mainittujen ympäristötekijöiden vaikutuksen niihin.

### **2.5.1. Pesyekoko**

Tutkin pesyekokoa, eli munien määrää kahden lineaarisen mallin avulla. Selitettävänä muuttujana on ”pesyekoon vuotuinen keskiarvo”. Ilmaston vaikutusta selittävässä mallissa selittävinä tekijöinä olivat ”kesäkuun lämpösumman” (+5 °C) ja ”sadannan” vuotuiset keskiarvot, sekä ”munintapäivä”, joka oli muninnan aloituspäivä vuoden alusta laskien. Mallissa olivat mukana vain kesäkuun sää tiedot, koska kirjosiepon muninta ajoittuu keskimääräisesti kesäkuuhun. Malli on painotettu muuttujalla ”pesien määrä N1”, joka oli se vuotuinen kirjosiepon pesien määrä, mistä munaluku on laskettu. Painotus oli tarpeellinen, sillä pesien määrä, ja näin ollen myös otoskoko, vaihteli tutkimusvuosien välillä paljon. Minimilämpötilan vaikutusta pesyekokoon

tarkastelin muutoin samanlaisella mallilla kuin edellä on kuvattu, mutta toisena selittävänä tekijänä oli lämpösunnan sijasta kesäkuun ”minimilämpötila”.

Toisessa mallissa tarkastelin saaliin, tässä tutkimuksessa yöperhosten, määrän vaikutusta pesyekokoon. Selitettävänä tekijänä oli jälleen ”munaluku”, selittävinä tekijöinä olivat ”yöperhosten summa”, minkä laskin jakamalla jokaisen tutkittavan 11 yöperhoslajin vuotuisen lukumäärän keskiarvon jokaisena vuonna käytettyjen valorysien määrällä. Lopuksi laskin kaikkien lajien lukumäärät yhteen, ja tein summalle  $\log_{10}$ -muunnoksen. Käytin muunnettua summaa analyysissa. Yöperhosten summan logaritmimuunnos oli tarpeellinen, sillä niiden lukumäärät vaihtelevat suuresti vuosien välillä. Kaikki tutkimuksessa tarkastellut yöperhoslajit eivät lennä kirjosiepon pesinnän aikaan (Taulukko 1), mutta tällä tavoin laskemalla voidaan huomioida myös myöhemmin lentävien lajien toukat, jotka ovat lentävien hyönteisten rinnalla merkittävä osa kirjosiepon ravintoa (Lifjeld, 1988). Toinen selitettävä tekijä oli ”munintapäivä”. Kuten ilmaston vaikutuksia tutkittaessakin, painotin mallin ”pesien määrällä N1”.

### **2.5.2. Kuoriutuneiden poikasten määrä**

Tutkin kuoriutuneiden poikasten lukumäärää samankaltaisilla malleilla kuin pesyekokoa. Ilmaston vaikutuksia tutkittaessa selitettävänä tekijänä oli ”kuoriutuneiden määrä”, eli poikasten vuotuinen keskiarvo. Selittävinä tekijöinä olivat kesäkuun ”lämpösomma” ja ”sadanta”, samoin kuin edellisessä mallissa, mutta munintapäivän sijaan viimeinen selittävä muuttuja oli ”kuoriutumispäivä”, joka oli laskettu munintapäivän tavoin vuoden alusta. Kuoriutumispäivä voi olla myös heinäkuun puolella, mutta keskimäärin se on kesäkuussa. Malli oli painotettu niiden ”pesien määrällä N2”, joista kuoriutuneiden poikasten lukumäärät oli laskettu aineistoa kerätessä. Toisessa ilmaston vaikutusta tarkastelevassa mallissa selitettävän tekijänä oli jälleen ”kuoriutuneiden määrä”, selittävinä tekijöinä olivat kesäkuun ”minimilämpötila” ja ”sadanta”, ja malli oli painotettu ”pesien määrällä N2”.

Perhosten lukumäärän vaikutusta kuoriutuneiden poikasten määriin tarkastelin mallilla, jossa selitettävänä tekijänä oli ”kuoriutuneiden määrä”, ja selittävinä tekijöinä olivat  $\log_{10}$ -muunnettu ”yöperhosten summa” ja ”kuoriutumispäivä”. Painotin mallin ”pesien määrällä N2”, koska vuotuinen pesien määrä, ja näin ollen myös estimaattien luotettavuus vaihteli huomattavasti.

### **2.5.3. Lentopoikasten määrä**

Lopuksi selvitin ilmaston ja yöperhosten määrän vaikutusta lentopoikasten määrään. Ilmastomallissa selitettävänä muuttujana oli ”lentopoikasten määrä”, taas vuotuisena

keskiarvona. Selittävinä muuttujina olivat ”kuoriutumispäivä” sekä ”kesäkuun lämpösumma” ja ”sadanta”. Malli oli painotettu lentopoikasten ”pesien määrällä N3”. Toinen ilmaston vaikutusta tarkasteleva malli oli muutoin samanlainen, mutta toinen selittävästä tekijöistä oli kesäkuun ”minimilämpötila”. Perhosten lukumäärän vaikutusta kuvaavassa lineaarisessa mallissa selitettävänä tekijänä oli ”lentopoikasten määrä”, ja selittävinä tekijöinä edellisen mallin tapaan  $\log_{10}$ -muunnettu ”yöperhosten summa” ja ”kuoriutumispäivä”. Malli oli painotettu ”pesien määrällä N3”.

### 3. Tulokset

#### 3.1. Muutokset tutkimusalueen ilmastossa

Sääaineiston alustavissa analyyseissa tarkastelin pyyntikauden (touko - lokakuu) ja talvikauden (marras - huhtikuu) säämuuttujien, eli lämpösumman, keski- ja minimilämpötilan sekä sadannan minimi- ja maksimiarvoja, seurantavuosien määrää sekä keskiarvoa ja keskihajontaa (Taulukko 2). Säämuuttujat ovat pyynti- ja talvikauden kuukausien päivittäisten säähavaintojen keskiarvoja, mistä laskin yhteiset vuotuiset keskiarvot tarkasteltaville ajanjaksoille.

Taulukko 2. Kevon säämuuttujien (lämpösumma, keski- ja minimilämpötila sekä sadanta) otoskoko, minimi- ja maksimiarvot, sekä keskiarvo ja keskihajonta pyynti- ja talvikaudella.

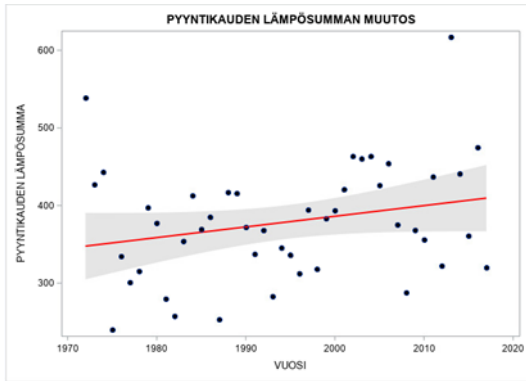
Ajanjakso	Muuttuja	n Vuodet	Min	Max	Keskiarvo	Keskihajonta
Pyyntikausi 1.5. – 31.10.	Lämpösumma +5°C	46	240	617	379	74,7
	Keskilämpö °C	46	5,51	9,60	7,13	0,897
	Minimilämpö °C	46	1,48	5,04	3,10	0,870
	Sadanta mm	46	0,884	3,37	2,05	0,65
Talvikausi 1.11. – 30.4.	Lämpösumma 0°C	46	390	621	479	52,3
	Keskilämpö °C	46	-14,3	-6,58	-9,52	2,00
	Minimilämpö °C	46	-19,6	-10,8	-14,5	2,30
	Sadanta mm	46	0,538	2,10	0,98	0,286

Tilastollisesti merkitsevä muutos pyyntikauden säätekijöissä tutkimusvuosien aikana oli havaittavissa keskilämpötilassa (regressiosuoran kulmakerroin  $\beta = 0,0337$ ,  $F_{1,44} = 15,01$ ,  $p. = 0,0004$ ), minimilämpötilassa ( $\beta = 0,0396$ ,  $F_{1,44} = 26,12$ ,  $p. < 0,0001$ ), sekä sadannassa ( $\beta = 0,0291$ ,  $F_{1,44} = 25,35$ ,  $p. < 0,0001$ ). Pyyntikauden keski- ja minimilämpötilat olivat nousseet (Kuva 1c. ja Kuva 1e.) 1,5 °C ja 1,8 °C ja sadanta kasvanut (Kuva 1g.) 1,3 mm tutkimusvuosien aikana. Lämpösummassa (Kuva 1a.) ei tapahtunut merkitsevää muutosta ( $\beta = 1,37$ ,  $F_{1,44} = 2,86$ ,  $p. = 0,1$ ).

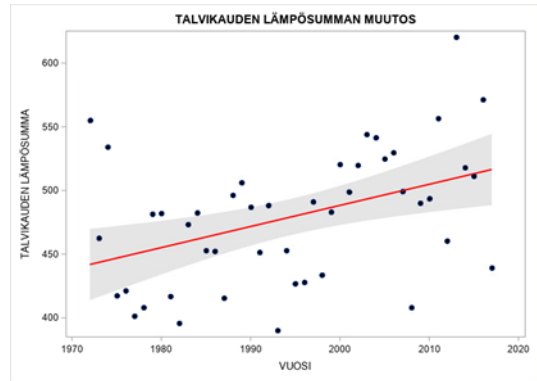
Talvikaudella kaikissa tutkittavissa muuttujissa havaittiin tilastollisesti merkitsevä muutos (Kuva 1b., Kuva 1d., Kuva 1f. ja Kuva 1h.). Lämpösumma (Kuva 1b.) oli kasvanut tutkimusvuosien

varrella ( $\beta = 1,66$ ,  $F_{1,44} = 9,72$ ,  $p = 0,003$ ,)  $74,6$  °C vrk. Keskilämpötila (Kuva 1d.) oli myös kasvanut  $2,2$  °C ( $\beta = 0,0482$ ,  $F_{1,44} = 5,15$ ,  $p = 0,03$ ,). Minimilämpötila (Kuva 1f.  $\beta = 0,0635$ ,  $F_{1,44} = 6,98$ ,  $p = 0,01$ ) oli kasvanut  $2,9$  °C. Sadannan (Kuva 1h.) määrä talvikaudella oli lisääntynyt tutkimusvuosien aikana  $0,5$  mm ( $\beta = 0,0110$ ,  $F_{1,44} = 16,08$ ,  $p = 0,0002$ ,).

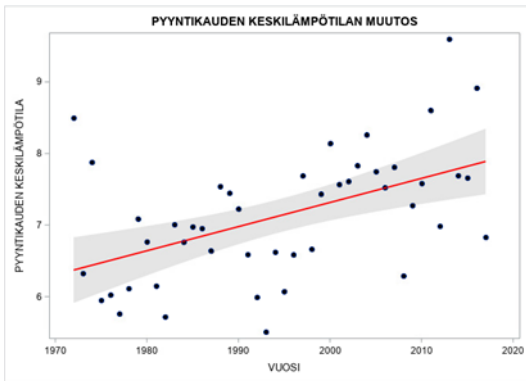
a.



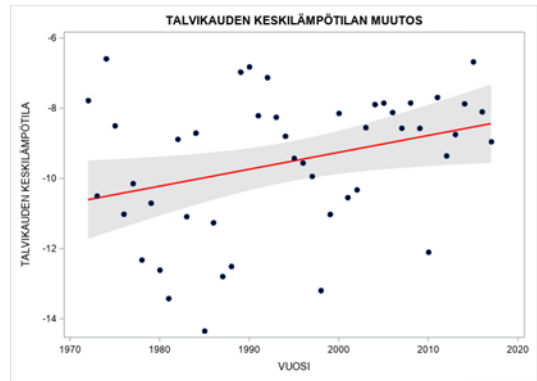
b.



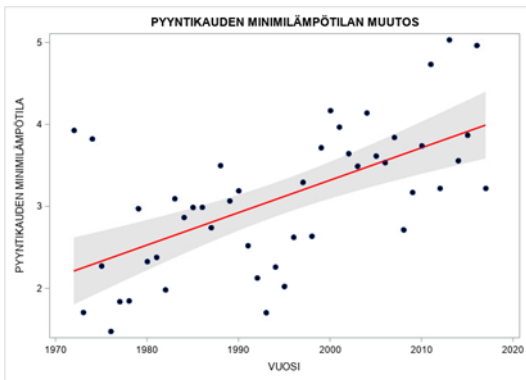
c.



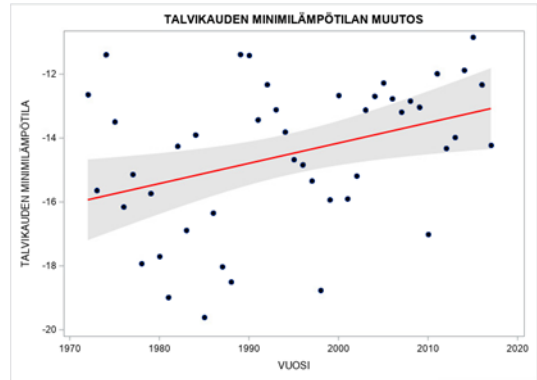
d.



