

LuK-tutkielma

Pääaine: Biologia

Tekijä: Ronja Niemi

Otsikko: Keltasompasammalen (*Splachnum luteum*) lisääntymisfenologian muutokset

Ohjaajat: Inka Kuusisto, Kati Pihlaja

Sivumäärä: 20 sivua

Päivämäärä: 26.1.2026

Eliöiden fenologia, eli esimerkiksi kasvun tai lisääntymisen vuosittainen ajoittuminen, on monilta osin ilmaston ohjaama. Ilmaston muuttuessa myös eliöiden fenologia voi muuttua. Monilla putkilokasveilla Euroopassa muun muassa lehtien avautumisen ja kukkimisen on todettu aikaistuneen lämpötilojen nousun myötä. Sammalet ovat oleellisia maaekosysteemien veden ja aineiden kierron säätelijöitä, ja ne ovat piirteidensä myötä vahvasti etenkin lämpötilan ja ilmankosteuden muutoksille alttiita. Tästä huolimatta ilmastonmuutoksen vaikutukset sammalille ovat suurilta osin tuntemattomia. Vähäiset fenologisia vasteita selvittävät tutkimukset ovat viitanneet siihen, että sammalajien välillä on eroja fenologisten muutosten suuruudessa. Tässä tutkielmassa selvitän keltasompasammalen (*Splachnum luteum* Hedw.) itiöpesäkkeen esiintymisajassa tapahtunutta muutosta sekä koko Suomessa että eri metsäkasvillisuusvyöhykkeillä aikavälillä 1859–2025. Lisäksi selvitän kehittyvätkö itiöpesäkkeet eri aikoihin eri metsäkasvillisuusvyöhykkeillä. Aineistoni koostui sekä luonnontieteellisten museoiden tieteellisistä keltasompasammalnäytteistä että uusista, digitaalisesti kirjatusta havainnoista (n = 545). Määritin jokaisen havainnon metsäkasvillisuusvyöhykkeen käyttäen QGIS-paikkatieto-ohjelmistoa, minkä jälkeen analysoin aineiston yleisellä lineaarisella mallilla. Selvitin myös kuinka luotettavia saamani tulokset ovat, sillä aineisto oli ajallisesti ja maantieteellisesti epätasaisesti jakautunutta. Lineaarisen mallin tulosten mukaan itiöpesäkkeen kehittyminen on aikaistunut koko Suomessa 20 päivällä aikavälillä 1859–2025. Metsäkasvillisuusvyöhykkeiden tulosten mukaan muutos on etelässä lähes merkitsevästi nopeampaa kuin pohjoisessa. Ilmaston lämpeneminen on kuitenkin nopeampaa mitä pohjoisemmasta alueesta on kyse, ja tulos saattaa aineiston niukkuuden ja epätasaisen jakautumisen takia olla vääristynyt. Metsäkasvillisuusvyöhykkeiden välillä oli selvät erot itiöpesäkkeen esiintymisaikojissa, mikä viittaa siihen, että ilmastolla on vaikutus lajin itiöpesäkkeen esiintymisaikaan. Keltasompasammalle fenologian muutos saattaa merkitä lisääntymismenestyksen heikentymistä. Jotta sammalten fenologian muutoksia ja niiden vaikutuksia ekosysteemeille ilmastonmuutoksen edetessä voidaan ennustaa tarkemmin, tarvitaan aiheesta lisää tutkimustietoa.

Avainsanat: keltasompasammal, *Splachnum luteum*, fenologia, sammalet, ilmastonmuutos, museonäytteet

Sisällys

1 Johdanto	1
1.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset sammalten fenologiaan	1
1.2 Tutkimuslaji	2
1.3 Tutkimuskysymykset	4
2 Aineisto ja menetelmät	4
2.1 Aineisto	4
2.2 Tilastolliset menetelmät	6
3 Tulokset	7
3.1 Itiöpesäkkeen esiintymisajassa tapahtuneet muutokset Suomessa	7
3.2 Itiöpesäkkeen esiintymisajassa tapahtuneet muutokset metsäkasvillisuusvyöhykkeittäin	8
3.3 Vyöhykkeiden väliset erot itiöpesäkkeiden esiintymisajassa	9
3.4 Tulosten luotettavuus	10
4 Tulosten tarkastelu	11
4.1 Keltasompasammalen fenologiassa tapahtuneet muutokset	11
4.2 Fenologian muutosten vaikutukset lajien välisiin suhteisiin	13
Kiitokset	14
Lähteet	15

1 Johdanto

1.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset sammalten fenologiaan

Ilmastonmuutoksen edetessä tarve ennustaa ja arvioida luonnossa tapahtuvia muutoksia kasvaa. Arviot edesauttavat ihmisten sopeutumista muutoksiin ja lisäävät tietoa siitä, mitä lajien ja ekosysteemien suojelemiseksi voidaan tehdä. Fenologia, eli eliöiden elämänkierron vaiheiden vuosittaiseen ajoittumiseen keskittyvä tutkimusala, on kasvin ja ympäristön vuorovaikutuksen ymmärtämisessä oleellista. Useat fenologiset tapahtumat, kuten eliöiden kasvu ja lisääntyminen, ovat ilmastotekijöiden ja vuodenaikojen ohjaamia. Näin ollen joidenkin eliöiden fenologian odotetaan muuttuvan ilmaston muuttuessa (Walther ym. 2002). Näin onkin jo havaittu tapahtuneen kasveilla Euroopassa: muun muassa lehtien avautuminen ja kukkiminen on aikaistunut hyvin monella putkilokasvilla lämpötilojen muuttumisen myötä (Menzel ym. 2006). Eliöiden fenologiassa tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa eliöyhteisöjen koostumukseen muun muassa lajien levittäytymisessä tapahtuvien muutosten kautta. Kasvien fenologian muutoksilla on myös hyvin monimutkaiset vaikutukset ilmastoon. Nämä vaikutukset johtuvat suurimmaksi osaksi siitä, että kasvit ovat aktiivisia suuremman osan vuodesta kuin aikaisemmin (Peñuelas ym. 2009). Sammalet ovat hyvin oleellinen osa etenkin pohjoisten ekosysteemien autotrofeja (Proctor 2011), ja niillä on suuri merkitys maaekosysteemien veden säätelyyn ja aineiden kiertoon (Slate ym. 2024). Jos ilmaston lämpenemisestä seuraavia luonnon muutoksia halutaan ennustaa täsmällisesti, on siis tärkeää tietää myös sammalten fenologiassa tapahtuvat muutokset.

