



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Saastumisen vaikutus tali- ja sinitiaisen sekä kirjosiepon munien kuoriutuvuuteen metallisulaton ympäristössä

Ilona Mäkelä

Turun yliopisto
Biologian laitos
LuK-tutkielma

16.4.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pääaine: Biologia

Tekijä: Ilona Mäkelä

Otsikko: Saastumisen vaikutus tali- ja sinitiaisen sekä kirjosiepon munien kuoriutumiseen metallisulaton ympäristössä

Ohjaaja: Tapio Eeva

Sivumäärä: 20 sivua

Päivämäärä: 16.4.2025

Tässä tutkielmassa tarkastelen saastumisen vaikutusta tali- ja sinitiaisen (*Parus major* ja *Cyanistes caeruleus*) sekä kirjosiepon (*Ficedula hypoleuca*) munien kuoriutuvuuteen Harjavallan saastuttavan metallisulaton alueella. Tutkimuksen valmis aineisto on kerätty vuosina 1991–2023, ja se kattaa alueita sekä sulattamon läheltä, että kauempana sijaitsevilla vertailualueilla. Tutkielman tarkoitus oli selvittää, vaikuttaako saastuminen lintujen täydellisesti kuoriutuneiden pesien osuuteen, eli niiden pesien, joissa kaikki munat kuoriutuvat Harjavallan kuparisulattamon lähialueella ja kauempana sijaitsevilla vertailualueilla. Analyysissä havaittiin, että saastuneisuus ei vaikuta merkittävästi täydellisesti kuoriutuneiden tali- ja sinitiaisten pesyeiden osuuteen, eli täydellisten pesintöjen määrä oli keskimäärin sama saastuneen alueen ja kontrollialueen välillä. Kirjosiepoilla saastuneen alueen ja kontrollialueen väliltä löytyi tilastollisesti merkittävä ero, ja täydellisten pesintöjen osuus oli kontrollialueella suurempi kuin saastuneella. Analyysissä huomattiin myös, että täydellisesti kuoriutuneiden pesyeiden osuus on kasvanut sekä kirjosiepolla että sinitiaisella vuodesta 1991, johtuen esimerkiksi Harjavallan alueella tehdyistä kunnostustoimista, joiden ansiosta saastumisen vaikutus on vähentynyt. Talitiaisella täydellisesti kuoriutuneiden pesien osuus ei taas ole merkittävästi muuttunut vuosien aikana.

Avainsanat: Harjavalta, kuoriutuvuus, *Parus major*, *Cyanistes caeruleus*, *Ficedula hypoleuca*

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Harjavalta.....	1
1.1.1	Kunnostustoimet Harjavallan alueella	1
1.2	Taustaa lintujen munien kuoriutuvuudesta	3
1.3	Tiaiset ja kirjosiippo.....	3
1.4	Raskasmetallit.....	4
1.5	Tutkielman tavoite ja hypoteesit	5
2	Aineisto ja menetelmät.....	6
2.1	Tutkimusaineisto	6
2.2	Aineiston tilastollinen analysointi	6
3	Tulokset	8
4.	Tulosten tarkastelu ja pohdinta.....	14
5.	Lähteet.....	17

1 Johdanto

1.1 Harjavalta

Harjavallan teollisuusalue sijaitsee Satakunnan maakunnassa Lounais-Suomessa, ja se on yksi Suomen merkittävimmistä, ja saastuneimmista, teollisuusalueista.

Harjavallan kupari- ja nikkelisulaton raskasmetalli- ja rikki päästöt ovat vaikuttaneet merkittävästi sitä ympäröivään metsäekosysteemiin vuodesta 1945 lähtien. Saasteet vaikuttavat kasvillisuuteen, ravinnekiertoon, kasvinsyöjiin, hyönteisiin, taudinaiheuttajiin, kasvillisuuden kestävyteen ja lintuihin. Raskasmetallien laskeuma on lisääntynyt jopa 30 kilometrin etäisyydellä, mikä on johtanut muutoksiin pohjakerroskasvillisuudessa, puiden kasvussa ja ravinteiden kierrossa (Kiikkilä 2003). 1990-luvun alussa tutkijat havaitsivat, että lintujen munamäärät kuparisulattamon läheisyydessä olivat huomattavasti vähäisemmät kuin kauempana sulattamosta, ja poikasten kuolleisuus oli suurempi. Munankuorten heikkouden osoitettiin johtuvan sekä lintuemojen ravintonaan käyttämistä hyönteisistä suoraan kertyneistä raskasmetalleista, että siitä, että rikki päästöjen vuoksi happamoituneista metsistä oli saatavilla vähemmän kalsiumpitoista ravintoa (Eeva ja Lehikoinen 1995).

1.1.1 Kunnostustoimet Harjavallan alueella

Harjavallassa on tehty useita koetyyppisiä ja pienialaisia kunnostustoimia, joilla on ollut myönteisiä vaikutuksia kyseisiin koelohiin. Harjavallan alueen ympäristön tila on lisäksi parantunut ympäristöä koskevan lainsäädännön tiukennuttua Suomessa 1990-luvulla. Silloin tuli muun muassa uusi laki ympäristövahinkojen korvaamisesta (737/1994), uusi luonnonsuojeluasetus (160/1997) sekä EU-tasolla annettu direktiivi ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi (96/61/EY).

Päästöjen vähentämisellä ja ympäristön kunnostuksella on pyritty vähentämään raskasmetallien haitallisia vaikutuksia, parantamaan ravinteiden saatavuutta, edistämään maaperän orgaanisen aineksen hajoamista sekä vakauttamaan ravinteiden kiertoa pitkäksi ajaksi (Kiikkilä 2003). Mälkönen ym. (1999) aloittivat maaperän kunnostuskokeen Harjavallassa vuonna 1992. Käsittelyt koostuivat kalkituksesta, hitaasti vapautuvan mineraaliseksi levittämisestä sekä neula- ja maa-analyysien perusteella määritetystä metsikkökohtaisesta lannoituksesta (Mälkönen ym. 1999). Kalkituksella oli positiivisia vaikutuksia maaperän kemiaan viiden tutkimusvuoden aikana. Se lisäsi vaihtuvia kalsium- ja magnesiumpitoisuuksia (Derome 2000), alensi vaihtuvia kupari- ja nikkelpitoisuuksia maaperässä (Mälkönen ym. 1999) sekä vähensi metallien huuhtoutumista maaperän profiiliin (Derome ja Saarsalmi 1999). Positiivisia vaikutuksia puiden kasvuun ja eloonjäämiseen havaittiin myös, ja kalkitus oli onnistunein hoitomuoto. Kaikki lannoitekäsittelyt lisäsivät männyn volyymikasvua (Mälkönen ym. 1999), ja kalkitus esimerkiksi lisäsi hienojuurten kasvua ja selviytymistä (Helmisaari ym. 1999) sekä vähensi raskasmetallien haitallisia vaikutuksia taimien eloonjäämiseen (Salemaa ja Uotila 2001).

