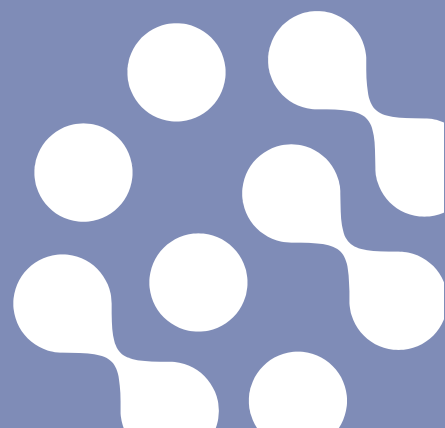


Eurofins Ahma Oy
Projekti 91099
19.12.2022

ETELÄ-KARJALAN MAAKUNNAN ILMANLAADUN BIOINDIKAATTORI- SEURANTA VUONNA 2022



TIIVISTELMÄ
1. JOHDANTO.....	1
2. TUTKIMUSALUE.....	2
2.1 YLEISKUVAUS.....	2
2.2 TUTKIMUSALUEEN ILMANLAATU	3
2.2.1 Päästöt.....	3
3. AINEISTO JA MENETELMÄT	11
3.1 HAVAINTOALAT.....	11
3.2 TUTKIMUSRYHMÄ JA MAASTOTÖIDEN AJANKOHTA	14
3.3 HAVUPUIDEN EPIFYTYTTIJÄKÄLIEN KARTOITTAMINEN	14
3.4 JÄKÄLÄKARTOITUKSEN VIRHELÄHTEET JA LUOTETTAVUUS.....	20
3.5 PAIKKATIIETOMENETELMÄT	20
3.6 TILASTOMENETELMÄT.....	21
3.6.1 Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot	21
3.6.2 Vuosien väliset vertailut	21
3.6.3 Regressioanalyysi.....	21
4. TULOKSET.....	22
4.1 MÄNTYJEN RUNKOJÄKÄLÄT	22
4.1.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste	22
4.1.2 Yleinen vaurioaste	25
4.1.3 Jäkälälajien määrät ja yleisyys	28
4.1.4 IAP-indeksi.....	36
5. TULOSTEN TARKASTELU	39
5.1 TAUSTAMUUTTUJIIEN VAIKUTUS	39
5.2 TUTKITTUJEN MUUTTUJIIEN VÄLINEN RIIPPUVUUS	41
5.3 REGRESSIOANALYYSI	42
5.3.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste	42
5.3.2 Yleinen vaurioaste	43
5.3.3 Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajit	43
5.3.4 IAP-indeksi.....	44
5.3.5 Sormipaisukarpeen peittävyys.....	44
5.3.6 Levän esiintyminen	44
5.3.7 Luppojen esiintyminen	45
5.4 YHTEENVETO	45
6. VERTAILU	55
6.1 VUOSIEN VÄLINEN VERTAILU	55
6.2 VERTAILU MUUALLA SUOMESSA TEHTYIHIN TUTKIMUKSIIN SEKÄ ALUEEN KUNTIEN VÄLILLÄ	64
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	65
LÄHTEET	67

LIITE 1 – Havaintoalakohtaiset tulokset

19.12.2022

Eurofins Ahma Oy

Tiina Osmala
Ympäristöasiantuntija, FM

Paula Kajankari-Shelvey
Ympäristöasiantuntija, FM

Jaakko Jokinen
Ympäristöasiantuntija, FM

Yhteystiedot:

Heinämäentie 2

40250 Jyväskylä

EtunimiSukunimi@eurofins.fi

www.eurofins.fi

Pohjakartat © Affecto Finland Oy, Karttakeskus.

TIIVISTELMÄ

Ilmanlaatua on seurattu Etelä-Karjalan alueen kunnissa 1980-luvulta lähtien. Vuonna 2005 tehtiin ensimmäinen laajempi Etelä-Karjalan maakunnan pohjois- ja keskiosat kattava ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus. Vuonna 2012 ilmanlaatua arvioitiin männyn epifyyttijäkälien sekä mäntyjen elinvoimaisuuden perusteella melkein koko maakunnan alueella. Vuonna 2022 ilmanlaatua arvioitiin mäntyjen epifyyttijäkälien perusteella ja kartoitus suoritettiin Imatran, Lappeenrannan, Rautjärven, Ruokolahden, Taipalsaaren, Lemin ja Savitaipaleen kuntien alueilla. Kolmannes havaintoverkon aloista jouduttiin vaihtamaan uuteen muun muassa metsähakkuiden takia.

Etelä-Karjalan alueen päästöt ovat pidemmällä aikavälillä pienentyneet selvästi 1980-luvun lopun tilanteesta. Myös ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ja laskeumat ovat pääasiassa laskeneet aikaisempaan verrattuna. Tutkimusalueen suurimmat päästölähteet sijaitsevat Lappeenrannassa ja Imatralla.

Etelä-Karjalan runkojäkälän indikaattoriarvot olivat jossain määrin heikentyneet edelliseen tutkimusajankohtaan verrattuna. Muun muassa ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien esiintymistiheydet olivat pääasiassa laskeneet ja ilman epäpuhtauksista hyötyvän seinäsuomujäkälän määrä oli lisääntynyt. Ilman epäpuhtauksille herkimät naavat ja lupot olivat vähentyneet erittäin huomattavasti, mikä näkyi muun muassa ilmanpuhtausindeksin ja yleisen vaurioasteluokituksen heikkenemisenä. Myös sormipaisukarve oli keskimäärin edellistä tutkimusta vaurioituneempaa ja kasvustojen peittävyys olivat alentuneet. Jäkälälajisto oli köyhtyneintä ja vaurioituneinta teollisuuskeskittymien ympäristöissä ja taajama-alueilla. Tulosten tilastollinen tarkastelun perusteella etäisyys päästölähteestä oli merkittävin jäkälämuuttujiin vaikuttanut tekijä. Edelliseen tutkimukseen verrattuna tulosten heikentymistä oli tapahtunut kuitenkin erityisesti tausta-alueiksi luokiteltavilla alueilla. Päästömääriltään vähäiset kunnat, Savitaipale ja Taipalsaari, erottuivat jäkälälajistoltaan monipuolisimpana ja lievimminkin vaurioituneina kun taas Imatran ja Lappeenrannan alueet erottuivat köyhtyneimpinä ja vaurioituneimpina.

Ilman epäpuhtauksien päästöjen laskusuuntaisuudesta huolimatta jäkälissä tapahtuneet muutokset voivat indikoida ilmanlaadun heikentymistä. Myös erilaiset luontaiset tekijät, kuten sateisuus, kuivuus tai kovat helteet, voivat vaikuttaa tuloksiin puskuroimalla tai voimistamalla ilman epäpuhtauksien vaikutuksia, minkä takia bioindikaattorien vasteet eivät aina yksiselitteisesti seuraa päästömäärissä tapahtuvia muutoksia. Päästömäärien kehityksestä ainakin osittain riippumattonta jäkälätunnusten heikentymistä on tapahtunut Etelä-Karjalan lisäksi myös muualla Suomessa. Tämän takia jäkälän kunnan ja monimuotoisuuden heikkenemisen taustalla voi mahdollisesti olla myös laajempialaisia tekijöitä, kuten ilmastonmuutos seurausilmiöineen. Jäkälätunnusten vuosien välistä vertailukelpoisuutta heikensi havaintoaloilla suoritettujen metsänhoidolliset toimenpiteet sekä varjostavan aluskasvillisuuden voimistuminen.

1. JOHDANTO

Etelä-Karjalan ilmanlaatua on selvitetty 1980- ja 1990-luvuilla useissa kuntakohtaisissa ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa. Jäkäläkartoituksia on tehty aikaisemmin Lappeenrannassa (Marttila 1981, Korttisen 1998 mukaan), Rautjärvellä (Bäck 1984, Korttisen 1998 mukaan), Joutsenossa (Insinööritoimisto Paavo Ristola Oy 1988, Korttisen 1998 mukaan) ja Imatralla (Piutunen 1993). Vuonna 1998 tehtiin ensimmäinen yhteinen jäkäläkartoitus, jossa olivat mukana Lappeenrannan, Joutsenon, Imatran ja Rautjärven kunnat (Korttinen 1998). Jäkäläkartoitusten lisäksi Imatran, Joutsenon, Lappeenrannan, Rautjärven ja Ruokolahden alueella on tutkittu ilmanlaadun biologisia vaikutuksia näkyvien metsävaurioiden avulla useissa eri selvityksissä (esim. Jokinen ym. 1990, Jokinen ym. 1995, Jokinen ym. 2000).

Vuonna 2005 tehtiin laajempi Etelä-Karjalan maakunnan pohjois- ja keskiosat kattava ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus, johon osallistuivat Imatran, Joutsenon, Lappeenrannan, Parikkalan, Rautjärven, Ruokolahden, Taipalsaaren ja Ylämaan kunnat. Joutseno ja Ylämaa ovat sittemmin liittyneet osaksi Lappeenrannan kaupunkia. Tutkimuksessa maakunnan alueelle perustettiin 240 pysyvää tutkimusalaa, joilta tutkittiin mäntyjen runkojäkäliä sekä mäntyjen elinvoimaisuutta (Haahla ym. 2006).

Vuonna 2012 mäntyjen runkojäkäliä sekä mäntyjen elinvoimaisuutta tutkittiin uudelleen käyttäen vuonna 2005 perustettua havaintoalaverkostoa (Lehkonen ym. 2013). Seuranta laajennettiin myös Lemminkäisen ja Savitaipaleen kuntien alueelle, jonne perustettiin yhteensä 23 uutta alaa. Etelä-Karjalan maakunnan alueelta tutkimukseen osallistuivat Imatran, Lappeenrannan, Parikkalan, Rautjärven, Ruokolahden, Taipalsaaren, Lemminkäisen ja Savitaipaleen kunnat.

Vuonna 2022 toteutettu seuranta on jatkumoa vuoden 2012 ja 2005 tutkimuksille. Mäntyjen elinvoimaisuuden seuranta jätettiin tutkimuksesta pois ja seuranta keskitettiin mäntyjen runkojäkäliin. Tutkimus toteutettiin yhteensä 245:llä vuonna 2012 ja 2005 perustetulla havaintoalalla. Parikkalan kunnan alueen havaintoalat jäivät tutkimuksesta pois. Tutkimukseen osallistuivat Imatran, Lappeenrannan, Rautjärven, Ruokolahden, Taipalsaaren, Lemminkäisen ja Savitaipaleen kunnat, jotka myös rahoittivat tutkimusta yhdessä paikallisten teollisuuslaitosten kanssa.

Bioindikaattori on eliö tai eliöryhmä, joka ilmaisee ympäristön ja ekosysteemin tilaa ja niissä tapahtuvia muutoksia (Lodenius ym. 2002, Markert ym. 2004). Muutokset ilmenevät muun muassa bioindikaattorin rakenteessa, toiminnassa, kemiallisessa koostumuksessa tai alkuainepitoisuudessa tapahtuvina muutoksina (SFS 5670). Vuoden 2022 seurannassa ilman epäpuhtauksien vaikutuksien ilmentäjinä käytettiin männynillä kasvavia runkojäkäliä. Seuranta toteutettiin 245 havaintoalalla. Epifyyttijäkälälajiston esiintyminen, runsaus ja kunto havainnoitiin viideltä männyltä jokaiselta havaintoalalta. Mäntyjen epifyyttijäkälät ovat hyviä ilmanlaadun bioindikaattoreita, sillä ne reagoivat herkästi ilman epäpuhtauksiin sekä ulkomuodollaan että lajiston koostumuksen ja runsauden muutoksilla. Epäpuhtauksien vaikutukset kuitenkin ilmenevät näissä indikaattorilajeissa hitaasti, minkä vuoksi menetelmät soveltuvat erityisen hyvin pitkän aikavälin muutostrendien kuvaamiseen. Ilman epäpuhtauksien vaikutuksen ilmenemiseen vaikuttavat lisäksi luontaiset tekijät, jotka voivat joko puskuroida tai voimistaa muutoksia.

Tutkimuksen tuloksia verrattiin vuoden 2012 ja 2005 toteutettujen tutkimusten tuloksiin (Lehkonen ym. 2013, Haahla ym. 2006). Tuloksia tulkittiin tarkastelemalla ilman laatua kuvaavien indikaattorimuuttujien vaihtelua suhteessa päästölähteisiin, vertailemalla lajistosuhteissa ja jäkälien kunnossa tapahtuneita muutoksia eri vuosina sekä vertaamalla jäkälälajiston muutoksia päästömäärien kehitykseen. Lisäksi tuloksia vertailtiin muualla Suomessa tehtyjen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimusten tuloksiin.

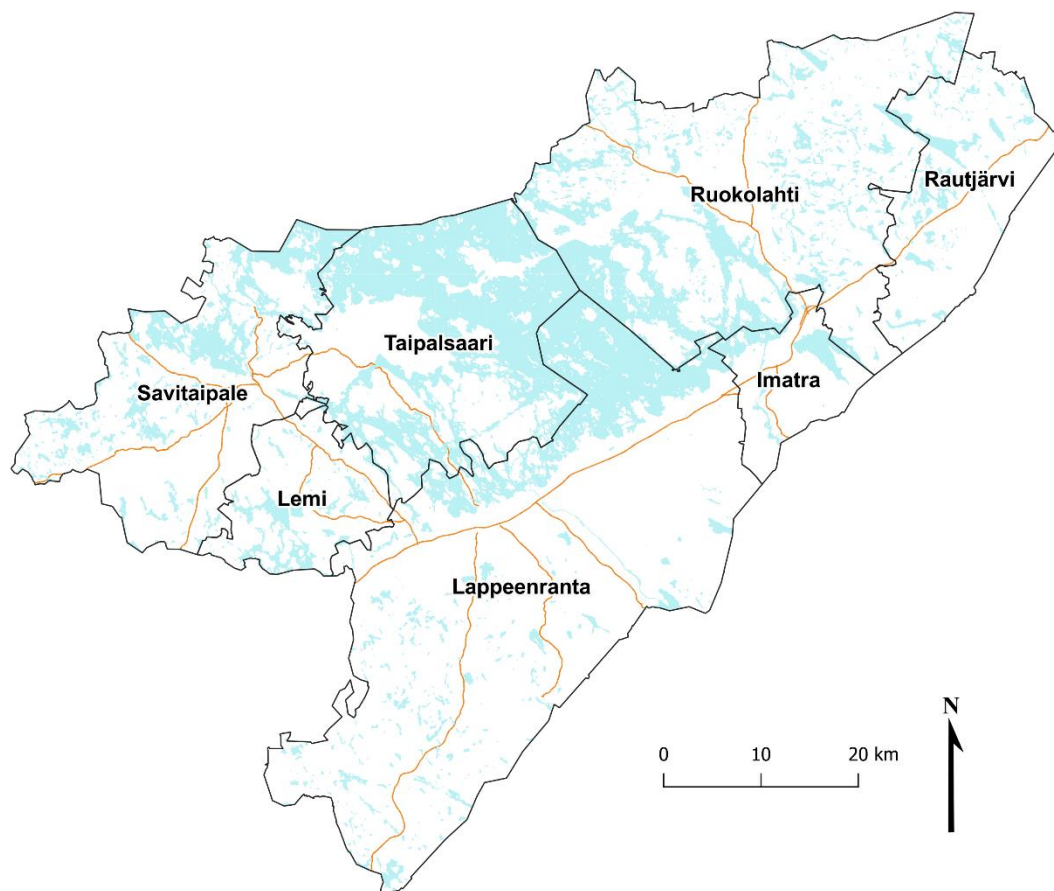
Tutkimuksen toteutti Eurofins Ahma Oy. Maastotyöt tehtiin kesällä 2022, ja niihin osallistuivat ympäristöasiantuntijat Tiina Osmala, Stiina Lehmus, Eeva Kosola ja Juho Harmoinen sekä tutkimusavustaja Satu Osmala. Raportin kirjoituksesta vastasi ympäristöasiantuntija Tiina Osmala. Aineiston tilastollisesta analysoinnista vastasi Paula Kajankari-Shelvey. Paikkatietoanalyseistä vastasivat Tiina Osmala ja Jaakko Jokinen.

2. TUTKIMUSALUE

2.1 Yleiskuvaus

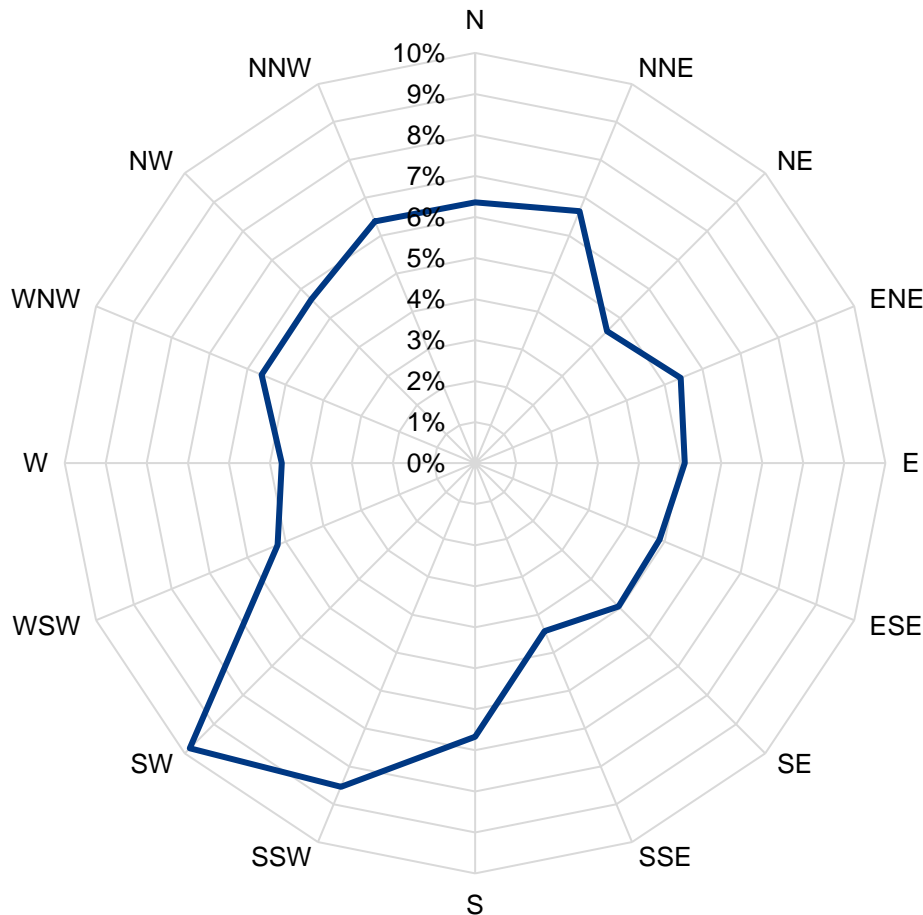
Tutkimusalue kattoi valtaosan Etelä-Karjalan maakunnasta, lukuun ottamatta Luumäen ja Parikkalan kuntia (kuva 2-1). Etelä-Karjala kuuluu eteläboreaaliseen kasvillisuusvyöhykkeeseen ja ympäristöä leimaa Salpausselkien harjumuodostumat sekä vesistöjen runsaus. Kasvillisuuden pienipiirteinen vaihtelu on alueella tyypillistä: moreenimäkien tai kalliokumpujen niukka kasvillisuus vaihtuu nopeasti painanteiden tai rinteiden viljavaan kasvillisuuteen (Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus 2000).

Maakunnan vilkkaimmin liikennöityjä teitä ovat valtatiet 6 (Lappeenrannasta koilliseen läpi maakunnan), 13 (Lappeenrannan eteläpuolelta Savitaipaleen ja Suomenniemen kautta luoteeseen) ja 62 (Ruokolahden kautta Puumalaan). Tihein asutus on maakunnassa keskittynyt kaupunki- ja kuntakeskusten yhteyteen etenkin Lappeenrannan ja Imatran alueelle. Valtaosa Etelä-Karjalan maakunnan pinta-alasta on metsää. Myös järvet, erityisesti Saimaa, peittävät suurta osaa maakunnasta. Viljelyalueita on runsaasti etenkin Lappeenrannan ja Imatran alueilla sekä Savitaipaleen kaakkoisosissa ja Lemillä. Teollinen toiminta ja muu maankäyttö on muuttanut huomattavasti Etelä-Karjalan ympäristöä. Vesistöjen äärellä on runsaasti puunjalostusteollisuutta ja siihen liittyvää kemianteollisuutta. Lisäksi alueen ympäristöä kuormittavat yhdyskunnat sekä maa- ja metsätalous (Kaakkois-Suomen Ympäristökeskus 2000).



Kuva 2-1. Etelä-Karjalan bioindikaattoritutkimukseen osallistuneet kunnat vuonna 2022.

Etelä-Karjalassa vallitsivat vuonna 2021 lounaasta (9,83 %) ja etelälounaasta (8,54 %) puhaltavat tuulet (kuva 2-2). Myös etelästä (6,67 %) ja pohjoiskoillisesta (6,65 %) puhaltavat tuulet olivat yleisiä.



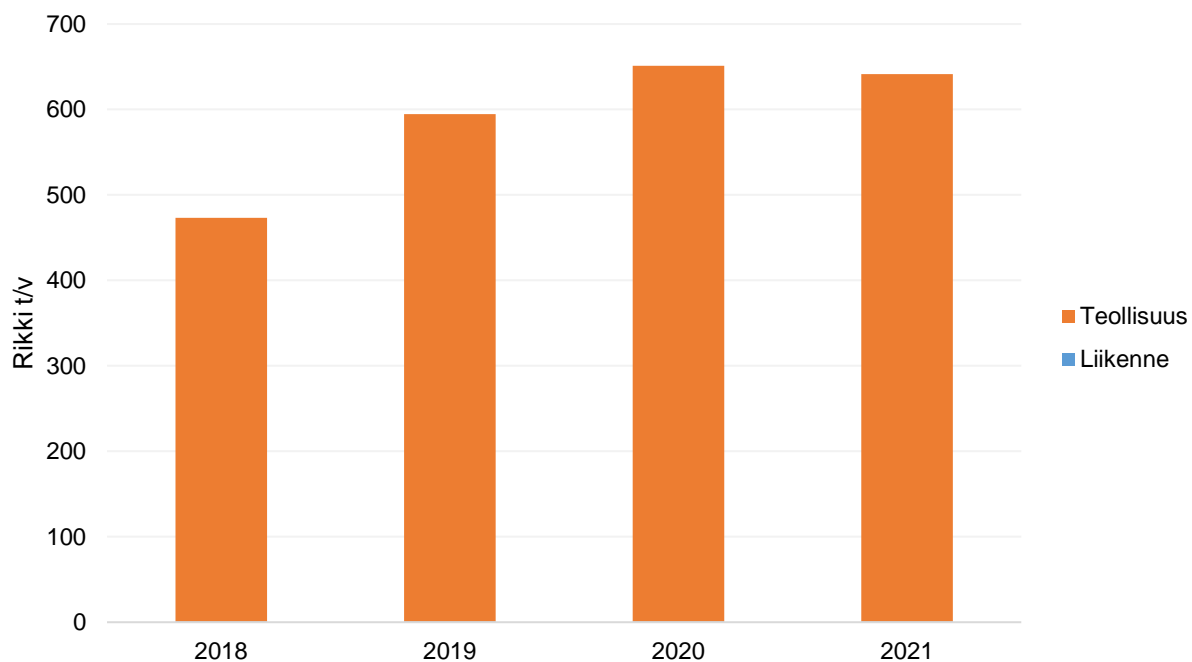
Kuva 2-2. Lappeenrannan lentokentällä vuonna 2021 vallinneet tuulensuunnat. Tuulitiedot Ilmatieteenlaitoksen avoimen datan verkkopalvelusta (2022).