Sammalten esiintymisen ja kasvun on pitkään tiedetty olevan hyvin ilmastoriippuvaista ja niitä on pidetty ilmastonmuutoksen bioindikaattoreina (esim. Gignac 2001). Tästä huolimatta ilmastonmuutoksen vaikutuksia sammaliin ei tunneta hyvin ja niiden fenologisia vasteita muutokseen on tutkittu vähän. Sammalilla voidaan olettaa olevan erilaisia fenologisia vasteita kuin putkilokasveilla, sillä ne eroavat putkilokasveista myös muiden ominaisuuksiensa puolesta. Aiheesta tähän mennessä tehdyt tutkimukset ovat viitanneet siihen, että sammallajien välillä on vaihtelua ilmastonmuutoksen aiheuttamien fenologisten vasteiden suhteen (esim. Bengtsson 2025). Sammalten fenologisia muutoksia käsittelevät tutkimukset ovat pääasiassa keskittyneet sammalten lisääntymisajankohdassa tapahtuvien muutosten tarkasteluun (Barbé ym. 2017, Bengtsson ym. 2025).

Abioottisista ympäristötekijöistä sammaliin vaikuttavat erityisesti lämpötila ja ilmankosteus (Barbé ym. 2017). Lämpötila vaikuttaa sammalten fotosynteesin tehokkuuden ja aineenvaihdunnan lisäksi myös niiden fenologiaan. Itiöpesäkkeen kehittyminen saattaa olla lämpötilasta riippuvaista (Glime 2017). Ilmankosteus ja sademäärät ovat oleellisia, sillä sammalten vedenotto poikkeaa putkilokasveista. Ne eivät ota vettä maaperästä juurilla vaan imevät vettä koko pinta-alaltaan. Ne ovat poikilohydriisiä, eli ne eivät säätele kosteuttaan itse, vaan niiden kosteus riippuu ilmankosteudesta. Sammal ei yhteytä tai kasva ollessaan kuiva, mutta sammalten ominaisuudet mahdollistavat niiden selviämisen kuivissa ja vähäravinteisissäkin olosuhteissa. Rahkasammalten (*Sphagnum* L.) suvussa itiöpesäkkeen kehittymiseen on todettu vaikuttavan edellisen kesän sademäärät ja kuluvan kesän kuivuus voi estää sukusolupesäkkeen muodostumisen (Sundberg 2002). Myös talven pituuden on todettu mahdollisesti vaikuttavan itiöiden leviämisaikajankohtaan (Barbé ym. 2017).

Etenkin pohjoisella pallonpuoliskolla, missä IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) arvioi ilmaston lämpenemisen olevan suurempaa kuin muualla (Masson-Delmotte ym. 2021), voidaan olettaa myös eliöiden fenologian muuttuneen. Vuoden keskilämpötila on Suomessa 0,8–1,6°C korkeampi nyt verrattuna 40 vuoden takaisiin lämpötiloihin (Ilmatieteen laitos 2025). Myös lumikausi on Suomessa lyhentynyt vuosien 1961 ja 2014 välillä (Luomaranta ym. 2019). Näin ollen on hyvin todennäköistä, että sammalten fenologia on Suomessa muuttunut. Tämän suuntaisia tuloksia saatiin Bengtssonin ym. (2025) toteuttamassa, Pohjois-Ruotsiin sijoittuvassa tutkimuksessa. He havaitsivat, että sammalten itiöiden leviäminen on heidän tutkimallaan Kiirunan alueella ylivoimaisella enemmistöllä tutkituista suvuista aikaistunut 3–6 viikolla aikavälillä 1974–2008. Tällä ajanjaksolla alueen keskilämpötila oli noussut 1,7°C.

1.2 Tutkimuslaji

Keltasompasammal (*Splachnum luteum* Hedw.) on levinneisyydeltään pohjoiseen painottuva ja eteläisessä Suomessa alueellisesti uhanalainen pesäkekärkinen lehtisammal. Se on sukunsa yleisin laji Suomessa. Suvun *Splachnum* tyypillinen kasvualusta on märehitijöiden lanta ja turvemaa (Suomen lajitietokeskus 2025). Koska lajit tarvitsevat kasvualustakseen erityisen kostean ja ravinteikkaan aineksen, on niille välttämätöntä siirtyä kasvualustalta toiselle lannan kuivuessa ja maatuessa. Sopivien kasvualustojen ja sitä myötä myös sompasammaleesiintymien

lyhytaikaisuus vaikeuttaa populaatiokoon arviointia ja voi heikentää populaatioiden selviytymismahdollisuuksia.

Sompasammalet ovat hyönteislevitteisiä, ja suvun tyypillisiä levittäjiä ovat kärpäset. Itiöitä levittäviä kärpäsiä houkuttelee sekä sammalen kasvualustasta, lannasta, että itiöpesäkkeistä erittyvä haju. Tietyn sompasammallajin itiöitä levittää yleensä tietyt kärpäslajit. Tämän spesifin suhteen takia jokainen sompasammallaji erittää omanlaistaan maatuvaa orgaanista ainesta matkivaa hajua. Kärpäset laskeutuvat sammalten itiöpesäkkeille, jolloin niihin tarttuu tahmeapintaisia itiöitä. Nämä itiöt päätyvät uusille kasvualustoille kärpästen siirtyessä muille lantakasoille. Itiöiden tahmaisuuden ja tietyn kasvualustan tarpeen vuoksi sammalten onnistunut levittäytyminen tuulen avulla on epätodennäköistä. Ne ovat siis kärpäsisistä riippuvaisia (Glime 2017).

Lajin *S. luteum* verso on vain 1–2 cm pitkä, mutta sen pesäkeperä on yleensä noin 10 cm pitkä. Itiöpesäkkeen alla on väriltään vaaleankeltainen, huomiota herättävä päivänvarjomainen kaulaosan laajentuma (Kuva 1). Sammal havaitaan helpoiten pesäkkeellisenä. Lajin itiöpesäkkeet ovat kehittyttyään esillä ja hyväkuntoisia noin 1–2 viikkoa (henkilökohtainen tiedonanto, Kati Pihlaja). Moniin muihin sammaliin verrattuna tämä on lyhyt aika, mikä tekee keltasompasammalesta fenologiseen tutkimukseen erityisesti sopivan lajin.



Kuva 1. Keltasompasammalnäyte Luonnontieteellisen keskusmuseon kokoelmista.

1.3 Tutkimuskysymykset

Tässä kandidaatin tutkielmassa selvitän, onko keltasompasammalen itiöpesäkkeiden esiintymisajassa tapahtunut muutosta aikavälillä 1859–2025. Lisäksi selvitän, ovatko mahdolliset ajalliset muutokset erilaisia eri metsäkasvillisuusvyöhykkeillä ja onko itiöpesäkkeiden esiintymisajassa alueellisia eroja. Odotukseni on, että itiöpesäkkeiden esiintyminen on aikaistunut. Odotukseni on myös, että itiöpesäkkeet kehittyvät eteläisessä Suomessa pohjoista aikaisemmin johtuen näiden alueiden välisistä lämpötilaeroista.