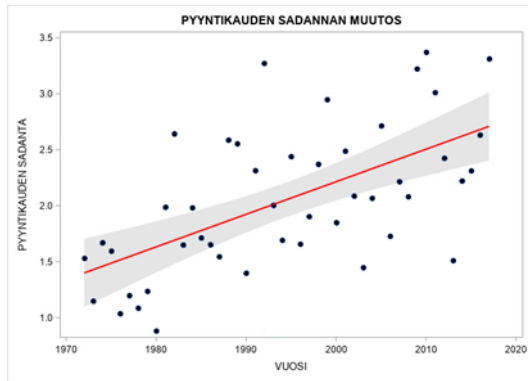
e.



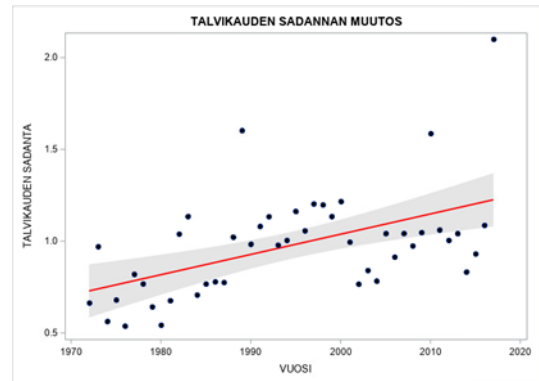
f.



g.



h.



Kuva 1. Pyynti- ja talvikauden säämuuttujien ajallinen trendi tutkimusvuosien 1972 – 2017 aikana. a. Lämpösumma ( $> +5^{\circ}\text{C}$ ), b. Lämpösumma ( $> +0^{\circ}\text{C}$ ), c. Pyyntikauden keskilämpötila d. Talvikauden keskilämpötila e. Pyyntikauden minimilämpötila, f. Talvikauden minimilämpötila, g. Pyyntikauden sadanta, h. Talvikauden sadanta. Vuosien määrä  $n = 46$ .

### 3.2. Yöperhosten lukumäärien muutos tutkimusvuosien aikana

Perhosaineiston alustavissa analyyseissä tarkastelin aineistossa esiintyvien yöperhoslajien otoskokoa, kokonaisuksilömäärää, minimi- ja maksimimäärää sekä esiintymistietojen keskiarvoa ja keskihajontaa. Tein alustavat analyysit perhosaineiston alkuperäisillä arvoilla (ei +1 lisäystä vuotuisiin määriin logaritminmuunnosta varten). Arvot ovat kaikkien rysien yhteenlaskettujen perhosmäärien vuotuiset keskiarvot (Taulukko 3).

Taulukko 3. Tutkittavien yöperhoslajien minimi- ja maksimimäärät, otoskoko, sekä esiintymistietojen keskiarvo ja keskihajonta

Laji	n Vuodet	Yksilöitä aineistossa	Min	Max	Keskiarvo	Keskihajonta
<i>Diarsia mendica</i>	46	938	0	235	20,4	44,9
<i>Dysstroma citratum</i>	46	1357	0	256	29,5	54,4
<i>Entephria caesiata</i>	46	16987	8	2148	369	472
<i>Epirrita autumnata</i>	46	542472	86	178495	11800	32100
<i>Eulithis populata</i>	46	7669	1	2012	167	312
<i>Operophtera brumata</i>	46	29141	0	12455	634	2400
<i>Poecilocampa populi</i>	46	549	0	77	11,9	14,8
<i>Scopula ternata</i>	46	2411	1	161	52,4	44,6
<i>Xestia alpicola</i>	46	875	0	310	19,0	52,6
<i>Xestia tecta</i>	46	150	0	22	3,26	5,86
<i>Xylena solidaginis</i>	46	905	0	219	19,7	39,5

Tilastollisesti merkitsevä muutos vuotuisissa yksilömäärissä esiintyi neljällä yöperhoslajilla, joista kaikilla lukumäärät olivat kasvaneet tutkimusvuosien aikana (Taulukko 4, Kuva 2): syysvarpumittarilla (Kuva 2b.) lukumäärät kasvoivat 7300 %, tunturimittarilla (Kuva 2d.) 720 %,



hallamittarilla (Kuva 2f.) 120000 % ja vaippayökkösellä (Kuva 2k.) 850 %. Lajikohtaiset kuvaajat (Kuva 2a. – k.) näyttävät lukumäärän kehityksen vuosien aikana.

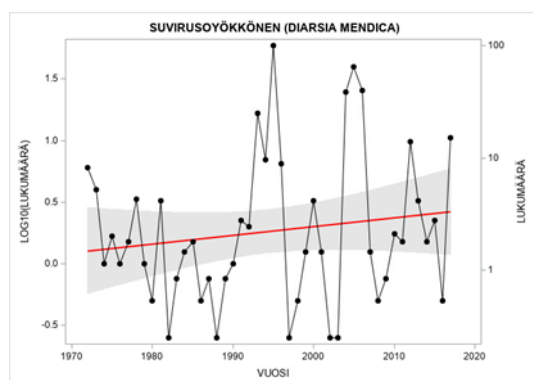
Populaatiokoon syklistä vaihtelua voidaan havaita erityisesti tunturi- ja hallamittarilla (Kuva 2d. ja f.), mutta myös metsäpohjanmittarilla (Kuva 2c.) ja mustikkamittarilla (Kuva 2e.) esiintyy syklistä vaihtelua kuvaajissa, vaikka ajallinen trendi ei ollut tilastollisesti merkitsevä (Taulukko 4.).

Puneharmo- ja ruskoharmoyökkönen lentävät vain joka toinen vuosi. Tämä johtuu niiden elinkierto-ominaisuuksista, sillä molemmat lajit talvehtivat toukkana kahtena talvena (ks. Aineisto ja menetelmät, Taulukko 1, yöperhoslajien elinkierto-ominaisuuksista), ja näin ollen aikuisia yksilöitä jää valorysiin vain joka toisena pyyntikautena (Kuva 2i. ja j.).

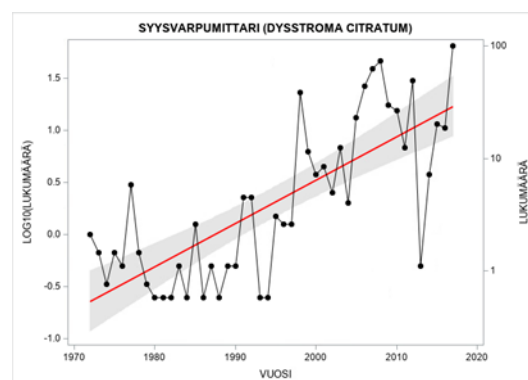
Taulukko 4. Regressioanalyysi havaituista muutoksista yöperhosten logaritimuunnetuissa lukumäärissä tutkimusvuosien aikana. Vuosien määrä n = 46.

Laji	n	Mallin vapausasteet DF	Virhevaihtelun DF	F-arvo	p-arvo	Regressiosuoran kulmakerroin $\beta$
<i>Diarsia mendica</i>	46	1	44	1,11	0,298	0,00704
<i>Dysstroma citratum</i>	46	1	44	56,19	<0,0001	0,0415
<i>Entephria caesiata</i>	46	1	44	0,55	0,464	-0,00495
<i>Epirrita autumnata</i>	46	1	44	6,15	0,0170	0,0203
<i>Eulithis populata</i>	46	1	44	0,52	0,475	0,00491
<i>Operophtera brumata</i>	46	1	44	57,87	<0,0001	0,0682
<i>Poecilocampa populi</i>	46	1	44	0,06	0,812	0,00123
<i>Scopula ternata</i>	46	1	44	2,90	0,0957	0,00816
<i>Xestia alpicola</i>	46	1	44	0,40	0,532	-0,00518
<i>Xestia tecta</i>	46	1	44	3,20	0,0806	-0,00858
<i>Xylena solidaginis</i>	46	1	44	9,97	0,0029	0,0218

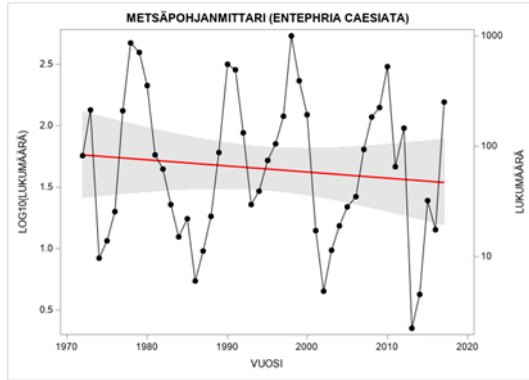
a.



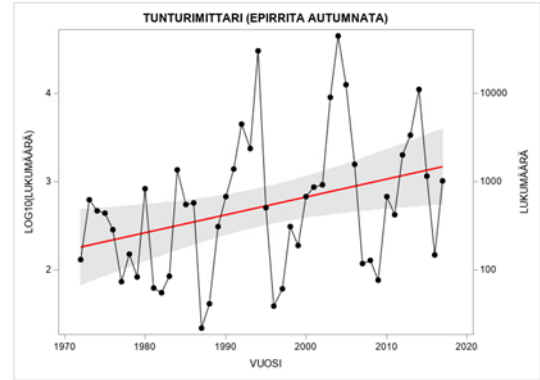
b.



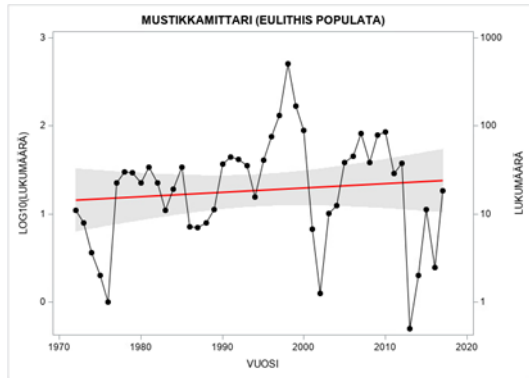
c.



d.



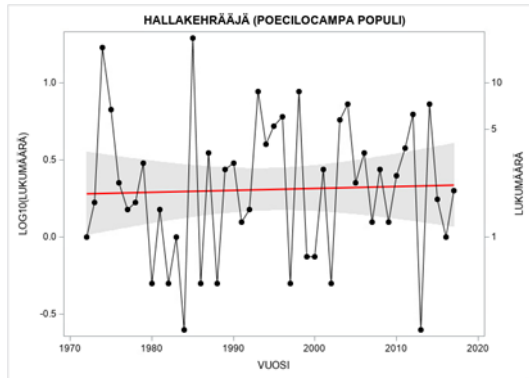
e.



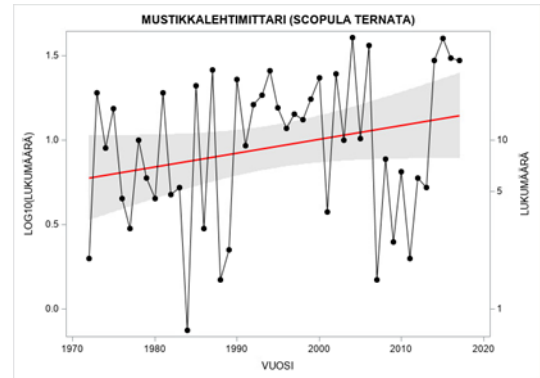
f.



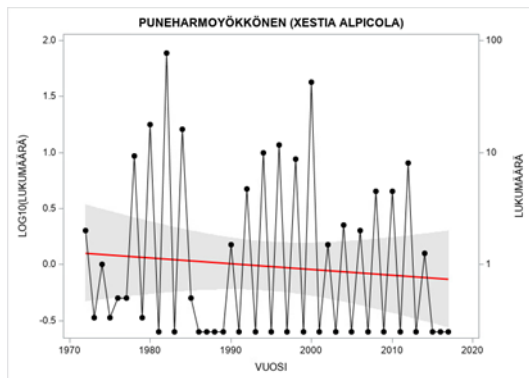
g.



h.



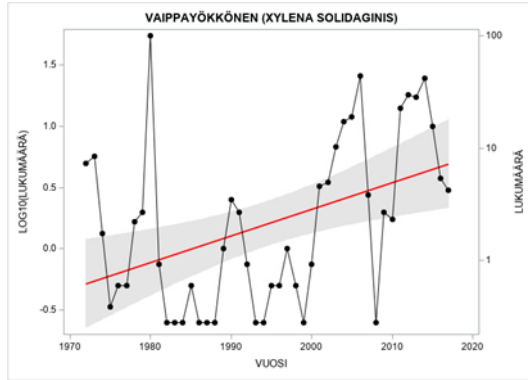
i.



j.



k.



Kuva 2. Yöperhoslajien lukumäärien ajallinen muutos tutkimusvuosien aikana. Kuvaajat: a. suvirusoyökkönen, b. sysyvarpumittari, c. metsäpohjanmittari, d. tunturimittari, e. mustikkamittari, f. hallamittari, g. hallakehrääjä, h. mustikkalehtimittari, i. puneharmoyökkönen, j. ruskoharmoyökkönen, k. vaipayökkönen. Vuosien määrä n = 46.