Toinen kunnostuskoe aloitettiin vuonna 1996. Siinä saastunutta metsäpohjaa mullattiin orgaanisella aineella, kompostin ja hakkeen seoksella, ja multaa täynnä oleviin taskuihin istutettiin useita taimia, kuten variksenmarjan (*Empetrum nigrum*) ja rauduskoivun (*Betula pendula*) taimia. Multaa levitettiin suoraan metsäpohjan mätänemättömän karikkeen päälle tai paljastuneen epäorgaanisen maan päälle saastuneen karikkeen ja orgaanisen maakerroksen poistamisen jälkeen. Orgaanisen maan kemialliset ja mikrobiologiset muutokset kolmen kasvukauden aikana multaamisen jälkeen ovat raportoineet Kiikkilä et al. (2001). Pilaantuneen maan multaaminen kompostin ja hakkeen seoksella muutti kuparin vähemmän myrkyllisiksi muodoiksi, mikä havaittiin maaperässä alhaisempana vaihtokelpoisena kuparipitoisuutena ja maaveden alhaisempana Cu^{2+} -pitoisuutena sekä maaveden alentuneena myrkyllisyytenä bakteereille. Mikrobiaktiivisuus lisääntyi ja bakteerien sietokyky kuparille heikkeni orgaanisessa kerroksessa (Kiikkilä ym. 2001, 2002).

Päästöjen vähenemisen seurauksena metsäsammaleiden raskasmetallipitoisuudet alenivat vuosina 1990–1995 (Kubin ym. 2000). Vähentyneet päästöt eivät kuitenkaan

näkyneet saasteiden massalaskemassa, maaliuoksessa, neulasbiomassassa tai puiden säteittäisessä kasvussa vuosina 1992–1996 (Mälkönen ym. 1999) luultavasti ekosysteemiin kertyneiden metallialtaiden vuoksi (Nieminen ja Saarsalmi 2002). Päästöjen väheneminen yhdessä kunnostustoimien kanssa on kuitenkin luultavasti hyödyttänyt lintuja. Tali- ja sinitiaisen pesimämenestys oli parantunut huomattavasti sulaton läheisyydessä vuosien 1991 ja 1997 välisenä aikana, ja pesivien lintujen lyijypitoisuudet olivat vuoteen 2000 laskeneet noin 90 % (Eeva ja Lehikoinen 2000).

1.2 Taustaa lintujen munien kuoriutuvuudesta

Lintujen munien kuoriutuvuus vaihtelee lajien mukaan, ja siihen vaikuttaa esimerkiksi leveysaste, ruokavalio ja pesätyyppi (Koenig 1982). Lintulajien väleillä on eroa, mutta keskimäärin 10-15 % kuoriutumisista epäonnistuu (Heggøy, Gohli, ja Lislevand 2024), joka voi johtua joko hedelmöitymisen epäonnistumisesta, sikiön kuolemasta tai kuoriutumisen epäonnistumisesta (Birkhead ym. 2008).

Kuoriutuvuutta haittaavat esimerkiksi hyönteismyrkyt (Cooke 1973) ja raskasmetallit, kuten elohopea, lyijy ja alumiini (Grandjean 1976; Nyholm 1981; Tejning 1967). Lisäksi happamoituminen voi vähentää lintujen käytettävissä olevan kalsiumin määrää, mikä voi vaikuttaa munankuoren rakenteeseen negatiivisesti/heikentävästi (Scheuhammer 1991). Nämä tekijät voivat heikentää munankuoren rakennetta, mikä vaikuttaa negatiivisesti kuoriutuvuuteen.

1.3 Tiaiset ja kirjosisieppo

Lintulajien herkkyys ympäristön metallisaasteille vaihtelee, ja alhaiset ravinnon ja verenkierron kalsiumtasot osoittavat suurempaa herkkyyttä myrkyllisten metallien haitallisille vaikutuksille. Hyönteissyöjäruokavalio näyttää viittaavan alhaisiin kalsiumtasoihin ja mahdolliseen herkkyyteen myrkyllisille metalleille (Espin ym.

2024). Sekä talitiainen (*Parus major*) että sinitiaainen (*Cyanistes caeruleus*) käyttävät ravintonaan pääosin hyönteisiä, minkä vuoksi ne voivat altistua myrkyllisille metalleille ravintoketjussa tapahtuvan rikastumisen seurauksena: hyönteiset voivat sisältää metalleja, jotka siirtyvät lintuihin niitä syödessä ja kertyvät elimistöön. Tämän vuoksi metallien pitoisuudet voivat nousta korkeammiksi kuin pelkästään siemeniä syöville lajeilla. Kirjosieppo (*Ficedula hypoleuca*) taas käyttää pelkästään hyönteisravintoa, mikä tarkoittaa sitä, että se on vielä herkempi saasteille kuin tali- ja sinitiaiset, koska siihen kertyy enemmän saasteita kuin niihin.

Lisäksi sinitiaisella on alhaisemmat kalsiumpitoisuudet ja joidenkin raskasmetallien korkeammat tasot verrattaessa talitiaiseseen (Espin ym. 2016), mikä saattaa viitata siihen, että kalsiumköyhissä ympäristöissä tämä laji saattaa olla alttiimpi negatiivisille saastevaikutuksille kuin talitiainen (Eeva ym. 2009). On myös havaittu, että saastuneella alueella pesivät linnut ovat herkempiä kärsimään huonoista sääoloista kuin puhtaamman alueen linnut, (Eeva ym. 2020) mikä tarkoittaa sitä, että Harjavallan saastuneella alueella olevat linnut kärsivät erityisen paljon.

1.4 Raskasmetallit

Raskasmetalli on terminä melko kiistely, koska sille on monta määritelmää. Yksi yleinen määritelmä on se, että ne ovat tiheydeltään suuria metalleja. Yleisesti raskasmetalleiksi luokitellaan metalleja, joiden tiheys ylittää 5 g/cm^3 , kuten lyijy (Pb), elohopea (Hg), ja kadmium (Cd), mutta määritelmät vaihtelevat $3,5 \text{ g/cm}^3$:sta yli 7 g/cm^3 :een. Yleisesti raskasmetallien oletetaan olevan erittäin myrkyllisiä tai ympäristölle haitallisia (Duffus 2002).

Raskasmetalleista johtuva ympäristön saastuminen ja ihmisten altistuminen ovat lisääntyneet, koska niitä käytetään eri teollisuudenaloilla, mukaan lukien kaivostoiminnassa ja sulatoissa. Biologisissa järjestelmissä raskasmetallit vaikuttavat soluelimiin aiheuttaen DNA-vaurioita ja konformaatiomuutoksia, jotka voivat johtaa solusyklin muutoksiin, syövän syntyyn tai solukuolemiin (Tchounwou ym. 2012).