2.2 Tutkimusalueen ilmanlaatu

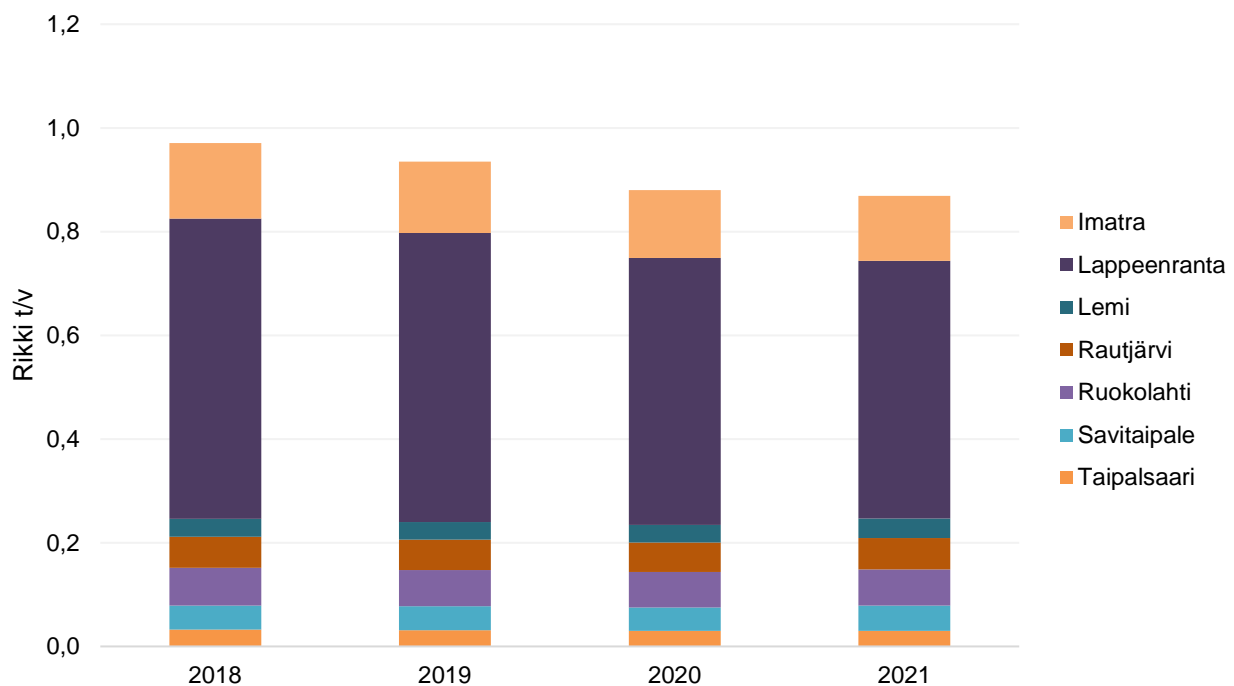
2.2.1 Päästöt

Tässä luvussa esitetään Imatran ja Lappeenrannan lupavelvollisten teollisuuslaitosten päästömäärien kehitys sekä tutkimusalueen liikenteen päästöjen kehitys vuodesta 2018 alkaen (Imatran kaupunki 2019–2022, LIISA 2022). Lisäksi esitetään kuntakohtaiset päästömäärät vuonna 2020 sekä merkittävimpien lupavelvollisten päästölähteiden päästömäärät ja sijainnit vuonna 2021. Päästötiedot on koottu ympäristöhallinnon yhteisestä verkkopalvelusta. Imatran ja Lappeenrannan seudun ympäristötoimet toimittivat lupavelvollisten päästölähteiden sijaintitiedot (Ahonen 2022, Piutunen 2022).

Kuvassa 2-3 on esitetty tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten sekä liikenteen rikkidioksidipäästöjen kehitys vuosina 2018–2021. Valtaosa rikkidioksidipäästöistä syntyy teollisuudesta ja päästöt ovat kasvaneet vuosien 2018 (473 t) ja 2020 (651 t) välisenä aikana. Vuonna 2021 rikkidioksidipäästöt (641 t) olivat hieman vuoden 2020 tasoa alempana. Liikenteen rikkipäästöt ovat vähentyneet tarkkailujaksolla. Suurimmat päästöt tulevat Lappeenrannasta (noin 59 %) ja Imatralta (noin 15 %) (kuva 2-4.).

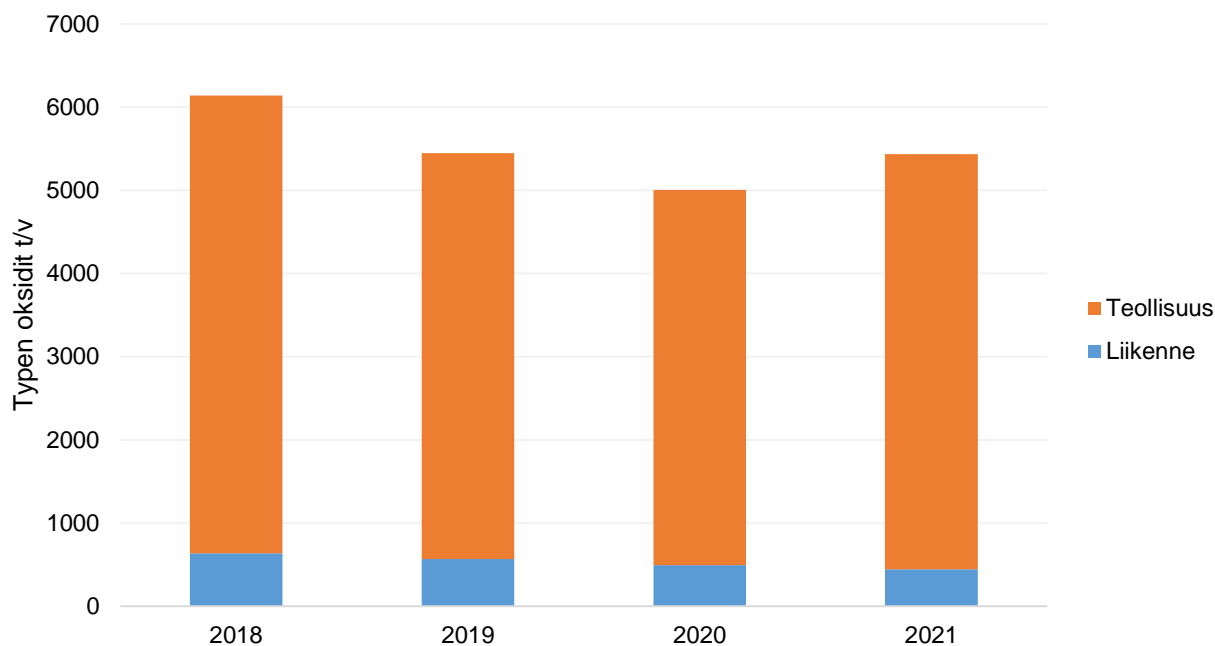


Kuva 2-3. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen rikkidioksidin päästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit, LIISA 2022).

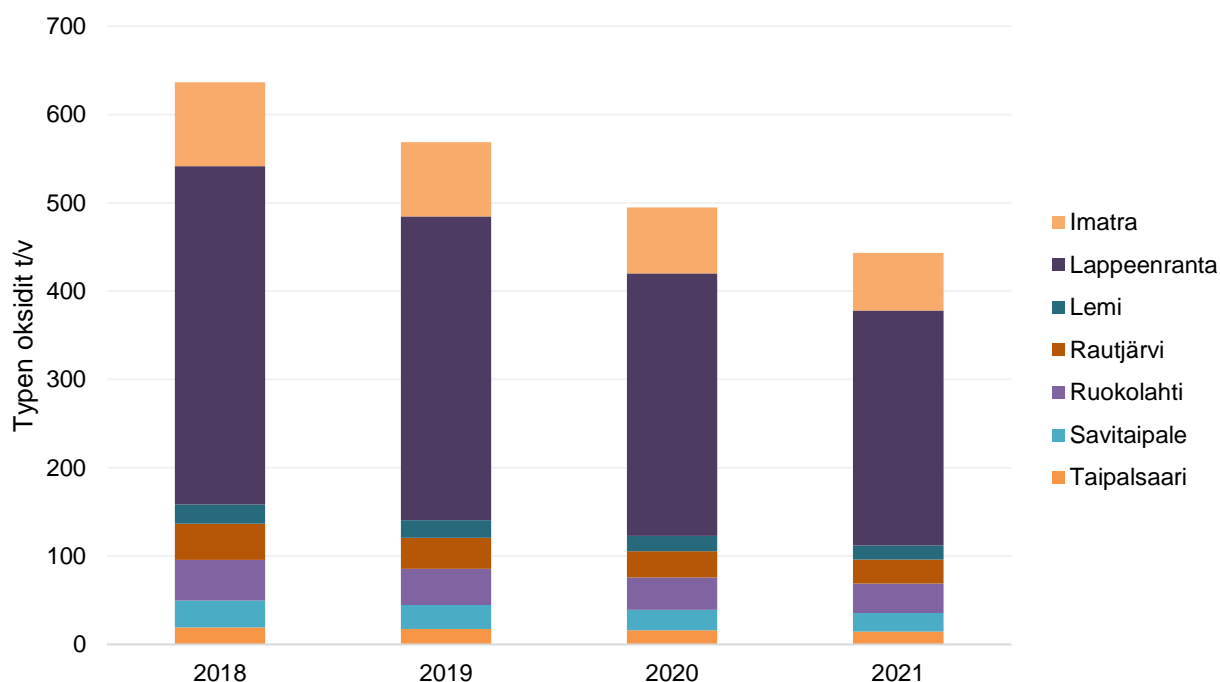


Kuva 2-4. Tutkimusalueen kuntien liikenteen rikkidioksidin päästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (LIISA 2022).

Tutkimusalueen typen oksidien päästöt ovat vuosina 2018–2020 laskeneet hieman yli 6000 tonnista noin 5000 tonniin. Vuonna 2021 typenoksidien päästöt nousivat 5400 tonniin (kuva 2-5). Liikenteen osuus typen oksidien kokonaispäästömäärästä on pienentynyt tasaisesti tarkasteluajanjakson aikana. (kuva 2-5 ja kuva 2-6). Suurimmat päästöt tulevat Lappeenrannasta (noin 60 %) ja Imatralta (noin 15 %) (kuva 2-6).

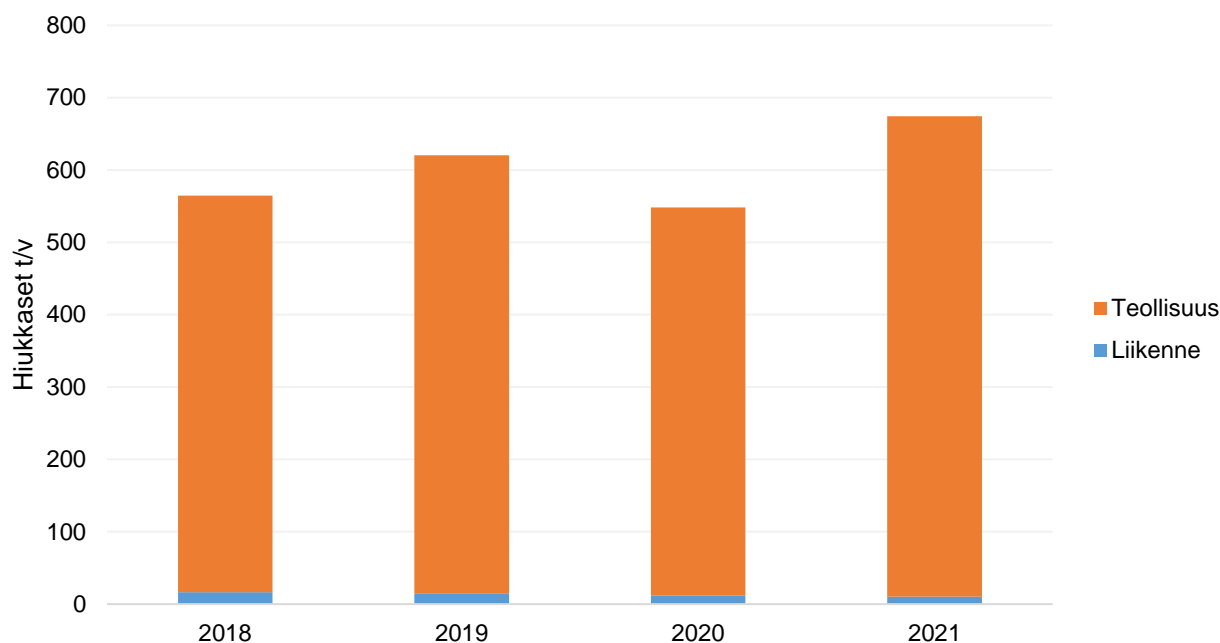


Kuva 2-5. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen typen oksidien päästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit, LIISA 2022).

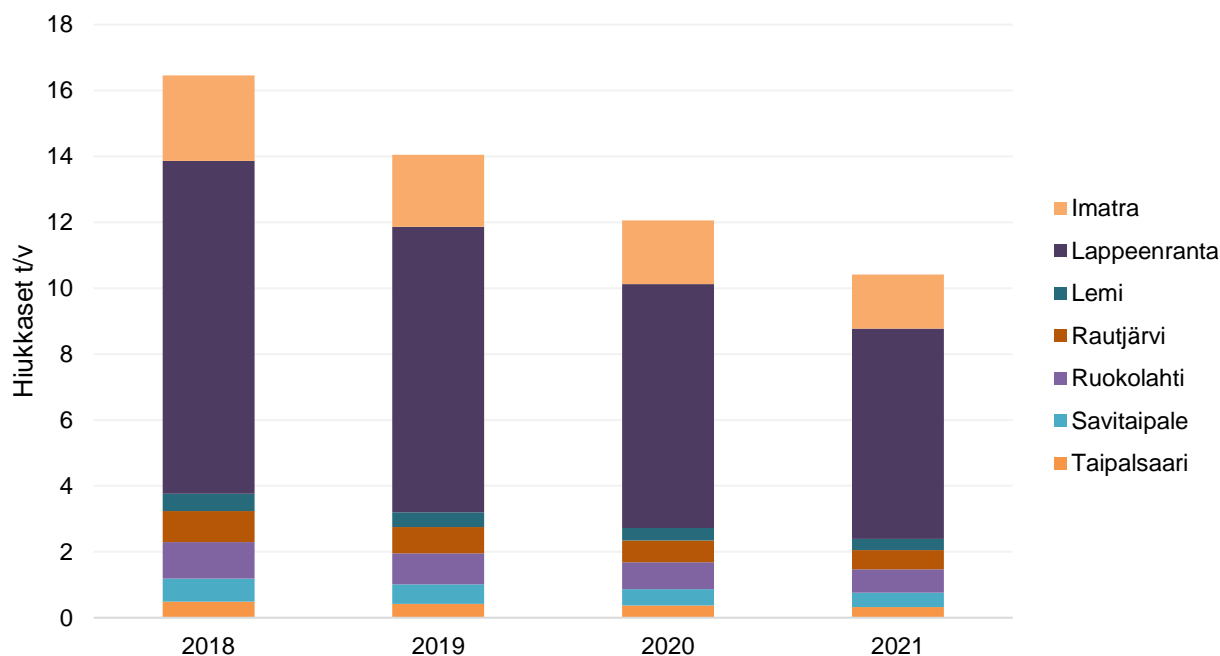


Kuva 2-6. Tutkimusalueen kuntien liikenteen typen oksidien päästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (LIISA 2022).

Tarkasteluajanjaksolla hiukkasten vuosipäästöt vaihtelivat 548 (vuonna 2020) ja 674 tonnin välillä (vuonna 2021) (kuva 2-7). Suurin osa hiukkaspäästöistä on peräisin teollisuuslaitoksista. Laitosten hiukkaspäästökehitys on ollut aaltomaista. Liikenteen osuus hiukkaspäästöihin on vähäinen ja päästöt ovat pienentyneet tasaisesti tarkasteluajanjakson aikana (kuva 2-7 ja kuva 2-8). Suurimmat päästöt tulevat Lappeenrannasta (noin 61 %) ja Imatralta (noin 16 %) (kuva 2-8).



Kuva 2-7. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen hiukkaspäästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit, LIISA 2022).



Kuva 2-8. Tutkimusalueen kuntien liikenteen hiukkaspäästöt (tn/v) vuosina 2018–2021 (LIISA 2022).

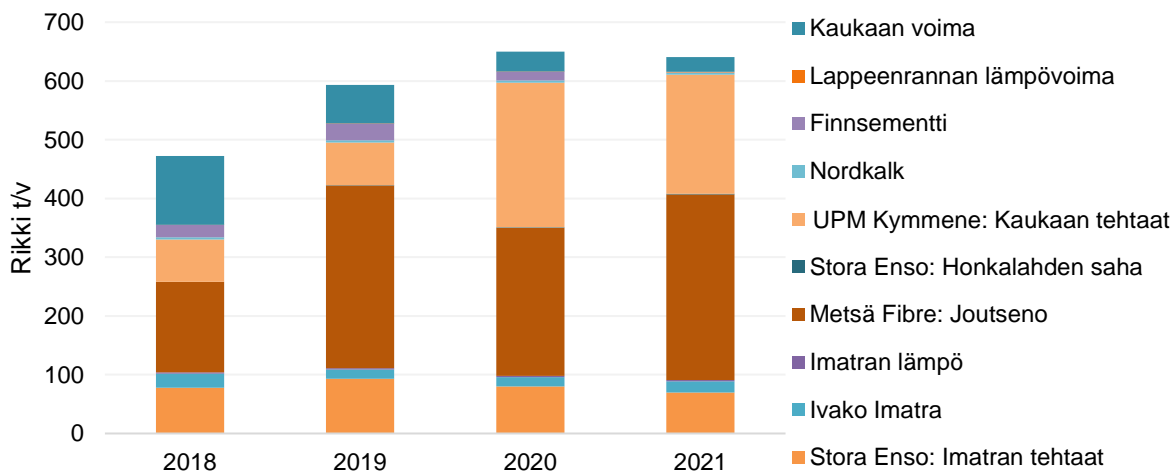
Tutkimusalueen lupavelvollisten teollisuuslaitosten rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöjen kehitys vuosina 2018–2021 on esitetty päästölähteittäin kuvissa 2-9–2-11. Tutkimusalueen suurin rikkidioksidin päästölähde on Metsä Fibren Joutsenon tehdas. Tehtaan rikkidioksidipäästöt ovat kaksinkertaistuneet tarkas-

teluajanjakson aikana. Rikkidioksidin päästöjä aiheuttaa merkittävästi myös UPM Kymmeneen Kaukaan tehtaat, joiden kokonaispäästöt rikkidioksidin osalta ovat niin ikään kaksinkertaistuneet. Myös Stora Enson Imatran tehtaiden rikkidioksidipäästöt ovat merkittäviä, mutta päästöt ovat hieman pienentyneet tarkkailujakson aikana (kuva 2-9).

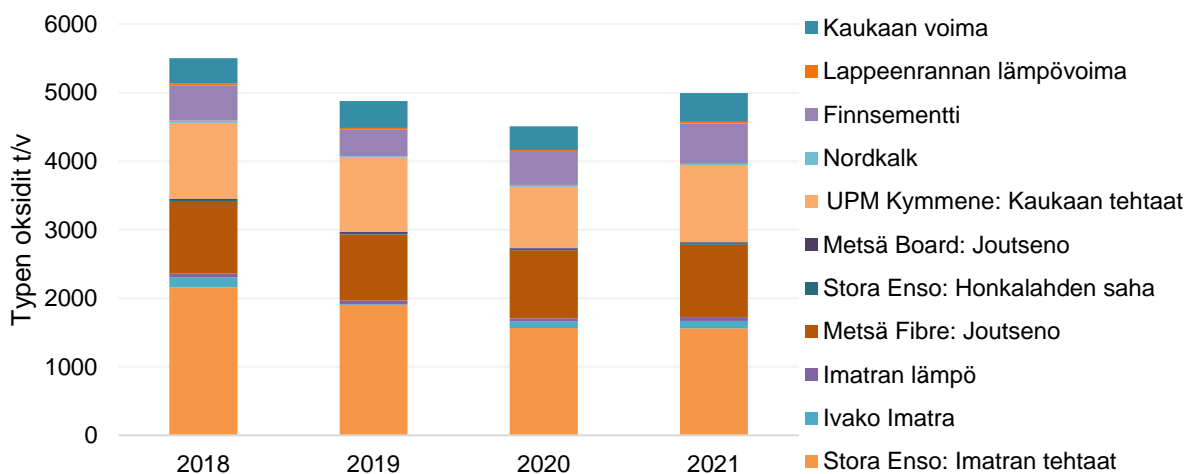
Tutkimusalueen suurimmat typen oksidien päästölähteet ovat Stora Enson Imatran tehtaat, UPM Kymmeneen Kaukaan tehtaat sekä Metsä Fibren Joutsenon tehdas. Stora Enson Imatran tehtaiden tyypipäästöt ovat vähentyneet, mutta muiden tehtaiden päästömäärissä ei ole tapahtunut merkittävää muutosta (kuva 2-10).

Suurimmat hiukkasten päästölähteet ovat UPM Kymmeneen Kaukaan tehtaat, Stora Enson Imatran tehtaat sekä Metsä Fibren Joutsenon tehdas. UPM Kymmeneen Kaukaan tehtaiden hiukkaspäästöt olivat kasvaneet huomattavasti vuonna 2021 (kuva 2-11).

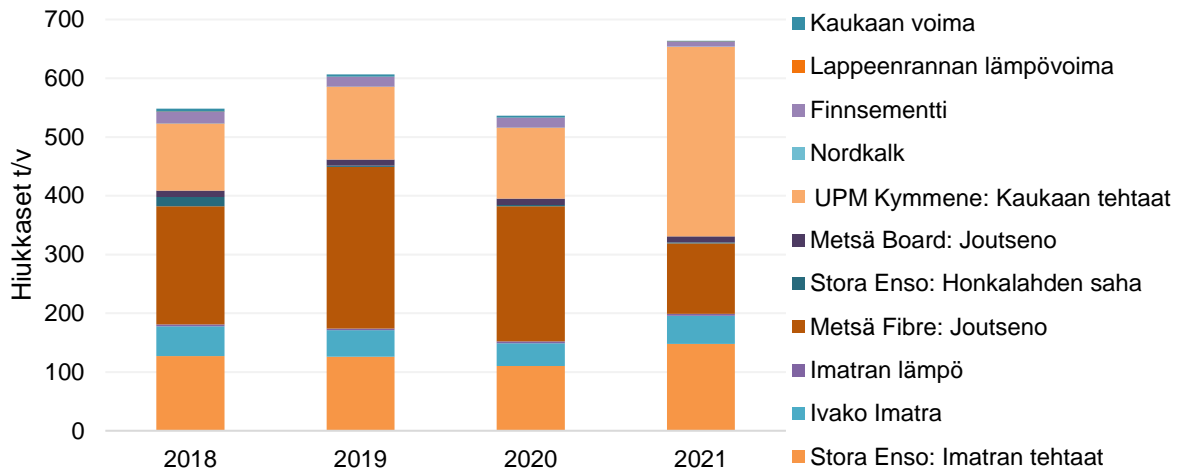
Kuvaan 2-12 on merkitty tutkimusalueen merkittävämät päästölähteet rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten osalta vuonna 2022. Imatran ilmanlaatuun vaikuttaa lisäksi venäläisen naapurikaupungin Svetogorskin alueen teollisuus.



Kuva 2-9. Tutkimusalueen rikkidioksidin päästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit).