### 3.3. Tiheyden ja vuoden vaikutus yöperhosten massaan

Tilastollisesti merkitsevä muutos tutkittavien yöperhoslajien massassa oli havaittavissa seuraavilla lajeilla (Taulukko 5): metsäpohjanmittarinaaraiden (Kuva 3) massa oli pienentynyt 30 %, ja mustikkalehtimittarikoiraiden (Kuva 4) massa oli pienentynyt 20 %. Näin ollen molemmilla lajeilla vuosi oli negatiivisesti merkitsevä tekijä. Muilla tutkimuslajeilla ei ollut havaittavissa merkitsevää muutosta massassa tutkimusvuosien aikana. Lajien yksilötiheys ei vaikuttanut merkitsevästi yhdenkään tutkimuslajin yksilöiden massaan (Taulukko 5).

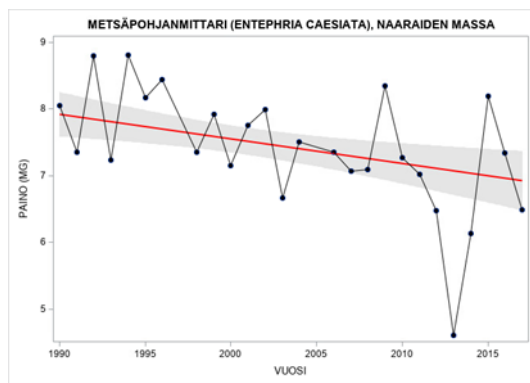
Taulukko 5. Regressioanalyysi yöperhoskoiraiden ja -naaraiden massan muutoksesta tutkimusvuosien aikana, ja tiheyden vaikutuksesta. Vuosien määrä n = 46.

Laji	Muuttuja	Massan keskiarvo (mg)	n Vuodet (lkm)	Punnitut yksilöt (lkm)	Mallin DF <sup>3</sup>	Virhevaihtelun DF	F-arvo	p-arvo <sup>4</sup>	Regressiosuoran kulmakerroin $\beta$
<i>Diarsia mendica</i> , ♂	Vuosi	18,3	22	202	2	19	0,70	0,924	-0,00468
	Tiheys							0,0274	0,0078
<i>Diarsia mendica</i> , ♀	Vuosi	19,4	13	50	2	10	0,42	0,727	-0,0621
	Tiheys							0,483	0,0125
<i>Dysstroma citratum</i> , ♂	Vuosi	5,12	22	206	2	19	1,84	0,0702	-0,0554
	Tiheys							0,267	0,00371
<i>Dysstroma citratum</i> , ♀	Vuosi	6,57	21	189	2	18	2,33	0,0606	-0,0562
	Tiheys							0,120	0,00472
<i>Entephria caesiata</i> , ♂	Vuosi	5,73	27	418	2	24	1,05	0,262	-0,0154
	Tiheys							0,617	0,000109
<i>Entephria caesiata</i> , ♀	Vuosi	7,41	26	348	2	23	5,17	<b>0,0044</b>	-0,0613
	Tiheys							0,73	-0,000110
<i>Epirrita autumnata</i> , ♂	Vuosi	7,32	27	645	2	24	1,99	0,0581	-0,0224
	Tiheys							0,755	-7,26

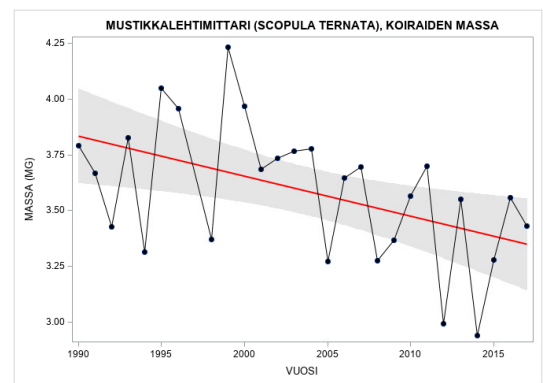
<sup>3</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvot ovat koko mallin arvot (molemmat selittävät muuttujat).

<sup>4</sup> P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

<i>Epirrita</i>	Vuosi	7,70	24	214	2	21	1,75	0,689	-0,0121
<i>autumnata</i> , ♀	Tiheys							0,0804	0,0000120
<i>Eulithis</i>	Vuosi	5,12	27	482	2	24	1,16	0,141	-0,0125
<i>populata</i> , ♂	Tiheys							0,726	-0,0000623
<i>Eulithis</i>	Vuosi	5,10	15	25	2	12	1,93	0,813	0,00583
<i>populata</i> , ♀	Tiheys							0,0789	-0,0024
<i>Operophtera</i>	Vuosi	3,22	20	608	2	17	1,33	0,130	-0,0282
<i>brumata</i> , ♂	Tiheys							0,951	0,00000206
<i>Operophtera</i>		—	—	—	—			—	—
<i>brumata</i> , ♀									
<i>Poecilocampa</i>	Vuosi	47,4	24	154	2	21	0,08	0,714	0,0489
<i>populi</i> , ♂	Tiheys							0,879	0,0154
<i>Poecilocampa</i>	Vuosi	53,4	19	75	2	16	0,72	0,251	-0,346
<i>populi</i> , ♀	Tiheys							0,496	-0,169
<i>Scopula</i>	Vuosi	3,59	27	497	2	24	3,76	<b>0,0114</b>	-0,0181
<i>ternata</i> , ♂	Tiheys							0,895	0,000153
<i>Scopula</i>	Vuosi	3,95	6	10	2	3	1,30	0,208	-0,291
<i>ternata</i> , ♀	Tiheys							0,248	-0,0767
<i>Xestia</i>	Vuosi	39,1	12	144	2	9	1,75	0,795	-0,0403
<i>alpicola</i> , ♂	Tiheys							0,106	0,0480
<i>Xestia</i>	Vuosi	31,7	5	10	2	2	12,54	0,0791	-1,07
<i>alpicola</i> , ♀	Tiheys							0,162	0,0616
<i>Xestia</i>	Vuosi	38,9	10	44	2	7	2,47	0,729	-0,124
<i>tecta</i> , ♂	Tiheys							0,117	0,682
<i>Xestia</i>	Vuosi	27,4	4	12	2	1	0,14	0,704	-1,41
<i>tecta</i> , ♀	Tiheys							0,765	-0,774
<i>Xylena</i>	Vuosi	44,7	20	181	2	17	0,51	0,508	0,152
<i>solidaginis</i> , ♂	Tiheys							0,707	0,0180
<i>Xylena</i>	Vuosi	49,4	16	126	2	13	0,82	0,778	-0,0620
<i>solidaginis</i> , ♀	Tiheys							0,258	-0,0414



Kuva 3. Metsäpohjanmittarinaaraiden massan trendi



Kuva 4. Mustikkalehtimittarikoiraiden massan trendi

### 3.4. Pyynti- ja talvikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten lukumääriin

Tilastollisesti merkitseviä tuloksia pyyntikauden (touko – lokakuu, kattaa valorysien koko aktiivisen ajan) ilmaston ja sään vaikutuksista yöperhosiin ilmeni kuudella lajilla (Taulukko 6, lihavoidut arvot): syysvarpumittarilla sadannalla oli positiivisesti ja tilastollisesti merkitsevä vaikutus, eli pyyntikauden aikainen runsas sadanta lisäsi syysvarpumittareiden määriä. Metsäpohjanmittarilla pyyntikauden lämpösumman vaikutus oli negatiivisesti ja tilastollisesti merkitsevä, eli niiden lukumäärät olivat alhaisempia lämpösumman ollessa korkea. Tunturimittarilla pyyntikauden lämpösummalla oli positiivisesti merkitsevä vaikutus, eli korkeampi lämpösumma pyyntikaudella lisäsi yksilöiden määrää. Mustikkamittarilla molemmat pyyntikauden säämuuttajat olivat tilastollisesti merkitseviä. Lämpösumman vaikutus oli negatiivinen, eli lämpösumman kasvaessa mittareiden lukumäärä pieneni. Sadannan vaikutus mustikkamittareiden määrään oli puolestaan positiivinen. Myös hallamittarilla molempien säämuuttajien vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä. Sekä lämpösumman että sadannan vaikutus hallamittarin lukumääriin oli positiivinen. Vaippayökkösellä pyyntikauden lämpösummalla oli positiivinen merkitsevä vaikutus yksilömääriin, eli lämpösumman ollessa korkea yökkösten lukumäärä oli suurempi.

Talvikauden (marras - huhtikuu) ilmasto- ja säätekijöillä oli tilastollisesti merkitseviä vaikutuksia seuraaville yöperhoslajeille (Taulukko 6, lihavoidut arvot): Talven sadannalla oli positiivisesti merkitsevä vaikutus syysvarpumittarin lukumääriin, jolloin ne kasvoivat sadannan ollessa runsasta. Metsäpohjanmittarilla molempien säätekijöiden vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä: lämpösumman vaikutus oli negatiivinen, eli talvikauden korkeampi lämpösumma vähensi yksilömääriä. Sadannan vaikutus oli puolestaan positiivinen, runsaan sadannan lisätessä perhosten lukumääriä. Tunturimittarilla talvikauden lämpösummalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus yksilömääriin, eli korkea lämpösumma lisäsi yksilömääriä. Mustikkamittarilla talven molemmilla säätekijöillä oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus: korkeampi lämpösumma vaikutti negatiivisesti mustikkamittarin lukumääriin niitä vähentäen, ja runsas sadanta puolestaan positiivisesti kasvattaen yksilömääriä. Myös hallamittarilla molemmat säätekijät vaikuttivat sen lukumääriin tilastollisesti merkitsevästi. Sekä lämpösummalla että sadannalla oli positiivinen vaikutus hallamittarin määriin, jolloin lajin yksilömäärät olivat suuremmat talven lämpösumman ollessa korkea ja sadannan runsasta. Vaippayökkösellä lämpösummalla oli positiivinen tilastollisesti merkitsevä vaikutus sen lukumääriin, korkean lämpösumman kasvattaessa niitä.

Taulukko 6. Regressioanalyysi pyynti- ja talvikauden sadannan ja lämpösumman vaikutuksesta yöperhosten logaritminuunneltuihin lukumääriin. Vuosien määrä n = 46, DF1 = mallin vapausasteet, DF2 = virhevaihtelun vapausasteet.

Laji	Muuttuja	n	DF 1 <sup>5</sup>	DF 2	F-arvo pyynti	p-arvo pyynti <sup>6</sup>	β pyynti	F-arvo talvi	p-arvo talvi	β talvi
<i>Diarsia mendica</i>	Lämpösumma	46	2	43	0,10	0,897	0,000159	0,44	0,872	-0,000282
	Sadanta	46				0,662	0,0624		0,359	0,295
<i>Dysstroma citratum</i>	Lämpösumma	46	2	43	8,58	0,697	0,000504	7,02	0,182	0,00256
	Sadanta	46				<b>0,0002</b>	0,615		<b>0,0012</b>	1,19
<i>Entephria caesiata</i>	Lämpösumma	46	2	43	4,04	<b>0,0090</b>	-0,00307	6,73	<b>0,0090</b>	-0,00417
	Sadanta	46				0,496	0,0892		<b>0,0158</b>	0,701
<i>Epirrita autumnata</i>	Lämpösumma	46	2	43	3,29	<b>0,0163</b>	0,00370	3,16	<b>0,0160</b>	0,00531
	Sadanta	46				0,523	0,110		0,927	0,0358
<i>Eulithis populata</i>	Lämpösumma	46	2	43	6,38	<b>0,009</b>	-0,00299	5,70	<b>0,0308</b>	-0,00353
	Sadanta	46				<b>0,0327</b>	0,279		<b>0,0131</b>	0,748
<i>Operophtera brumata</i>	Lämpösumma	46	2	43	13,33	<b>0,0004</b>	0,00756	17,16	<b>&lt;0,0001</b>	0,0139
	Sadanta	46				<b>0,0010</b>	0,796		<b>0,0190</b>	1,18
<i>Poecilocampa populi</i>	Lämpösumma	46	2	43	1,49	0,0929	-0,00156	0,90	0,206	-0,00168
	Sadanta	46				0,811	-0,0252		0,722	-0,0858
<i>Scopula ternata</i>	Lämpösumma	46	2	43	0,37	0,405	-0,000750	0,26	0,706	-0,000485
	Sadanta	46				0,847	-0,0200		0,539	0,145
<i>Xestia alpicola</i>	Lämpösumma	46	2	43	0,85	0,260	-0,00168	0,72	0,283	-0,00229
	Sadanta	46				0,510	-0,113		0,628	-0,188
<i>Xestia tecta</i>	Lämpösumma	46	2	43	2,12	0,216	-0,00108	1,27	0,209	-0,00160
	Sadanta	46				0,102	-0,167		0,360	-0,212
<i>Xylena solidaginis</i>	Lämpösumma	46	2	43	10,39	<b>&lt;0,0001</b>	0,00519	14,61	<b>&lt;0,0001</b>	0,00824
	Sadanta	46				0,941	0,00979		0,563	-0,163

Kesäkauden minimilämpötilalla ja sadannalla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus seuraavien lajien lukumääriin (Taulukko 7): Syysvarpumittarilla sadannalla oli positiivinen merkitsevä vaikutus sen lukumääriin, jolloin lämpimän kauden runsas sadanta kasvatti niitä. Metsäpohjanmittarilla minimilämpötilalla oli merkitsevä negatiivinen vaikutus sen lukumääriin, eli metsäpohjanmittarin yksilömäärät olivat pienemmät minimilämpötilan ollessa korkeampi. Mustikkamittarilla sadannalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus, eli pyyntikauden runsas sadanta lisäsi niiden lukumääriä. Hallamittarilla minimilämpötilalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus, eli pyyntikauden minimilämpötilan ollessa korkeampi myös mittareiden määrät kasvoivat. Myös vaippayökkösellä minimilämpötilalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus.