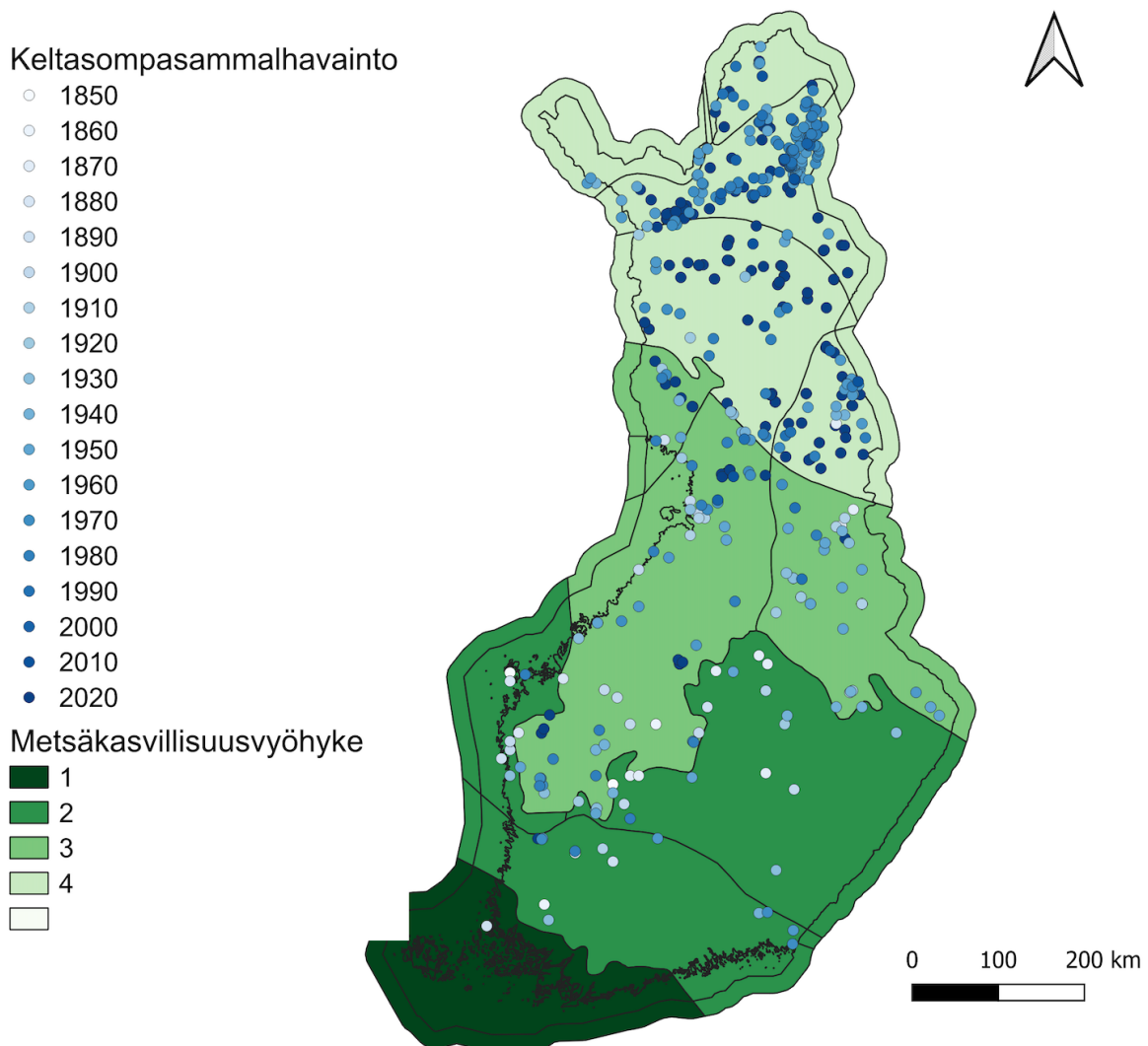
2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Aineisto

Aineistoani varten digitoin lähes kaikki Turun yliopiston kasvimuseon (TUR), Oulun yliopiston kasvimuseon (OULU) sekä Luonnontieteellisen keskusmuseon (H) luonnontieteellisten kokoelmien keltasompasammalnäytteet. Yliopistojen kasvimuseoiden tieteelliset sammalnäytteet ovat erinäisten tutkijoiden ja muiden henkilöiden keräämiä näytteitä heidän havaitsemistaan sammalista. Yleensä näytteisiin kirjataan muun muassa milloin ja mistä ne on kerätty. Usein niihin kirjataan myös jonkinlaisia habitaattitietoja. Käydessäni läpi herbaarionäytteitä tallensin jokaisesta tiedot keräyspäivämäärästä ja -paikasta. Jos näytteen kerääjä ei ollut ilmoittanut keräyspaikan koordinaatteja, määritin ne annettujen paikannimien mukaan. Lisäksi kirjasin tiedon siitä, oliko näytteessä kypsät itiöpesäkkeet, eli oliko näyte steriili vai fertiili. Suurin osa näytteistä on kerätty pesäkkeellisenä, mikä mahdollistaa fenologisen tiedon saannin. Vain fertiilit museonäytteet otettiin mukaan aineistoon.

Tämän lisäksi käytin tutkielmassani Suomen ympäristökeskuksen (Syke) Sammaltyöryhmän etsintäkuulutuksesta saatuja uudempia keltasompasammalhavaintoja. Sammaltyöryhmä etsintäkuulutti sompasammalet vuonna 2024 ja etsintäkuulutus jatkui myös vuoden 2025 kasvukauden ajan (Sammalyöryhmä 2025). Käytännössä etsintäkuulutus tarkoittaa sitä, että kuka vain sompasammalen havainnut on voinut ilmoittaa havaintonsa kuvallisena eri palvelujen kautta. Sammaltyöryhmän jäsenet ovat tarkistaneet kaikki kertyneet havainnot ja varmentaneet kuvissa näkyvien lajien määritykset. Kaikille näille havainnoille on olemassa tiedot paikasta ja havainnointipäivästä. Kuvista on myös tarkistettu, että havainnoituissa sammalissa on kypsät itiöpesäkkeet.