Esimerkiksi elohopea on laajalle levinnyt raskasmetalli, joka aiheuttaa vakavia kudosaivourioita ja haitallisia terveysvaikutuksia. Sen myrkyllisyys liittyy oksidatiiviseen stressiin, joka lisää sulfhydryyliryhmien reaktiivisuutta, kuluttaa solujen antioksidantteja ja edistää reaktiivisten happilajien muodostumista (Tchounwou ym. 2012).

Harjavallan sulatosta pääsee sitä ympäröivään luontoon muun muassa kuparia ja lyijyä. Kupari on raskasmetalli, joka toimii useiden oksidatiiviseen stressiin liittyvien entsyymien olennaisena kofaktorina, mutta liiallinen altistuminen voi johtaa soluvaurioihin ja maksan kupariaineenvaihdunnan häiriöihin (vrt. Wilsonin tauti ihmisellä) (Tchounwou ym. 2012).

Lyijyllä on taas myrkyllinen vaikutus biokemiallisten prosessien kautta, mukaan lukien estämällä kalsiumin toiminnan, ja se on myös mahdollisesti karsinogeeninen. Ihmisillä lyijy voi aiheuttaa esimerkiksi verenmyrkytyksiä, vähentynyttä älykkyyttä, kuulon heikkenemistä ja kasvun hidastumista (Tchounwou ym. 2012). Linnuilla, kuten sini- ja talitiaisilla sekä kirjosiepoilla, lyijy taas haittaa kuoriutumista aiheuttamalla ohentumista lintujen munien kuoriin (Grandjean 1976).

1.5 Tutkielman tavoite ja hypoteesit

Tämän tutkielman tarkoitus on tutkia saastumisen vaikutuksia talitiaisien (*P. major*), sinitiaisen (*C. caeruleus*) sekä kirjosiepon (*F. hypoleuca*) munien kuoriutuvuuteen Harjavallan saastuneella alueella. Tutkielman päätavoitteena on selvittää, heikentävätkö alueen saasteet lintulajien keskimääräistä kuoriutuvuutta.

Tarkoituksena on 1. analysoida munien kuoriutuvuutta, ja 2. vertailla lajikohtaisia kuoriutuvuuksia. Testaan saastuneelta alueelta kerätyn aineiston avulla kahta hypoteesia: Hypoteesi 1: Saastuneella alueella on epätodennäköisempää, että lintujen pesiminen onnistuu täydellisesti (nollahypoteesi: Eroja ei löydy alueiden välillä). Hypoteesi 2: Kuoriutuvuuksilla on lajikohtaisia eroja (nollahypoteesi: Eroa ei löydy, eli kuoriutuvuus on keskimäärin sama).

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusaineisto

Tutkielman aineistona on valmis tutkimusaineisto, joka on kerätty Harjavallan kuparisulattamon läheltä. Tutkimusryhmä on vuodesta 1991 asti tehnyt edelleen jatkuvaa tutkimusta, jossa asetettiin linnunpönttöjä sulattamon alueelle ja kauemmas siitä. Lähin linnunpönttö on alle kilometrin päässä, ja kaukaisin yli sadan kilometrin. Pesäpönttöjä on lisätty vuosien varrella, ja niitä on nykyään satoja. Maastokautena, joka alkaa keväällä, pöntöt tarkastellaan yksitellen. Pesistä pyydystetään lintunaaraat rengastamista ja identifioimista varten, lasketaan munamäärät, dokumentoidaan kuoriutuneiden poikasten määrä ja pesäkuolleisuus, ja lopulta rengastetaan selviytyneet poikaset. Tutkijat myös ottavat linnuista erilaisia näytteitä myöhemmin suoritettavia laboratorioanalyyskejä varten (Eeva ym. 2000; Eeva ja Lehikoinen 1995).

2.2 Aineiston tilastollinen analysointi

Aineisto on laaja, ja se kattaa vuosien 1991–2023 pesäkohtaiset havainnot tiaisten (tali- ja sinitiaisen) sekä kirjosiepon munien kuoriutumisesta Harjavallan saastuneella alueella sekä suhteellisen saastumattomalla vertailualueella.

Aineisto oli Microsoft Excel -ohjelmistossa. Excel-taulukkoon lisäsin muutamia uusia muuttujia, jotka helpottavat analyysin suorittamista ja tulkintaa: Lisäsin taulukkoon muuttujan, joka jakaa havaintoaineiston kahteen ryhmään: saastuneeseen (0-2 km sulattamosta) ja saastumattomaan alueeseen (>2 km sulattamosta, jota voidaan käyttää kontrollina). Näin voin selvästi erottaa, kummalle alueelle kukin havainto kuuluu. Lisäksi lisäsin muuttujan, joka ilmaisee kuoriutumattomien munien osuuden (%).

Käytin analyyseihin lähinnä RStudiota, mutta hieman myös Microsoft Excel -ohjelmistoa. Käytin chi-neliötestiä vertaillakseni eroja, esimerkiksi täysin ja vain

osittain onnistuneiden pesintöjen osuuksien välillä. Vertailin myös lajikohtaisia kuoriutuvuuksia, ja analysoin, onko niiden välillä jotain merkitsevää eroa. Näiden lisäksi pyrin aineiston ajallisella tarkastelulla selvittämään, onko saastuneen alueen kuoriutumistilanne parantunut vuosien varrella.

Aineistosta ei ole poistettu saalistuksen vuoksi kuoriutumatta jääneitä pesiä, joten petojen vaikutusta kuoriutumismenestykseen ei voida tämän perusteella arvioida.