Talvikauden minimilämpötilalla ja sadannalla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus kuudella lajilla (Taulukko 7): samoin kuin kesäkauden minimilämpötilan ja sadannan vaikutuksia tarkastellessa, syysvarpumittarilla sadannalla oli positiivinen merkitsevä vaikutus yksilömääriin,

<sup>5</sup> Mallin (DF1) ja virhevaihtelun (DF2) vapausasteet sekä F-arvot koko mallin arvoja. Vapausasteet ovat samat pyynti- ja talvikauden analyyseissa.

<sup>6</sup> P-arvot ja regressiosuoran kulmakertoimet yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

eli talvikauden runsas sadanta lisäsi niiden määriä. Myös metsäpohjanmittarilla talvikauden sadannalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus. Tunturimittarilla talvikauden minimilämpötilalla oli positiivinen merkitsevä vaikutus niiden yksilömääriin, eli korkea minimilämpötila kasvatti tunturimittareiden määriä. Mustikkamittarilla sadannalla oli positiivinen merkitsevä vaikutus yksilömääriin, eli runsas sadanta kasvatti niiden yksilömääriä. Hallamittarilla talvikauden korkealla minimilämpötilalla oli myös positiivisesti merkitsevä vaikutus, jolloin yksilömäärät kasvoivat korkean minimilämpötilan myötä. Lopuksi myös vaippayökkösellä talven minimilämpötilalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus sen yksilömääriin.

Taulukko 7. Regressioanalyysi pyynti- ja talvikauden minimilämpötilan ja sadannan vaikutuksesta yöperhosten logaritimuunnettuihin lukumääriin. Vuosien määrä n = 46, DF1 = mallin vapausasteet, DF2 = virhevaihtelun vapausasteet.

Laji	Muuttuja	n	DF 1 <sup>7</sup>	DF 2	F-arvo pyynti	p-arvo pyynti <sup>8</sup>	β pyynti	F-arvo talvi	p-arvo talvi	β talvi
<i>Diarsia mendica</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	0,26	0,572	-0,0630	1,54	0,147	0,0575
	Sadanta mm	46				0,553	0,0892		0,463	0,232
<i>Dysstroma citratum</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	10,66	0,0842	0,199	7,40	0,126	0,0670
	Sadanta mm	46				<b>0,0012</b>	0,526		<b>0,0021</b>	1,13
<i>Entephria caesiata</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	3,87	<b>0,0106</b>	-0,273	3,85	0,134	-0,0564
	Sadanta mm	46				0,119	0,219		<b>0,0163</b>	0,742
<i>Epirrita autumnata</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	0,60	0,346	0,135	4,44	<b>0,0048</b>	0,141
	Sadanta mm	46				0,844	0,0378		0,813	-0,0903
<i>Eulithis populata</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	4,38	0,0555	-0,203	3,87	0,191	-0,0499
	Sadanta mm	46				<b>0,0092</b>	0,378		<b>0,0127</b>	0,785
<i>Operophtera brumata</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	19,89	<b>&lt;0,0001</b>	0,826	6,27	<b>0,0079</b>	0,199
	Sadanta mm	46				0,0678	0,409		0,0805	1,03
<i>Poecilocampa populi</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	0,41	0,379	-0,0747	0,34	0,472	0,0221
	Sadanta mm	46				0,910	0,0129		0,634	-0,117
<i>Scopula ternata</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	0,02	0,946	-0,00555	0,29	0,646	0,0135
	Sadanta mm	46				0,893	-0,0149		0,589	0,128
<i>Xestia alpicola</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	0,87	0,251	-0,155	0,13	0,979	-0,00133
	Sadanta mm	46				0,827	-0,0395		0,619	-0,197
<i>Xestia tecta</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	1,56	0,479	-0,0565	0,88	0,360	-0,0269
	Sadanta mm	46				0,202	-0,138		0,418	-0,191
<i>Xylena solidaginis</i>	Minimilämpötila °C	46	2	43	7,39	<b>0,0004</b>	0,417	3,06	<b>0,0186</b>	0,104
	Sadanta mm	46				0,200	-0,190		0,494	-0,236

<sup>7</sup> Mallin (DF1) ja virhevaihtelun (DF2) vapausasteet sekä F-arvot ovat koko mallin arvoja. Vapausasteet ovat samat pyynti- ja talvikauden analyyseissa.

<sup>8</sup> P-arvot ja regressiosuoran kulmakertoimet yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

### 3.5. Kirjosiepon pesimämenestys Kevolla

Kirjosiepon pesintää on seurattu 32 vuotta, mutta lentopoikasista aineistoa oli saatavilla 31 vuoden ajalta. Tarkastelin lintuaineiston muuttujien minimi-, maksimi-, ja keskiarvoja, sekä keskihajontaa (Taulukko 8).

Taulukko 8. Kirjosiepon pesyekoon, sekä kuoriutuneiden ja lentopoikasten minimi- ja maksimimäärät, seurantavuodet sekä keskiarvo ja keskihajonta.

Muuttuja	n Vuodet	Min	Max	Keskiarvo	Keskihajonta
<b>Pesyekoko</b>	32	5,39	6,33	5,89	0,248
<b>Kuoriutuneet</b>	32	2	5,75	4,55	0,859
<b>Lentopoikaset</b>	31	1,59	5,44	3,87	0,93

Kesäkuun säätekijöillä, eli sadannalla ja lämpösummalla, tai munintapäivällä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta kirjosiepon pesyekokoon (Taulukko 9). Tulos oli sama myös mallissa, jossa lämpösumma oli korvattu kesäkuun minimilämpötilalla, muiden muuttujien pysyessä samoina.

Yöperhosten logaritmuunnetun lukumäärän summalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus pesyekokoon, eli yöperhosten määrän ollessa suurempi, myös kirjosiepon pesyekoko kasvoi noin 5 % (Taulukko 10, Kuva 5). Munintapäivällä oli negatiivinen merkitsevä vaikutus pesyekokoon. Kirjosiepon pesyekoko pieneni juliaanisen munintapäivän ollessa myöhäisempi (Taulukko 10, Kuva 6).

Taulukko 9. Regressioanalyysi kesäkuun säätekijöiden ja munintapäivän vaikutuksesta kirjosiepon pesyekokoon. Tutkimusvuosien määrä n = 32.

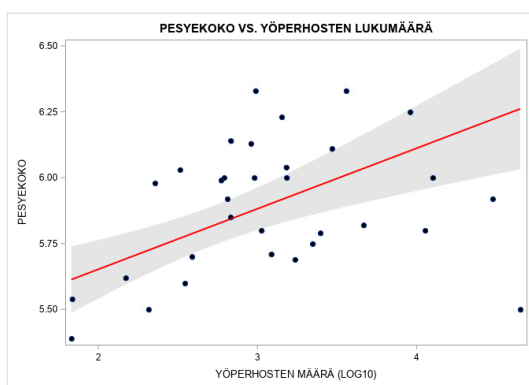
Muuttuja	n Vuodet	Malli DF <sup>9</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Munintapäivä</b>					0,366	-0,0161
<b>Sadanta kesäkuu</b>	32	3	28	4,34	0,730	0,0101
<b>Lämpösumma kesäkuu</b>					0,149	0,00198

<sup>9</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakertoimet ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

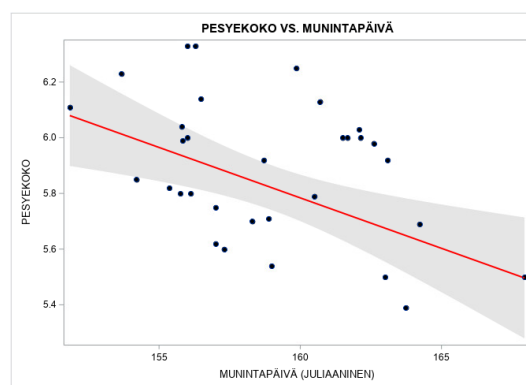


Taulukko 10. Regressioanalyysi yöperhosten runsauden ja munintapäivän vaikutuksesta kirjosisiepon pesyekokoon. Tutkimusvuosien määrä n = 32.

Muuttuja	n vuodet	Malli DF <sup>10</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Yöperhosten lukumäärä</b>	32	2	29	11,88	<b>0,0038</b>	0,180
<b>Munintapäivä</b>					<b>0,0437</b>	-0,0225



Kuva 5. Yöperhosten lukumäärän vaikutus pesyekokoon



Kuva 6. Munintapäivän vaikutus pesyekokoon

Samoin kuin säätelijöiden vaikutusta pesyekokoon selittävissä mallissa, kuorituneiden poikasten määrää selittävissä mallissa yksittäisillä säätelijöillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta (Taulukko 11). Kesäkuun minimilämpötilan vaikutusta tarkastelevassa mallissa yksittäisillä säätelijöillä ei ollut vaikutusta kuorituneiden poikasten lukumääriin. Yöperhosten logaritmuunnetulla määrällä ei ollut merkitsevää vaikutusta kuorituneiden poikasten määriin (Taulukko 12).

Taulukko 11. Regressioanalyysi kesäkuun säätelijöiden ja kuoritumispäivän vaikutuksesta kirjosisiepon kuorituneiden poikasten määrään. Tutkimusvuosien määrä n = 32.

Muuttuja	n Vuodet	Malli DF <sup>11</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Kuoritumispäivä</b>					0,994	0,000362
<b>Sadanta kesäkuu</b>	32	3	28	3,81	0,0968	-0,145
<b>Lämpösumma kesäkuu</b>					0,0684	0,00768

<sup>10</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

<sup>11</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

Taulukko 12 Regressioanalyysi yöperhosten runsauden ja kuoriutumispäivän vaikutuksesta kuoriutuneiden poikasten määrään. Tutkimusvuosien määrä n = 32.

Muuttuja	n Vuodet	Malli DF <sup>12</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Yöperhosten lukumäärä</b>	32	2	29	1,63	0,883	-0,0313
<b>Kuoriutumispäivä</b>				1,63	0,0983	-0,0638

Säätökijöistä lentopoikasten määriin tilastollisesti merkitsevästi vaikutti ainoastaan kesäkuun sadanta, ja sen vaikutus lukumääriin oli negatiivinen (Taulukko 13, Kuva 7), vähentäen lentopoikasten määriä noin 3 %. Minimilämpötilan vaikutusta tarkastelevassa mallissa ainoastaan kesäkuun sadannalla oli negatiivinen merkitsevä vaikutus lentopoikasten määriin (n = 31 vuotta,  $\beta = 0,241$ ,  $F_{3,27} = 4,12$ ,  $p = 0,0314$ ). F-arvo on koko mallin arvo. Tulos on lähes sama kuin sadannalla lämpösumman ja sadannan vaikutusta tarkastelevassa mallissa (Taulukko 13). Samoin kuin kuoriutuneilla poikasilla, yöperhosten logaritimuunnetulla määrällä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta lentopoikasten määriin (Taulukko 14).

Taulukko 13. Regressioanalyysi kesäkuun säätökijöiden ja kuoriutumispäivän vaikutuksesta lentopoikasten lukumääriin. Tutkimusvuosien määrä n = 31.

Muuttuja	n Vuodet	Malli DF <sup>13</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Kuoriutumispäivä</b>					0,705	-0,0256
<b>Sadanta kesäkuu</b>	31	3	27	4,40	<b>0,0328</b>	-0,236
<b>Lämpösumma kesäkuu</b>					0,138	0,00809

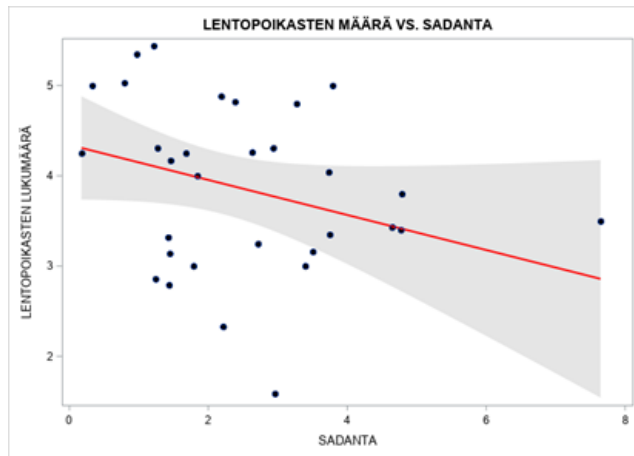
Taulukko 14. Regressioanalyysi yöperhosten runsauden ja kuoriutumispäivän vaikutuksesta lentopoikasten määrään. Tutkimusvuosien määrä n = 31.