Jokaiselle näytteelle ja havainnolle määritettiin kasvillisuusvyöhyke havaintopaikan mukaan käyttäen QGIS-paikkatieto-ohjelmistoa (versio 3.34.14). Tähän käytettiin Syken avointa metsäkasvillisuusvyöhykeaineistoa (Suomen ympäristökeskus 2015). Aineistossa vyöhykkeet määrittyvät eri alueiden lämpötiloista johtuvien kasvillisuuserojen perusteella. Tässä tutkimuksessa käytetään vyöhykkeiden pääjakoa, joka koostuu neljästä kasvillisuusvyöhykkeestä: hemiboreaalin, eteläboreaalin, keskiboreaalin ja pohjoisboreaalin vyöhyke. Suomen eteläosan havaintojen niukkuuden vuoksi kaksi eteläisintä vyöhykettä on yhdistetty tilastollisia analyyseja varten. Analyyseissa käytetyt vyöhykkeet on numeroitu etelästä pohjoiseen numeroin 2,3 ja 4. Vyöhykkeeseen 2 sisältyvät siis aineiston pääjaon vyöhykkeet 1 ja 2, hemiboreaalin ja eteläboreaalin vyöhyke (Kuva 2). Vyöhyke 3 on keskiboreaalin vyöhyke, ja vyöhyke 4 on pohjoisboreaalin vyöhyke.



Kuva 2. Aineiston keltasompasammalhavainnot kartalla. Kartassa näkyy metsäkasvillisuusvyöhykkeet 1–4, joita käytettiin muuttujana tutkielman tilastollisissa analyyseissa.

Aineistoni koostui yhteensä 545 keltasompasammalhavainnosta. Havainnot ovat aikaväliltä 1859–2025. Aineisto on epätasaisesti jakautunut: uudempia havaintoja on pohjoisesta paljon, kun taas etelässä niitä ei ole juurikaan. Vanhoja taas on enimmäkseen etelästä ja hyvin niukasti pohjoisesta. Aikasarjan vanhimpia havaintoja on suhteellisen pieni määrä: 1800-luvulta on kaiken kaikkiaan vain 32 havaintoa. Etsintäkuulutuksen myötä vuosilta 2024 ja 2025 on merkittävästi enemmän havaintoja kuin muilta vuosilta, mikä saattaa vaikuttaa tilastollisten analyysien tuloksiin.

2.2 Tilastolliset menetelmät

Tein tilastolliset analyysit R-ohjelmistolla (versio 4.4.1) ohjaajani Inka Kuusiston avustuksella. Tutkin vuoden ja kasvillisuusvyöhykkeen vaikutusta itiöpesäkkeiden esiintymisaikaan yleisellä lineaarisella mallilla, jossa selittävinä muuttujina oli kasvillisuusvyöhyke ja havainnointivuosi sekä näiden yhteisvaikutus ja selitettävänä vastemuuttujana näytteen keräys- tai havainnointipäivä. Päivämäärän sijaan käytin analyyseissä päivän vuosittaista järjestyslukua (eng. day of year, DOY). Standardoin vuoden malleihin siten, että keskiarvovuosi sai arvon nolla ja käsitelin sitä numeerisena muuttujana. Kasvillisuusvyöhyke oli mallissani luokittelevana muuttujana. Aineistoni oli Cullen & Frey -kuvaajien perusteella (R-paketti `fitdistrplus`, Delignette-Muller & Dutang 2015) normaalijakautunutta. Testasin mallini residuaalit `simulateResiduals`-komennolla (R-paketti `DHARMA`, Hartig 2022). Residuaaleissa näkyi pientä poikkeamaa normaalijakaumasta, mutta sen voi olettaa johtuvan siitä, että havaintoja on aikavälin loppupäästä huomattavasti enemmän kuin muulloin.

Tarkastelin eri muuttujien kokonaisvaikutuksia varianssianalyysillä (type III ANOVA, R-paketti `car`, Fox & Weisberg 2019). Lisäksi käytin `emtrends`-funktiota (R-paketti `emmeans`, Lenth & Piaskowski 2025) saadakseni kulmakertoimet kokonaisuutokselle ja vyöhykekohtaisille muutoksille. Vyöhykkeiden mallinnettujen keskiarvojen avulla tarkastelin, eroavatko itiöpesäkkeiden esiintymisaikat keskimäärin toisistaan laskettuna kaikkien vuosien havaintojen suhteellisilla painoilla (R-paketti `emmeans`). Vertasin vyöhykkeiden marginaalisia keskiarvoja ja kulmakertoimia toisiinsa `emmeans`-paketin `pairs`-komennolla.

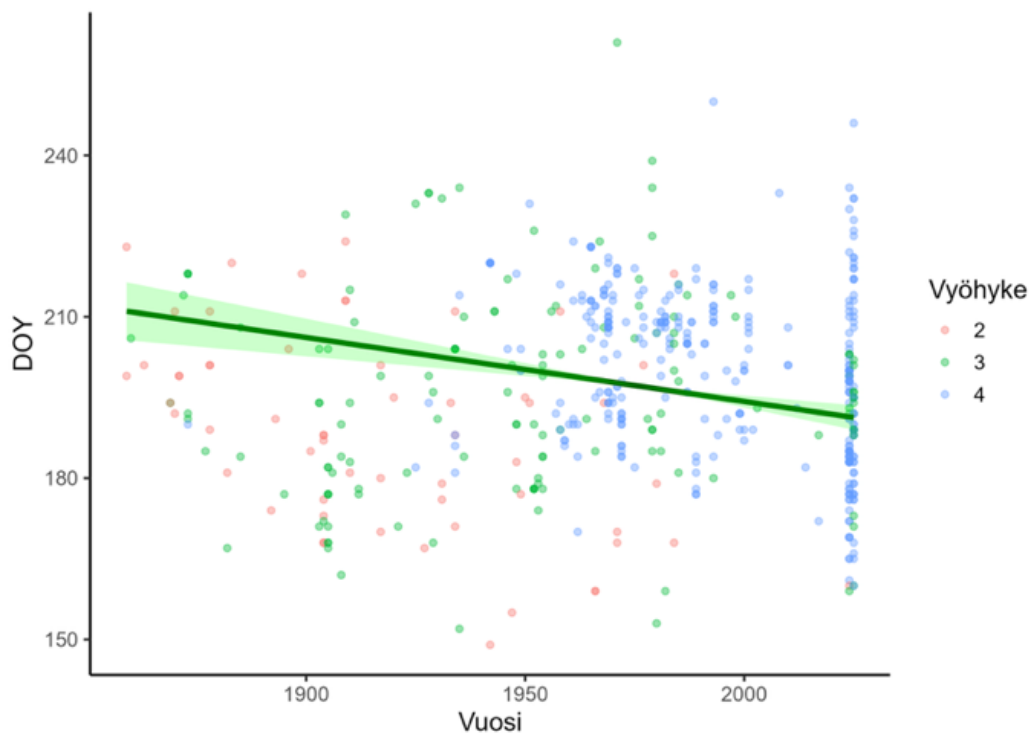
Aineiston epätasaisen ajallisen jakauman vuoksi selvitin, kuinka luotettavia saamani tulokset ovat, eli kuinka herkkiä ne ovat aineiston epätasaiselle ajalliselle jakaumalle. Jaoin aineistoni kahteen ajanjaksoon, 1859–1950 ja 1951–2025, minkä jälkeen toistin edellä kuvaamani

lineaarisen mallin 1000 kertaa ottaen jokaiselta vyöhykkeeltä ja molemmilta ajanjaksoilta joka kerta mukaan 13 satunnaisesti valittua havaintoa (13 oli havaintojen määrä pienimmässä luokassa edellä tehdyn jaon jälkeen). Tarkastelin III-tyypin ANOVA:n avulla, kuinka usein ajanjakson vaikutus oli malleissani tilastollisesti merkitsevä. Lisäksi tarkastelin vyöhykkeiden marginaalisia kulmakertoimia ja laskin, kuinka usein ne erosivat merkitsevästi nolasta. Laskin malleista myös keskimääräiset keskiarvoestimaatit eri vyöhykkeille.