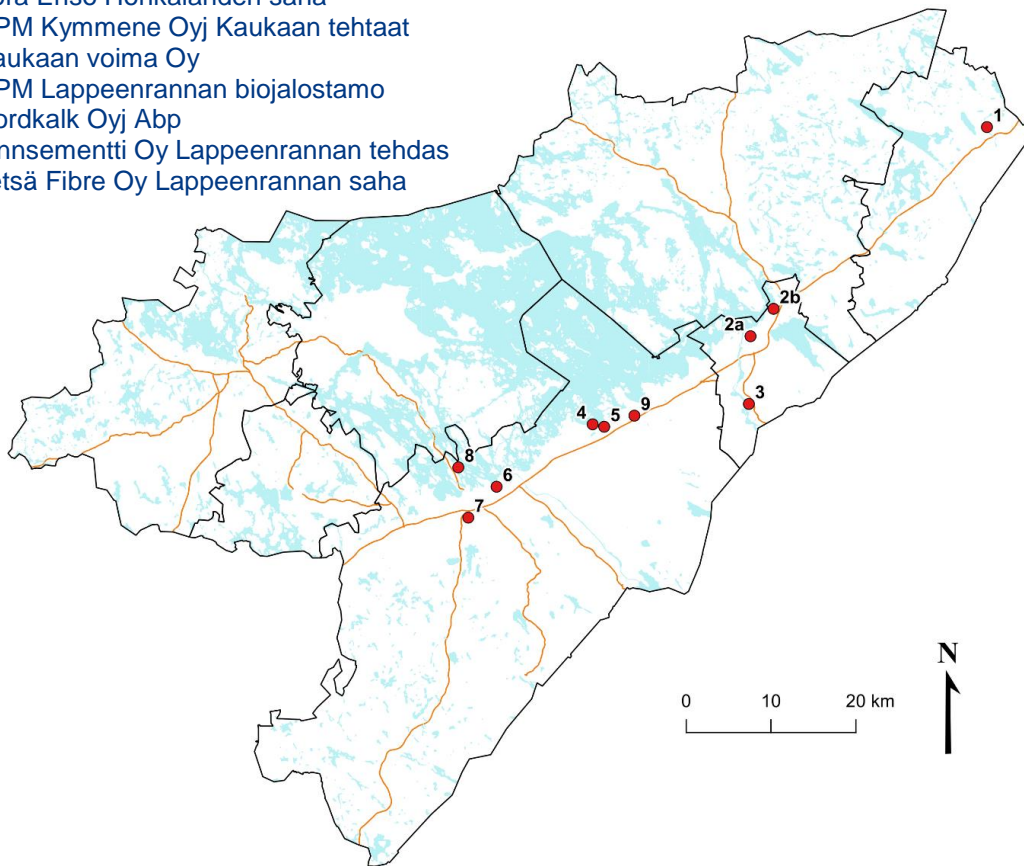


Kuva 2-10. Tutkimusalueen typen oksidien päästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit).



Kuva 2-11. Tutkimusalueen hiukaspäästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 2018–2021 (Imatran seudun ympäristöraportit).

1. M-Real Oyj Simplele
2. Stora Enson Imatran tehtaat
3. Ovako Imatra Oy
4. Metsä Fibre Oy Joutsenon tehdas
5. Stora Enso Honkalahden saha
6. -UPM Kymmene Oyj Kaukaan tehtaat
-Kaukaan voima Oy
-UPM Lappeenrannan biojalostamo
7. -Nordkalk Oyj Abp
-Finnsementti Oy Lappeenrannan tehdas
8. Metsä Fibre Oy Lappeenrannan saha

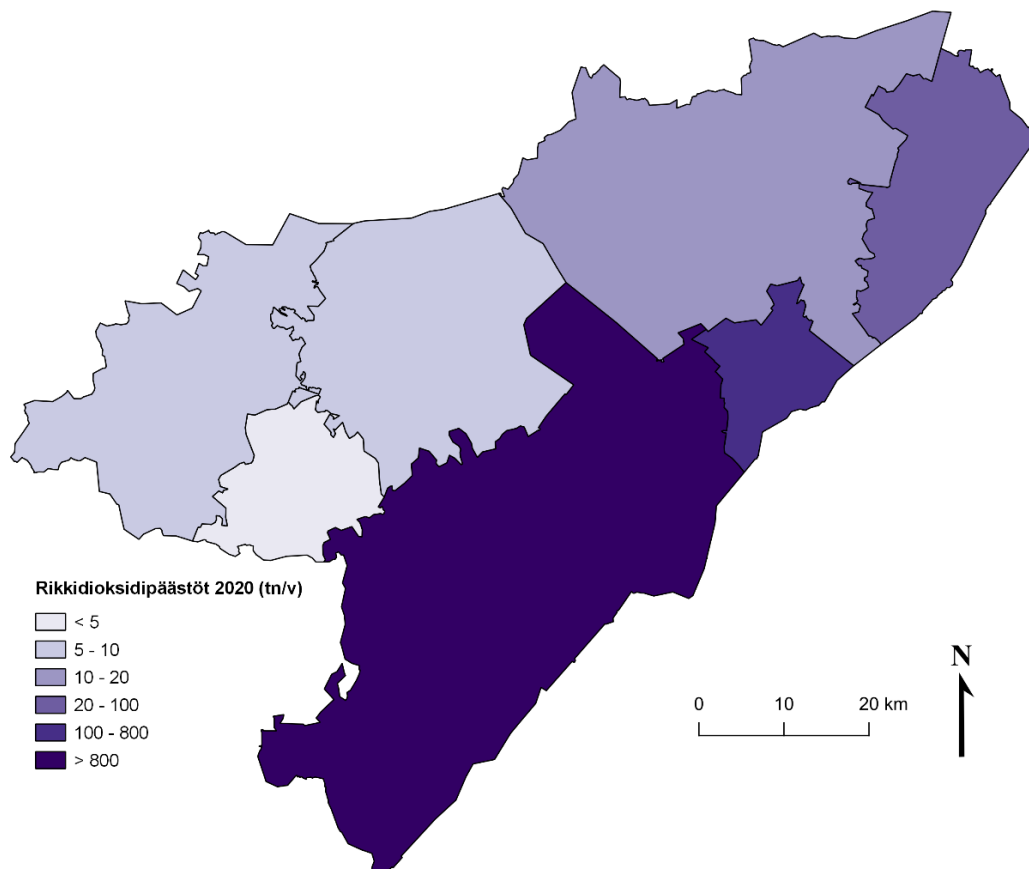


Kuva 2-12. Merkittävimmät päästölähteet tutkimusalueella vuonna 2022.

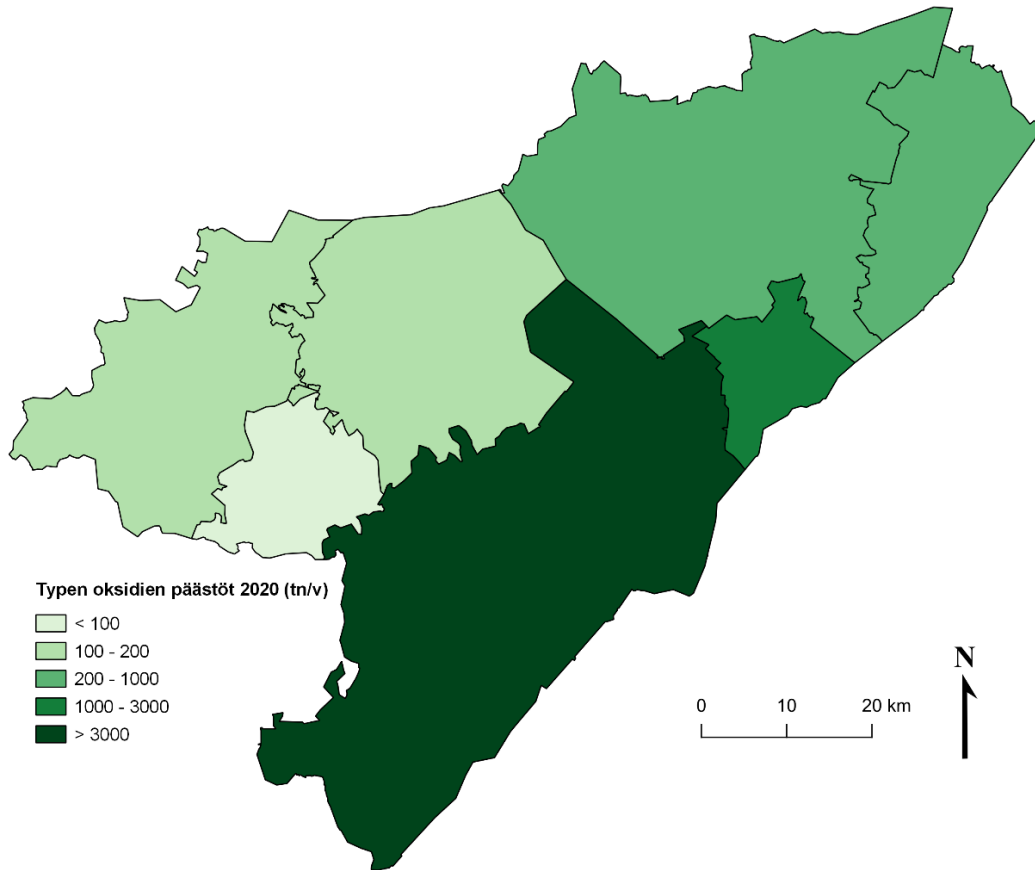
Etelä-Karjalan kuntakohtaisia päästötietoja on tarkasteltu taulukossa 2-1 sekä kuvissa 2-13–2-15. Päästötiedot ovat peräisin ympäristöhallinnon yhteisestä verkkopalvelusta (2020). Vuonna 2020 rikkidioksidipäästöt olivat suurimmat Lappeenrannassa. Myös Imatralla ja Rautjärvellä rikkidioksidipäästöt olivat tutkimusalueen muita kuntia suuremmat. Typen oksidien päästöjä syntyi eniten Lappeenrannassa ja Imatralla, muualla päästöt olivat selvästi alle 300 tonnia vuodessa. Myös hiukkaspäästöt olivat suurimmat Lappeenrannassa ja Imatralla, muualla päästöt olivat alle 100 tonnia vuodessa. Vähiten rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöjä syntyi Lemin, Savitaipaleen ja Taipalsaaren alueilla. Etelä-Karjalan kuntakohtaisiin päästömääriin vaikuttivat eniten alueen suurimmat teollisuuslaitokset, jotka sijaitsevat Lappeenrannassa, Imatralla ja Rautjärvellä.

Taulukko 2-1. Tutkimusalueen päästöt rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (tn/v) kunnittain vuonna 2020 (Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2020).

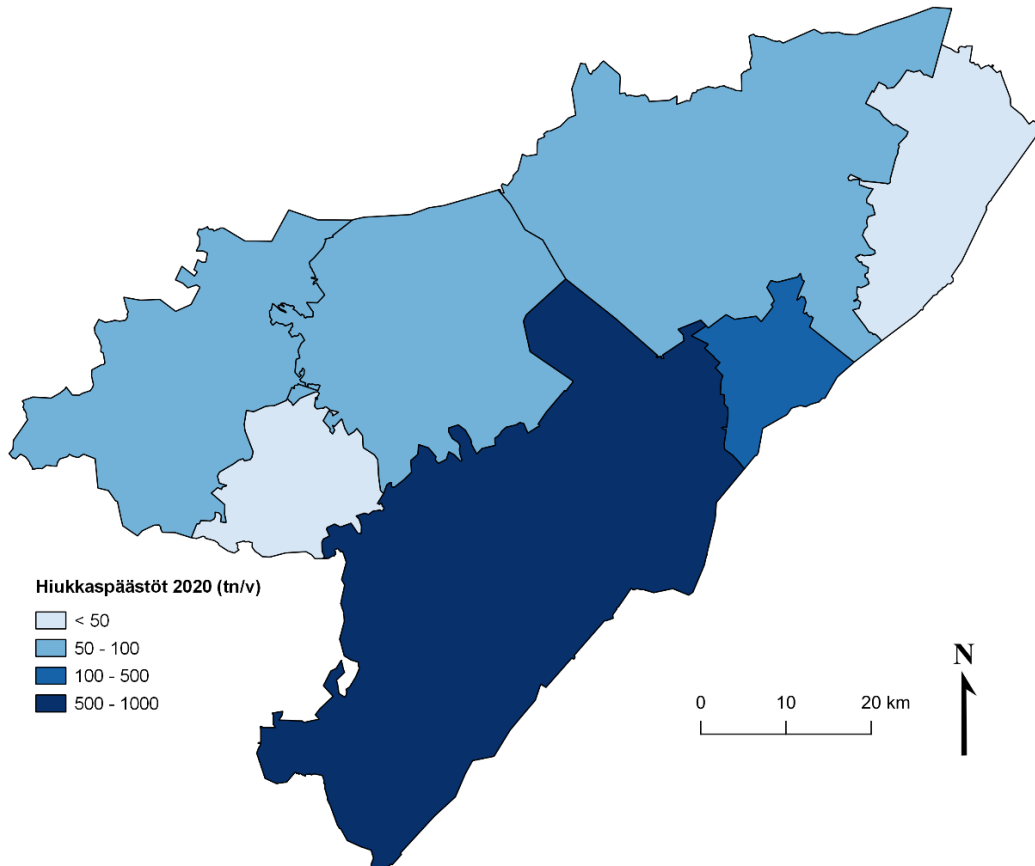
Kunta	SO ₂	NO _x	Hiukkaset
Imatra	140	1906	264
Lappeenranta	824	3619	715
Lemi	4	70	41
Rautjärvi	89	215	46
Ruokolahti	11	208	84
Savitaipale	8	104	61
Taipalsaari	6	143	59



Kuva 2-13. Rikkidioksidipäästöt (tn) Etelä-Karjalassa kunnittain vuonna 2020.



Kuva 2-14. Typen oksidien päästöt (tn) Etelä-Karjalassa kunnittain vuonna 2020.



Kuva 2-15. Hiukkaspäästöt (tn) Etelä-Karjalassa kunnittain vuonna 2020.

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Havaintoalat

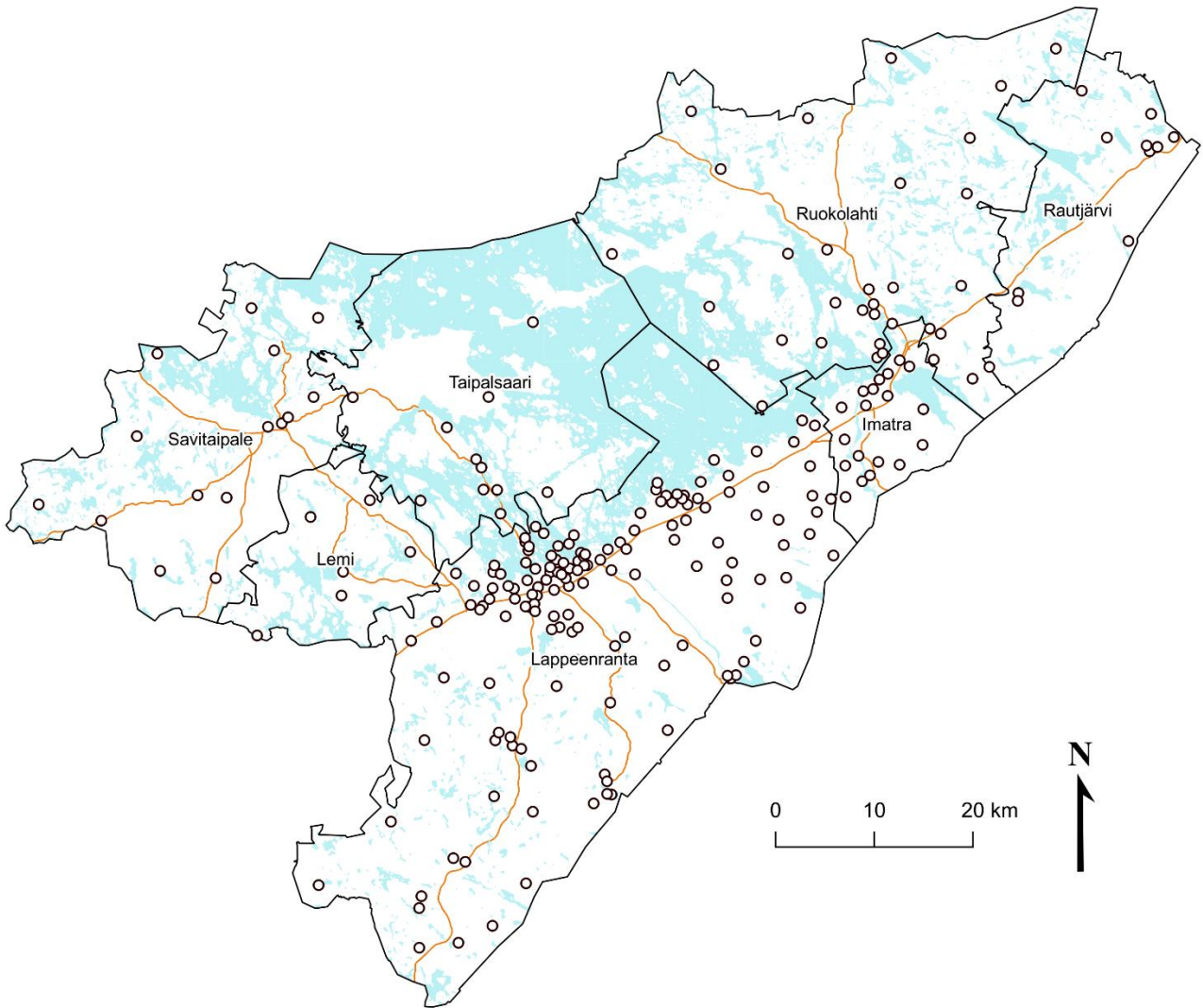
Mäntyjen runkojäkäläkartoitus tehtiin yhteensä 245:llä Imatran, Lappeenrannan, Lemin, Rautjärven, Ruokolahden, Savitaipaleen ja Taipalsaaren kuntien alueella sijaitsevalla havaintoalalla (kuva 3-1, taulukko 3-1). Kullakin havaintoalalla oli viisi tutkimuspuuta. Kartoitus pyrittiin tekemään samoilta havaintoaloilta, kuin vuoden 2012 tutkimuksessa, mutta maankäytön muutosten takia yhteensä 81 alaa jouduttiin perustamaan uudelleen. Osalla vanhoista aloista myös yksittäisiä puita jouduttiin valitsemaan uudelleen muun muassa harvennusten tai tuulenkaatojen takia.

Uusien havaintoalojen valinnassa huomioitiin standardin SFS 5670 asettamat vaatimukset puuston iän, tiheyden ja aluspuuston peittävyys suhteen. Lisäksi valinnassa huomioitiin, onko alueella toteutettu harvennushakkuita lähivuosien aikana tai onko lähistöllä reunavaikutusta aiheuttavia tekijöitä, kuten suppia tai paisterinteitä. Uudet havaintopuut valittiin siten, että ne olivat oksattomia kolmen metrin korkeuteen sekä läpimitaltaan vähintään 20 cm. Pensaiden tai taimien ympäröimiä puita tai hyvin lähellä toisia puita kasvavia puita ei hyväksytty mukaan kartoitukseen. Havaintoalojen ja -puiden valinnalla pyritään eliminoimaan luontaiset jäkälälajiston koostumukseen sekä vaurioihin vaikuttavat mikroilmastolliset tekijät, joista tärkein on valoisuuden ja varjoisuuden suhde.

Havaintoalojen sijainnit määritettiin GPS-laitteella. Havaintopuiden (viisi puuta/havaintoala) sijainnit selvitettiin havaintoalan etsintäohjeiden sekä havaintopuiden tyvessä olevien valkoisten maalitäplien avulla. Havaintoalojen ja -puiden etsintäohjeet täytettiin taustatietolomakkeeseen. Taustatietolomakkeeseen kirjattiin tiedot havaintoalan metsätyypistä, topografiasta, puulajisuhteista, puuston kehitysluokasta, valtalajien pohjapinta-alasta sekä havaintopuiden keskimääräisestä korkeudesta ja iästä. Lisäksi arvioitiin metsikön soveltuvuutta kartoitukseen asteikolla hyvä-kohtalainen-huono. Havaintoalan soveltuvuuden arvioinnissa arvioitiin subjektiivisesti, kuinka hyvin havaintoalan metsikkö täytti jäkäläkartoitukseen käytettävää metsikköä koskevat kriteerit. Puuston pohjapinta-alat määritettiin relaskoopin avulla ja puiden keskimääräinen ikä ja pituus määritettiin silmä määräisesti.

Tutkimusmetsiköistä lähes puolet (46,5 %) sijaitsi tuoreilla mustikkatyyppin (MT) kankailla ja noin neljäsosa (24,9 %) kuivahkoilla puolukkatyyppin (VT) kankailla (taulukko 3-2). Lehtomaisilla kankailla (OMT) sijaitsi noin 15 % aloista ja kuivilla kanervatyyppin kankailla (CT) noin 3,7 % aloista. Muuksi luokitelluilla metsätyypeillä sijaitsi 9 % tutkimusaloista. Muuksi luokitellut metsiköt olivat pääasiassa tuoreita ja kuivia lehtoja tai nurmialueita. Suurin osa (56 %) mäntyaloista soveltui tutkimukseen kohtalaisesti. Alojen soveltuvuutta tutkimukseen heikensi usein runsas ja rehevä aluskasvillisuus.

Tutkimusmetsät olivat pääasiassa 100–120 vuotiaita kypsiä mäntymetsiä. Tutkimuspuiden keskimääräinen pituus oli 20,3 metriä ja läpimitta 34,3 cm. Puuston keskimääräinen pohjapinta-ala oli 19,2 m²/ha ja valtalajin keskimääräinen pohjapinta-ala 14,9 m²/ha. Valtaosalla aloista valtalajina oli mänty ja toisena lajina oli useimmiten kuusi tai koivu. Lisäksi aloilla havaittiin haapaa, pihlajaa, vaahteraa, katajaa, lehtikuusta sekä raitaa.



Kuva 3-1. Havaintoalojen sijainti tutkimusalueella vuonna 2022.

Taulukko 3-1. Havaintoalojen lukumäärät kunnittain sekä uutena perustettujen havaintoalojen määrät vuonna 2022.

Kunta	Vanhat alat	Uudet alat	Yhteensä
Imatra	19	1	20
Lappeenranta	102	48	150
Lemi	3	4	7
Rautjärvi	8	3	11
Ruokolahti	18	12	30
Savitaipale	7	9	16
Taipalsaari	7	4	11
7 kuntaa	164	81	245

Taulukko 3-2. Mäntyhavaintoaloja kuvaavia tunnuksia vuonna 2022.

Tunnus		Kpl	%
Metsätyyppi	OMT	37	15,1
	MT	114	46,5
	VT	61	24,9
	CT	9	3,7
	CIT	2	0,8
	Muu	22	9,0
Soveltuvuus	hyvä	86	35,1
	kohtalainen	136	55,5
	huono	23	9,4
Kehitysluokka	kypsä	197	80,4
	varttunut	44	18,0
	nuori	4	1,6
1. valtalaji	mänty	237	96,7
	kuusi	4	1,6
	koivu	2	0,8
	haapa	2	0,8
2. valtalaji	kuusi	97	39,6
	koivu	83	33,9
	mänty	8	3,3
	haapa	7	2,9
	pihlaja	4	1,6
	vaahtera	2	0,8
	kataja	1	0,4
	lehtikuusi	1	0,4
	raita	1	0,4
	Valtapuiden pituus (m)	< 15	7
15-20		56	22,9
20-25		127	51,8
25-30		52	21,2
> 30		2	0,8
Valtalajin pohjapinta-ala (m ² /ha)	< 10	49	20,0
	10-15	78	31,8
	15-20	59	24,1
	20-25	46	18,8
	≥ 25	13	5,3
Havaintopuiden halkaisija (cm)	< 25	12	4,9
	25-30	49	20,0
	30-35	84	34,3
	35-40	57	23,3
	≥ 40	43	17,6
Puuston ikä (v)	< 80	18	7,3
	80-100	79	32,2
	100-120	100	40,8
	≥ 120	48	19,6

3.2 Tutkimusryhmä ja maastotöiden ajankohta

Mäntyjen jäkäläkartoitukset tehtiin 24.5.2022–28.7.2022 välisenä aikana. Maastotöihin osallistuivat ympäristöasiantuntijat Tiina Osmala, Stiina Lehmus, Eeva Kosola ja Juho Harmoinen sekä tutkimusavustaja Satu Osmala.