Muuttuja	n vuodet	Malli DF <sup>14</sup>	Virhevaihtelu DF	F-arvo	p-arvo	$\beta$
<b>Yöperhosten lukumäärä</b>	31	2	28	2,81	0,197	0,345
<b>Kuoriutumispäivä</b>					0,243	-0,0566

<sup>12</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

<sup>13</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.

<sup>14</sup> Mallin ja virhevaihtelun vapausasteet sekä F-arvo ovat koko mallin arvoja. P-arvo ja regressiosuoran kulmakerroin ovat yksittäisten selittävien muuttujien arvoja.



Kuva 7. Sadannan vaikutus lentopoikasten lukumääriin. Vuosien määrä n = 31.

## 4. Tulosten tarkastelu

### 4.1. Havaitut muutokset tutkimusalueen ilmastossa

Analyysien tulokset vastaavat hyvin kirjallisuudessa, ja aikaisemmissa tutkimuksissa tehtyjä havaintoja ilmastonmuutoksesta pohjoisilla alueilla (mm. Box ym., 2019; Keret ym., 2020). Pyyntikauden, eli touko – lokakuun (koko kesän kattava valorysien aktiivinen aika) keski- ja minimilämpötilat olivat kohonneet tutkimusvuosien 1972 – 2017 aikana 1,5°C ja 1,8°C. Myös pyyntikauden sadanta oli lisääntynyt 1,3 mm. Talvikaudella, eli marras – tammikuussa muutoksia oli havaittavissa kaikissa tarkasteltavana olleissa säämuuttujissa. Talvikauden keski- ja minimilämpötila kasvoivat tutkimusvuosien aikana 2,2°C ja 2,9°C, samoin kuin sadanta 0,5 mm. Myös talvikauden lämpösumma, eli päivien, joiden keskilämpötila ylittää 0°C, oli kasvanut 74,6 °C vrk.

Pyyntikauden lämpösummassa, eli päivien määrässä, jolloin vuorokauden keskilämpötila ylittää +5°C ei ollut regressiomallien mukaan tapahtunut merkitsevää muutosta tutkimusvuosien aikana. Regressiosuora on kuitenkin nouseva, vaikka tulos ei ole tilastollisesti merkitsevä. Tämä viittaisi siihen, että pohjoisen lajiston kannalta suotuisa kasvukausi ei ole suuremmin muuttunut tutkimusvuosien aikana. Tämä tulos poikkeaa aiemmasta kirjallisuudesta, jonka mukaan arktisten alueiden kasvukausi on pidentynyt (Bale & Hayward, 2010; Pateman ym., 2012; Walther ym., 2002). Gradussa havaittu tulos voi johtua esimerkiksi paikallisesta vaihtelusta, sillä ilmastonmuutoksen vaikutukset eivät välttämättä ole samanlaiset kaikilla maantieteellisillä alueilla (Phoenix & Lee, 2004).

Pyyntikauden kohonneet keski- ja minimilämpötilat voivat edistää Kevon lajiston menestystä kasvukaudella. Koska esimerkiksi perhosten toiminta on lämpötilariippuvaista, lämpimämpi

kasvukausi mahdollistaa esimerkiksi suuremman aktiivisuuden, nopeamman yksilönkehityksen, ja populaatiokokojen kasvun (Bale & Hayward, 2010; Callaghan ym., 2004b; Danks, 2004; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Toisaalta kevään ja kesän lämpenemisellä voi olla negatiivisia vaikutuksia eliöille: yksilönkehityksen ajoitus voi mennä epäsuhtaan esimerkiksi ravintokasveihin nähden, ja lämpötilan liiallinen nousu voi muuttaa lajin elinympäristön sille sopimattomaksi (Bale & Hayward, 2010; Callaghan ym., 2004b; Danks, 2004; Fox, 2013). Pyyntikauden kasvanut sadanta voi heikentää tiettyjen lajien menestystä, esimerkiksi yöperhosten aktiivisuutta vähentämällä (Veistola ym., 1995, 1997).

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat aiempien tutkimusten mukaan voimakkaampia talvella (Box ym., 2019), mikä vastaa myös gradutyöni tuloksia. Keski- ja minimilämpötilan, sekä lämpösumman kasvaminen oli voimakkaampaa talvikaudella. Sadanta oli analyysieni mukaan runsastunut enemmän pyyntikaudella kuin talvikaudella, mikä ei täysin vastaa aiempaa tietoa (Box ym., 2019).

Talvikauden lämpösumma oli kasvanut, mikä voi viitata talven lyhentymiseen Lapissa, tai lämpötilan vaihteluihin talven aikana. Tulos vastaa hyvin aiempaa kirjallisuutta mm. (Keret ym., 2020; Post ym., 2009). Pyyntikauden lämpösumma ei kuitenkaan ollut muuttunut, joten kasvukausi ei todennäköisesti ole pidentynyt, sillä alle viiden celsiusasteen lämpötila ei ole välttämättä riittävää kasvien ja eliöiden toiminnan alkamiselle. Lämpösumman muutosta olisi hyvä tarkastella lisää mahdollisissa jatkotutkimuksissa, erityisesti siltä kannalta, johtuuko lämpösumman kasvu talven alkamisen myöhästymisestä tai kevään aikaistumisesta, vai onko kyse lämpötilan vaihteluista talven aikana.

Leudommat talvet parantavat monien pohjoisten lajien selviytymistä talven yli. Runsas sadanta tarjoaa paksun lumikerroksen, joka toimii eristävänä kerroksena ja mahdollistaa mm. perhosten talvehtivien vaiheiden selviytymisen. Myös lajit, jotka eivät aiemmin menestyneet pohjoisessa ankaran talven vuoksi, voivat menestyä paremmin ja levitä vielä pohjoisemmaksi (Bale & Hayward, 2010; Box ym., 2019; Danks, 2004; Fox, 2013; Pitts ym., 2005; Woiod, 1997). Leudommat talvet voivat olla hyödyllisiä myös paikallisille lajeille: esimerkiksi tunturimittarin talvehtivat munat eivät selviydy liian alhaisista lämpötiloista. Mikäli talven lämpötilat pysyvät korkeampina, suurempi osa munista pääsee kuoriutumaan keväällä (Callaghan ym., 2004b; Virtanen & Neuvonen, 1999b).

Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että terrestristen alueiden lumipeite on vähentynyt viime vuosikymmenien aikana, ja lumi sataa maahan myöhemmin (Box ym., 2019). Lumipeitteen sulaminen talven aikana voi altistaa eliöt sääolosuhteille ja heikentää niiden selviytymistä ja menestystä kasvukaudella (Phoenix & Lee, 2004). Toisaalta ohuempi lumipeite sulaa nopeammin keväällä, mahdollistaen aikaisemman ja pidemmän kasvukauden (Bale & Hayward, 2010; Post ym., 2009; Strathdee & Bale, 1998). Vaikka Kevolla on kerätty tietoja myös lumen syvyydestä ja

lumipeitteen ajallisesta kestosta, en analysoinut niitä tässä gradussa. Lumipeite on tärkeä monien eliölajien, esimerkiksi yöperhosten talvehtimismuotojen, selviytymisen ja kasvukauden pituuden kannalta (Danks, 2004; Mattila ym., 2008; Sinclair ym., 2003; Strathdee & Bale, 1998; Virtanen & Neuvonen, 1999a), joten muutosta lumipeitteessä on hyvä tarkastella mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

Eryyisesti talvikuukausien aikana havaittu ilmankosteuden kasvu niin maa- kuin merialueillakin on lisännyt sadannan määrää, mutta sen on havaittu tulevan monilla alueilla vesisateena lumen sijasta (mm. Box ym., 2019). Tämän gradun tulokset vastaavat hyvin aiempia tutkimuksia tältä osalta. Kevolla talvikauden keskilämpötilat ovat kuitenkin pitkään varsin alhaiset, joten siellä lunta sataa varsin runsaasti. Muutokset kosteudessa ja lämpötiloissa voivat muuttaa paikallista kasvillisuutta, millä on suuret vaikutukset koko pohjoisten alueiden ekosysteemeihin ja lajistoon (Box ym., 2019).

Kasvillisuuden mahdollisia muutoksia ilmastonmuutoksen myötä ei huomioitu tässä gradutyössä. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa kasviyhteisöjen muutokset olisi kuitenkin hyvä huomioida, sillä esimerkiksi uusien isäntäkasvien leviäminen mahdollistaa eteläisempien yöperhoslajien pysyvän kolonisoinnin pohjoisessa (Keret ym., 2020; Strathdee & Bale, 1998), ja vastaavasti pohjoisten kasvilajien runsauden ja levinneisyyden heikentyminen voi vähentää erityisesti ravintospecialistien populaatiokokoja (Strathdee & Bale, 1998; Virtanen & Neuvonen, 1999a; Woiwod, 1997).

#### **4.2. Muutokset tutkittavien yöperhoslajien lukumäärissä**

Tutkittavista yöperhoslajeista syysvarpumittarin, tunturimittarin, hallamittarin ja vaippayökkösen lukumäärät olivat kasvaneet voimakkaasti tutkimusvuosien aikana. Kasvu oli erityisen merkittävää hallamittarilla, joka on Kevolla suhteellisen uusi tulokas. Kaikilla neljällä lajilla oli yhdistäviä elinkierto-ominaisuuksia: kaikki olivat munina talvehtivia lajeja, joiden lentoaika sijoittui loppukesään ja alkusyksyyn. Yhdelläkään toukkana talvehtivista tutkimuslajeista ei esiintynyt lukumäärien kasvua. Muiden lajien keskimääräinen lentoaika oli elo – syyskuussa, mutta hallamittari lensi syys – lokakuussa. Kaikki neljä lajia olivat myös moniruokaisia, mutta niin olivat myös muut tutkimuslajit. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että erityisesti munina talvehtivat lajit hyötyvät ilmastonmuutoksesta (mm. Mattila ym., 2008; Virtanen & Neuvonen, 1999a). Esimerkiksi koivujen oksilla ilman lumikerroksen tuomaa suojaa talvehtiva tunturimittari on alttiina erityisesti laaksoihin keskittyvälle kylmyydelle, ja leudomprien talvien myötä niiden selviytyminen on huomattavasti parempaa (Virtanen & Neuvonen, 1999c). Munina talvehtivat lajit myös lentävät kasvukauden loppupuolella, eli myös talven viivästyminen voi lisätä niiden yksilömääriä (Mattila ym., 2008). Ilmastotekijöiden vaikutusta tarkastelen lisää myöhemmin

tässä kappaleessa. Myös generalistit, joita nämä lajit ovat, usein hyötyvät ilmastonmuutoksesta (Keret ym., 2020).

Pelkät elinkierto-ominaisuudet eivät kuitenkaan selitä lajien yksilömäärien kasvua. Aineistossa oli esimerkiksi muitakin munina talvehtivia lajeja, kuten mustikkamittari ja hallakehrääjä, mutta näillä lajeilla ei esiintynyt tilastollisesti merkitsevää muutosta lukumäärissä. Lajien elinkierto-ominaisuuksia ja niiden muutoksia on kuitenkin tärkeä tarkastella lisää tulevaisuudessa tutkimuksissa, esimerkiksi mahdollisten ilmastonmuutokseen sopeutumista edistävien tekijöiden tunnistamiseksi.

Yksilömäärien vähenemistä vuosien varrella oli havaittavissa kolmella lajilla: metsäpohjanmittarilla sekä pune- ja ruskoharmoyökkösellä. Nämä tulokset eivät kuitenkaan ole tilastollisesti merkitseviä. Kaikki nämä lajit talvehtivat toukkana, metsäpohjanmittari kerran ja yökköset kahdesti. Kaikkien kolmen lajin lentoaika alkaa myös pohjoiseen sijaintiin nähden suhteellisen aikaisin heinäkuussa. Pune- ja ruskoharmoyökkösen lentoajat ovat varsin lyhyet, mutta metsäpohjanmittari lentää syyskuuhun asti. Toukkana ja koteloina talvehtivat lajit ovat ilmastonmuutokselle alttiimpia, sillä ne ovat riippuvaisia eristävästä lumipeitteestä ja kärsivät sen ohenemisesta. Lisääntynyt sadanta vaikuttaa negatiivisesti pune- ja ruskoharmoyökkösen yksilömääriin, mutta tämä tulos ei ollut merkitsevä. Toukkana talvehtiminen on yleisintä pohjoisissa elinympäristöissä, ja näiden lajien levinneisyys on myös heikentynyt eniten (Mattila ym., 2008; Virtanen & Neuvonen, 1999a). Lajit, joiden lentoaika on lyhyt, ovat myös kärsineet ilmastonmuutoksesta (Mattila ym., 2008). Syynä on todennäköisesti se, että esimerkiksi pariutuminen voi epäonnistua, mikäli sääolosuhteet ovat heikot juuri lyhyenä lentoaikana.