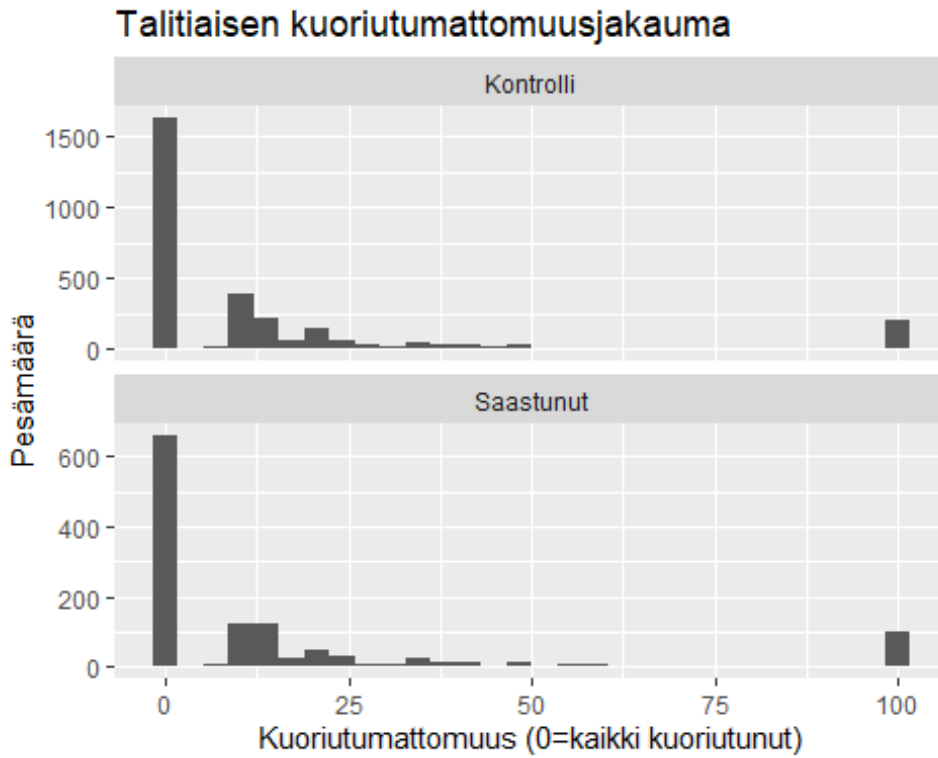
3. Tulokset

Aineisto sisältää yhteensä 10 740 pesintähavaintoa 33 vuoden tutkimusjaksolta. Yhteenvetoa varten laaditussa taulukossa näkyy, kuinka monta pesintähavaintoa kullakin lajilla on kontrolli- ja saastuneella alueella (Taulukko 1).

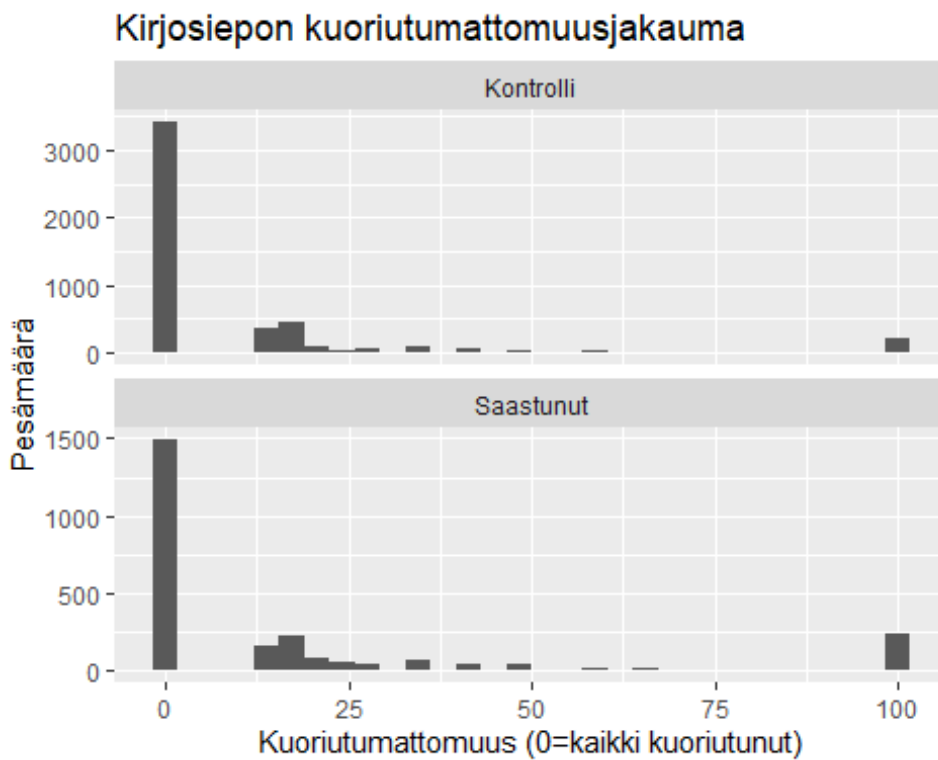
Taulukko 1: Pesintöjen määrä ja onnistuminen tutkimuslajeittain kontrollialueella ja saastuneella alueella. Täydelliset pesinnät ovat tässä ne pesinnät, joissa kaikki kuoriutumiset ovat onnistuneet, ja epätäydelliset pesinnät ovat ne pesinnät, joissa joko yksi tai enemmän munista ei ole kuoriutunut.

Laji	Ryhmä	Täydelliset	Epätäydelliset	Epätäydellisten osuus	Yhteensä
Kirjosieppo	Saastunut	1497	1001	40,0 %	2498
Kirjosieppo	Kontrolli	3428	1460	29,9 %	4888
Sinitiainen	Saastunut	209	290	58,1 %	499
Sinitiainen	Kontrolli	373	475	56,0 %	848
Talitiainen	Saastunut	662	569	46,2 %	1231
Talitiainen	Kontrolli	1640	1335	44,9 %	2975
Yhteensä	Kaikki	5610	5130	47,8 %	10740

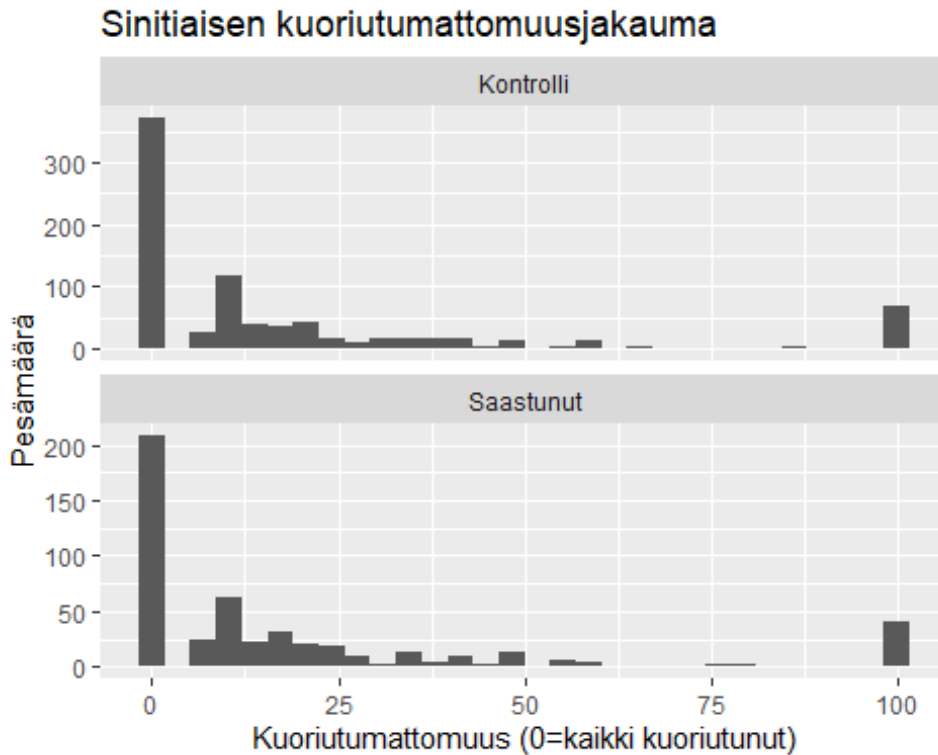
Tein RStudioissa testin, jolla selvitin, miten aineisto on jakautunut. Tämä tieto auttaa oikean tilastotestin valinnassa. Testistä huomasi, että aineisto on vahvasti vinoutunut vasemmalle päin, eikä se ole normaalijakautunut. Jokaisella lajilla on runsaasti eniten pesintöjä, joissa kaikki munat ovat kuoriutuneet, ja reilusti vähemmän pesintöjä, joissa joko kaikki tai osa munista ei ole kuoriutunut (Kuvat 1–3). Koska aineisto ei ole normaalijakautunut, t-testiä ei voi tehdä. Sen sijaan päätin lajikohtaisesti chi-neliötestin avulla vertailla täydellisiä pesintöjä, eli sitä määrää pesinnöistä, joissa kaikki munat ovat kuoriutuneet saastuneella ja saastumattomalla alueella (Taulukko 2).