3.3 Havupuiden epifyyttijäkälien kartoittaminen

Kullakin mäntyhavaintoalalla toteutettiin männyn rungoilla esiintyvien 12 jäkälälajin kartoitus standardin SFS 5670 mukaisesti (taulukko 3-3). Kartoitus toteutettiin viideltä puulta 50–200 cm korkeudelta lieriönmuotoiselta alalta. Standardista poiketen kunkin lajin runsaus arvioitiin kolmiasteisella luokituksella (taulukko 3-4).

Jäkälät koostuvat symbioosissa elävistä lehtivihreättömästä sieniosakkaasta ja yhteyttävästä leväosakkaasta. Ne menestyvät hyvin niukkaravinteisessa ja kuivassa elinympäristössä. Jäkälät kasvavat löyhärakenteisina sekovarsina ilman suojaavia pintasolukerroksia ottaen ravinteensa ja vetensä suoraan ilmasta, sadevedestä tai runkovalunnasta. Tämä tekee jäkälät hyvin herkiksi ilman epäpuhtauksien vaikutuksille. Altistus tapahtuu pääasiassa siten, että epäpuhtaudet kiinnittyvät sieniosakkaan soluseinämien proteiineihin. Talviaikana ilmassa on yleensä enemmän epäpuhtauksia, eikä runkojäkälän päälle kerry epäpuhtauksilta suojaava lumikerrosta.

Ilman epäpuhtauksien vaikutukset näkyvät muutoksina jäkälän morfologiassa, peittävydessä sekä lajikoostumuksessa (Lodenius 2002). Morfologiset muutokset näkyvät muun muassa jäkälän sekovarren koon pienemisenä sekä liuskaisuuden ja värin muuttumisena. Eri jäkälälajit reagoivat ilman epäpuhtauksiin eri tavoin. Usein vaikutukset näkyvät ensin herkimmissä lajeissa, joiden peittävydet puiden rungoilla pienenevät, kunnes laji ei enää pysty menestymään kasvupaikallaan. Herkimpien lajien kadottua kestävämmät lajit saattavat valata vapautunutta elintilaa. Osa lajeista voi myös hyötyä kuormituksen lisääntymisestä ja runsastua puiden rungoilla. Standardin SFS 5670 mukaisessa jäkäläkartoituksessa käytettävien jäkälälajien kestävyys ilman epäpuhtauksille on esitetty oheisessa taulukossa (taulukko 3-5). On huomattava, että ilmansaasteiden sietokyvyn lisäksi jäkälälajien esiintymiseen vaikuttavat lajien luontaiset kasvupaikkavaatimukset.

Sormipaisukarve on erityisen hyvä ilman epäpuhtauksien indikaattori, sillä se kestää hyvin suuriakin ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia, mutta indikoi niitä morfologisilla muutoksilla. Morfologisia muutoksia arvioidaan vaurioasteluokituksen avulla. On myös esitetty, että sormipaisukarve saattaisi hyötyä ilman epäpuhtauksista tiettyyn kuormitustasoon asti (Anttonen 1990). Kuormitustason kasvaessa sormipaisukarve voi vahvana kilpailijana vallata kasvualaa muilta lajeilta, mikä näkyy lajin peittävyden kasvamisena lievässä kuormitustasossa. Kuitenkin sormipaisukarvekin kestää kuormitusta vain tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen sen vauriot pahenevat ja peittävyys pienenee (vrt. esim. Niskanen ym. 2003a ja Niskanen ym. 1996).

Ilman epäpuhtauksien aiheuttamat muutokset jäkälissä ja jäkälälajistossa voivat ilmetä nopeasti etenkin suurissa saastepitoisuuksissa (Jussila ym. 1999). Usein vaikutukset näkyvät vielä vuosienkin päästä kuormituksen vähennyttyä, koska jäkälät ovat hyvin hidaskasvuisia ja vaikutukset saattavat välittyä niihin myös kasvualustan muutosten kautta. Tärkein jäkäliin vaikuttava ilman epäpuhtaus on rikkidioksidi, mutta myös typpiyhdisteillä ja alkalisilla päästöillä on vaikutusta. Alkaliset päästöt muuttavat erityisesti havupuulla kasvavien jäkälän normaalisti hapanta kasvualustaa emäksisemmäksi.

Jäkälän morfologisia muutoksia arvioitiin tässä tutkimuksessa sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioasteen sekä yleisen vaurioasteen avulla ja jäkäläyhteisöjen lajikoostumuksen muutoksia lajilukumäärän sekä ilmanpuhtausindeksin avulla. Peittävyksiä arvioitiin sormipaisukarpeen ja luppojen (*Bryoria sp.*) osalta pistefrekvenssimenetelmällä, jossa käytetään apuna sadan pisteen systemaattista otantaa.

Taulukko 3-3. Standardin SFS 5670 mukaiset jäkälälajit ilmanlaadun indikaattoreina. Indikaattoriarvon luokitus: +++ hyvä, ++ kohtalainen, + pieni, - huono. Seuralaislajien lukumäärät perustuvat Uudenmaan vuoden 2009, Pohjois-Karjalan vuoden 2010, Kokkolan ja Pietarsaaren vuoden 2012 sekä Etelä-Karjalan vuoden 2012 bioindikaattoritutkimusten yhdistetyistä aineistoista (Huuskonen ym. 2010, Lehtonen ym. 2011, Huuskonen & Lehtonen 2012 ja Lehtonen ym. 2013) Lehtonen ym. 2013 mukaan. Lajikuvaukset Laita ym. 2008 ja lajikuvat © Tiina Osmala.



Sormipaisukarve (*Hypogymnia physodes*) +++

Sormipaisukarve on käytetyistä indikaattorilajeista kestävin ja yleisin laji, joka sietää eniten ilman epäpuhtauksia. Sormipaisukarpeen esiintymis-frekvenssi eli peittävyys pienentyä vasta voimakkaasti kuormitetuilla alueilla. Sormipaisukarve on hyvä ilmanlaadun indikaattori, sillä myös sekovarren näkyvät vauriot kuvastavat ilman epäpuhtauksien kuormitusta. Seuralaislajien lukumäärä on 4,92.



Keltatyvikarve (*Parmeliopsis ambigua*) +++

Keltatyvikarve sietää myös hyvin ilman epäpuhtauksia ja sen esiintymisfrekvenssit noudattavat ilman epäpuhtauksien kuormitus-vyöhykkeitä. Keltatyvikarve viihtyy parhaiten sulkeutuneissa kosteissa metsissä (Pihlström & Myllyvirta 1995). Keltatyvikarvetta esiintyy hyvin yleisesti, ja se on ilman epäpuhtauksia kestävä, hyvä indikaattorilaji. Seuralaislajien lukumäärä 4,92



Tuhkakarve ja harmaatyvikarve (*Parmeliopsis hyperopta* & *Imshaugia aleurites*) +++

Tuhkakarve ja harmaatyvikarve sijoittuvat kestävyydeltään kolmanneksi. Tämä sijoitus sopii yleensä hyvin näiden lajien esiintymisfrekvenssin alueelliseen jakaantumiseen, sillä kahta edellistä lajia herkempanä näiden lajien pienentyneet esiintymisfrekvenssit ulottuvat vähemmän kuormitetuille alueille kuin sormipaisu- ja keltatyvikarpeella. Tuhka- ja harmaatyvikarve ovat ilmansaasteita sietäviä, hyviä indikaattorilajeja, jotka tosin suosivat kuivia ja valoisia kalliomänniköitä. Seuralaislajien lukumäärä 5,33.



Seinäsuomujäkälä (*Hypocenomyce scalaris*) ++

Seinäsuomujäkälää kasvaa luontaisesti vanhojen mäntyjen rungoilla. Se pystyy myös käyttämään hyväkseen ilmassa olevia epäpuhtauksia ja sen esiintyminen lisääntyy ilman saasteiden kuormituksen lisääntyessä. Seinäsuomujäkälä on kohtalaisen hyvä ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori eli sen esiintyminen kuvastaa lähinnä typpilaskeuman rehevöittävä vaikutusta. Seuralaislajien lukumäärä 5,29.



Lupot (*Bryoria* sp.) +++

Lupoilla on keskimäärin eniten seurannaislajeja rungoilla, mikä osoittaa sen herkkyyttä ilman epäpuhtauksille. Luppojen esiintymisfrekvenssit noudattavat yleensä ilmansaasteiden kuormitusta ja luppojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Lupot ovat hyviä ilman laadun indikaattoreita. Seuralaislajien lukumäärä 6,27.



Naavat (*Usnea* sp.) +++

Naavojen esiintymisfrekvenssit vaihtelevat ilmansaastekuormituksen mukaan yleensä samalla tavalla kuin lupoilakin. Naavojen seuralaislajien määrä on yleensä melko suuri kuten lupoilakin, mikä osoittaa näiden jäkälälajien herkkyyttä ilman epäpuhtauksille. Naavojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Rannikon läheisyys suosii naavojen esiintymistä. Seuralaislajien lukumäärä 6,22.



Harmaaröyhelö (*Platismatia glauca*) ++

Harmaaröyhelö on seuralaislajien määrän perusteella suhteellisen herkkä indikaattorilaji ja myös sen esiintymisfrekvenssit ovat yleensä loogisia: laji puuttuu kuormitetuilta alueilta ja eniten sitä todetaan puhtailla alueilla. Harmaaröyhelö on herkkä ilman epäpuhtauksille, mutta sen luontainen esiintyminen voi kuitenkin vaihdella suuresti, minkä vuoksi sen indikaattoriarvo jää kohtalaiseksi. Seuralaislajien lukumäärä 5,88.



Keltaröyhelö (*Vulpicida pinastri*) +

Keltaröyhelön esiintyminen on usein varsin satunnaista, sitä voidaan löytää voimakkaasti kuormitetuilta alueilta ja toisaalta se saattaa puuttua taustalueilta. Keltaröyhelön luontainen esiintyminen vaihtelee suuresti, mutta mahdollisesti myös ilman epäpuhtauksilla on vaikutusta sen esiintymiseen. Keltaröyhelön arvo ilman laadun indikaattorina jää kuitenkin pieneksi. Seuralaislajien lukumäärä 5,32.



Ruskoröyhelö (*Cetraria chlorophylla*) –

Ruskoröyhelö on yleensä 12 indikaattorilajin joukossa yksi harvinaisimmista lajeista. Sen esiintyminen vaihtelee usein hyvin satunnaisesti ja sitä voidaan löytää voimakkaasti kuormitetuiltakin alueilta. Ilmanlaadun indikaattorina ruskoröyhelö on huono. Seuralaislajien lukumäärä 6,94.



Hankakarve (*Pseudevernia furfuracea*) ++

Hankakarve on hyvin yleinen jäkälälaji männyn rungolla. Keskimääräisen seuralaislajien määrän perusteella hankakarpeen voidaan katsoa olevan herkkä ilman epäpuhtauksille, ja myös sen esiintymisfrekvenssien alueellinen jakauma vastaa yleensä ilman epäpuhtauksien kuormituksen jakaumaa. Ilmansaasteet aiheuttavat selvästi havaittavia muutoksia hankakarpeen sekovarressa. Indikaattorina se on kohtalainen. Rannikon läheisyys suosii hankakarpeen esiintymistä. Seuralaislajien lukumäärä 5,80.



Raidanisokarve (*Parmelia sulcata*) +

Raidanisokarve on harvinainen männyn rungolla esiintyvä jäkälälaji. Raidanisokarve on ravinteisuudesta hyötyvä jäkälälaji, jota esiintyy yleensä mm. kalkkipölyalueiden liepeillä. Raidanisokarve soveltuu kalkkipölyn indikaattoriksi. Yleensä raidanisokarve on niin harvinainen, että sen indikaattoriarvo jää pieneksi. Seuralaislajien lukumäärä 6,25.



Viherlevä ja vihersukkulajäkälä (*Algae & Scoliciosporum*) +++

Viherleväpeite lisääntyy lähinnä kasvaneen typpilaskeuman vaikutuksesta eli se on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori. Viherleväpeite ja vihersukkulajäkälä ovat hyviä typpikuormituksen indikaattoreita. Seuralaislajien lukumäärä 4,86.

Taulukko 3-4. Jäkälien runsauden luokittelu. Leväpeite ja seinäsuomujäkälä luokitellaan peittävytenä (%), muut lajit sekovarsien lukumäärän perusteella.

Luokka	Sekovarsien lukumäärä, kpl	Peittävyys, %
1	1 - 2	< 5
2	2 - 7	5 - 49
3	> 7	≥ 50

Taulukko 3-5. Eräiden jäkälälajien herkkyudet rikkidioksidille Kuusinen ym. 1990 mukaan.

Lajin herkkyys	Lajin nimi	Lajin tieteellinen nimi
Kestävä, hyötyvä	seinäsuomujäkälä	<i>Hypocenomyce scalaris</i>
	leväpeite	<i>Algae + Scoliosporum</i>
Melko kestävä	sormipaisukarve	<i>Hypogymnia physodes</i>
	keltatyvikarve	<i>Parmeliopsis ambigua</i>
	ruskoröyhelö	<i>Cetraria chlorophylla</i>
	keltaröyhelö	<i>Vulpicida pinastri</i>
Melko herkkä	harmaatyvikarve	<i>Parmeliopsis hyperopta</i>
	harmaaröyhelö	<i>Platismatia clauca</i>
	hankakarve	<i>Pseudevernia furfuracea</i>
	raidanisokarve	<i>Parmelia sulcata</i>
Herkkä	lupot	<i>Bryoria sp.</i>
	naavat	<i>Usnea sp.</i>

Jokaisen tutkimuspuun sormipaisukarpeen ja jäkälien yleiset vaurioasteet arvioitiin viisiportaisella luokituksella puolen vaurioluokan tarkkuudella. Vaurioluokitukset perustuivat standardin SFS 5670 mukaisiin luokitteluperusteisiin (taulukko 3-6, taulukko 3-7). Sormipaisukarpeen eriasteisia vauriotasoja on esitetty kuvassa 3-2. Alakohtaisina vaurioluokituksina käytettiin viiden tutkimuspuun vaurioluokitusten keskimääristä arvoa.

Taulukko 3-5. Sormipaisukarpeen vaurioluokitus (SFS 5670).

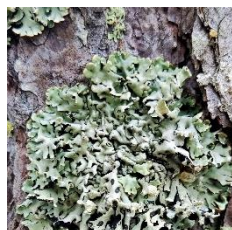
Vaurio	Näkyvät muutokset
I normaali	Jäkälät terveitä tai lähes terveitä
II lievä vaurio	Lievästi kitukasvuisia, lieviä värimuunnoksia
III selvä vaurio	Jäkälät kitukasvuisia, vihertyneitä tai tummuneita tai kumpaakin
IV paha vaurio	Jäkälät pieniä, ryppyisiä, vihertyneitä tai tummuneita tai kumpiakin
V kuollut tai puuttuu	



I = terve



II = lievä vaurio



III = selvä vaurio



IV = paha vaurio



V = kuollut/puuttuu

Kuva 3-2. Sormipaisukarpeen vaurioluokitus. Vaurioastekuvat ©Tiina Osmala.

Taulukko 3-6. Yleinen vaurioluokitus (SFS 5670).

Vaurio	Näkyvät muutokset
I normaali	Kaikkien lajien ulkonäkö ja kasvu muuttumattomia
II lievä vaurio	Pensasmaiset kitukasvuisia, lehtimäiset normaaleja
III selvä vaurio	Pensasmaiset pieniä, lehtimäiset vaurioituneita
IV paha vaurio	Pensasmaiset puuttuvat, lehtimäiset pahoin vaurioituneita
V kuolleet tai puuttuvat	Myös lehtimäiset puuttuvat, leväpeitettä voi esiintyä

Kullekin tutkimuspuulle ja -alalle laskettiin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lajimäärä. Ala- ja puukohtaisia lajimääriä laskettaessa ei huomioitu ilman epäpuhtauksista hyötyviä seinäsuomujäkälää sekä levää ja vihersukkulajäkälää. Tämän takia lajeja saattoi olla puuta tai alaa kohti enimmillään 10. Lajimäärän perusteella alat tai puut luokiteltiin jäkälälajistoltaan normaalista erittäin selvästi köyhtyneeseen (taulukko 3-7).

Taulukko 3-7. Jäkälälajiston luokitus lajilukumäärän perusteella.

Lajilukumäärä	Lajiston kuvaus
0 - 1	Erittäin selvästi köyhtynyt
2 - 3	Selvästi köyhtynyt
4 - 5	Köyhtynyt
6 - 7	Lievästi köyhtynyt
≥ 8	Normaali jäkälälajisto

Kullekin havaintoalalle laskettiin paikan jäkäläkasvillisuutta kuvaava IAP-indeksi (*Index of Air Purity*). IAP-indeksi yhdistää eri jäkälälajien esiintymisfrekvenssit yhteen lukuarvoon ottamalla huomioon myös eri lajien herkkyudet (Polojärvi 2005). IAP-indeksi kuvaa jäkälälajiston tilaa, eli mitä suurempi indeksiluku on, sitä runsaampi on jäkälälajisto ja sitä enemmän esiintyy ilman saasteille herkkiä lajeja.

Indeksi laskettiin kullekin havaintoalalla seuraavasti:

$$IAP = \sum_{1}^{n} (Q \times f) / 10$$

Q = Kunkin jäkälälajin keskimääräinen seuralaislajien lukumäärä rungolla

f = Lajin suhteellinen esiintymisfrekvenssi näytealalla (0–1)

n = Jäkälälajien lukumäärä ($n = 10$)

Indeksiä laskettaessa käytettiin kymmentä standardin SFS 5670 mukaista ilman epäpuhtauksista kärsivää jäkälälajia. Ilman epäpuhtauksista hyötyvien seinäsuomujäkälän, levän sekä vihersukkulajäkälän esiintymiset huomioitiin seuralaislajien lukumäärissä.

IAP-indeksin laskentatavasta ei ole yhdenmukaista käytäntöä, mistä johtuen indeksille ei ole esitetty yleisesti käytettävää luokitusta. Tässä selvityksessä indeksin arvo luokiteltiin oheisen taulukon (taulukko 3-8) mukaisesti. Tutkimusten vertailukelpoisuuden takia tässä selvityksessä käytettiin samoja seuralaislajimääriä kuin vuoden 2012 tutkimuksessa. Myös aikaisempien vuosien IAP-indeksit on laskettu käyttäen vuoden 2012 tutkimuksessa määritettyjä seuralaislajimääriä. Seuralaislajien lukumäärät on laskettu Uudenmaan vuoden 2009, Pohjois-Karjalan vuoden 2010, Kokkolan ja Pietarsaaren vuoden 2012 sekä Etelä-Karjalan vuoden 2012 bioidikaattoritutkimusten yhdistetyistä aineistoista, joka käsittää 7885 puuta (Huuskonen ym. 2010, Lehkonen ym. 2011, Huuskonen & Lehkonen 2012, Lehkonen ym. 2013).

Taulukko 3-8. Jäkälälajiston luokitus IAP-indeksin perusteella.

IAP-indeksi	Kuvaus jäkäläkasvillisuudesta
> 3	Jäkälälajisto vastaa tausta-alueiden lajistoa, mukana yleisesti herkempiä lajeja
2 - 3	Lajistossa lieviä muutoksia, herkempiä lajeja puuttuu yleisesti
1 - 2	Lajisto on köyhtynyt, herkempiä lajeja voi esiintyä yksittäisillä rungoilla
0,5 - 1	Lajisto on erittäin selvästi köyhtynyt, herkkimmät lajit puuttuvat yleisesti, rungoilla esiintyy ilmansaasteista hyötyviä lajeja
< 0,5	Jäkäläautio tai lähes jäkäläautio

3.4 Jäkäläkartoituksen virhelähteet ja luotettavuus

Jäkäläkartoituksen tulosten luotettavuuteen vaikuttavat erityisesti kartoituksen tekijöiden lajintuntemus sekä kokemus bioindikaattoritutkimusten tekemisessä. Standardissa SFS 5670 esitettyjen 12 indikaattorilajin lajintuntemuksen lisäksi tulee tuntea muut runkojäkälät, sillä muuten indikaattorilajit voivat sekoittua muihin lajeihin. Ilman epäpuhtaudet voivat myös aiheuttaa lajien ulkonäköön huomattavia muutoksia, minkä vuoksi pelkkä luonnontilaisten jäkälien tunteminen ei ole tutkimuksen kannalta riittävää.

Eri jäkälälajien esiintymisen kirjaaminen voi vaihdella eri arvioitsijoiden kesken, sillä muun muassa leväpeitteiden ja seinäsuomujäkälän havainnointi on erityisen hankalaa niiden kasvutavan takia. Edellä kuvattujen lajien esiintyminen voi vaihdella pienestä laikusta tai yksittäisestä suomusta yhtenäiseen tiiviiseen peitteeseen. Tyvikarpeiden osalta esiintymiseksi kirjattiin vain selvästi erottuva sekovarsi, eikä kaarnan pinnalla olevaa keller-tävää tai vaaleaa jauhomaista kasvustoa. Lajihavainnoista leväpeitteen arviointi on osoittautunut tarkkuudeltaan epävarmimmaksi (Polojärvi ym.2005).

Lajien esiintymisen kirjaamisen lisäksi subjektiivisiin arvioihin pohjautuva jäkälien näkyvien vaurioiden arviointi ja luokittelu aiheuttavat myös tutkijakohtaisia eroja jäkäläkartoituksen tuloksiin. Muun muassa sormipaisukarpeen vaurioasteiden luokittelun välillä ei ole kuitenkaan havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja havainnoijien välillä (Polojärvi ym.2005). Virhelähteiden pienentämiseksi maastoryhmän arviointitasot saatettiin samalle tasolle ennen maastokauden alkua. Tutkijakohtaisten erojen vaikutus kartoituksen tuloksiin oli vuoden 2022 tutkimuksessa hyvin vähäinen, sillä noin 90 % jäkäläkartoituksesta suoritettiin yhden tutkijan toimesta.

3.5 Paikkatietomenetelmät

Paikkatietoaineistojen käsittelyssä ja visualisoinnissa hyödynnettiin QGIS 3.22.10 –ohjelmistoa. Vyöhykekartat interpoloitiin kriging-menetelmällä. Krigingmenetelmä laskee tuntemattomalle pisteelle arvon painottamalla lähimpien tunnettujen pisteiden arvoja. Painotus ei perustu pelkästään pisteiden väliseen etäisyyteen ja enustettuun sijaintiin, vaan myös tunnettujen pisteiden ja niiden arvojen spatiaaliseen järjestäytymiseen. Kriging-menetelmää käytettäessä huomioidaan spatiaalisen autokorrelaation vaikutus. Autokorrelaatio tarkoittaa sitä, että toisiaan lähellä olevissa paikoissa vastemuuttujan arvot ovat keskenään keskimäärin samanlaisempia kuin toisistaan kaukana olevissa paikoissa.