Yöperhosten yhteenlasketuissa lukumäärissä esiintyi runsasta vuosien välistä vaihtelua. Kuten aiemmissakin tutkimuksissa on havaittu, suurin vaihtelun aiheuttaja on tunturimittari massaesiintymiensä vuoksi (Keret ym., 2020). Populaatiokoon syklistä vaihtelua on nähtävissä muun muassa metsäpohjanmittarilla ja hallamittarilla, vaikkakin populaatiokoon muutos ei ollut metsäpohjanmittarilla tilastollisesti merkitsevää. Pune- ja ruskoharmoyökkönen esiintyy vain joka toinen vuosi, sillä se talvehtii toukkana kahtena talvena. Kaikkien tutkimuslajien populaatiokoot vaihtelevat jossain määrin vuosittain, vaikka kaikilla yksilömäärien muutostrendi ei ollutkaan tilastollisesti merkitsevää. Populaatiokokojen vaihtelu on yleistä arktisilla alueilla, vaikka saman lajin eteläisten populaatioiden koot pysyisivät melko tasaisina vuosien välillä. Myös massaesiintymiä havaitaan pääasiassa pohjoisessa (Callaghan ym., 2004b; Strathdee & Bale, 1998; Tanhuanpää ym., 2001; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Valorysäpyynnit eivät kerro täydellisesti kunkin lajin vuotuista populaatiokokoa, mutta ne antavat hyvän arvion lajien vuotuisesta runsaudesta, mikä on myös erittäin arvokasta tietoa.

Yöperhosten lukumäärissä saattaa myös esiintyä jonkin verran virhevaihtelua. Valorysien lamput eivät olleet samanlaiset kaikkien rysiä ja keräysvuosien välillä. ”3 Aita” ja ”4 Suo” -rysiä

lamput vaihdettiin 250 watin tehoisiksi vuosina 2012 -2013, ”1 Sauna” ja ”5 Ranta” -rysiä lamput ovat puolestaan olleet teholtaan 500 wattia koko rysiä toiminnan ajan (Andersson, 2022). Näiden rysiä heikommat lamput voivat heikentää niiden pyyntitehoa, ja näin ollen vaikuttaa rysiä jäävien yöperhosten määrään ja gradutyön tuloksiin. Tein kuitenkin tilastoanalyysit kaikista valorysistä saadulla yöperhosten määrän logaritmuunnetulla summalla, mikä oli jaettu rysiä määrällä niiden lukumäärän vaihtelun huomioimiseksi, mikä saattaa tasoittaa kahden rysiä aiheuttamaa mahdollista heikompaa yöperhossaalista pyyntiajanjakson loppupuolelta.

### **4.3. Vuoden ja populaation tiheyden vaikutus yöperhosyksiöiden massa**

Yöperhospopulaatioiden tiheys ei vaikuttanut yhdelläkään lajilla niiden massa, vaikka aiemmissa tutkimuksissa tämä ilmiö on todettu useasti myös tässäkin gradututkimuksessa käytetyillä tutkimuslajeilla, kuten tunturimittarilla (Keret ym., 2020; Klemola ym., 2004; Ruohomäki ym., 2003; Scriber & Slansky, 1981).

Tulos saattaa myös johtua käyttämäni aineiston luonteesta: punnittuja yksilöitä oli rajallinen määrä, joillakin lajeilla ja sukupuolilla vain muutamia. Tulos olisi saattanut olla erilainen, mikäli kunkin lajin ja sukupuolen tilastollinen malli olisi painotettu punnittujen yksilöiden määrällä. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että myös muiden lajien tiheys voi vaikuttaa yksilöiden kokoon: esimerkiksi sekä tunturi- ja hallamittareiden tiheyden ollessa suuri, tunturimittareiden kotelot ja näin ollen aikuiset yksilöt jäävät pieniksi, heikentäen tulevaa lisääntymismenestystä (Heisswolf ym., 2009). Todennäköisesti erityisesti samoilla kasveilla ruokailevat ja toukkavaiheessa samaan aikaan kasvukaudella olevat lajit vaikuttavat toisiinsa, joten kaikkien lajien yhteenlaskettu tiheys ei olisi ollut tarpeen. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa muun muassa yöperhosten elinkierto-ominaisuudet, pyynti- ja talvikauden säätekijät sekä esiintymisaika kasvukaudella on hyvä ottaa tarkemmin huomioon.

Kahdella yöperhoslajilla yksilöiden massa oli kuitenkin muuttunut tutkimusvuosien edetessä. Metsäpohjanmittarinaaraiden ja mustikkalehtimittarikoiraiden ruumiin koko oli pienentynyt tutkimusvuosien kuluessa. Vaikka metsäpohjanmittarilla lukumäärän ja vuoden suhde ei ollut tilastollisesti merkitsevä, niiden lukumäärät vaikuttavat vähentyneen. Mikäli ilmastonmuutoksen myötä olosuhteet ovat muuttuneet metsäpohjanmittarin kannalta epäsuotuisiksi, voi olla, että se vaikuttaa negatiivisesti myös niiden ruumiin kokoon ja lisääntymismenestykseen. On myös mahdollista, että muiden yöperhoslajien tiheys vaikuttaa metsäpohjanmittarin massan pienentymiseen (Heisswolf ym., 2009; Ruohomäki ym., 2003). Mustikkalehtimittareiden lukumäärän muutokset eivät myöskään olleet tilastollisesti merkitseviä, mutta niiden yksilömäärät näyttävät lisääntyneen tutkimusvuosien varrella. Mustikkalehtimittari lentää suhteellisen aikaisin pohjoisessa, etenkin muihin tutkimuslajeihin verrattuna, joten on

mahdollista, että esimerkiksi kevään ja alkukesän muuttuneet sääolosuhteet heikentävät niiden kasvua.

Vuoden ja yöperhosten oman lajin tiheyden vaikutusta yksilöiden massaan tarkastelevissa malleissa voi esiintyä useita virhelähteitä. Ensinnäkin gradutyötä aloittaessani en tuntenut yöperhoslajeja kovin hyvin, joten väärää lajimäärityksiä on saattanut tapahtua. Lajitunnistukseni kuitenkin parani työn edetessä, joten tämä virhelähde ei vaikuta kovinkaan suureen määrään yksilöitä. Lisäksi sukupuolten tunnistamisessa on saattanut tapahtua virheitä. Punnittujen yöperhosyksilöiden määrä vaihteli lajien ja sukupuolten välillä melko paljon, ja esimerkiksi analyysien toteuttaminen suuremmalla otoskoolalla tai painottamalla punnittujen yksilöiden määrällä saattaisi antaa erilaisen tuloksen.

#### **4.4. Pyyntikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten yksilömääriin**

Pyyntikauden säätekijät vaikuttivat moniin tutkimuslajeista. Korkeampi lämpösumma vaikutti positiivisesti tunturimittarin, hallamittarin ja vaippayökkösen lukumääriin niitä kasvattaen. Metsäpohjanmittarilla ja mustikkamittarilla korkeampi lämpösumma vähensi niiden yksilömääriä. Pyyntikauden korkeampi minimilämpötila vähensi metsäpohjanmittareiden määriä, hallamittarilla ja vaippayökkösellä yksilömäärät puolestaan kasvoivat minimilämpötilan ollessa suurempi. Runsas sadanta lisäsi syysvarpumittareiden, mustikkamittareiden ja hallamittareiden määriä voimakkaasti. Syysvarpumittarilla ja mustikkamittarilla myös minimilämpötilan ja sadannan vaikutusta analysoivassa vain sadannalla oli merkitsevä positiivinen vaikutus.

Metsäpohjanmittari ja mustikkamittari olivat ainoat lajit, joille korkeampi lämpösumma, eli päivien määrä, jolloin lämpötila ylitti +5 °C, vaikutti negatiivisesti yksilömääriin. Metsäpohjanmittarilla oli tässä gradutyössä havaittavissa myös massan pientymistä, kuten ”Vuoden ja tiheyden vaikutus yöperhosyksilöiden massaan” -kappaleessa todettiin. Pyyntikauden lämpösumma ei ollut muuttunut Kevolla tilastollisesti merkitsevästi, ainakaan tämän gradutyön analyysien mukaan. Voi kuitenkin olla, että kasvukausi on esimerkiksi aikaistunut, mutta ei pidentynyt, ja metsäpohjamittarin talvehtivat toukat ilmaantuvat liian aikaisin ravintokasveihin nähden. Todellisten syiden selvittämiseksi on kuitenkin tehtävä tarkempia tutkimuksia, joten tämän gradun tuloksista niitä ei voi päätellä.

Pyyntikauden korkeampi lämpösumma kasvatti tunturi- ja hallamittarin, sekä vaippayökkösen yksilömääriä. Kuten ”Muutokset tutkittavien yöperhoslajien yksilömäärissä” -kappaleessa todettiin, näiden lajien lukumäärät ovat myös kasvaneet tutkimusvuosien aikana. Aiemmat tutkimukset tukevat tätä tulosta, sillä munina talvehtivat ja myöhään lentävät lajit hyötyvät mahdollisesti pidentyneestä kasvukaudesta (Mattila ym., 2008). Vaikka pyyntikauden



lämpösumman muutos ei ollutkaan tilastollisesti merkitsevä, sen regressiosuora oli kuitenkin hieman positiivinen.

Pyyntikauden minimilämpötila oli kasvanut merkitsevästi tutkimusvuosien aikana, ja kohonnut lämpötila vähensi metsäpohjanmittarien lukumääriä. Myös lämpösumma vaikutti tämän lajin yksilömääriin merkitsevästi, joten on selvää, että lämpeneminen on metsäpohjanmittareille haitallista. On mahdollista, että pohjoiset elinympäristöt alkavat lämpenemisen myötä muuttua niille sopimattomiksi, mutta tämän varmistamiseksi tarvitaan tarkempia tutkimuksia. Hallamittari ja vaippayökkönen ovat puolestaan hyötynet korkeammasta minimilämpötilasta pyyntikaudella, samoin kuin korkeammasta lämpösummasta. Myös niiden yksilömäärät ovat kasvaneet tutkimusvuosien aikana. Esimerkiksi hallamittari on levittäytynyt etelästä, ja sen runsaus ja levinneisyys tulee lisääntymään tulevaisuudessa (Ammunét ym., 2011; Bale & Hayward, 2010; Tanhuanpää ym., 2001). Vaippayökkösen elinkierto-ominaisuudet ovat samankaltaiset kuin hallamittarilla, esimerkiksi myöhäinen lentoaika ja munina talvehtiminen, joten samankaltainen vaste lämpötilan nousuun ei ole yllättävä (Mattila ym., 2008; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Lämpötila on monia lajeja rajoittava tekijä pohjoisissa elinympäristöissä, joten useiden, erityisesti päälevinneisyysalueeltaan eteläisten lajien runsaus ja levinneisyys tulee kasvamaan lämpötilan myötä (Box ym., 2019; Danks, 2004; Strathdee & Bale, 1998). On silti huomioitava, että kaikilla lähisukuisilla tai samankaltaiset elinkierto-ominaisuudet omaavilla lajeilla vaste lämpötilan nousuun ei ole samanlainen.

Runsas pyyntikauden aikainen sadanta lisäsi syysvarpumittarin, hallamittarin ja mustikkamittareiden lukumääriä voimakkaasti, mikä poikkeaa aiemmista havainnoista, sillä aiemmissa tutkimuksissa sadannan on todettu vähentävän hyönteisten lukumääriä ja aktiivisuutta (Veistola ym., 1995, 1997). On tosin mahdollista, että runsas sadanta parantaa näiden lajien ravintokasvien tuottavuutta, tarjoten niille enemmän ravintoa (Strathdee & Bale, 1998). Halla- ja syysvarpumittarin lentoaika sijoittuu loppukesään ja alkusyksyyn, ja mustikkamittarikin lentää keskimäärin heinäkuun loppupuolelta elokuun loppuun, jolloin on mahdollista, että nämä lajit pystyvät hyödyntämään ravintokasvien paremman tuottavuuden.

Suotuisa sää, eritoten korkea lämpötila, vaikuttaa yksilömäärien lisäksi yöperhosten aktiivisuuteen. Koska valorysät pyytävät lentäviä hyönteisiä, voi olla, että sateisina ja viileinä kesinä todellinen populaatiokoko on arvioitua suurempi.

#### **4.5. Talvikauden säätekijöiden vaikutus yöperhosten yksilömääriin**

Talvikauden lämpösumman, eli päivien määrän, jolloin lämpötila ylitti 0 °C, kasvu oli tilastollisesti merkitsevää, ja sillä oli positiivinen vaikutus tunturimittarin, hallamittarin ja vaippayökkösen lukumääriin, eli niiden yksilömäärät olivat suurempia lämpösumman ollessa

korkeampi. Korkeammalla minilämpötilalla oli näihin lajeihin samanlainen vaikutus. Tulos vastaa hyvin aiempia tutkimuksia, joiden mukaan munina talvehtivat lajit hyötyvät lyhyemmästä ja lämpimämmästä talvesta (Mattila ym., 2008; Pitts ym., 2005; Virtanen & Neuvonen, 1999b, 1999c). Esimerkiksi tunturimittarin tunturikoivun rungoilla ja oksilla talvehtivat munat ovat alttiina pakkaselle, joten se hyötyy leudommista talvista (Callaghan ym., 2004b). Myös monet tyypillisesti eteläisemmät lajit, esimerkiksi hallamittari, kykenevät leviämään pysyvämmiin pohjoiseen, sillä ankara talvi on aiemmin ollut rajoittava tekijä (Box ym., 2019; Mattila ym., 2008; Strathdee & Bale, 1998). Mahdollisissa jatkotutkimuksissa olisi hyvä tarkastella Kevon valorysäaineistoa kokonaisuudessaan, jotta voidaan havainnoida yöperhoslajiston laajempaa muutosta, ja mahdollisesti verrata näitä tietoja lajien elinkierto-ominaisuuksiin, talvikauden lämpenemisen vaikutuksien selvittämiseksi.