Kuva 1. Talitiaisen kuoriutumattomuusjakauma (Saastuneella alueella 1231 havaintoa, kontrollialueella 2975).



Kuva 2: Kirjosiepon kuoriutumattomuusjakauma (Saastuneella alueella 2498 havaintoa, kontrollialueella 4888).



Kuva 3: Sinitiaisen kuoriutumattomuusjakauma (Saastuneella alueella 499 havaintoa, kontrollialueella 848).

Talitiaisella kontrollialueella munia kuoriutui täydellisesti 55.1 %, ja saastuneella alueella niitä kuoriutui 53.8 %. Saastuneen alueen ja kontrollialueen välinen ero ei ole tilastollisesti merkitsevä (chi-neliötesti: $\chi^2 = 0,58$, $df = 1$, $p = 0,44$). Tämä tarkoittaisi sitä, että talitiaisella saasteiden määrä ei vaikuta merkitsevästi siihen, miten moni pesinnöistä onnistuu täydellisesti, joten nollahypoteesia ei voida kumota.

Sinitiaisella munia kuoriutui saastumattomalla alueella, eli kontrollissa, täydellisesti 43,9 %, ja saastuneella alueella 41,8 %. Sekään ei ole tilastollisesti merkitsevä (chi-neliötesti: $\chi^2 = 0,48$, $df = 1$, $p = 0,48$). Tämän mukaan sinitiaisellakaan saasteiden määrä ei vaikuta siihen, miten moni pesinnöistä onnistuu täydellisesti, joten sinitiaisellakaan ei voida kumota nollahypoteesia.

Kirjosiepolla munia kuoriutui täydellisesti kontrollissa 70.1 % koko pesintämäärästä, ja saastuneella alueella 60 % pesintämäärästä. Saastuneella ja saastumattomalla alueella olevien täydellisesti onnistuneiden pesintöjen välillä on tilastollisesti merkitsevä ero (chi-neliötesti: $\chi^2 = 77$, $df = 1$, $P < 0,0001$). Näin ollen saastuneella

alueella on epätodennäköisempää, että kirjosiippopeseyneiden kuoriutuminen onnistuu täydellisesti.

Kirjosiepolla on saastuneella alueella täydellisiä pesintöjä 59,9 % pesinnöistä, eli noin 60 %, ja sinitiaisilla 41,8 % pesinnöistä. Kirjosiepon ja sinitiaisen kuoriutuvuuksien välillä on tilastollisesti merkitsevä ero (chi-neliötesti: $\chi^2 = 7,15$, $df = 1$, $P=0,0075$).

Kirjosiepolla on saastuneella alueella 60 % mahdollisuus kaikkien munien kuoriutumiseen, talitiaisella ja noin 53 %. Myös talitiaisen ja kirjosiepon kuoriutuvuuksien välillä on tilastollisesti merkitsevä ero (chi-neliötesti: $\chi^2 = 12,55$, $df = 1$, $P<0,0001$).

Talitiaisella täydellisiä pesintöjä on saastuneella alueella 53 %, ja sinitiaisella 41,8 %. Nämä eroavat myös merkitsevästi (chi-neliötesti: $\chi^2 = 10,94$, $df = 1$, $P<0,0001$).

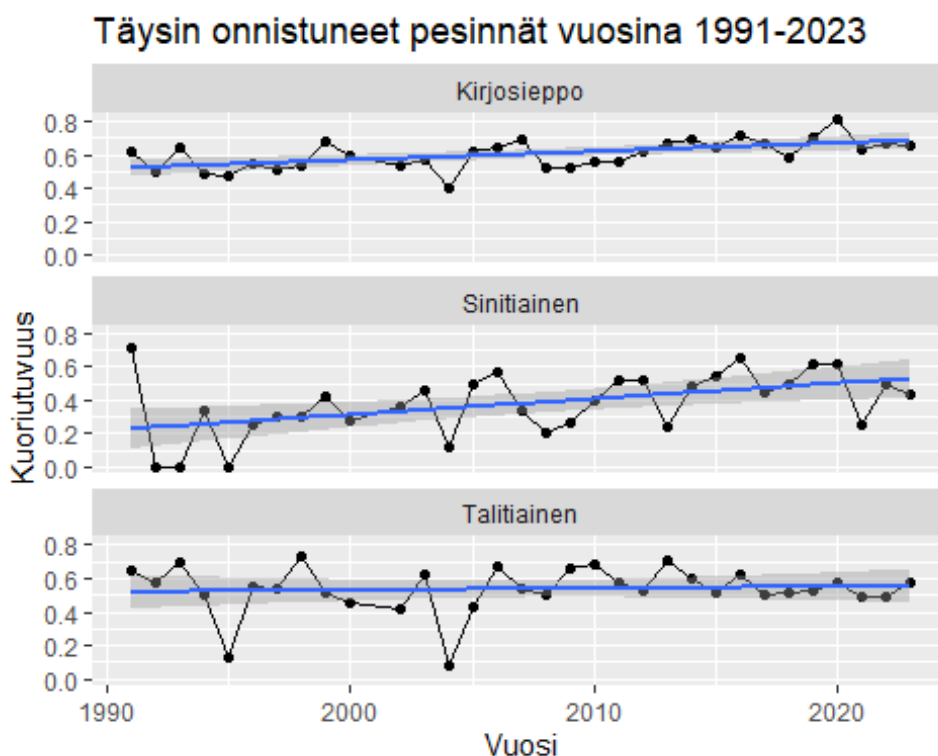
Tämän aineiston mukaan jokaisen lajin kuoriutuvuus siis eroaa hieman toisistaan, eli hypoteesi, jonka mukaan lajien kuoriutuvuuksien välillä on jotain eroa, tulee voimaan kaikilla lajeilla.

Analysoin lisäksi, miten paljon täysin onnistuneiden pesintöjen määrä on kasvanut vuodesta 1991 vuoteen 2023. Kuvaaja (Kuva 4) näyttää siltä, että osalta lajeista (kirjosiepolla ja sinitiaisella) täysin onnistuneiden pesintöjen määrä olisi noussut vuodesta 1991, mutta halusin varmistaa asian sovittamalla aineistoihin lineaariset mallit RStudioissa (Taulukko 2).