Vyöhykekarttoja tarkasteltaessa tulee huomioida, että interpolointitulokset on aina yleistys, jonka tarkkuuteen vaikuttaa ennen kaikkea tunnettujen pisteiden määrä ja tiheys. Näin ollen interpoloinnin tulosta voidaan pitää luotettavana niillä alueilla, joilla tunnettuja pisteitä (tutkimusaloja) on tiheässä. Harvan havaintoalaverkon alueilla interpoloinnin tulokseen tulee huomattavasti enemmän epävarmuustekijöitä, sillä yksittäisen havaintoalan tulos vaikuttaa laajempiin alueisiin kuin tiheämmän havaintoalaverkon alueella. Etelä-Karjalassa havaintoalaverkko on tiheämpi taajamissa ja harvempi tausta-alueilla, mikä voi vaikuttaa vyöhykekarttojen luotettavuuteen esimerkiksi Lemillä, Savitaipaleella sekä Ruokolahden pohjoisosissa.

3.6 Tilastomenetelmät

Tilastomenetelmien avulla pyrittiin saamaan tietoa ilmanlaatu- ja taustamuuttujien vaikutuksesta tutkittuihin muuttujiin, ilmanlaatua kuvaavien muuttujien välisestä yhteisvaihtelusta sekä vuosien välisistä eroista (Partanen ja Veijola 1996). Taustamuuttujiksi otettiin havaintoaloilla tehdyt havainnot sekä eräitä ilmanlaatua ja päästöjä kuvaavia muuttujia. Ilmanlaatu- ja päästömuuttujiksi valittiin havaintoalojen etäisyys lähimpään lupavolliseen teollisuus- tai energialaitokseen sekä tämän lähimmän laitoksen päästömäärät rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (Ahonen 2022, Piutunen 2022, Imatran kaupunki 2019–2022)

Tulosten tilastollinen analysointi toteutettiin R-ohjelmistolla versiolla 4.2.0 (R Core Team 2022). Taustamuuttujien vaikutusta tutkittiin Kruskal-Wallislin yksisuuntaisella varianssianalyysillä ja Dunnin testillä (Dinno 2017). Muuttujien välisiä suhteita toisiinsa tutkittiin Spearmanin korrelaatiolla.

3.6.1 Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot

Luokittelevien taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin testattiin parametrittomalla Kruskal-Wallislin yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Luokittelevina muuttujina käytettiin metsätyyppiä, metsikön kehitystasetta ja metsikön soveltuvuutta tutkimukseen. Jatkuvien taustamuuttujien ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien välisiä riippuvuuksia tarkasteltiin Spearmanin järjestykorrelaatioiden avulla. Alle 0,3:n korrelaatiota ei yleisesti katsota merkitykselliseksi. Suurilla aineistoilla varsin pienetkin korrelaatiot voivat olla tilastollisesti merkitseviä. Tilastollisesti merkitsevä tulos ei siten aina merkitse sitä, että muuttujien välinen korrelaatio olisi voimakas.

Tilastollisissa tarkasteluissa on huomioitava se, että havaintoalat jakoutuivat taustamuuttujien muodostamiin luokkiin epätasaisesti. Tämä voi osaltaan heikentää taustamuuttujien vaikutuksen tilastollisen arvioinnin luotettavuutta ja tulokset voivat erityisesti olla herkempiä parametristen testien taustaoletusten rikkoutumisen aiheuttamille virheille, jotka vaikuttavat testin merkitsevyytasoon ja voimakkuuteen. Jos esimerkiksi sekä otoskoot että otosten varianssit eroavat ryhmittäin, riski tehdä tyypin 1 virhe, eli hylätä nollahypoteesi sen ollessa tosi, kasvaa (Ranta ym. 1989).

3.6.2 Vuosien väliset vertailut

Vuosien välisiä eroja tutkittiin parittaisten otosten testillä. Ensin tulosten normaalijakauma selvitetään Shapiro-Wilkin testillä. Koska aineisto ei ollut normaalistijakautunutta, vuosien 2005, 2012 ja 2022 välisiä eroja muuttujilla tutkittiin parametrittomalla Friedmanin testillä ja parittaisella Wilcoxin testillä.

3.6.3 Regressioanalyysi

Tärkeimpien tutkittujen muuttujien riippuvuutta jatkuvista tausta- ja ilmanlaatua kuvaavista muuttujista tarkasteltiin usean selittävän muuttujan hierarkkisen regressioanalyysin avulla. Regressioanalyysin avulla pyrittiin vastaamaan siihen, miten selittävän muuttujan arvojen vaihtelu riippuu selittävien muuttujien arvoista ja näiden muutoksista. Hierarkkisen regressioanalyysin avulla voitiin selvittää, mikä lopulta on ilmanlaatua kuvaavien muuttujien osuus tutkittujen vaihtelun selittämisessä, kun muut mahdolliset jäkälä- ja mäntyjen elinvoimaisuutta kuvaaviin muuttujiin vaikuttavat (tausta-)tekijät on huomioitu. Vain merkitsevät selittävät muuttujat jäävät malliin mukaan.

4. TULOKSET

4.1 Mäntyjen runkojäkälät

Mäntyjen jäkälälajistoa kuvaavien muuttujien keskiarvot, ääriarvot sekä keskihajonta on esitetty taulukossa 4-1. Kutakin jäkälälajistoa kuvaavaa muuttujaa on tarkasteltu tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Taulukko 4-1. Männyn runkojäkälien ilmanpuhtausindeksin, alakohtaisen ja puukohtaisen lajimäärän, sormipaisukarpeen vaurioasteen, yleisen vaurioasteen, sormipaisukarpeen ja luppojen peittävyden sekä levän yleisyyden keskiarvo, ääriarvot ja keskihajonta (n = 245). Lajimäärissä ei ole huomioitu levää eikä seinäsuomujäkälää.

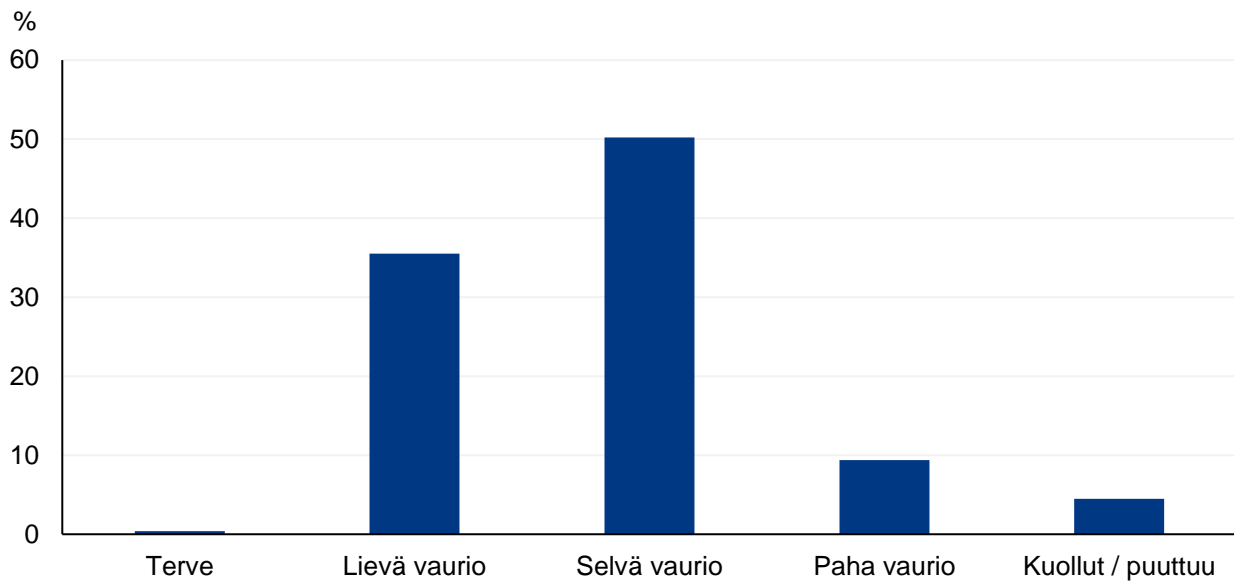
	Ka	Min	Max	S.D.
IAP-indeksi	2,1	0,0	3,8	0,71
Lajimäärä/näyteala	5,3	0,0	9,0	1,83
Lajimäärä/puu	3,9	0,0	8,0	1,48
Yleinen vaurioaste	3,3	1,2	5,0	0,89
Sormipaisukarpeen vaurioaste	2,8	1,5	5,0	0,75
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	6,6	0,0	31,2	5,87
Luppojen peittävyys (%)	0,1	0,0	7,5	0,63
Levän yleisyys	1,5	0,0	5,0	1,92

4.1.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste

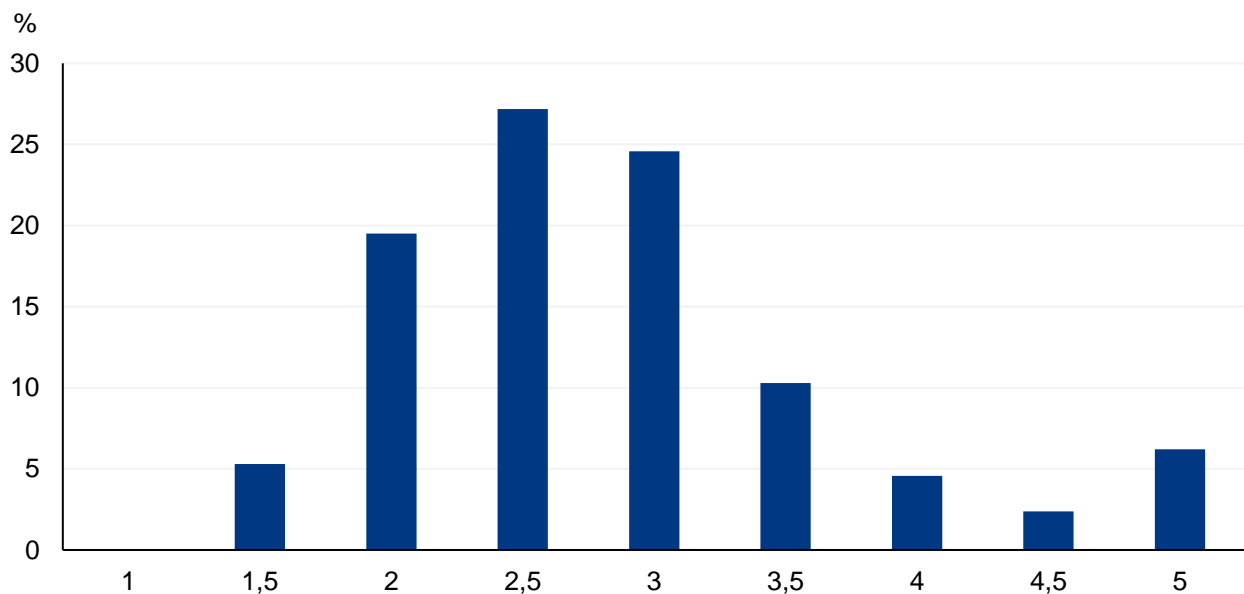
Sormipaisukarpeen vaurioastetta arvioitiin puolen vaurioluokan välein viisiportaisella asteikolla (ks. taulukko 3-5 ja kuva 3-2), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Vaurioituneisuus arvioitiin puukohtaisesti, minkä perusteella laskettiin havaintoalakohtainen keskimääräinen vaurioaste.

Sormipaisukarve oli tutkimusalueella keskimäärin selvästi vaurioitunutta (keskimääräinen vaurioaste 2,8) ja vaurioasteet vaihtelivat terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (taulukko 4-1). Vaurioiden jakaantumista koko aineistossa tarkasteltiin luokittelemalla vaurioasteet sekä puu- että havaintoalakohtaisesti (kuvat 4-1 ja 4-2). Sormipaisukarve luokiteltiin selvästi vaurioituneeksi puolella (50 %) havaintoaloista. Lieviä vaurioita esiintyi 35,5 %:lla aloista ja pahoja vaurioita 9,4 %:lla aloista. Sormipaisukarve luokiteltiin täysin terveeksi vain yhdellä alalla. Sormipaisukarve puolestaan puuttui 11 havaintoalalta eli 4,5 % havaintoaloista.

Tutkimuspuukohtaisesti tarkasteltuna sormipaisukarve oli tervettä tai melkein tervettä (vaurioaste 1 tai 1,5) 5,3 %:lla havaintopuista. Lähes puolella (46,7 %) tutkimuspuista sormipaisukarve oli lievästi vaurioitunutta (vaurioaste 2 tai 2,5). Selviä vaurioita (vaurioaste 3 tai 3,5) havaittiin 34,9 %:lla ja pahoja vaurioita (vaurioaste 4 tai 4,5) 6,9 %:lla puista. Tutkimuspuista 6,2 %:lla (76 runkoa) sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui.



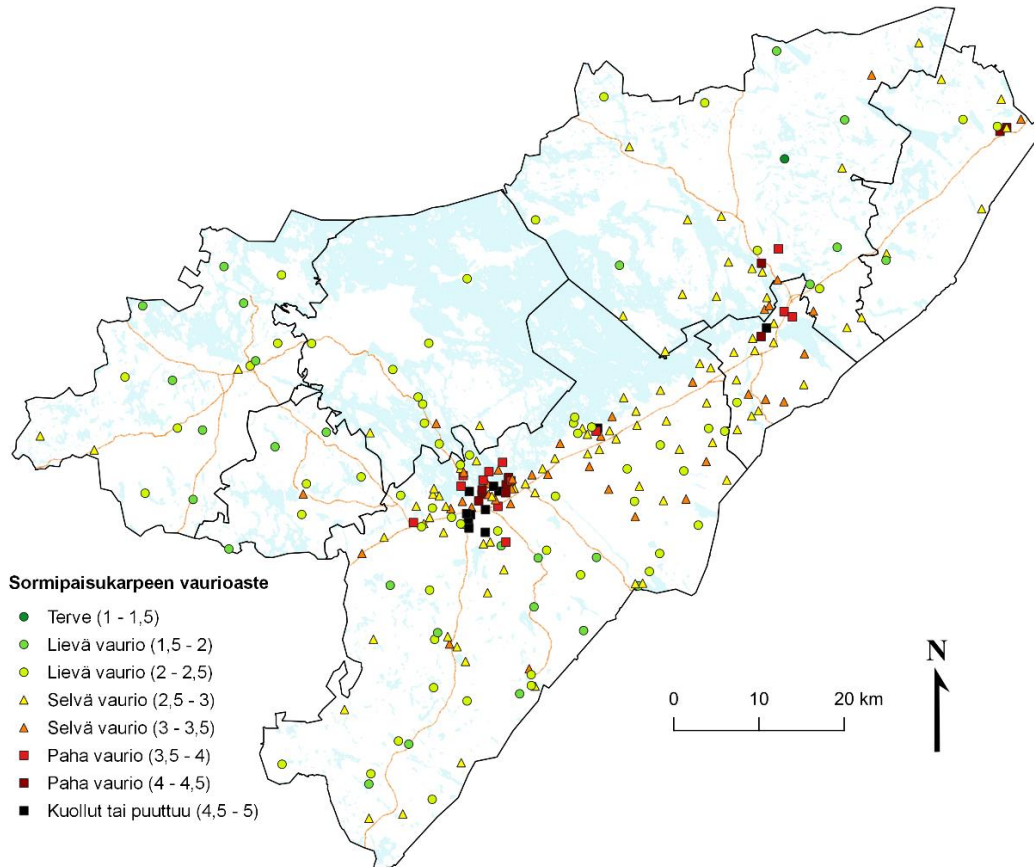
Kuva 4-1 Sormipaisukarpeen vaurioasteet havaintoaloilla luokittain vuonna 2022 (n = 245).



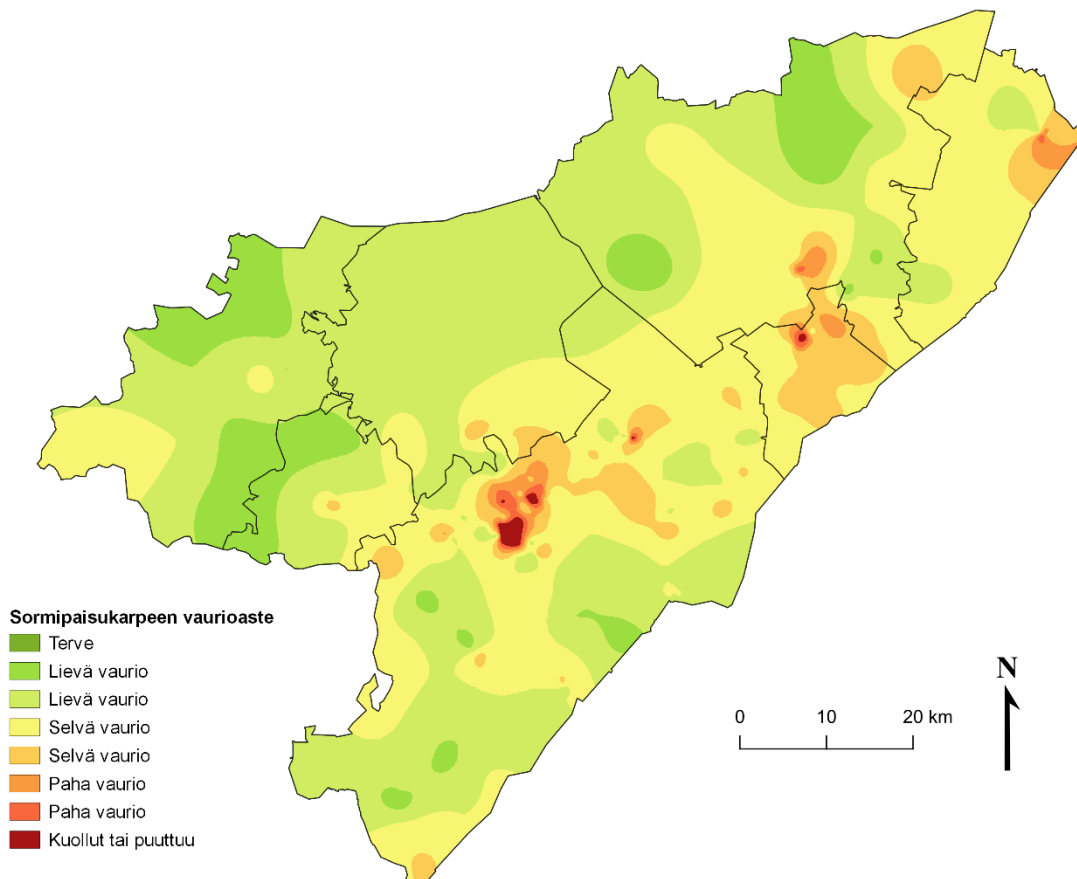
Kuva 4-2. Sormipaisukarpeen vaurioasteet luokiteltuna rungoittain vuonna 2022 (n = 1225).

Alat, joilla sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui, sijoituivat Lappeenrannan (10 alaa) ja Imatran (1 ala) kaupunkien alueille (kuva 4-3). Pahat vauriot painottuivat niin ikään Lappeenrannan ja Imatran alueille. Sormipaisukarpeen osalta pahasti vaurioituneita aloja esiintyi lisäksi Ruokolahdella sekä Rautjärvellä M-Real Oyj Simpeleen tehtaan läheisyydessä. Suurin osa aloista luokiteltiin sormipaisukarpeen osalta selvästi vaurioituneeksi ja selviä vaurioita esiintyi läpi tutkimusalueen. Vähiten selviä vaurioita esiintyi Lemmin, Savitaipaleen ja Taipalsaaren aluilla, jossa sormipaisukarpeen vaurioasteet olivat pääasiassa lievempiä. Lieviä vaurioita havaittiin 87:llä havaintoalalla, jotka sijoituivat ympäri tutkimusaluetta, mutta erityisesti Lemmin, Savitaipaleen ja Taipalsaaren alueille sekä Lappeenrannan eteläosiin. Sormipaisukarve oli tervettä ainoastaan yhdellä Ruokolahdella sijoittuvalla havaintoalalla.

Sormipaisukarpeen lievän vaurion vyöhykkeet muodostuivat pääasiassa Lemmin, Savitaipaleen, Taipalsaaren ja Ruokolahden alueille sekä Lappeenrannan eteläosiin (kuva 4-4). Lappeenrannan pohjoisosan, Imatran ja Rautjärven alueet olivat pääasiassa selvästi vaurioituneita. Suurimmat vaurioastevyöhykkeet painottuivat Lappeenrannan ja Imatran alueille.



Kuva 4-3. Sormipaisukarpeen vaurioasteet havaintoaloilla vuonna 2022.



Kuva 4-4. Sormipaisukarpeen vaurioasteita kuvaavat vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2022.

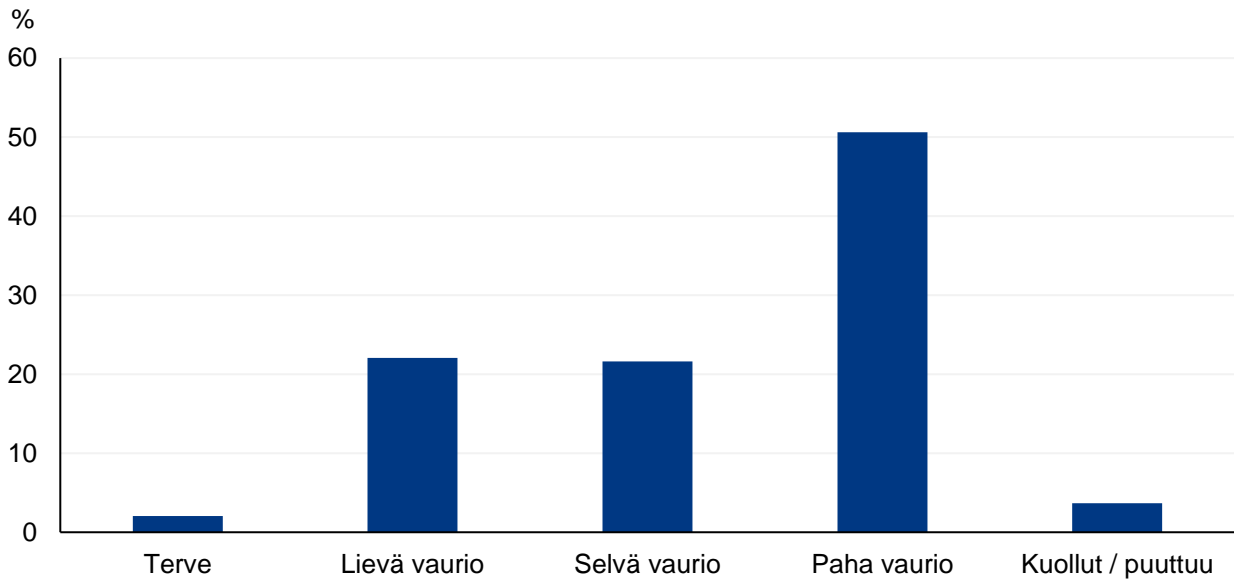
4.1.2 Yleinen vaurioaste

Yleistä vaurioastetta arvioitiin jäkälälajiston lajikoostumuksen ja vaurioituneisuuden perusteella viisiportaisella asteikolla puolen vaurioluokan välein (taulukko 3-6), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Yleinen vaurioaste arvioitiin puukohdasta yksittäisen havaintoalan yleisenä vaurioasteena käytettiin alan puukohtaisten tulosten keskiarvoa.