Metsäpohjanmittarilla ja mustikkamittarilla talvikauden korkeampi lämpösumma puolestaan vähensi niiden yksilömääriä, samoin kuin pyyntikauden lämpösummakin. Korkeampi lämpösumma talvella viittaisi pakkaspäivien vähenemiseen, mikä voi muun muassa sekoittaa elinkierron vaiheiden ajoituksen ympäristöön nähden (Box ym., 2019). Kohonnut lämpötila, mikä on havaittavissa Kevollakin erityisesti talviaikaan, vaikuttaa yöperhosiin erityisesti myöhäisessä toukkavaiheessa, minkä seurauksena yksilönkehityksen nopeus voi kiihtyä (Altermatt, 2010; Bale & Hayward, 2010; Pitts ym., 2005; Sparks ym., 2006). Metsäpohjanmittarilla tulos ei ole yllättävä, sillä se talvehtii toukkana, mutta mustikkamittari talvehtii puolestaan munina. Munina talvehtivat lajit ovat tyypillisesti hyötyneet talven lyhentymisestä (Mattila ym., 2008; Pitts ym., 2005; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Elinkierto-ominaisuudet eivät olleet muuttujina tämän gradun tilastollisissa analyyseissä, joten talven lyhentymisen vaikutusten tarkemmaksi arvioimiseksi on tehtävä lisätutkimuksia.

Talvikauden runsaammalla sadannalla oli positiivinen vaikutus syysvarpumittarin ja metsäpohjanmittarin yksilömääriin niin lämpösumman ja sadannan, kuin minimilämpötilan ja sadannan vaikutuksia analyysoivissa malleissa. Mustikkamittarilla ja hallamittarilla talven runsaampi sadanta lisäsi niiden yksilömääriä, mutta tämä vaikutus oli merkitsevä vain lämpösumman ja sadannan vaikutusta tarkastelevassa mallissa. Gradutyössä saatu tulos vastaa hyvin aiempien tutkimuksien tuloksia. Runsaampi talvikauden sadanta tarjoaa paksun lumipeitteen, joka luo eristävän kerroksen yöperhosten talvehtimismuodoille ja parantaa niiden selviytymismahdollisuuksia. Erityisesti toukkana talvehtivat lajit, kuten metsäpohjanmittari, hyötyvät runsaasta lumipeitteestä (Box ym., 2019; Danks, 2004; Mattila ym., 2008; Sinclair ym., 2003; Strathdee & Bale, 1998; Virtanen & Neuvonen, 1999b). Tämä saattaa mahdollisesti korvata lämpenemisen aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa olisi hyvä tarkastella lumipeitteen ominaisuuksia, kuten syvyyttä ja kestoa, ja sen vaikutuksia lajien yksilömääriin.

Runsaasta lumisateesta voi olla haittaa keväällä, sillä paksun lumipeitteen sulaminen kestää kauemmin lyhentäen yöperhosille suotuisaa kasvukautta, mutta kevään aikaistuminen ja lämpeneminen voi nopeuttaa lumen sulamista, poistaen tämän ongelman (Post ym., 2009).

#### **4.6. Kirjosiepon pesimämenestys Kevolla**

Yöperhosten lukumäärällä oli positiivinen vaikutus kirjosiepon pesyekokoon eli munien määrään. Munintapäivän vaikutus oli puolestaan negatiivinen, eli mitä myöhäisempi kirjosiepon munintapäivä oli, sitä pienemmäksi pesyekoko jäi. Myöhäisen munintapäivän aiheuttama pesyekoon pieneneminen on monilla lajeilla havaittu, kalenterivaikutuksena tunnettu ilmiö. Lentopoikasten lukumäärät puolestaan heikkenivät, mikäli kesäkuun sadanta oli runsasta ja minimilämpötila alhainen. Nämä havainnot vastaavat hyvin aikaisempien tutkimusten tuloksia (Alatalo & Lundberg, 1989; Siikamäki, 1998; Veistola ym., 1997). Kuoriutuneiden poikasten määriin eivät vaikuttaneet kesäkuun säätekijät tai yöperhosten lukumäärä. Talvikauden lämpötilan vaikutusta ei ollut tarpeen analysoida, sillä kirjosieppo on muuttolintu ja näin ollen ei ole alttiina koville pakkasille. Toisaalta talven säätekijät saattavat vaikuttaa kirjosiepon pesimämenestykseen yöperhosten kautta, sillä talven säällä on vaikutusta useiden yleisten yöperhoslajien runsauteen.

Gradututkielman tilastoanalyseissa on mukana vain pieni osa kirjosiepon mahdollisista ravinnoksi käyttämistä lajeista. Mikäli mukana olisi lisää perhoslajeja sekä muita kirjosiepolle tärkeitä saalishyönteisiä, kuten kaksisiipisiä ja kovakuoriaisia (Lifjeld, 1988), saaliin määrän vaikutus -pesimämenestykseen voisi korostua. Monien niveljalkaislahkojen kokonaisbiomassa on huipussaan vasta loppukesästä, mikä on kirjosiepon pesinnän kannalta liian myöhään (Veistola ym., 1995, 1997). Lisäksi on huomioitava, että vuosina, jolloin yöperhosia on saatavilla erittäin runsaasti, esimerkiksi massaesiintymien aikaan, kirjosiepon pesimämenestys ei parannu enää tietyn pisteen jälkeen hyönteisten määrän kasvaessa, sillä se ei kykene pyydystämään ja hyödyntämään enempää hyönteisiä.

Vaikka tarkastelin gradututkielmassa yöperhosten massan muutosta tutkimusvuosien aikana, en tehnyt tarkempia analyysseja sen ja kirjosiepon pesimämenestyksen välillä. Tämä johtui pääasiassa siitä, että tein perhosten punnitusaineiston analysoinnin lajikohtaisesti, mutta perhosten lukumäärän vaikutusta kirjosieppoon tarkastelin kaikkien lajien summana. Punnitusaineiston analysoinnissa kuitenkin havaitsin, että ruumiin koko oli pienentynyt vain kahdella tutkittavalla yöperhoslajilla: metsäpohjan- ja mustikkamittarilla. Useampien lajien yksilömäärät olivat kuitenkin lisääntyneet ajan saatossa, joten saaliin runsaampi saatavuus voi mahdollisesti korvata niiden pienempää kokoa. Tulevissa jatkotutkimuksissa analyysseja voidaan

tarkentaa, jolloin massan muutoksen mahdollinen vaikutus pesimämenestykseen voidaan arvioida.

Kesän aikainen viileä ja sateinen sää vähentää monien perhoslajien ja muidenkin niveljalkaisten aktiivisuutta. Kirjosieppo on erikoistunut pyytämään lentäviä hyönteisiä, ja vaikka se siirtyisikin pyytämään kenttäkerroksessa olevia niveljalkaisia, on ravinnonsaanti heikompaa ja hyönteiset huonolaatuisempia. Poikasten ruokintatiheys on erityisesti kylminä päivinä matalampaa (Danks, 2004; Veistola ym., 1997).

Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että kylmä lämpötila kirjosiepon muninnan aikaan heikentää munien kuoriutumista. Tämä johtuu erityisesti siitä, että koiras ei kykene ruokkimaan hautovaa naarasta. Naaraan on tällöin poistuttava pesästä, ja munat jäävät hautomatta (Lifjeld, 1988; Veistola ym., 1997). Gradutyössäni en kuitenkaan havainnut säätekijöiden osalta tilastollisesti merkitsevää vaikutusta pesyekokoon tai kuoriutuneiden poikasten lukumääriin, mutta yöperhosten lukumäärällä oli positiivinen vaikutus munien määriin. Tämän perusteella voin sanoa, että yöperhosten suurempi lukumäärä parantaa kirjosieppojen ravinnon saatavuutta, ja näin ollen pesyekokokin on suurempi. Yöperhosten määrä voi myös kasvaa lämpimämmissä olosuhteissa, joten sään vaikutus pesyekokoon voi mahdollisesti ilmetä yöperhosten määrän välityksellä. Myöhäinen munintapäivä vaikutti kirjosiepon pesyekokoon negatiivisesti, mikä oli hieman yllättävää, sillä aiempien tutkimusten mukaan ravinnon saatavuus on loppukesällä parempaa, minkä pitäisi puolestaan parantaa pesimämenestystä. Toisaalta liian myöhäisen muninnan seurauksena lentäviä hyönteisiä ei enää riitä poikasten ravinnoksi (Veistola ym., 1997). Toisaalta ilmastonmuutoksen myötä saalishyönteisten lentoajat voivat siirtyä ja pidentyä jopa viikoilla, mikä saattaa lisätä ravinnon saatavuutta (Altermatt, 2010; Van Strien ym., 2008).

Eniten poikaskuolemia tapahtuukin sään kannalta epäsuotuisina päivinä, ja suurin syy tähän on poikasten nälkiintyminen. Kylmyys ja sateinen sää myös lisäävät poikasten energiantarvetta (Veistola ym., 1997). Tässä gradutyössä ilmeni, että kesäkuun aikainen runsas sadanta ja alhainen minimilämpötila vähentävät merkittävästi lentopoikasten määrää, mikä vastaa hyvin aiempia tutkimuksia. Sadannalla ei juurikaan esiintynyt negatiivista vaikutusta yöperhosten runsauteen, mutta viileällä sää heikensi muutaman Lapin yleisen lajin yksilömääriä, joten ainakin näiden yöperhoslajien liikkuvuus ja saatavuus voi olla tällöin heikompaa.

Kirjosiepon pesimämenestys saattaa parantua tulevaisuudessa, sillä pyyntikauden keski- ja minimilämpötilat ovat nousseet Lapissa, ja todennäköisesti muutos on samansuuntainen myös tulevaisuudessa. Se on alueella uusi tulokas eikä ole sopeutunut kesäkauden aikaisiin epäsuotuisiin sääolosuhteisiin samoin kuin paikalliset lajit (Veistola ym., 1997), mutta sääolosuhteiden muuttuminen voi korjata tämän puutteen. Kesän aikainen sadanta on myös kasvanut, mutta kirjosiepolle viileä sää on kohtalokkaampaa sen pesimäalueen reunamilla (Veistola ym., 1997). Lämmin sää lisää myös joidenkin yöperhoslajien lukumääriä, ja kaikkien

niveljalcaisten aktiivisuutta, joten tulevaisuudessa kirjosiopolla voi olla enemmän ravintoa käytettävissään (Danks, 2004). Elinalueensa pohjoisrajoilla elävien lajien lisääntymismenestys on usein heikompa kuin niiden keskeisillä esiintymisalueilla. Mikäli ilmastonmuutoksen myötä olosuhteet muuttuvat samankaltaisiksi keskeisimpien alueiden kanssa, lisääntymismenestys voi myös parantua (Lifjeld, 1988).

#### **4.7. Yhteenveto**

Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat selkeästi havaittavissa myös Kevolla, erityisesti talvella. Tämä on vaikuttanut paikalliseen perhosyhteisöön, muuttaen esimerkiksi lajien yksilömääriä ja ruumiin kokoa. Lajit, joilla muutoksia on havaittavissa, ovat yleisiä ja tärkeitä pohjoisten ekosysteemien toiminnassa, muun muassa kasvinsyöjinä ja lintujen ravintona. Yöperhoslajit, joiden yksilömäärissä ja ruumiin koossa esiintyi muutoksia, vaikuttivat reagoivan useisiin ilmastomuuttujiin. Tämän suhteen selvittämiseksi vaaditaan kuitenkin lisää tutkimuksia. Muutokset pohjoisissa hyönteispopulaatioissa voivat vaikuttaa hyönteissyöjälintujen, kuten pohjoisessa uutena tulokkaana pesivän kirjosiopon selviytymiseen ja pesimämenestykseen. Mikäli pohjoisen olosuhteet muuttuvat samankaltaiseksi kuin sen keskeisillä levinneisyysalueilla, kirjosiopon pesimämenestys saattaa parantua entisestään.

Ilmastonmuutos on merkittävä uhka maailman biodiversiteetille, ja se voi muuttaa ekosysteemien ja eliöyhteisöjen rakennetta. Kevolle saattaa tulla uusia yöperhoslajeja ilmastonmuutoksen myötä, mikä lisää biodiversiteettiä, mutta pohjoisiin olosuhteisiin sopeutuneet paikalliset lajit saattavat vähentyä ja kadota. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että ilmastonmuutoksen vaikutuksia, erityisesti herkillä arktisilla alueilla, tutkitaan runsaasti tulevaisuudessa, jotta sen todelliset seuraukset eliöihin ja ekosysteemeihin voidaan ymmärtää.

#### **5. Kiitokset**

Haluan kiittää gradututkielmani rahoituksesta Societas pro Fauna et Flora Fennicaa, Suomen Hyönteistieteellistä seuraa ja Vuokon luonnonsuojelusätiötä. Kiitän tutkielman ohjauksesta Kari Saikkosta, Tapio Eevaa ja Tommi Anderssonia, sekä hyvistä neuvoista Pekka Niemelää. Lisäksi haluan kiittää vanhempiani Pirkko ja Ari Marjamäkeä sekä puolisoani Pekka Qvistiä kannustuksesta koko graduprosessin aikana.