Tämän analyysin mukaan sinitiaisen lähtökohtana on ollut se, että täydellisten pesintöjen osuus oli sillä 22 % vuonna 1991. Siitä lähtien kuoriutuminen on parantunut 0,9 prosenttiyksikköä vuodessa. Mallin selitysarvo (R^2) ei ole kovin korkea, mutta parantuminen on silti tilastollisesti merkitsevää, ja täydellisten pesintöjen määrä on siis sinitiaisella kasvanut vuodesta 1991 (Taulukko 2).

Kirjosiepolla lähtökohtana on ollut 52 % täydellisten pesintöjen osuus, joka on parantunut vähemmän kuin sinitiaisella, 0,5 prosenttiyksikköä vuodessa. Kirjosiepollakin täydellisten kuoriutumisten määrä on kasvanut merkitsevästi vuodesta 1991 (Taulukko 2).

Talitiiaisella lähtökohtana on ollut 52 % kuoriutuvuus, joka on mallin mukaan parantunut 0,1 prosenttiyksikköä vuodessa, mutta mallin selitysarvo on hyvin matala, eikä kuoriutuminen ei ole muuttunut tilastollisesti merkitsevästi. Talitiainen näyttää olevan näistä lintulajeista ainoa, jolla täydellisesti kuoriutuneiden pesintöjen määrä ei ole muuttunut merkitsevästi vuodesta 1991 (Taulukko 2).



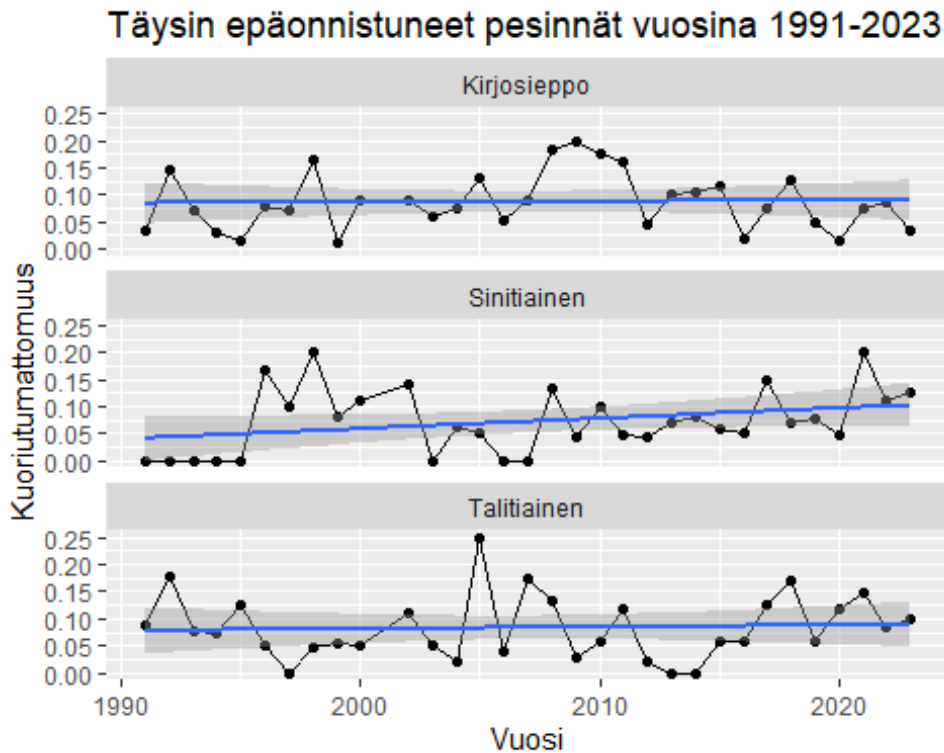
Kuva 4: Täysin onnistuneiden pesintöjen osuudet saastuneella alueella vuosina 1991–2023.

Taulukko 2: Lajien pesimisen täyden onnistumisen ajallinen trendi vuosina 1991–2023 lineaarisella mallilla analysoituna.

Laji	Lähtökohta	Muutos/vuosi	P-arvo	R ²	Muutos
Kirjosieppo	52,0 %	0,5 %	P<0,001	0,326	Parannus
Sinitäinen	22,0 %	0,9 %	0,004	0,237	Parannus
Talitiainen	51,8 %	0,1 %	0,68	0,005	Ei muutosta

Analysoin myös niiden pesintöjen määrän, jotka olivat täysin epäonnistuneet saastuneella alueella, eli mikään pesän munista ei ollut onnistunut kuoriutumaan. (Kuva 5 ja Taulukko 3). Kirjosiepolla keskimäärin 8 % pesinnöistä on epäonnistunut täysin joka vuosi. Sinitiaisella se määrä on ollut 4 % vuodessa, ja talitiiaisella 7 %.

Millään lajeista täysin epäonnistuneiden pesintöjen määrä ei ole muuttunut merkittävästi tutkimuksen aikana (Kuva 5 ja Taulukko 3).



Kuva 5: Täysin epäonnistuneet pesinnät vuosina 1991–2023

Taulukko 3: Tutkimuslajien täysin epäonnistuneiden pesien vuosittaisten osuuksien ajalliset trendit saastuneella alueella vuosina 1991–2023 analysoituna lineaarisella mallilla.

Laji	Lähtökohta	Muutos/vuosi	P-arvo	R ²	Muutos
Kirjosieppo	8 %	0,01 %	0,86	0,01	Ei muutosta
Sinitäinen	4 %	0,10 %	0,08	0,09	Ei muutosta
Talitiainen	7 %	0,03 %	0,75	0,09	Ei muutosta

4. Tulosten tarkastelu ja pohdinta

Kirjosiepoista oli enemmän havaintoja kuin talitiaisista, koska kirjosieppo on yleinen Harjavallan alueella, ja siksi suuremmin edustettuna tässä aineistossa. Talitiaisesta oli taas reilusti enemmän havaintoja kuin sinitiaisesta, mikä johtunee siitä, että se on sinitiaista paljon yleisempi laji. Vuosien 1992 ja 1993 saastuneen alueen aineistosta löytyy vain yksi havainto sinitiaisesta, minkä lisäksi sekä tali- ja sinitiaiselta että kirjosiepolla puuttuu täysin vuodelta 2001 saastunut data. Kumpikaan näistä ei kuitenkaan todennäköisesti merkittävästi vaikuta tuloksiin siitä, miten monta täydellistä pesintää on tapahtunut, koska otoskoko on niin suuri kaikilla lajeilla.