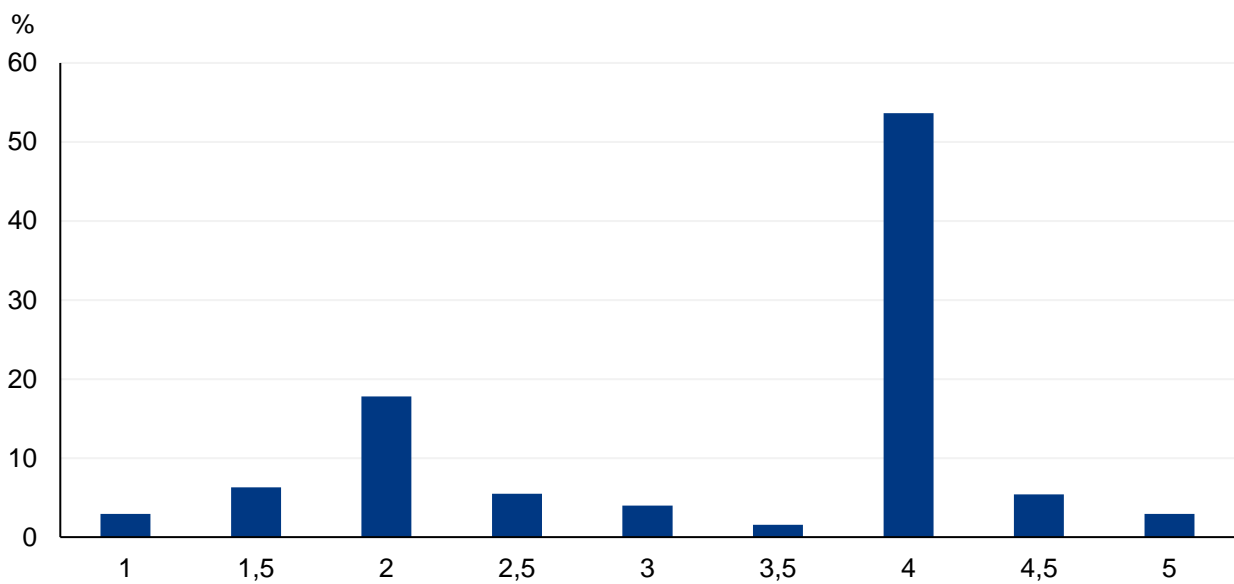
Yleinen vaurioaste oli keskimäärin 3,3, eli tutkimusalueen jäkälälajisto oli keskimäärin selvästi vaurioitunutta. Vaurioasteet vaihtelivat terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (taulukko 4-1). Vaurioiden jakaantumista koko aineistossa tutkittiin luokittelemalla vaurioasteet sekä puu- että havaintoalakohtaisesti (kuvat 4-5 ja 4-6). Jäkälälajisto luokiteltiin pahasti vaurioituneeksi puolella (50,6 %) havaintoaloista (kuva 4-5). Havaintoaloista 21,6 % luokiteltiin jäkälälajistoltaan selvästi vaurioituneeksi ja 22 % lievästi vaurioituneeksi. Jäkälälajisto luokiteltiin muuttumattomaksi 2 %:lla aloista. Jäkäläautiota esiintyi 3,7 %:lla havaintoaloista.

Tutkimuspuukohtaisesti tarkasteltuna jäkälälajisto oli tervettä tai melkein tervettä (vaurioaste 1 tai 1,5) 9,8 %:lla havaintopuista (kuva 4-6). Noin neljäsosa (23,3 %) tutkimuspuista oli jäkälälajistoltaan lievästi vaurioituneita (vaurioaste 2 tai 2,5). Selviä vaurioita (vaurioaste 3 tai 3,5) havaittiin 5,6 %:lla ja pahoja vaurioita (vaurioaste 4 tai 4,5) 59 %:lla puista. Jäkäläautiota esiintyi yhteensä 2,9 %:lla puista oli kuollutta tai puuttui. Normaali- ja kaumasta poikkeava jakauma selittyy yleisen vaurioasteen arviointiperusteella: puun jäkälälajisto luokitellaan pahasti vaurioituneeksi, jos puulla ei kasva pensasmaisia lajeja (luppoja, naavoja tai harmaahankakarvetta), vaikka lehtimäiset lajit olisivatkin vain lievästi tai selvästi vaurioituneita.

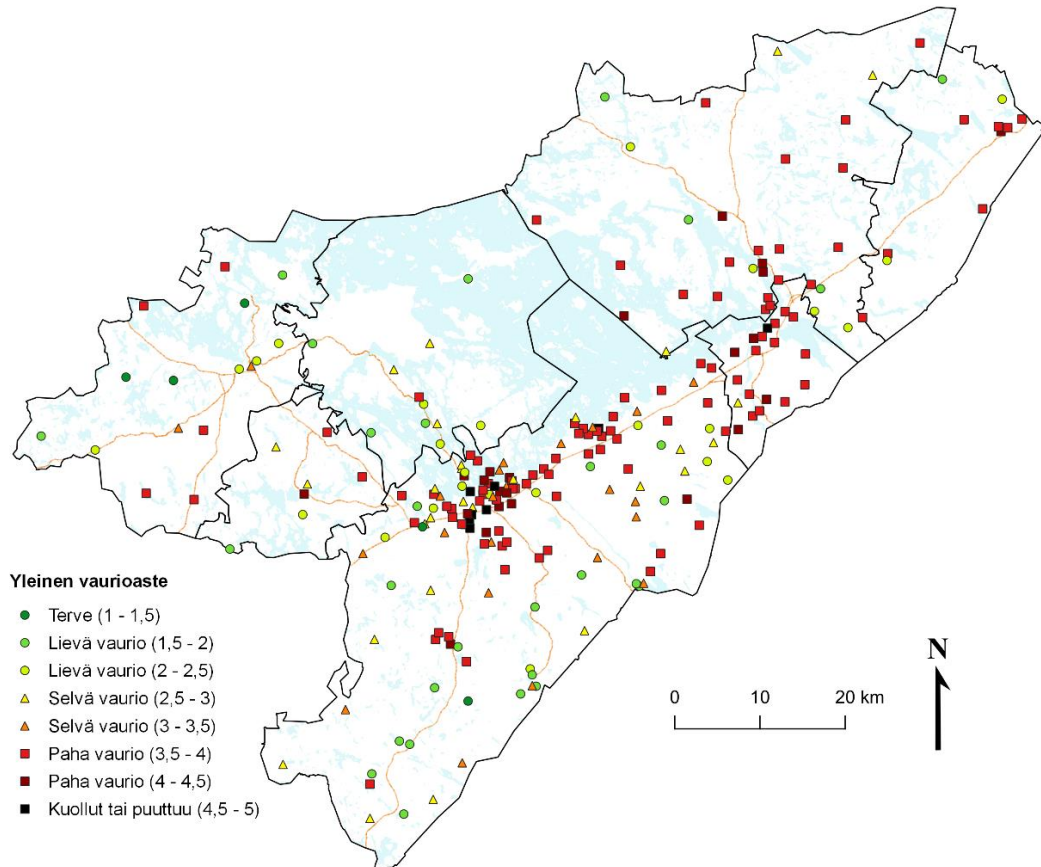
Jäkälälajiston suurimmat vauriot painottuivat pääasiassa samoille alueille kuin sormipaisukarpeen vauriot, mutta jäkälälajiston yleisessä vaurioasteessa pahoja vaurioita esiintyi huomattavasti enemmän johtuen luokitte- luperusteista. Jäkälälajiston pahojen vaurioiden vyöhykkeitä muodostui myös sellaisille alueille, joilla sormi- paisukarpeen vauriot olivat lieviä, kuten Lemille ja Savitaipaleelle. Pienet terveen jäkälälajiston vyöhykkeet muodostuivat Savitaipaleen alueelle (kuva 4-7, kuva 4-8).



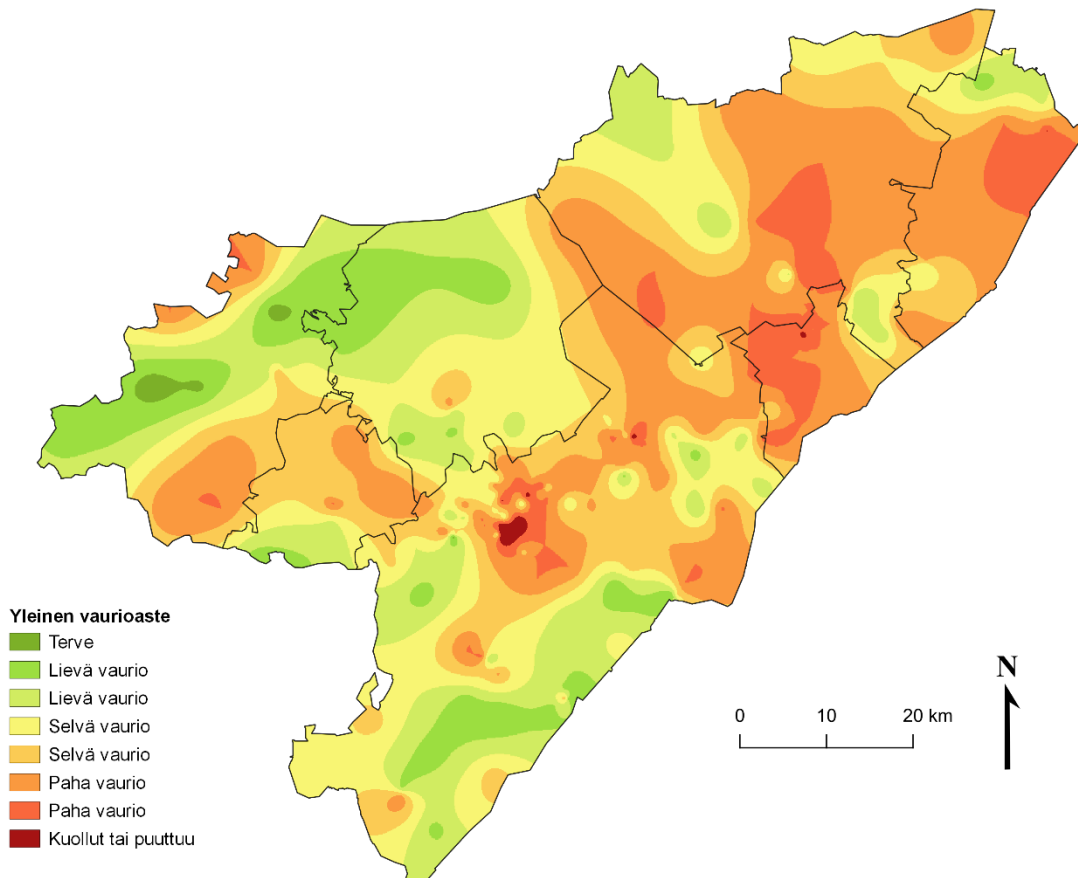
Kuva 4-5. Yleiset vaurioasteet luokiteltuna aloittain vuonna 2022 (n = 245).



Kuva 4-6. Yleiset vaurioasteet luokiteltuna rungoittain vuonna 2022 (n = 1225).



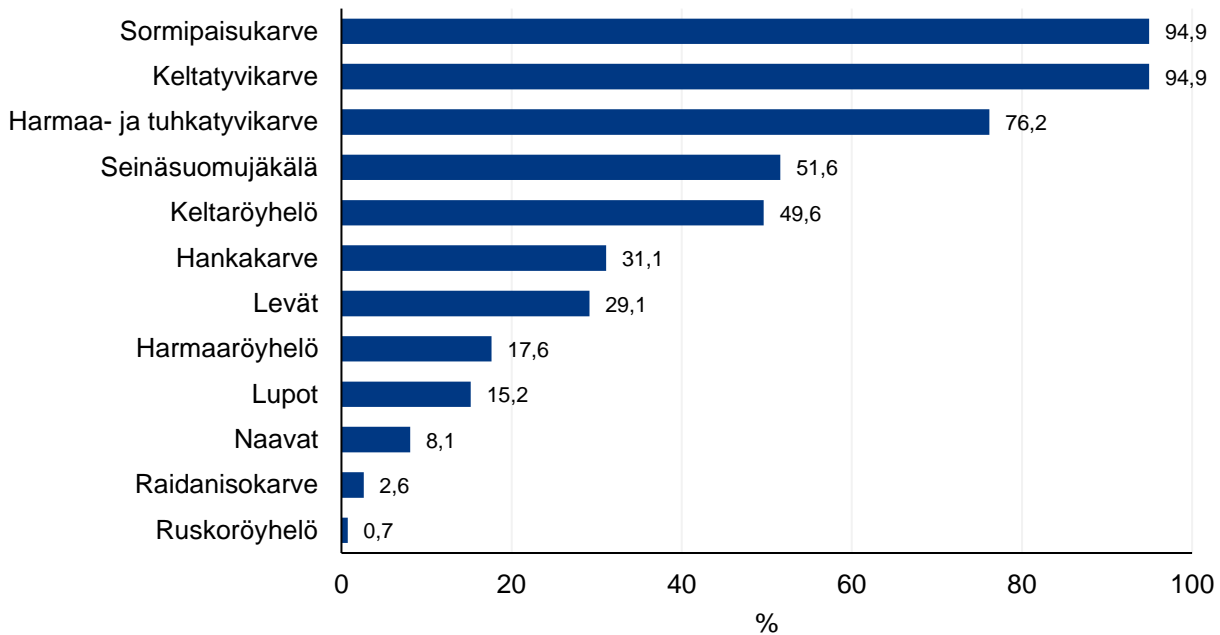
Kuva 4-7. Yleinen vaurioaste havaintoaloilla vuonna 2022.



Kuva 4-8. Yleisen vaurioasteen vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2012.

4.1.3 Jäkälälajien määrät ja yleisyys

Yleisimmät lajit tutkimusalueella olivat sormipaisukarve ja keltatyvikarve, joita esiintyi 95 %:lla tutkimuspuista (kuva 4-9). Myös harmaa- ja tuhkatyvikarvetta kasvoi suurella osalla (76 %) tutkimuspuista. Seinäsuomujäkälää (52 %) ja keltaröyhelöä (50 %) esiintyi lähes puolella tutkimuspuista. Hankakarvetta (31 %) ja viherlevää (29 %) esiintyi lähes kolmanneksella tutkimuspuista. Harmaaröyhelöä esiintyi 18 %:lla puista, luppoja 15 %:lla ja naavaa 8 %:lla puista. Harvinaisimmat lajit olivat raidanisokarve (2,6 %) ja ruskoröyhelö (0,7 %).

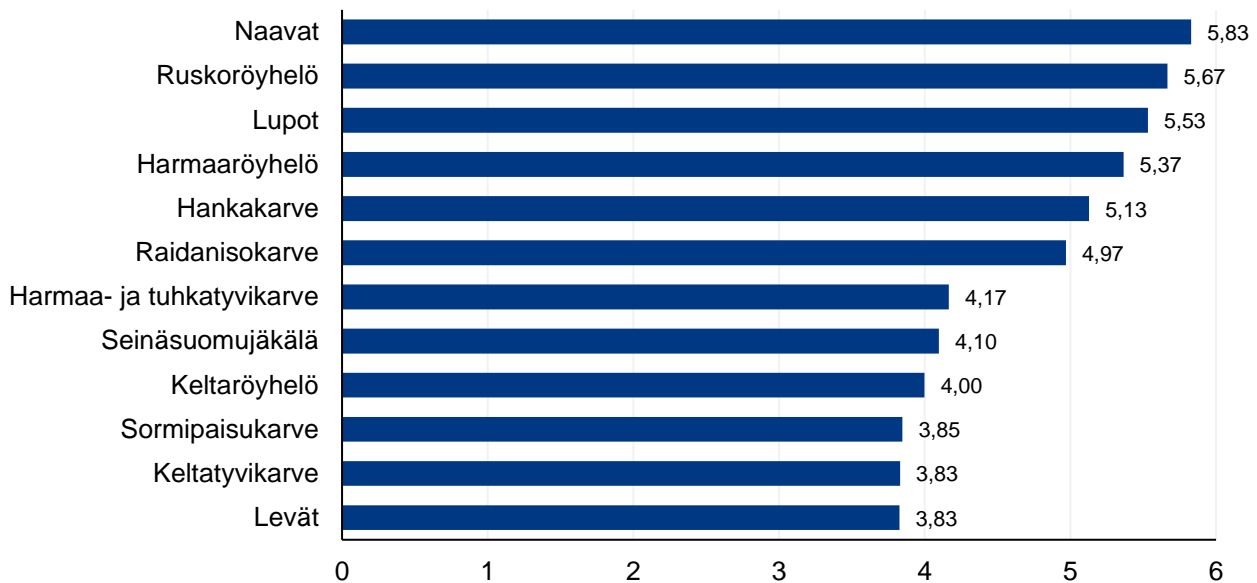


Kuva 4-9. Männyn runkojäkälien esiintymistiheys tutkimusalueella vuonna 2022.

Runkojäkäliden seuralaislajien, eli kyseisen lajin kanssa samalla rungolla esiintyvien muiden lajien määrät, on esitetty kuvassa 4-10. Eniten seuralaislajeja oli tutkimusalueella huomattavasti vähentyneellä naavalla (5,83) sekä tutkimusalueella harvinaisimpana esiintyvällä ruskoröyhelöllä (5,67). Myös lupoilta, harmaaröyhelöllä ja hankakarpeella oli yli viisi seuralaislajia. Havaitut seuralaislajien määrät olivat edellisessä tutkimuksessa havaittuja määriä alhaisempia. Vähiten seuralaislajeja oli levällä, keltatyvikarpeella ja sormipaisukarpeella.

Tutkimuksessa havaitut seuralaislajimäärät noudattavat melko hyvin oletuksia jäkälien herkkyydestä ilman epäpuhtauksille. Eniten seuralaislajeja oli herkillä naavoilla ja lupoilta, sekä tutkimusalueella harvinaisena esiintyvällä ruskoröyhelöllä. Ruskoröyhelön indikaattoriarvo on kuitenkin satunnaisen esiintymisen vuoksi pieni. Seuralaislajien ja yleisyyden puolesta hyviä indikaattorilajeja ovat hankakarve, harmaaröyhelö, lupot ja naavat.

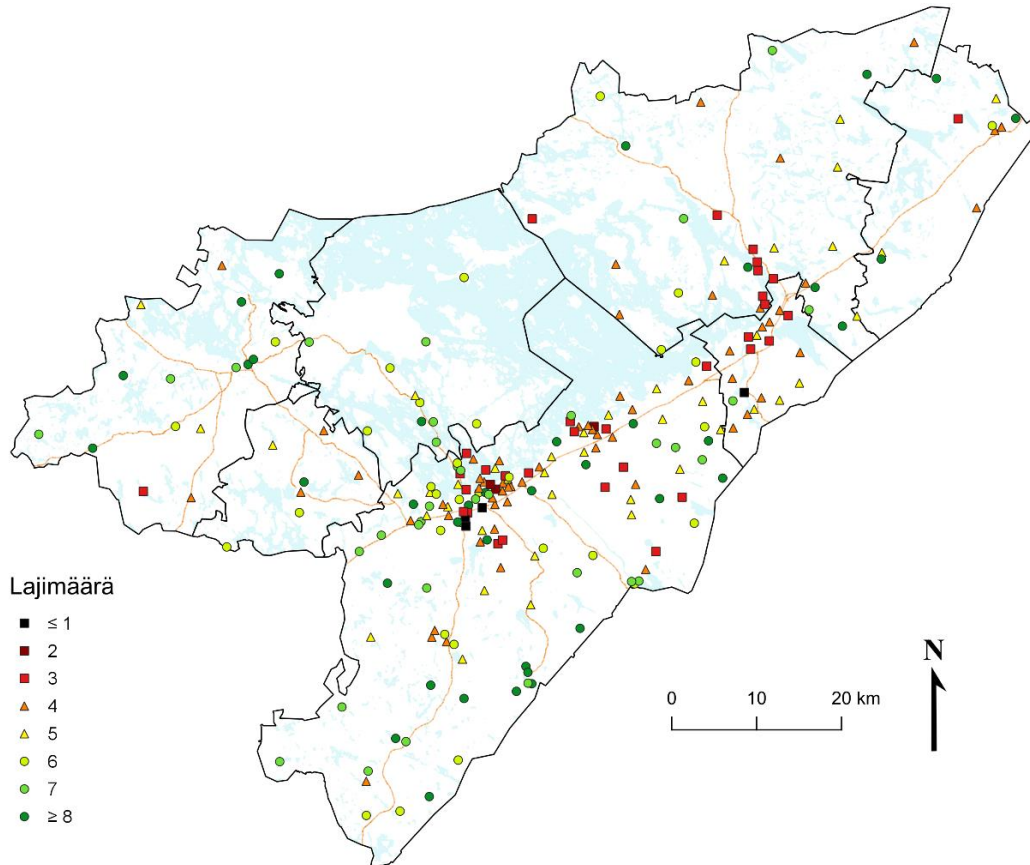
Vähiten seuralaislajeja oli kuormitusta hyvin kestäville lajeille viherlevällä, sormipaisukarpeella ja keltatyvikarpeella. Seinäsuomujäkälä on hyvin kuormitusta kestävä laji, mutta sillä oli muita kestäviä jäkäliä enemmän seuralaislajeja Etelä-Karjalassa. Toisaalta seinäsuomujäkälä viihtyy hyvin myös vanhoilla kilpikaarnoittuvilla männynillä, mikä voi vaikuttaa sen seuralaislajien lukumäärään.



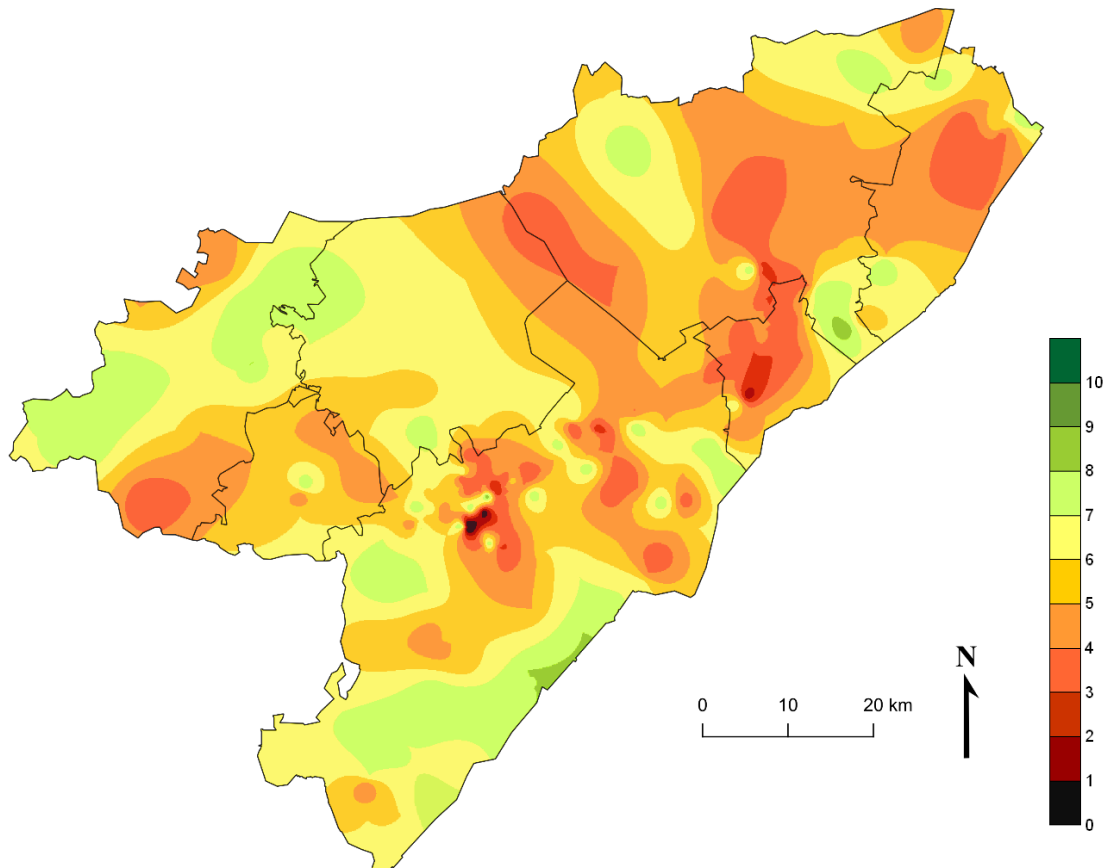
Kuva 4-10. Männyn runkojäkälien seuralaislajien lukumäärät tutkimusalueella vuonna 2022.