## 6. Lähteet

- Alatalo, R. V., & Lundberg, A. (1989). Clutch Size of the Pied Flycatcher *Ficedula-Hypoleuca* - an Experiment. *Ornis Fennica*, *66*, 15–23.
- Albrecht, A., & Huldén, L. (2000). *Suomen suurperhosatlas = Finlands storfjärilsatlas = Atlas of Finnish macrolepidoptera* (A. Albrecht & L. Huldén (eds.)). Suomen perhostutkijain seura, Helsinki
- Altermatt, F. (2010). Tell me what you eat and I'll tell you when you fly: Diet can predict phenological changes in response to climate change. *Ecology Letters*, *13*, 1475–1484.  
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01534.x>
- Ammunét, T., Klemola, T., & Saikkonen, K. (2011). Impact of host plant quality on geometrid moth expansion on environmental and local population scales. *Ecography*, *34*, 848–855.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.06685.x>
- Andersson, Tommi, Eeva Tapio, Niemelä Pekka, Saikkonen, K. (2019a). Punnittavien perhosten määrästä. Gradun ohjaustapaaminen 6.9.2019.
- Andersson, Tommi, Eeva Tapio, Niemelä Pekka, Saikkonen, K. (2019b). Yleisistä yöperhoslajeista Kevolla. Gradun ohjaustapaaminen 12.11.2019.
- Andersson, T. (2022). Kevon valorysäpyydysten lampuista. Henkilökohtainen tiedonanto 16.03.2022.
- Bale, J. S., & Hayward, S. A. L. (2010). Insect overwintering in a changing climate. *Journal of Experimental Biology*, *213*, 980–994. <https://doi.org/10.1242/jeb.037911>
- Box, J. E., Colgan, W. T., Christensen, T. R., Schmidt, N. M., Lund, M., Parmentier, F. J. W., Brown, R., Bhatt, U. S., Euskirchen, E. S., Romanovsky, V. E., Walsh, J. E., Overland, J. E., Wang, M., Corell, R. W., Meier, W. N., Wouters, B., Mernild, S., Mård, J., Pawlak, J., & Olsen, M. S. (2019). Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environmental Research Letters*, *14*.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>
- Bradshaw, C. J. A., & McMahon, C. R. (2008). Fecundity. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, 1535–1543. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00645-5>
- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2006). Evolutionary response to rapid climate change. *Science*, *312*, 1477–1478. <https://doi.org/10.1126/science.1127000>
- Callaghan, T. V., Björn, L. O., Chernov, Y., Chapin, T., Christensen, T. R., Huntley, B., Ims, R. A., Johansson, M., Jolly, D., Jonasson, S., Matveyeva, N., Panikov, N., Oechel, W., Shaver, G., Elster, J., Henttonen, H., Laine, K., Taulavuori, K., Taulavuori, E., & Zöckler, C. (2004a). Biodiversity, distributions and adaptations of arctic species in the context of environmental change. *Ambio*, *33*(7), 404–417. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.7.404>
- Callaghan, T. V., Björn, L. O., Chernov, Y., Chapin, T., Torben, R., Callaghan, T. V., Björn, L. O., Chernov, Y., Chapin, T., Christensen, T. R., & Huntley, B. (2004b). Climate Change and UV-B

Impacts on Arctic Tundra and Polar Desert Ecosystems: Effects on the Structure of Arctic Ecosystems in the Short- and Long-term Perspectives. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 33, 436–447.

Callaghan, T. V., Björn, L. O., Chernov, Y., Chapin, T., Torben, R., Huntley, B., Ims, R. A., Johansson, M., Jolly, D., Jonasson, S., Matveyeva, N., Panikov, N., Oechel, W., Shaver, G., Bjorn, L. O., & Christensen, T. R. (2011). Climate Change and UV-B Impacts on Arctic Tundra and Polar Desert Ecosystems Effects in the on the Function of Arctic Ecosystems and Perspectives. *Ecosystems*, 33, 448–458.

Danks, H. V. (2004). Seasonal adaptations in Arctic insects. *Integrative and Comparative Biology*, 44, 85–94. <https://doi.org/10.1093/icb/44.2.85>

Eeva, T. (2022). Kirjosiepon pesimätietojen keruusta. Henkilökohtainen tiedonanto 18.5.2022.

Fox, R. (2013). The decline of moths in Great Britain: A review of possible causes. *Insect Conservation and Diversity*, 6, 5–19. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2012.00186.x>

Gaston, K. J., & Lawton, J. H. (1988). *Patterns in the distribution and abundance of insect populations*. 3, 14–17.

Heisswolf, A., Klemola, T., Andersson, T., & Ruohomäki, K. (2009). Shifting body weight-fecundity relationship in a capital breeder: Maternal effects on egg numbers of the autumnal moth under field conditions. *Bulletin of Entomological Research*, 99, 73–81. <https://doi.org/10.1017/S0007485308006135>

Ilmatieteen laitos. (2021). Termiset vuodenaajat. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/termiset-vuodenaajat>> [Luettu 27.12.2021]

Itämies, J., Pulliainen, E., & Siekkinen, J. (1993). Fluctuations in catches of *Epirrita autumnata*, (Lepidoptera, Geometridae) in eastern Finnish Forest Lapland. *Oecologia Montana*, 2, 19–22.

Keret, N. M., Mutanen, M. J., Orell, M. I., Itämies, J. H., & Välimäki, P. M. (2020). Climate change-driven elevational changes among boreal nocturnal moths. *Oecologia*, 192, 1085–1098. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04632-w>

Klemola, T., Ruohomäki, K., Andersson, T., & Neuvonen, S. (2004). Reduction in size and fecundity of the autumnal moth, *Epirrita autumnata*, in the increase phase of a population cycle. *Oecologia*, 141, 47–56. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1642-z>

Kozlov, M. V., Hunter, M. D., Koponen, S., Kouki, J., Niemelä, P., & Price, P. W. (2010). Diverse population trajectories among coexisting species of subarctic forest moths. *Population Ecology*, 52, 295–305. <https://doi.org/10.1007/s10144-009-0183-z>

Kozlov, M. V., & Kullberg, J. (2008). Lepidoptera of tundra habitats of the northern Kola Peninsula, Northwestern Russia. *Entomologica Fennica*, 19, 114–121. <https://doi.org/10.33338/ef.84421>

Lawton, J. H. (1983). Plant architecture and the diversity of phytophagous insects. *Annual Review of*

- Lifjeld, J. T. (1988). Prey choice and nestling hunger: an experiment with pied flycatchers, *Ficedula hypoleuca*. *Animal Behaviour*, *36*, 134–139. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(88\)80256-2](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(88)80256-2)
- Lindström, J., Kaila, L., & Niemelä, P. (1994). Polyphagy and adult body size in geometrid moths. *Oecologia*, *98*, 130–132. <https://doi.org/10.1007/BF00341463>
- Mattila, N., Kaitala, V., Komonen, A., Kotiaho, J. S., & Päivinen, J. (2006). Ecological determinants of distribution decline and risk of extinction in moths. *Conservation Biology*, *20*, 1161–1168. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00404.x>
- Mattila, N., Kotiaho, J. S., Kaitala, V., & Komonen, A. (2008). The use of ecological traits in extinction risk assessments: A case study on geometrid moths. *Biological Conservation*, *141*, 2322–2328. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.06.024>
- Molleman, F., Javoš, J., Esperk, T., Teder, T., Davis, R. B., & Tammaru, T. (2011). Sexual differences in weight loss upon eclosion are related to life history strategy in Lepidoptera. *Journal of Insect Physiology*, *57*, 712–722. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2011.02.009>
- Pateman, R. M., Hill, J. K., Roy, D. B., Fox, R., & Thomas, C. D. (2012). Temperature-dependent alterations in host use drive rapid range expansion in a butterfly. *Science*, *336*(6084), 1028–1030. <https://doi.org/10.1126/science.1216980>
- Phoenix, G. K., & Lee, J. A. (2004). Predicting impacts of Arctic climate change: Past lessons and future challenges. *Ecological Research*, *19*, 65–74. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1703.2003.00609.x>
- Pitts, A., Benham, S., Straw, N. ., & Moffat, A. . (2005). Evaluation of moth-trap data from Alice Holt Forest, Hampshire, 1966–2001: possible effects of changing climate on Macrolepidoptera. *Entomologist's Gazette*, *56*, 237–247.
- Post, E., Forchhammer, M. C., Bret-Harte, M. S., Callaghan, T. V., Christensen, T. R., Elberling, B., Fox, A. D., Gilg, O., Hik, D. S., Høye, T. T., Ims, R. A., Jeppesen, E., Klein, D. R., Madsen, J., McGuire, A. D., Rysgaard, S., Schindler, D. E., Stirling, I., Tamstorf, M. P., ... Aastrup, P. (2009). Ecological dynamics across the arctic associated with recent climate change. *Science*, *325*, 1355–1358. <https://doi.org/10.1126/science.1173113>
- Pöyry, J., Leinonen, R., Söderman, G., Nieminen, M., Heikkinen, R. K., & Carter, T. R. (2011). Climate-induced increase of moth multivoltinism in boreal regions. *Global Ecology and Biogeography*, *20*, 289–298. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00597.x>
- Ruohomäki, K., Klemola, T., Kaitaniemi, P., & Käär, M. (2003). Crowding-induced responses in a geometrid moth revisited: A field experiment. *Oikos*, *103*, 489–496. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12778.x>
- Scriber, J. M., & Slansky, J. (1981). The nutritional ecology. *Annual Review of Entomology*, *26*, 183–211.
- Siikamäki, P. (1998). Limitation of reproductive success by food availability and breeding time in pied



- flycatchers. *Ecology*, 79, 1789–1796. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[1789:LORSBF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[1789:LORSBF]2.0.CO;2)
- Silvonen, K., Top-Jensen, M., & Fibiger, M. (2014). *Suomen päivä- ja yöperhoset : maastokäsikirja = A field guide to the butterflies and moths of Finland.*, s. 204 - 691. Bugbook Publishing, Østermarie
- Sinclair, B. J., Vernon, P., Klok, C. J., & Chown, S. L. (2003). Insects at low temperatures: An ecological perspective. *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 257–262. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00014-4)
- Sparks, T. H., Huber, K., & Dennis, R. L. H. (2006). Complex phenological responses to climate warming trends? Lessons from history. *European Journal of Entomology*, 103, 379–386. <https://doi.org/10.14411/eje.2006.051>
- Strathdee, A. T., & Bale, J. S. (1998). Life on the edge: Insect ecology in Arctic environments. *Annual Review of Entomology*, 43, 85–106. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.85>
- Tammaru, T., Kaitaniemi, P., & Ruohomäki, K. (1996). Realized fecundity in *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae): relation to body size and consequences to population dynamics. *Oikos*, 77, 407. <https://doi.org/10.2307/3545931>
- Tammaru, T., Ruohomäki, K., & Saikkonen, K. (1996). Components of male fitness in relation to body size in *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae). *Ecological Entomology*, 21, 185–192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1996.tb01186.x>
- Tanhuanpää, M., Ruohomäki, K., & Uusipaikka, E. (2001). High Larval Predation Rate in Non-Outbreking Populations of a Geometrid Moth. *Ecology*, 82, 281. <https://doi.org/10.2307/2680103>
- Van Strien, A. J., Plantenga, W. F., Soldaat, L. L., Van Swaay, C. A. M., & WallisDeVries, M. F. (2008). Bias in phenology assessments based on first appearance data of butterflies. *Oecologia*, 156, 227–235. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0959-4>
- Veistola, S., Eeva, T., & Lehikoinen, E. (1995). Seasonal occurrence of arthropods as a source of food for birds in Finnish Lapland. *Entomologica Fennica*, 6, 177–181. <https://doi.org/10.33338/ef.83855>
- Veistola, S., Lehikoinen, E., & Eeva, T. (1997). Weather and breeding success at high latitudes - The Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca* and the Siberian Tit *Parus cinctus*. *Ornis Fennica*, 74, 89–98.
- Virtanen, T., & Neuvonen, S. (1999a). Climate change and macrolepidopteran biodiversity in Finland. *Chemosphere - Global Change Science*, 1(4), 439–448. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(99\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(99)00039-2)
- Virtanen, T., & Neuvonen, S. (1999b). Climate change and macrolepidopteran biodiversity in Finland. *Chemosphere - Global Change Science*, 1, 439–448. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(99\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(99)00039-2)
- Virtanen, T., & Neuvonen, S. (1999c). Performance of moth larvae on birch in relation to altitude, climate, host quality and parasitoids. *Oecologia*, 120, 92–101.

<https://doi.org/10.1007/s004420050837>

Walther, G., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. I. O. H., & Bairlein, F. (2002). Ecological response to recent climate change. *Nature*, *416*, 389–395.

Woiwod, I. P. (1997). Detecting the effects of climate change on Lepidoptera. *Journal of Insect Conservation*, *1*, 149–158. <https://doi.org/10.1023/A:1018451613970>