3 Tulokset

3.1 Itiöpesäkkeen esiintymisajassa tapahtuneet muutokset Suomessa

Lineaarisen mallin tulosten perusteella keltasompasammalen itiöpesäkkeiden esiintymisaika on aikaistunut keskimäärin Suomessa 0,12 päivää vuosittain (keskivirhe = 0,024, 95 % luottamusväli -0,17 – -0,07) aikavälillä 1859–2025. Kokonaismuutos tällä aikavälillä on 20 päivää (Kuva 3). Tämä muutos on tilastollisesti merkitsevä (Taulukko 1).



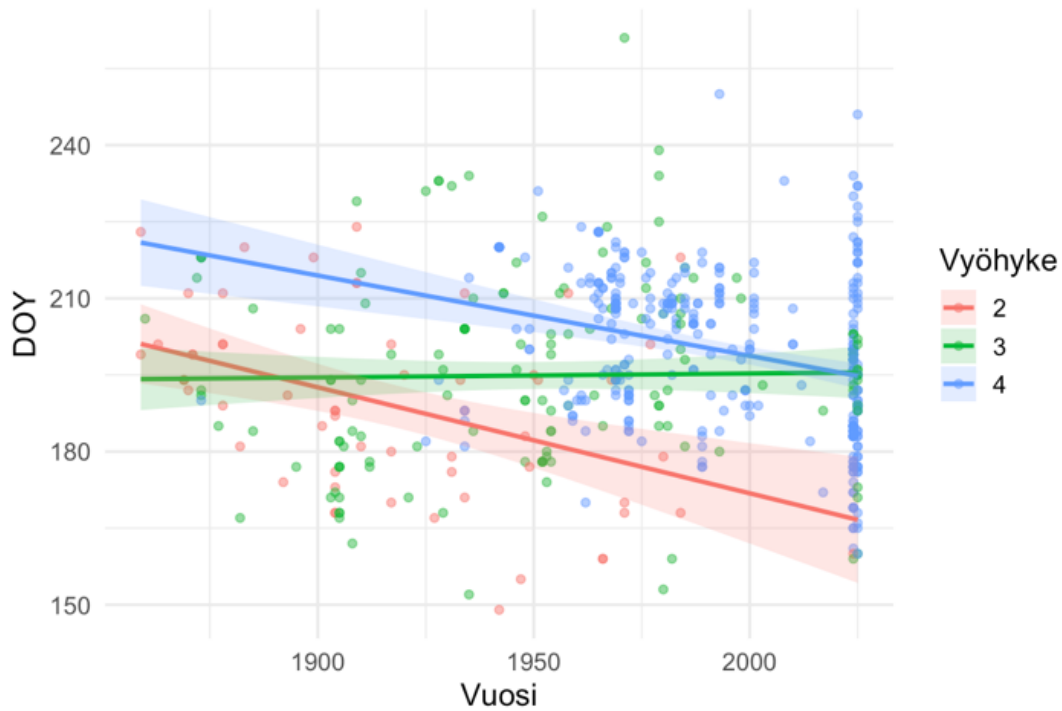
Kuva 3. Lineaarisen mallin tulosten mukaan arvioitu keskimääräinen muutos itiöpesäkkeen esiintymispäivässä (DOY) ajanjaksolla 1859–2025 Suomessa 95 % luottamusväleillä.

Taulukko 1. Muuttujien kokonaisvaikutukset itiöpesäkkeen esiintymisaikaan (ANOVA). Muuttujina havaintovuosi (vuosi), metsäkasvillisuusvyöhyke (vyöhyke) ja näiden kahden muuttujan yhdysvaikutus (yhdysvaikutus). Taulukossa neliösumma (SS), vapausasteet (df), F-testisuure ja p-arvo.

	SS	df	F	p
vuosi	3566	1, 539	13,77	0,0002
vyöhyke	13273	2, 539	25,63	< 0,0001
yhdysvaikutus	5132	2, 539	9,91	< 0,0001

3.2 Itiöpesäkkeen esiintymisajassa tapahtuneet muutokset metsäkasvillisuusvyöhykkeittäin

Hemi- ja eteläborealisella vyöhykkeellä (vyöhyke 2) itiöpesäkkeen esiintymisaika on aikaistunut 0,21 päivää vuosittain (Taulukko 2). Koko aikavälillä tämän vyöhykkeen muutos on noin 34 päivää (Kuva 4). Keski-borealisella vyöhykkeellä (vyöhyke 3) muutos on 0,008 päivää vuosittain, eli merkitsevää muutosta ei ole tapahtunut (Taulukko 2). Pohjoisborealisella vyöhykkeellä (vyöhyke 4) vuosittainen muutos on 0,16 päivää, eli koko aikavälillä itiöpesäkkeiden esiintyminen on aikaistunut 26 päivällä (Taulukko 2). Vyöhykkeiden 2 ja 4 kulmakertoimet, eli ajallisen muutoksen nopeudet, eivät eronneet merkitsevästi toisistaan ($p = 0,71$), mutta kummankin kerroin erosi vyöhykkeen 3 kulmakertoimesta ($p = 0,0021$ ja $p = 0,0004$).