Tali- ja sinitiaisen sekä kirjosiepon pesyeiden kuoriutumisen on onnistunut täydellisesti suurimmassa määrässä pesintöjä. Kaikilla kolmella lajilla on eniten pesintöjä, jossa kaikki kuoriutumiset ovat onnistuneet, ja huomattavasti vähemmän niitä, jossa se on joko täysin tai osittain epäonnistunut. Tämä käy järkeen, koska nämä lintulajit ovat suhteellisen kestäviä ja yleisiä Suomessa, ja evolutiivisesti on hyvä, jos kehittyvät sikiöt selviävät elävinä, eivätkä munat hajoa.

Aiemmin mainitun lähteen mukaan (Eeva ym. 2009) sinitiaisen alhaisemmat kalsiumpitoisuudet ja joidenkin raskasmetallien korkeammat tasot (verrattaessa talitiaiseseen) saattaisivat viitata siihen, että kalsiumpuutteellisissa ympäristöissä se saattaisi olla alttiimpi negatiivisille saastevaikutuksille kuin talitiainen. Tämän analyysin mukaan asia ei ehkä ole aivan näin, koska sinitiaisella on tämän aineiston ja tämän menetelmän mukaan ylipäätään hieman alhaisempi täydellinen kuoriutuvuusprosentti verrattuna talitiaiseseen ja kirjosieppoon, mutta se ei vaihtelee saastuneen ja kontrollialueen välillä, toisin kuin esimerkiksi kirjosiepolla. Alhainen kuoriutuvuusprosentti voisi kertoa sinitiaisen herkkyydestä, mutta sinitiaisella on myös keskimääräisesti isoin pesäkoko näistä kolmesta lintulajista, jolloin täydellinen pesintä on epätodennäköisempää, kuin esimerkiksi kirjosiepolla, jolla on keskimääräisesti pienempi pesäkoko. Sinitiaisella saastuneella alueella kuitenkin täydellisten pesintöjen määrä on noussut merkitsevästi, mikä viittaisi siihen, että ainakin tutkimusjakson alkuvuosina se on saattanut olla saasteille herkempi kuin talitiainen. Siihen on luultavasti myös vaikuttanut se, että sinitiaisten määrä on

kasvanut tutkimuksen alkamisen jälkeen, ja alkuvuosina yksittäisten pesintöjen epäonnistuminen vaikutti enemmän pesintöjen suhteisiin.

Talitiainen näytti aineiston mukaan olevan melko resilientti saasteille, siitä huolimatta, että se käyttää sinitiaisen lailla runsaasti hyönteisiä ravintonaan. Talitiainen on levittäytynyt laajalti koko Suomeen, ja sen täytyy siten luultavasti olla melko kestävä monenlaisille oloille. Sillä ei ole keskimäärin niin isoja pesiä kuin sinitiaisella, joten sen on helpompi saada täysin onnistuneita pesintöjä kuin sinitiaisen, mutta sillä on keskimäärin isommat pesät kuin kirjosiepolla, joten täysiä epäonnistumisia tulee sille vaikeammin. Talitiaisella on lisäksi suhteellisen korkea kalsiumtaso, joka voi vaikuttaa positiivisesti sen kestävyYTEEN (Espín et al. 2024).

Kirjosiepolla oli suhteellisesti eniten täysin onnistuneita pesintöjä saastuneella alueella, mutta myös eniten täysin epäonnistuneita pesintöjä. Tämä johtune siitä, että se munii keskimäärin vähemmän munia kuin tali- ja sinitiaiset, jolloin sillä on suurempi mahdollisuus joko täysin onnistua tai täysin epäonnistua pesinnässä. Lisäksi sattumalla ja esimerkiksi petojen saalistuksella on voinut olla merkitys etenkin niissä pesinnöissä, jossa kaikki kuoriutumiset ovat estyneet. Kirjosieppo oli lisäksi selvästi herkin saasteille, mikä on luultavasti vaikuttanut kuoriutuvuuteen negatiivisesti saastuneella alueella. Se oli linnuista ainoa, jolla oli merkitsevää eroa saastuneen ja saastumattoman alueen täydellisten kuoriutuvuuksien osuuksien välillä, mikä johtune lähinnä juuri siitä, että se on hyönteissyöjä, ja saa ravinnon kautta enemmän raskasmetalleja kuin tali- ja sinitiaiset. Se on luultavasti tärkein syy siihen, miksi saastuneen ja saastumattoman alueen kuoriutuvuuksien välillä on merkitseviä eroja kirjosiepolla, mutta ei tali- ja sinitiaisella.

Täydellisesti kuoriutuneiden pesintöjen määrä on parantunut merkitsevästi sinitiaisella ja erityisesti kirjosiepolla vuodesta 1991. Kirjosieppo on herkkä raskasmetalleille, joten Harjavallassa tehtyjen kunnostustoimien ja saasteiden vähenemisen seurauksena sen täydellisten pesintöjen määrä on kasvanut, mikä viittaisi siihen, että kunnostus- ja puhdistustoimenpiteillä on ollut positiivinen vaikutus. Sinitiaisella täysin onnistuneiden pesyeiden määrä ei ollut kasvanut niin merkitsevästi kuin kirjosiepolla, mutta silläkin oli eroa vuosien välillä. Talitiaisella täydellisten pesintöjen määrä ei taas ollut muuttunut merkitsevää määrää. Se, yhdistettynä siihen, että sillä ei ollut saastuneen ja kontrollialueen välillä eroa täydellisissä

pesinnöissä, saattaa viitata siihen, että talitiainen on ylipäättään melko resilientti laji, eivätkä saasteet juurikaan vaikuta sen kuoriutumiseen.

Täysin epäonnistuneiden pesintöjen määrä on taas pysynyt vakiona joka lajilla, eikä vuosien aikana ole tullut tilastollisesti merkitsevää muutosta. Siihen on luultavasti vaikuttanut lähinnä sattumanvaraiset tekijät, kuten ympäristöolosuhteet tai esimerkiksi pedot. Siihen on voinut myös vaikuttaa pienet pesäkoot, niin kuin kirjosiepolla, jolla osuus pesinnöistä, jotka olivat täysin epäonnistuneet, on suurin (8 % vuodessa), mutta jolla on myös keskimäärin pienin pesäkkö.

Tutkimusta Harjavallan alueella tullaan luultavasti jatkamaan tulevaisuudessa, jolloin nähdään, onko tulevaisuudessa jotain muutoksia lajeissa, niiden pesinnässä tai alueella muuten.