Tutkimusalueella havaittiin keskimäärin 5,3 lajia havaintoalaa kohti ja 3,9 lajia havaintopuuta kohti. Keskimäärin tutkimusalueen jäkälälajisto oli siis havaintoalakohtaista lajimäärää tarkasteltaessa lievästi köyhtyneen ja köyhtyneen rajalla ja puukohtaista lajimäärää tarkasteltaessa köyhtyneen ja selvästi köyhtyneen rajalla. Lajimäärän vaihteluväli havaintoaloilla oli 0–9 kpl ja havaintopuilla 0–8 kpl (taulukko 4-1). Kokonaan jäkäläautoita havaintopuuta tutkimusalueella oli 31. Vastaavasti puita, joilla havaittiin 8 ilman epäpuhtauksista kärsivää jäkälälajia, oli 12. Yhdelläkään tutkimusrungolla ei havaittu kaikkia ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja.

Jäkälälajisto oli erittäin selvästi köyhtynyttä (0–1 lajia) kolmella Lappeenrannan keskusta-alueen läheisyydessä sijaitsevalla alalla sekä yhdellä Imatralla sijaitsevalla alalla (kuva 4-11, kuva 4-12). Selvästi köyhtyneitä (2–3 lajia) havaintoaloja oli 35 kappaletta ja ne painottuivat Lappeenrannan ja Imatran ympäristöön sekä Ruokolahden eteläosaan. Suurimmalla osalla havaintoaloista (102 alaa) jäkälälajisto oli köyhtynyttä (4–5 lajia). Köyhtyneet alueet sijoituivat melko tasaisesti koko tutkimusalueelle, painottuen kuitenkin merkittävämpien päästölähteiden läheisyyteen. Jäkälälajistoltaan lievästi köyhtyneitä (6–7 lajia) aloja oli yhteensä 65 kappaletta ja jäkälälajistoltaan luonnontilaisia (≥ 8 lajia) aloja 38 kappaletta. Lajistoltaan monipuolisimmat alueet painottuivat Lappeenrannan eteläosaan ja Savitaipaleelle.



Kuva 4-11. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärät havaintoaloilla vuonna 2022.



Kuva 4-12. Ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lukumäärät vyöhykkeittäin vuonna 2022.

Ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien yleisyydet

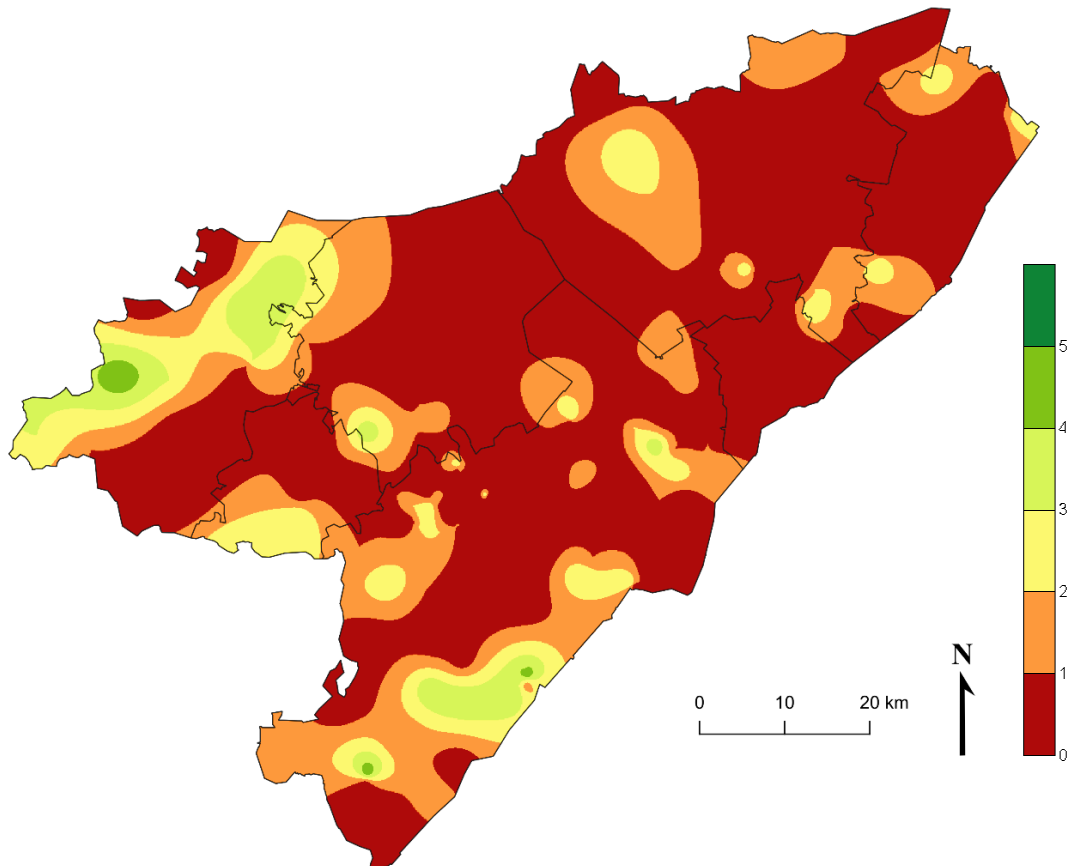
Kuvissa 4-13, 4-14, 4-15 ja 4-16 on esitetty ilman epäpuhtauksista kärsivien lупpojen, naavojen, harmaaröyhelön ja harmaahankakarpeen yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0–5 (0 = lajia ei havaittu tutkimusalalla lainkaan, 5 = lajia havaittiin jokaisella tutkimuspuulla).

Luppoja havaittiin tutkimusalueella 15,2 %:lla puista ja 37 %:lla aloista. Luppoja kasvoi jokaisella tutkimusrungolla ainoastaan 1,2 %:lla aloista. Keskimäärin lупpoja havaittiin havaintoalalla 0,76 puulla. Vyöhykkeet, joilla lупot esiintyivät runsaina, olivat varsin pienialaisia ja sijoituivat Savitaipaleen kunnan alueelle sekä Lappeenrannan eteläosaan. Suurin osa tutkimusalueesta muodostui vyöhykkeistä, joilla lупpoja esiintyi vain yhdellä tutkimusrungolla tai ei lainkaan (kuva 4-13).

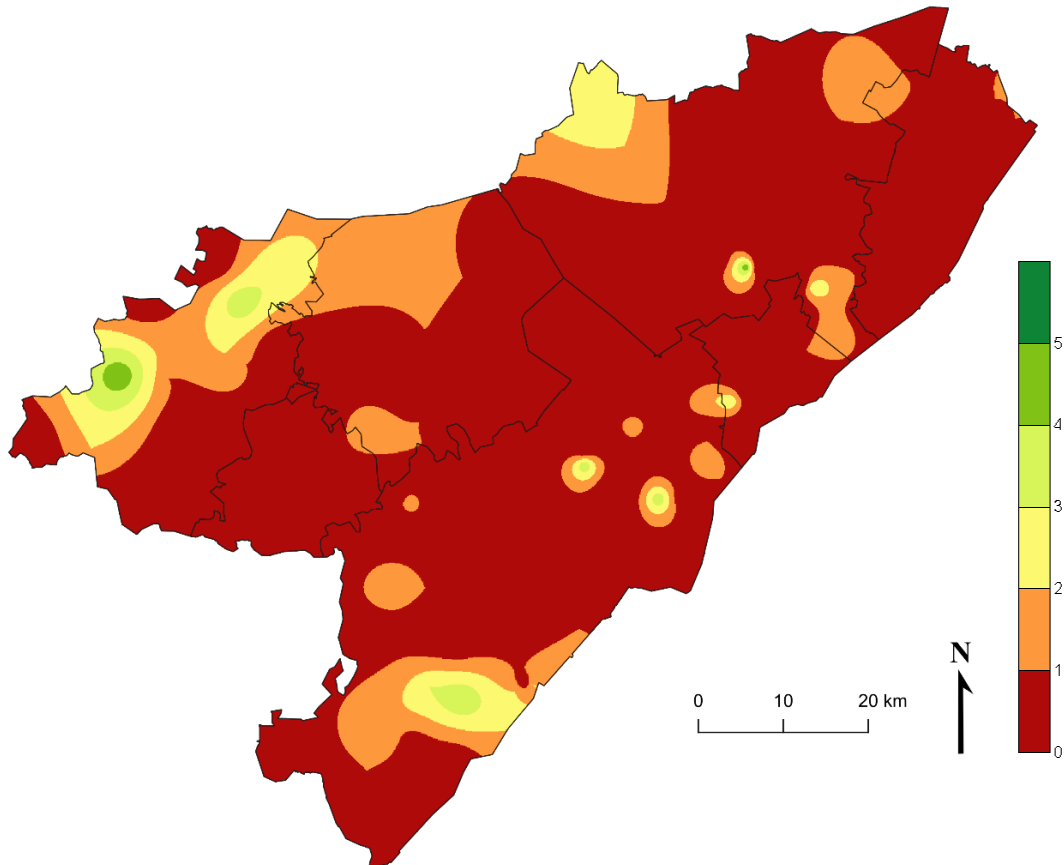
Naavoja havaittiin tutkimusalueella 8,1 %:lla puista ja 21 %:lla aloista. Naavoja kasvoi jokaisella tutkimusrungolla vain 0,8 %:lla havaintoaloista. Keskimäärin naavoja havaittiin 0,4 puulla. Naavat olivat yleisimpiä pienialaisilla alueilla Savitaipaleen kunnan alueella sekä Lappeenrannan eteläosassa. Naavat olivat harvinaisia suurimmalla osalla tutkimusalueesta (kuva 4-14).

Harmaahankakarvetta esiintyi 31 %:lla tutkimuspuista ja 51 %:lla havaintoaloista ja sitä tavattiin tutkimusalueella huomattavasti muita pensasmaisia runkojäkäliä enemmän. Harmaahankakarvetta kasvoi jokaisella tutkimusrungolla yhteensä 13 %:lla aloista. Lajia esiintyi havaintoalalla keskimäärin 1,6 puulla. Harmaahankakarve oli yleisin tutkimusalueen etelä- ja lounaisosissa. Harmaahankakarve esiintyi harvemmin Imatran, Ruokolahden ja Rautjärven alueilla (kuva 4-15).

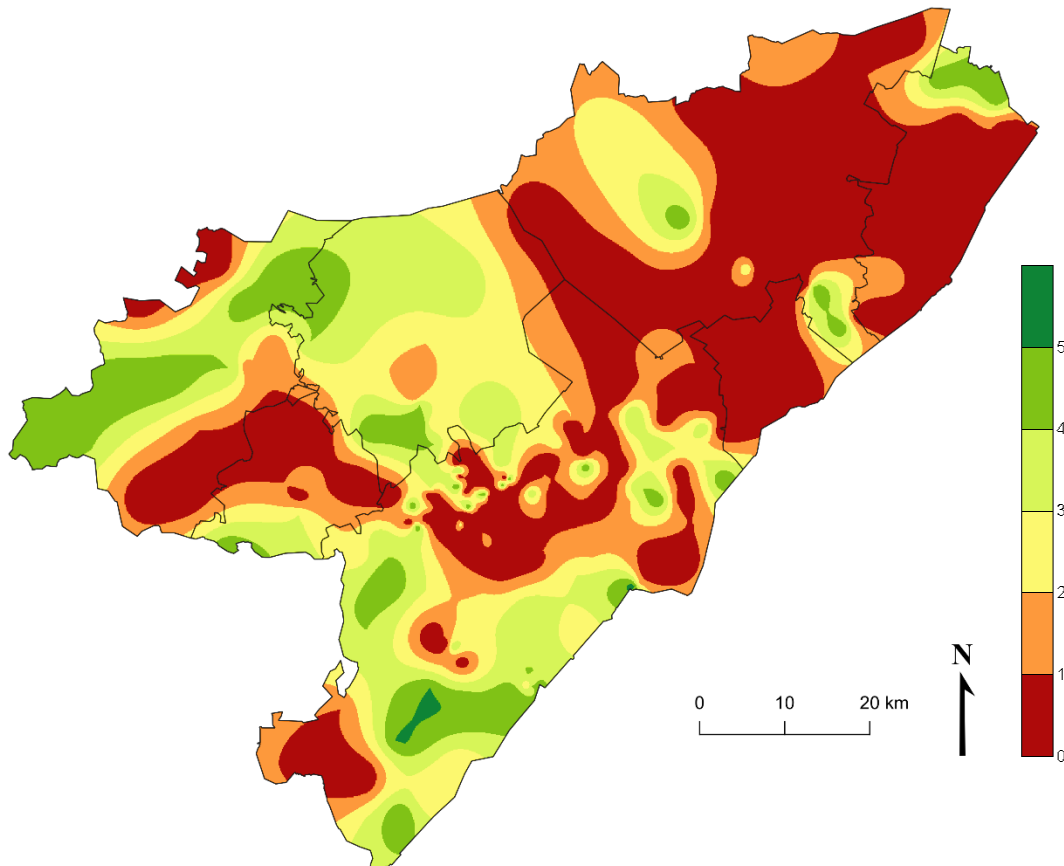
Harmaaröyhelöä havaittiin 17,6 %:lla tutkituista puista ja 40 %:lla aloista. Harmaaröyhelöä esiintyi keskimäärin 0,9 puulla per ala. Lajia tavattiin pääasiassa Lappeenrannan eteläosassa sekä Lemin, Savitaipaleen ja Ruokolahden alueella. Valtaosalla tutkimusalueesta harmaaröyhelöä ei tavattu lainkaan (kuva 4-16).



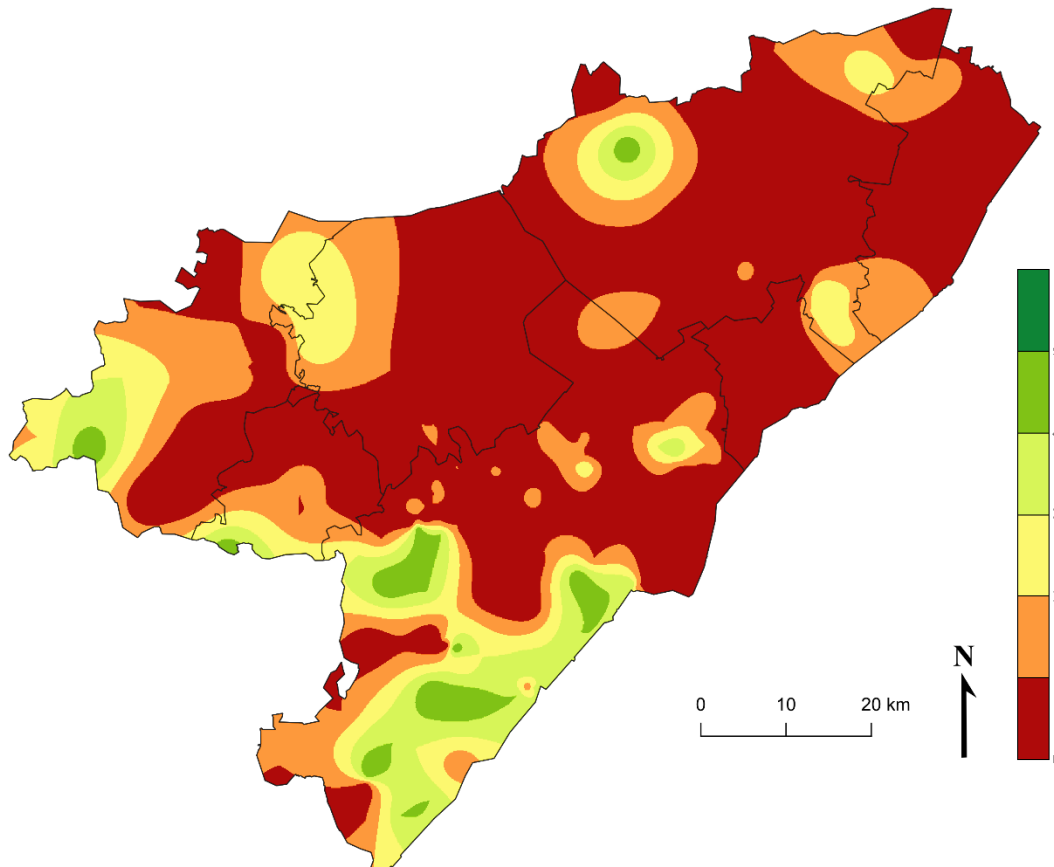
Kuva 4-13. Lупpojen yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.



Kuva 4-14. Naavojen yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.



Kuva 4-15. Harmaahankakarpeen yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.

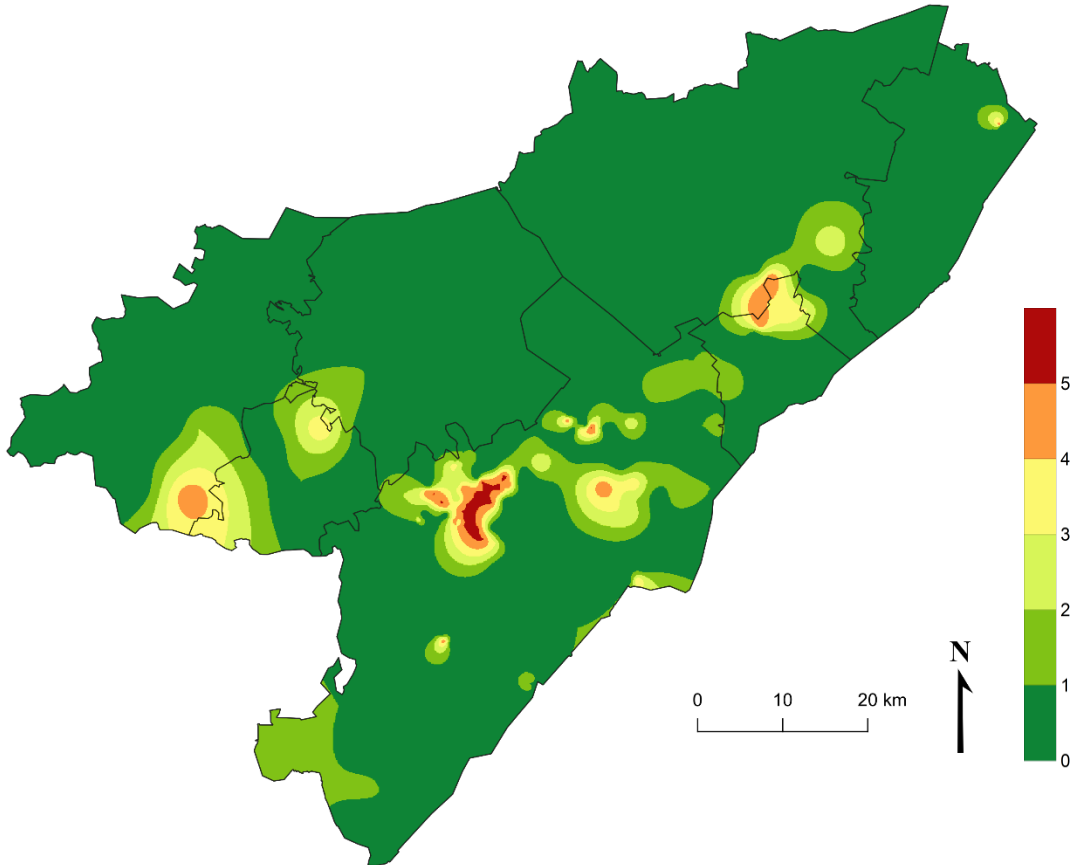


Kuva 4-16. Harmaaröyhelön yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.

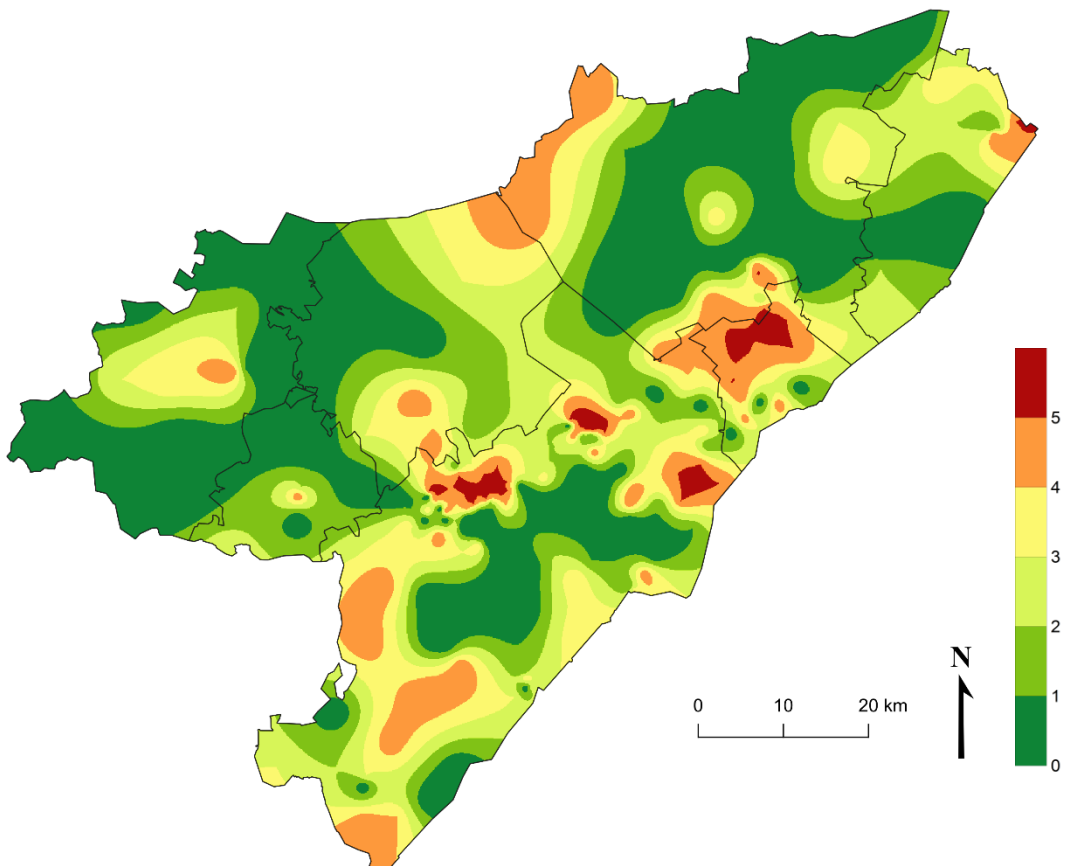
Ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien yleisyydet

Kuvissa 4-17 ja 4-18 on esitetty ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien, viherlevän ja seinäsuomujäkälän, yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0-5. Keskimäärin levää havaittiin 1,5:llä havaintopuulla havaintoalaa kohti ja seinäsuomujäkälää 2,6 havaintopuulla. Levää havaittiin 47 %:lla havaintoaloista ja seinäsuomujäkälää 70 %:lla havaintoaloista.

Levien ja seinäsuomujäkälän levinneisyys oli vastakkaista herkkiin lajeihin verrattuna. Niillä alueilla, joilla herkkät lajit olivat harvalukuisia tai puuttuivat, epäpuhtauksista hyötyvät lajit olivat runsaita. Näitä alueita olivat Rautjärven eteläosasta Imatran, entisen Joutsenon ja Lappeenrannan keskusta-alueen kautta Savitaipaleen eteläosaan ulottuva vyöhyke sekä Rautjärven pohjoisosassa. Seinäsuomujäkälän yleisyys ei vastannut yhtä hyvin alueiden kuormittuneisuutta kuin levän, sillä seinäsuomujäkälää esiintyi myös sellaisilla alueilla, joilla lajisto oli muutenkin monimuotoista.