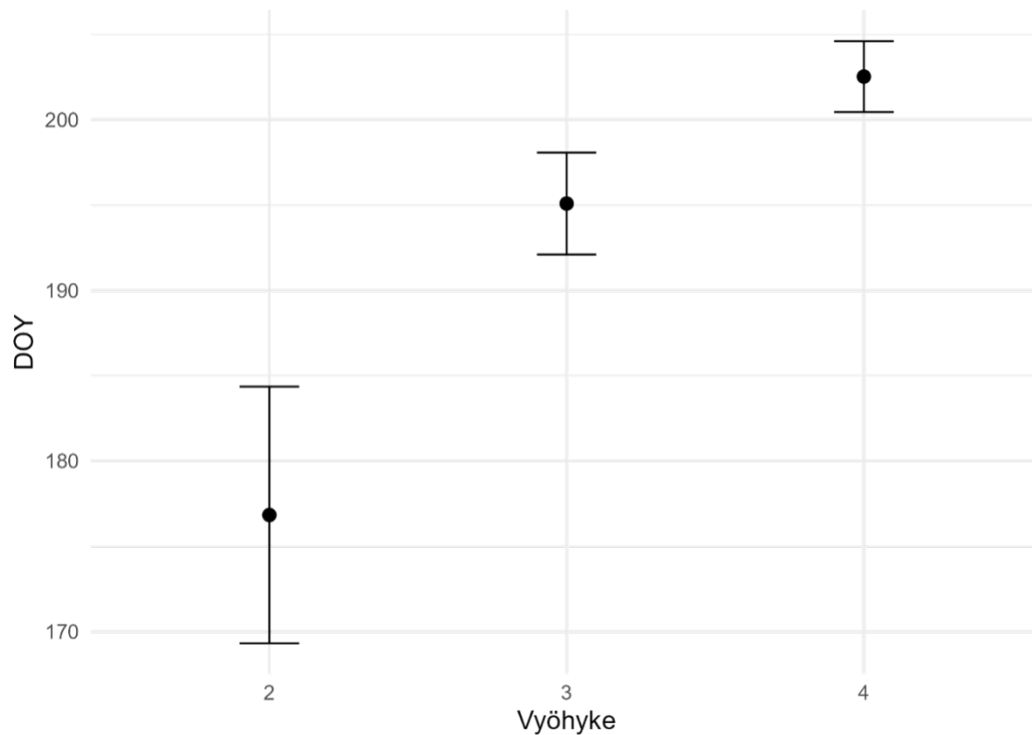
Kuva 4. Lineaarisen mallin tulosten mukaan arvioitu muutos itiöpesäkkeen esiintymispäivässä (DOY) ajanjaksolla 1859–2025 metsäkasvillisuusvyöhykkeillä 95 % luottamusväleillä. Vyöhyke 2 on hemi- ja eteläboreaalinen, vyöhyke 3 keskiboreaalinen ja vyöhyke 4 pohjoisboreaalinen vyöhyke.

Taulukko 2. Muutokset keltasompasammalen itiöpesäkkeen esiintymisajassa ajanjaksolla 1859–2025 metsäkasvillisuusvyöhykkeillä (vyöhyke 2, 3 ja 4). Taulukossa vuosittainen muutos esiintymisajassa päivinä (muutos), keskivirhe (SE), vapausasteet (df), t-testisuure ja p-arvo.

	muutos päivinä	SE	df	t	p
vyöhyke 2	-0,21	0,056	539	-3,71	0,0002
vyöhyke 3	0,008	0,029	539	0,26	0,796
vyöhyke 4	-0,16	0,031	539	-5,07	< 0,0001

3.3 Vyöhykkeiden väliset erot itiöpesäkkeiden esiintymisajassa

Mahdollisten muutosten lisäksi selvitettiin, eroavatko itiöpesäkkeiden esiintymisajat metsäkasvillisuusvyöhykkeiden välillä. Kaikkien keskenään vertailtavien parien erot ovat tilastollisesti merkitsevät, eli kaikkien vyöhykkeiden itiöpesäkkeiden esiintymisajat eroavat merkitsevästi toisistaan (Kuva 5; Taulukko 3).



Kuva 5. Itiöpesäkkeen esiintymispäivän (DOY) erot metsäkasvillisuusvyöhykkeiden välillä 95 % luottamusväleillä.

Taulukko 3. Metsäkasvillisuusvyöhykkeiden väliset erot itiöpesäkkeen esiintymisajassa. Taulukossa vertailtavien vyöhykkeiden välinen ero päivinä, keskivirhe (SE), vapausasteet (df), t-testisuure ja p-arvo.

vertailtavat vyöhykkeet	ero	SE	df	t	p
2 ja 3	-18,26	4,12	539	-4,43	< 0,0001
2 ja 4	-25,71	3,97	539	-6,47	< 0,0001
3 ja 4	-7,44	1,85	539	-4,01	0,0002

3.4 Tulosten luotettavuus

Varianssianalyysin luotettavuustestauksen tulosten mukaan vuosi vaikutti itiöpesäkkeen esiintymispäivään merkitsevästi 61,5 % niistä 1000 toistokerrasta, joissa aineisto oli tasapainotettu satunnaisotannalla luokittain. Vyöhykkeelle vastaava osuus oli 98,9 %. Muuttujien yhdysvaikutus oli merkitsevä vain 16,8 % kerroista.

Testasin myös, kuinka monella prosentilla mallin ajokerroista eri vyöhykkeiden fenologian muutosnopeudet erosivat merkitsevästi nollassa. Hemi- ja eteläboreaalisen vyöhykkeen trendi erosi nollassa 61,5 % toistokerroista, keskiboreaalisen 30,1 % kerroista ja pohjoisboreaalisen 6,1 % kerroista.

Satunnaistetuissa malleissa itiöpesäkkeiden keskimääräinen esiintymispäivä oli hemi- ja eteläboreaalaisella vyöhykkeellä 176 (95 % luottamusväli 169–184), keskiboreaalaisella 195 (95 % luottamusväli 192–198) ja pohjoisboreaalaisella 202 (95 % luottamusväli 200–204).

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Keltasompasammalen fenologiassa tapahtuneet muutokset

Tulosteni mukaan keltasompasammalen itiöpesäkkeen esiintymisaika on aikaistunut Suomessa lähes 20 päivällä vuodesta 1859. Aikaistumista havaittiin myös vyöhykekohtaisessa tarkastelussa: eteläisimmällä vyöhykkeellä itiöpesäkkeet kehittyvät noin 34 päivää aikaisemmin kuin ennen, ja pohjoisimmalla vyöhykkeellä muutos on noin 26 päivää. Näiden vyöhykkeiden muutosnopeudet eivät eronneet merkitsevästi toisistaan. Tulokseni tukevat Bengtssonin ym. (2025) saamia tuloksia, joissa itiöiden leviämisen todettiin aikaistuneen Pohjois-Ruotsissa 3–6 viikolla 35 vuoden aikana. He totesivat myös lämpötilan nousseen tutkittavalla alueella ajanjakson (1974–2008) aikana 1,7°C. Suomessa lämpötilan muutos suunnilleen samalla ajanjaksolla on 0,8–1,6°C (Ilmatieteen laitos 2025). En tarkastele tässä tutkielmassa tarkemmin lämpötilojen muutoksia Suomen eri alueilla tai niiden mahdollista yhteyttä itiöpesäkkeiden esiintymisen aikaistumiseen. Laajemmassa tutkimuksessa olisi kuitenkin perusteltua tehdä niin, koska lämpötilan tiedetään vaikuttavan sammalten fenologiaan (Glime 2017) ja muidenkin kasvien fenologian muutoksiin (Menzel ym. 2006). On kuitenkin oletettavaa, että itiöpesäkkeen esiintymisajan aikaistuminen johtuu ilmastossa tapahtuvista muutoksista.