5. Lähteet

- Birkhead, T. R., J. Hall, E. Schut, ja N. Hemmings. 2008. "Unhatched Eggs: Methods for Discriminating between Infertility and Early Embryo Mortality". *Ibis* 150(3):508–17. doi: 10.1111/j.1474-919X.2008.00813.x.
- Cooke, A. S. 1973. "Shell thinning in avian eggs by environmental pollutants". *Environmental Pollution (1970)* 4(2):85–152. doi: 10.1016/0013-9327(73)90009-8.
- Derome, J. 2000. "Detoxification and amelioration of heavy-metal contaminated forest soils by means of liming and fertilisation". *Environmental Pollution* 107(1):79–88. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00132-3.
- Derome, J., ja A. Saarsalmi. 1999. "The effect of liming and correction fertilisation on heavy metal and macronutrient concentrations in soil solution in heavy-metal polluted scots pine stands". *Environmental Pollution* 104(2):249–59. doi: 10.1016/S0269-7491(98)00183-3.
- Duffus, J. H. 2002. "'Heavy Metals' a Meaningless Term? (IUPAC Technical Report)". *Pure and Applied Chemistry* 74(5):793–807. doi: 10.1351/pac200274050793.
- Eeva, T., M. Ahola, ja E. Lehikoinen. 2009. "Breeding Performance of Blue Tits (*Cyanistes caeruleus*) and Great Tits (*Parus major*) in a Heavy Metal Polluted Area". *Environmental Pollution* 157(11):3126–31. doi: 10.1016/j.envpol.2009.05.040.
- Eeva, T., ja E. Lehikoinen. 2000. "Recovery of Breeding Success in Wild Birds". *Nature* 403(6772):851–52. doi: 10.1038/35002672.
- Eeva, T., M. Ojanen, O. Räsänen, ja E. Lehikoinen. 2000. "Empty nests in the great tit (*Parus major*) and the pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) in a polluted area". *Environmental Pollution* 109(2):303–9. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00256-0.
- Eeva, T., S. Espín, P. Sánchez-Virosta, ja M. Rainio. 2020. "Weather effects on breeding parameters of two insectivorous passerines in a polluted area".

Science of The Total Environment 729:138913. doi:
10.1016/j.scitotenv.2020.138913.

Eeva, T., ja E. Lehtikoinen. 1995. "Egg Shell Quality, Clutch Size and Hatching Success of the Great Tit (*Parus major*) and the Pied Flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) in an Air Pollution Gradient". *Oecologia* 102(3):312–23. doi: 10.1007/BF00329798.

Espin, S., T. Andersson, M. Haapoja, R. Hyvonen, E. Klun, H. Kolunen, T. Laaksonen, J. Lakka, L. Leino, K. Merimaa, J. Nurmi, M. Rainio, S. Ruuskanen, K. Ronka, P. Sanchez-Virosta, J. Suhonen, P. Suorsa, ja T. Eeva. 2024. "Fecal Calcium Levels of Bird Nestlings as a Potential Indicator of Species-Specific Metal Sensitivity". *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 345:123181. doi: 10.1016/j.envpol.2023.123181.

Espin, S., S. Ruiz, P. Sanchez-Virosta, ja T. Eeva. 2016. "Effects of Calcium Supplementation on Growth and Biochemistry in Two Passerine Species Breeding in a Ca-Poor and Metal-Polluted Area". *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH* 23(10):9809–21. doi: 10.1007/s11356-016-6219-y.

Grandjean, P. 1976. "Possible Effect of Lead on Egg-Shell Thickness in Kestrels 1874-1974". *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 16(1):101–6. doi: 10.1007/BF01753113.

Heggøy, O., J. Gohli, ja T. Lislevand. 2024. "Avian hatching failure rates did not increase during the last century, although species of high conservation concern appear particularly susceptible to factors leading to reproductive failure". *Ornithological Applications* 126(3):duae018. doi: 10.1093/ornithapp/duae018.

Helmisaari, H., K. Makkonen, M. Olsson, A. Viksna, ja E. Mälkönen. 1999. "Fine-Root Growth, Mortality and Heavy Metal Concentrations in Limed and Fertilized *Pinus silvestris* (L.) Stands in the Vicinity of a Cu-Ni Smelter in SW Finland". *Plant and Soil* 209(2):193–200. doi: 10.1023/A:1004595531203.

- Kiikkilä, O. 2003. "Heavy-Metal Pollution and Remediation of Forest Soil around the Harjavalta Cu-Ni Smelter, in SW Finland". *SILVA FENNICA* 37(3):399–415. doi: 10.14214/sf.497.
- Kiikkilä, O., J. Perkiömäki, M. Barnette, J. Derome, T. Pennanen, E. Tulisalo, ja H. Fritze. 2001. "In Situ Bioremediation through Mulching of Soil Polluted by a Copper-Nickel Smelter". *Journal of Environmental Quality* 30(4):1134–43. doi: 10.2134/jeq2001.3041134x.
- Kiikkilä, O., J. Derome, T. Brügger, C. Uhlig, ja H. Fritze. 2002. "Copper Mobility and Toxicity of Soil Percolation Water to Bacteria in a Metal Polluted Forest Soil". *Plant and Soil* 238(2):273–80. doi: 10.1023/A:1014478818078.
- Koenig, W. D. 1982. "Ecological and Social Factors Affecting Hatchability of Eggs". *The Auk* 99(3):526–36. doi: 10.1093/auk/99.3.526.
- Kubin, E., H. Lippo, ja J. Poikolainen. 2000. "Heavy Metal Loading". Ss. 60–71 teoksessa *Forest Condition in a Changing Environment: The Finnish Case*, toimittanut E. Mälkönen. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Laki ympäristövahinkojen korvaamisesta 737/1994. Annettu Helsingissä 19.8.1994. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/1994/737#OT0>
- Luonnonsuojeluasetus 160/1997. Annettu Helsingissä 14.2.1997. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/1997/160>
- Mälkönen, E., J. Derome, H. Fritze, H. Helmisaari, M. Kukkola, A. Saarsalmi, ja M. Salemaa. 1999. "Compensatory Fertilization of Scots Pine Stands Polluted by Heavy Metals". *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55(3):239–68. doi: 10.1023/A:1009851326584.
- Neuvoston direktiivi 96/61/EY, annettu 24.9.1996, ympäristön pilaantumisen ehkäisemisen ja vähentämisen yhtenäistämiseksi. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex%3A31996L0061>

- Nieminen, T. M., ja A. Saarsalmi. 2002. "Contents of Cu, Ni and Zn in smelter-polluted soil-plant systems". *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2:167–74. doi: 10.1144/1467-787302-020.
- Nyholm, N. Erik I. 1981. "Evidence of involvement of aluminum in causation of defective formation of eggshells and of impaired breeding in wild passerine birds". *Environmental Research* 26(2):363–71. doi: 10.1016/0013-9351(81)90212-7.
- Salemaa, M., ja T. Uotila. 2001. "Seed bank composition and seedling survival in forest soil polluted with heavy metals". *Basic and Applied Ecology* 2(3):251.
- Scheuhammer, A. M. 1991. "Effects of Acidification on the Availability of Toxic Metals and Calcium to Wild Birds and Mammals". *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)* 71(2–4):329–75. doi: 10.1016/0269-7491(91)90036-v.
- Tchounwou, P. B., C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, ja D. J. Sutton. 2012. "Heavy Metals Toxicity and the Environment". *EXS* 101:133–64. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Tejning, S. 1967. "Biological Effects of Methyl Mercury Dicyandiamide-Treated Grain in Domestic Fowl Gallus gallus L". *OIKOS* S:7-.