Hemi- ja eteläboreaalisen ja pohjoisboreaalisen vyöhykkeen itiöpesäkkeiden esiintymisajassa tapahtuneet muutokset eivät eronneet merkitsevästi toisistaan, mutta muutos oli etelässä lähes merkitsevästi nopeampaa. Tätä voisi osin selittää se, että Etelä-Suomessa talvet ovat vähälumisempia ja vesisade on selvästi yleisempää kuin ennen (Luomaranta ym. 2019). Talven pituus on mahdollisesti sammalten itiöiden leviämisaikaan vaikuttava tekijä (Barbé ym. 2017).

Ilmaston lämpeneminen on kuitenkin nopeampaa, mitä pohjoisemmasta alueesta on kyse (IPCC 2021), joten myös fenologisten muutosten nopeuden voisi olettaa kasvavan pohjoista kohti mentäessä. On mahdollista, että tämän tutkielman tulokset ovat aineiston niukkuuden ja epätasaisuuden vuoksi jossain määrin vääristyneet. Tämä kävi ilmi vuoden ja vyöhykkeen vaikutusten varianssianalyysin luotettavuutta arvioitaessa: testissä vuoden ja vyöhykkeen yhdysvaikutus oli tilastollisesti merkitsevä vain 16,8 % toistokerroista, joissa aineisto oli tasapainotettu satunnaisotannalla luokittain. Täten vyöhykekohtaiset trendit ovat tuloksista epäluotettavimmat ja varmuuteen alueellisten erojen suuruudesta ei päästä ilman kattavampaa aineistoa.

Keskiborealisella vyöhykkeellä (vyöhyke 3) ei ollut havaittavissa muutosta. Tämä saattaa johtua yksinkertaisesti siitä, että käyttämäni aineisto on liian suppea. Tosin havaintoja on ajanjaksolta melko tasaisesti tällä vyöhykkeellä, minkä voisi ajatella mahdollistavan merkitsevän tuloksen saamisen. Joka tapauksessa tarvittaisiin enemmän aineistoa, jotta voitaisiin varmasti sanoa, onko kyseisellä vyöhykkeellä tapahtunut ajallista muutosta.

Tulosteni mukaan itiöpesäkkeiden esiintymisajassa on eroja metsäkasvillisuusvyöhykkeiden välillä, kun ajallisen muutoksen vaikutus on otettu huomioon. Hemi- ja eteläborealisen vyöhykkeen (2) itiöpesäkkeen mallinnettu keskimääräinen esiintymisaika oli 26.6., keskiborealisen (3) 14.7. ja pohjoisborealisen (4) 22.7. Etelässä itiöpesäkkeet kehittyvät siis yli kolme viikkoa aikaisemmin kuin pohjoisessa. Tämä tulos on alueiden lämpötilaerojen kanssa yhteensopiva ja tukeekin hypoteesiani siitä, että ilmasto-oloilla on vaikutusta lajin itiöpesäkkeiden esiintymisaikaan. Alueiden lämpötilojen vertailu saattaisi antaa suuntaa antavia tietoja siitä, miten paljon itiöpesäkkeiden esiintymisaika muuttuu ilmaston lämmitessä ja missä lämpötiloissa laji yleensä tuottaa itiöpesäkkeen.

Eteläisestä Suomesta ei ole uusia havaintoja lähestulkoon ollenkaan. Tämä voi viitata siihen, että keltasompasammal on vähentynyt näillä alueilla viime vuosikymmenten aikana. Syynä kannan alueelliseen pienenemiseen saattaa yksinkertaisesti olla sopivien elinympäristöjen katoaminen, mutta myös ilmastonmuutos on voinut vaikuttaa asiaan joko suorasti muuttaen ilmasto-olosuhteita lajille epäsuotuisiksi tai epäsuorasti vähentämällä lajille suotuisien elinympäristöjen määrää. Mahdollisia ilmastonmuutoksen vaikutuksia lajin levinneisyyteen olisikin mielekästä selvittää. Bergamini ym. (2009) havaitsivat sammalten keskimääräisen

levinneisyyskorkeuden merenpinnasta nousevan ilmaston lämmitessä. Samanlaista muutosta sammalten levinneisyyksissä voidaan olettaa tapahtuvan leveysasteiden suhteen ja lajien levinneisyyksien siirtyvän pohjoisemmaksi ilmaston lämmitessä.

4.2 Fenologian muutosten vaikutukset lajien välisiin suhteisiin

Sammalten itiöpesäkkeiden kehittymisen aikaistumisella on vaikutuksia sekä lajitasolla että laajemmin. Fenologian muutokset voivat olla lajille haitallisia, sillä ne voivat vaikuttaa sen vuorovaikutuksiin muiden eliöiden kanssa eri eliöiden fenologian muuttuessa eri tahtiin. Sompasammalten leviämislle ja täten esiintyvyydelle oleellista on niiden suhteet niiden itiöitä levittäviin kärpäsiin. Kukkivien kasvien ja niiden pölyttäjien välillä on havaittu fenologista yhteensopimattomuutta johtuen lumikauden muutoksista ja kevään aikaistumisesta (Kudo & Ida 2013). Kilian ym. (2023) tutkivat viljellyn kuminan kukinnan vaikutusta pölyttäjien aktiivisuuteen. He havaitsivat, että kukinnan jälkeen pölyttäjien, joiden joukossa oli myös kärpäsiä (*Brachycera*), määrä väheni huomattavasti. Lisäksi spesialistien osuus pölyttäjistä pieneni merkittävästi, ja jäljelle jäi suurimmaksi osaksi generalisteja, eli eliöitä, jotka hyödyntävät ympäristössään olevia erilaisia resursseja monipuolisesti. Spesialistien ekolokerot ovat rajattuja, ja niillä voi olla spesifisiä lajenvälisiä suhteita.

On mahdollista, että sompasammalten itiöitä levittävät kärpäset ovat aktiivisempia tiettyyn aikaan kesästä (Kilian ym. 2023). Itiöpesäkkeiden esiintymisaikojen muuttuessa niiden lisääntymismenestys voi heikentyä, jos kärpäset eivät ole yhtä aktiivisia uutena esiintymisaikana (Memmott ym. 2007). Sompasammalten ja niiden itiöitä levittävien kärpästen väliset suhteet ovat usein lajikohtaisia (Glime 2017). Jos pölyttäjistä spesialistit vähentävät aktiivisuuttaan generalisteja huomattavammin kukinta-ajan päätyttyä voi riski lisääntymismenestyksen heikentymiselle olla suurempi. Mitä lyhyemmän aikaa esimerkiksi pölytettävä kukka on olemassa, sen suurempi todennäköisyys on sille, että syntyy fenologista yhteensopimattomuutta. Keltasompasammalten itiöpesäke on melko lyhytikäinen, joten voi olla, että fenologian muutos vaikuttaa sen kannan säilymiseen negatiivisesti.

Tutkielmani tulokset tukevat muita aiheesta tehtyjä tutkimuksia ja vahvistavat tietoa siitä, että ilmastonmuutoksella on selvät vaikutukset putkilokasvien lisäksi myös sammaliin. Nykyisten tutkimustietojen avulla ei kuitenkaan tarkasti voida ennustaa sammalten fenologian muutoksia tai niiden vaikutuksia ilmastonmuutoksen edetessä. Keltasompasammallelle tässä tutkielmassa

todettu itiöpesäkkeen esiintymisajan aikaistuminen saattaa merkitä lisääntymismenestyksen heikentymistä, jos itiöitä levittävät kärpäset ovat aktiivisia väärään aikaan. Yksittäisten lajien fenologian muutokset voivat näkyä ekosysteemitasollakin juuri lajien välisten suhteiden häiriintymisen ja lajien levinneisyyden muuttumisen myötä.

Kiitokset

Kiitän ohjaajiani Kati Pihlajaa ja Inka Kuusistoa mielenkiintoiseen aiheeseen tutustuttamisesta ja sen tutkimisen mahdollistamisesta. Kiitän heitä myös kaikesta korvaamattomasta avusta ja kokemuksesta, jota tutkielman tekemisen aikana sain.

Lähteet

- Barbé, M., Fenton, N., Caners, R., Bergeron, Y. 2017. Interannual variation in bryophyte dispersal: linking bryophyte phenophases and weather conditions. *Botany* 95: 1151-1169. <https://doi.org/10.1139/cjb-2017-0054>
- Bengtsson, F., Cronberg, N., Villegas, J., Siddique, A., Stenberg, P., Ekroos, J. 2025. Rapid shifts in bryophyte phenology revealed by airborne eDNA. *Journal of Ecology* 00: 1-15. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.70180>
- Bergamini, A., Ungricht, S., & Hofmann, H. 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century – an effect of climate warming? *Diversity and distributions* 15: 871-879. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2009.00595.x>
- Delignette-Muller, M., Dutang, C. 2015. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, 64: 1-34. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>
- Fox, J., Weisberg, S. 2019. *An R Companion to Applied Regression*, kolmas versio. Sage, Thousand Oaks CA, USA. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Gignac, L. D. 2001. Bryophytes as indicators of climate change. *The Bryologist* 104: 410-420. [https://doi.org/10.1639/0007-2745\(2001\)104\[0410:BAIOCC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1639/0007-2745(2001)104[0410:BAIOCC]2.0.CO;2)
- Glime, J. M. 2017. *Bryophyte Ecology*. E-kirja. <https://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/>. Luettu 17.3.2025.
- Hartig, F. 2024. DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models, versio 0.4.7. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>
- Ilmatieteen laitos 2025. Teematietoa – Ilmastonmuutos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastonmuutoskysymyksia#3AlxWPGTde9akxOAOqc2Vi>. Luettu 13.11.25.

- Kilian, I., Swenson, S., Mengual, X., Gemeinholzer, B., Hamm, A. Wägele, J., Peters, R. 2023. More complex than you think: Taxonomic and temporal patterns of plant-pollinator networks of caraway (*Carum carvi* L.). *Molecular Ecology* 32: 3702-3717. <https://doi.org/10.1111/mec.16943>
- Kudo, G. & Ida, T. 2013. Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology* 94: 2311–2320. <https://doi.org/10.1890/12-2003.1>
- Lenth, R., Piaskowski, J. 2025. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R-paketti, versio 2.0.0. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Luomaranta, A., Aalto, J., Jylhä, K. 2019. Snow cover trends in Finland over 1961-2014 based on gridded snow depth observations. *International Journal of Climatology* 39: 3147-3159. <https://doi.org/10.1002/joc.6007>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, C., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. IPCC. Cambridge University Press, New York, USA.
- Memmott, J., Craze, P., Waser, N., Price, M. 2007. Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions. *Ecology Letters* 10: 710-717. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x>
- Menzel, A., Sparks, T., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remisová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A., Wielgolaski, F., Zach, S., Züst, A. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969-1976. <https://doi-org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>

- Peñuelas, J., Rutishauser, T., Filella, I. 2009. Phenology feedbacks on climate change. *Science* 324: 887-888. <https://doi.org/10.1126/science.1173004>
- Proctor M. C. F. 2011. Climatic responses and limits of bryophyte: comparisons and contrasts with vascular plants. *Bryophyte ecology and climate change*. Cambridge University Press, New York, USA. Sivut 35-54.
- Renner, S., Zohner, C. 2018. Climate Change and Phenological Mismatch in Trophic Interactions Among Plants, Insects, and Vertebrates. *Annual review of ecology, evolution, and systematics* 49. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062535>
- Sammaltyöryhmä, Laiho, E. 2025. Etsintäkuulutus: sompasammalet! <https://laji.fi/news/8269>. Luettu 18.12.2025.
- Slate, M., Antoninka, A., Bailey, L., Berdugo, M., Callaghan, D., Cárdenas, M., Chmielewski, M., Fenton, N., Holland-Moritz, H., Hopkins, S., Jean, M., Kraichak, B., Lindo, Z., Merced, A., Oke, T., Stanton, D., Stuart, J., Tucker, D., Coe, K. 2024. Impact of changing climate on bryophyte contributions to terrestrial water, carbon, and nitrogen cycles. *New Phytologist* 242: 2411-2429. <https://doi.org/10.1111/nph.19772>
- Sundberg, S. 2002. Sporophyte production and spore dispersal phenology in *Sphagnum*: the importance of summer moisture and patch characteristics. *Canadian Journal of Botany* 80: 543-556. <https://doi.org/10.1139/b02-060>
- Suomen lajitietokeskus 2025. Keltasompasammal – *Splachnum luteum*. <https://laji.fi/taxon/MX.44072>. Luettu 16.3.2025.
- Suomen ympäristökeskus 2015. Metsäkasvillisuusvyöhykkeet. Paikkatietoaineisto. <https://ckan.ymparisto.fi/fi/dataset/metsakasvillisuusvyohykkeet>
- Walther, G., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T., Fromentin, J., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395. <https://doi.org/10.1038/416389a>