Kuva 4-17. Viherlevän yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.



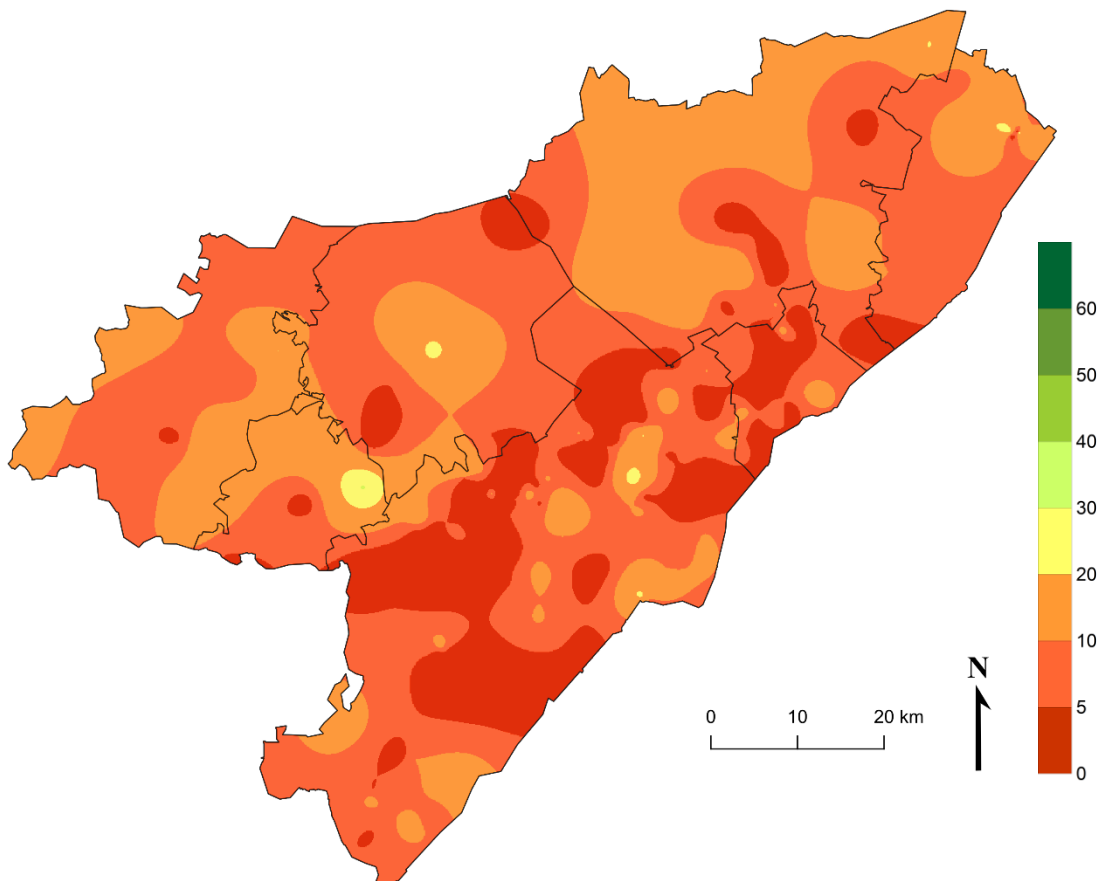
Kuva 4-18. Seinäsuomujäkälän yleisyys vyöhykkeittäin vuonna 2022.

Peittävydet

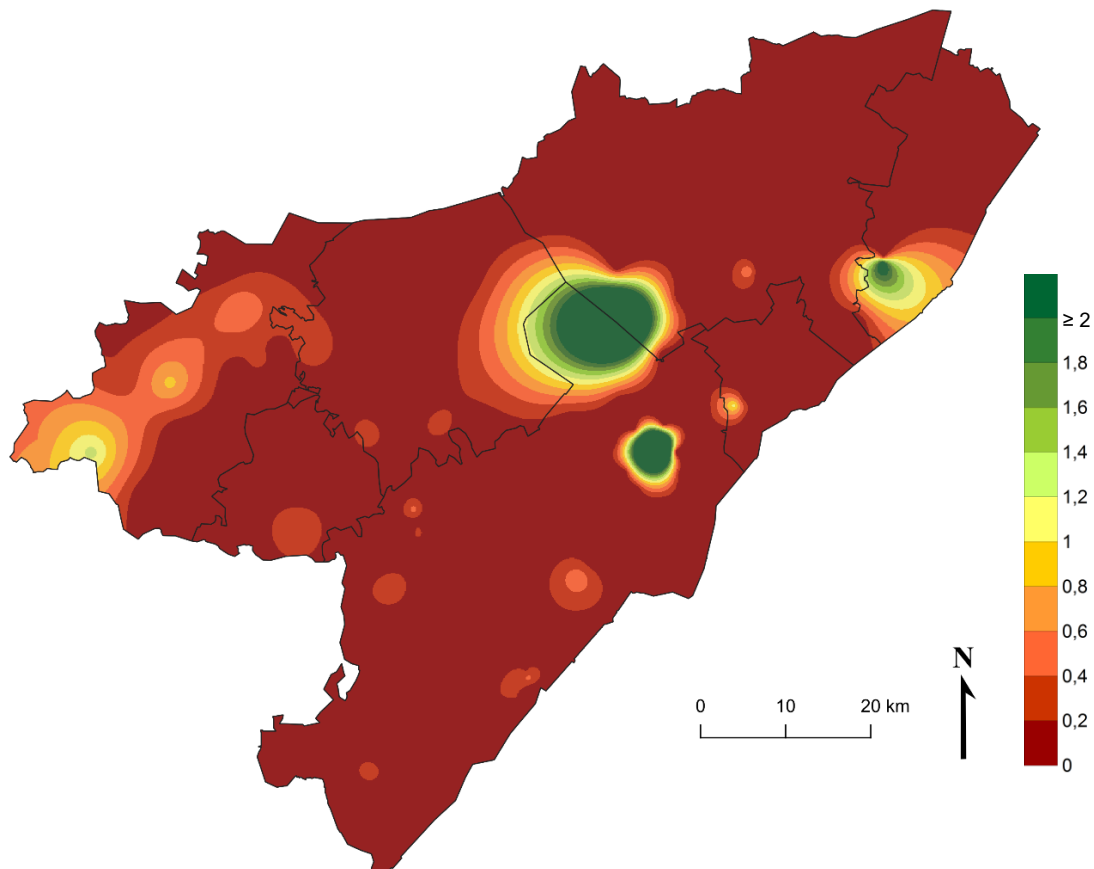
Kuvissa 4-19 ja 4-20 on esitetty sormipaisukarpeen sekä luppojen pistefrekvenssimenetelmällä laskettujen peittävyksien havaintoalakohtaisista keskiarvoista yleistetyt vyöhykkeet. Karttoja tarkasteltaessa on huomioitava, että erityisesti sormipaisukarpeen peittävyys reagoi ilman epäpuhtauksiin epälineaarisesti: lajin peittävyys usein ensin kasvaa epäpuhtauksien vaikutuksesta, ja kuormitustason edelleen kasvaessa peittävyys jälleen pienenee. Lisäksi luontaiset tekijät vaikuttavat peittävyksiin melko voimakkaasti. Sormipaisukarpeen peittävyys on muun muassa usein suurempi nuorissa kuin vanhoissa männiköissä.

Sormipaisukarpeen keskimääräinen peittävyys oli 6,6 % (taulukko 4-1). Sormipaisukarpeen suurimmat peittävydet havaittiin Lemmin itäosassa (kuva 4-19). Peittävydet olivat pääasiassa alhaisimpia Lappeenrannan ja Imatran alueilla. Pääasiassa tutkimusalueen sormipaisukarpeen peittävydet olivat korkeimmillaan 20 %.

Luppojen keskimääräinen peittävyys oli 0,1 % (taulukko 4-1). Lupot esiintyivät runsaina vain yksittäisillä aloilla, ja Lappeenrannan alueen korkeamman peittävyden vyöhykkeet muodostuivat yksittäisten alojen korkeista peittävyysarvoista. Lupot puuttuivat tai niiden peittävyys oli pieni laajoilla alueilla, joilla ilman epäpuhtaudet ovat todennäköisesti vaikuttaneet epäpuhtauksille herkkien luppojen häviämiseen (kuva 4-20). Jos Lappeenrannan alueen poikkeuksellisen korkeat luppojen peittävydet jätettiin huomiotta, tutkimusalueen luppojen peittävyden keskiarvo tippui 0,06 %:iin. Korkeimmat peittävyysarvot mitattiin kahdelta vuonna 2022 vaihtuneelta havaintoalalta.



Kuva 4-19. Sormipaisukarpeen keskimääräinen peittävyys (%) vyöhykkeinä tutkimusalueella vuonna 2022.

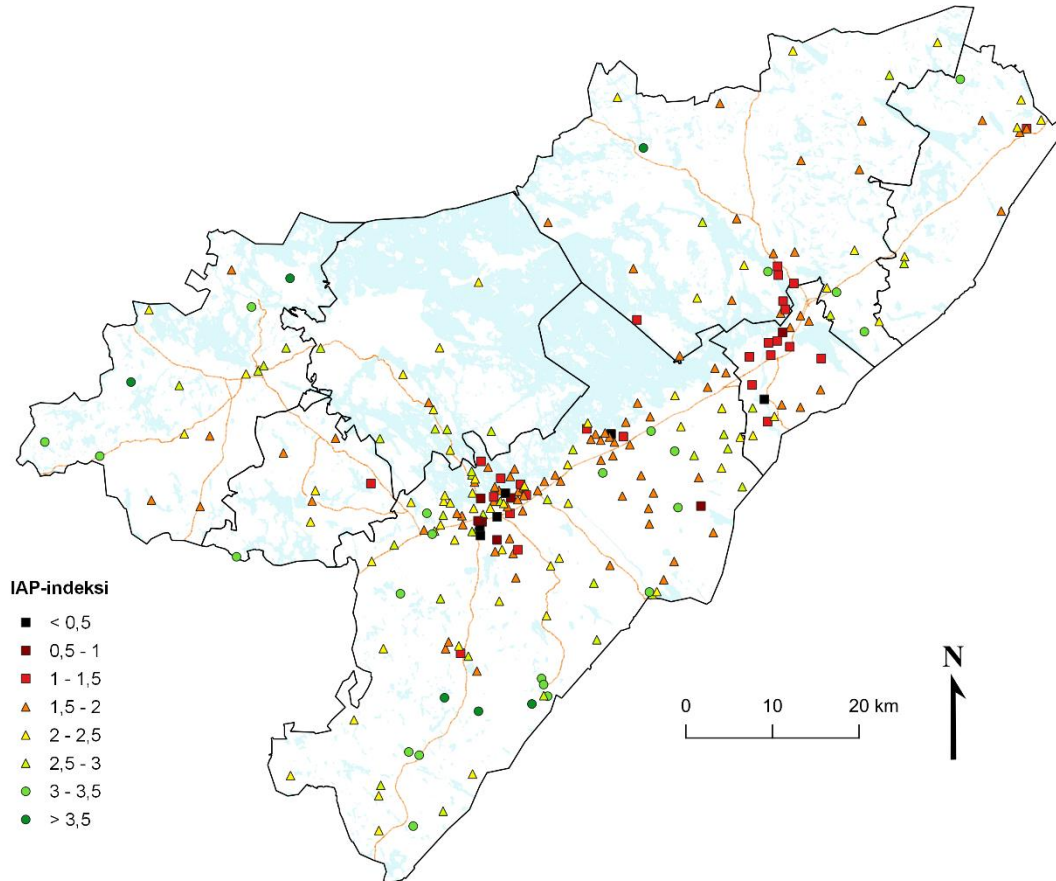


Kuva 4-20. Luppojen keskimääräinen peittävyys (%) vyöhykkeinä tutkimusalueella vuonna 2022.

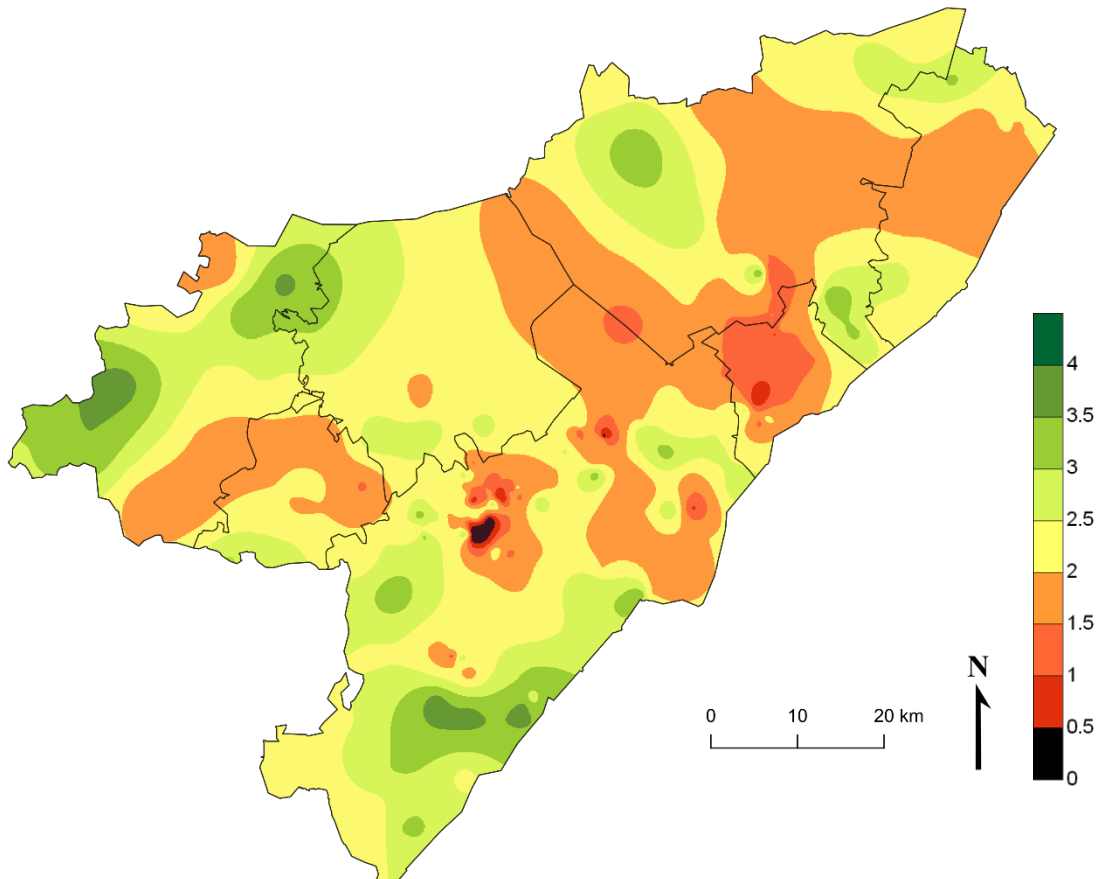
4.1.4 IAP-indeksi

IAP-indeksi oli tutkimusalueella keskimäärin 2,1. Arvon perusteella lajistoa voi kuvailla keskimäärin lievästi muuttuneeksi. Pienin IAP-indeksin arvo oli 0 (jäkäläautio) ja suurin 3,8 (luonnontilainen lajisto) (taulukko 4-1). IAP-indeksin arvon perusteella suurin osa (45 %) tutkimusaloista oli jäkälälajistoltaan köyhtyneitä (kuva 4-23). Toiseksi eniten (38 %) oli lajistoltaan lievästi köyhtyneitä havaintoaloja. Luonnontilaista lajistoa esiintyi 11 %:lla havaintoaloista. Selvästi lajistoltaan köyhtyneitä aloja oli 2,9 % ja jäkäläautioita tai melkein jäkäläautioita yhteensä 2,4 %.

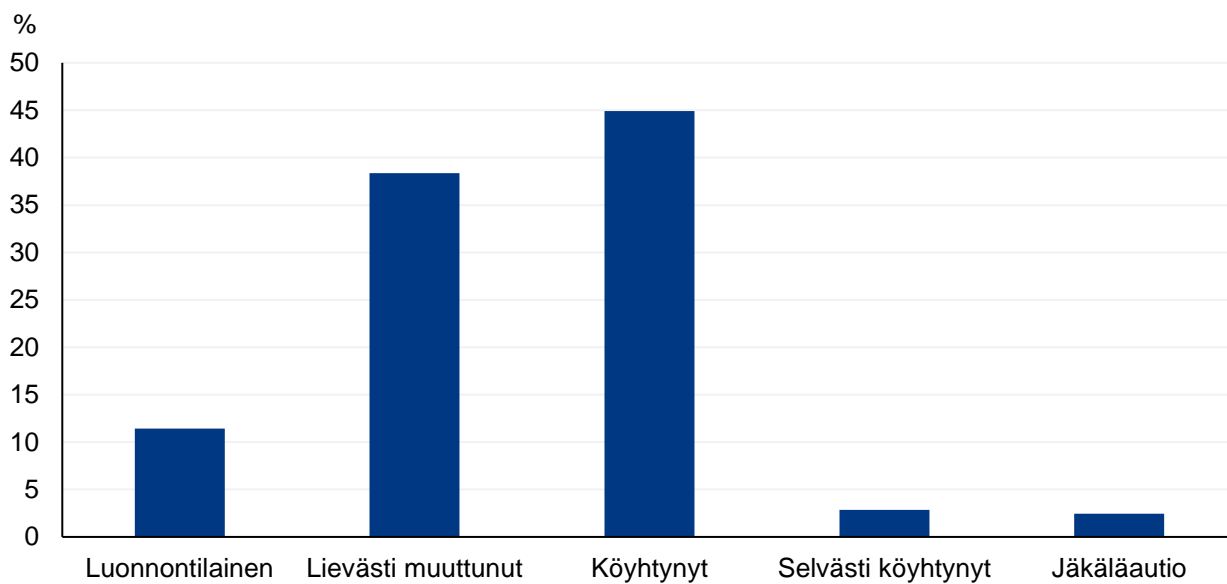
Täysin muuttumatonta jäkälälajistoa (IAP-indeksin arvo > 3) esiintyi pääasiassa Lappeenrannan etelä- ja keskiosissa, Savitaipaleella ja Ruokolahdella (kuva 4-21, kuva 4-22). Lievästi muuttunutta lajistoa (IAP-indeksin arvo 2–3) esiintyi Taipalsaaren, Lappeenrannan ja Savitaipaleen alueella. Lajistoltaan köyhtyneet (IAP-indeksi 1–2) alat sijoittuivat melko tasaisesti koko tutkimusalueelle Lappeenrannan eteläisintä osaa lukuun ottamatta painottuen Lappeenrannan, Imatran ja Ruokolahden eteläosan alueelle. Erittäin selvästi köyhtyneet alat (IAP-indeksi < 1) painottuivat Lappeenrannan keskustan seudulle ja Imatralle. Kuusi Lappeenrannan ja Imatran alueella sijaitsevista aloista olivat jäkäläautioita (IAP-indeksi < 0,5).



Kuva 4-21. IAP-indeksi tutkimusaloilla vuonna 2022.



Kuva 4-21. IAP-indeksi vyöhykkeittäin tutkimusalueella vuonna 2012.



Kuva 4-23. IAP-indeksin jakauma havaintoaloittain vuonna 2022.

5. TULOSTEN TARKASTELU

Saatuja tuloksia ja niihin vaikuttaneita tekijöitä tarkasteltiin muuttujakohtaisesti tilastollisten menetelmien avulla. Taustamuuttujina käytettiin paitsi havaintoalalta kirjattuja puusto- ja metsikkötunnuksia, myös päästö-tietoja. Taustamuuttujien vaikutuksia tarkasteltiin regressioanalyysin, varianssianalyysin sekä korrelaatiotes-tien avulla. Lisäksi tarkasteltiin eri jäkälämuuttujien välisiä riippuvuuksia.

Taustamuuttujina käytettiin seuraavia muuttujia:

- havaintoalan soveltuvuus (luokiteltu muuttuja asteikolla hyvä – kohtalainen – huono)
- metsätyyppi (luokiteltu muuttuja)
- kehitysluokka (luokiteltu muuttuja asteikolla nuori – varttunut – kypsä)
- ikä (havaintopuiden arvioitu keskimääräinen ikä)
- pituus (metsikön valtapuiden arvioitu keskipituus)
- puuston pohjapinta-ala
- havaintopuiden rinnankorkeuden ympärysmitta
- havaintoalan etäisyys lähimmästä päästölähteestä
- lähimmän ilmoitusvelvollisen laitoksen rikkidioksidi-, typen oksidi- ja hiukkaspäästöt

5.1 Taustamuuttujien vaikutus

Taustamuuttujat ovat muuttujia, jotka eivät itsessään kuvaa ilmanlaatua, mutta saattavat vaikuttaa ilmanlaadusta kertoviin muuttujiin. Taustamuuttujia ovat esimerkiksi metsätyyppi, puiden ikä, puiden läpimitta, metsän kehitysaste sekä puuston pohjapinta-ala. Nämä muuttujat havainnoidaan kaikilta näytealoilta. Taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin tutkittiin Kruskal-Wallisn varianssianalyysillä. Taustamuuttujilla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus useisiin indikaattorimuuttujiin (taulukko 5-1).

Metsikön soveltuvuus vaikutti kaikkiin ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin, paitsi sormipaisukarpeen peittävyys-teen. Metsikön soveltuvuutta jäkäläkartoitukseen arvioidaan sen perusteella, kuinka hyvät kasvuolosuhteet metsikössä on päälysjäkäliden kannalta. Jäkäliden kasvuolosuhteita huonontavat muun muassa liika varjoisuus, paahteisuus tai epäsuotuisat mikroilmastolliset tekijät. Kasvuolosuhteita voidaan arvioida puuston iän, puula-jisuhteiden, metsätyyppin, puuston pohjapinta-alan sekä puiden pituuden perusteella. Havaintoalan soveltu-vuus on havainnoijan subjektiivinen arvio siitä, kuinka paljon nämä tekijät vaikuttavat jäkäliden kasvuolosuhteisiin. Soveltuvuudeltaan hyväksi luokitellussa metsikössä vaikutus oletetaan vähäiseksi, soveltuvuudeltaan kohtalaisessa metsikössä taustamuuttujilla on havaittavaa vaikutusta jäkäliin, ja soveltuvuudeltaan huonossa metsikössä taustamuuttujien vaikutus on suuri. Ilmanpuhtausindeksin arvot ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkäliden lajilukumäärät olivat suurempia soveltuvuudeltaan hyväksi luokitelluissa metsiköissä kuin soveltuvuu-deltaan kohtalaiseksi tai huonoksi luokitelluissa metsiköissä. Lisäksi ilmapuhtausindeksi oli suurempi soveltu-vuudeltaan kohtalaisissa metsiköissä kuin soveltuvuudeltaan huonoissa metsiköissä. Myös luppojen peittä-vyys ja yleisyys olivat suurempia soveltuvuudeltaan hyväksi luokitelluissa metsiköissä verrattuna soveltuvuu-deltaan kohtalaiseksi luokiteltuihin metsiin. Jäkäliden yleinen vaurioaste ja sormipaisukarpeen vaurioaste olivat suurimmillaan soveltuvuudeltaan huonoissa metsiköissä, ja suurempia soveltuvuudeltaan kohtalaisissa kuin hyvissä metsiköissä. Levä oli yleisempää soveltuvuudeltaan huonoiksi ja kohtalaiseksi luokitelluissa metsi-köissä kuin soveltuvuudeltaan hyväksi luokitelluissa metsiköissä.

Metsätyyppillä oli vaikutusta jokaiseen tutkittuun muuttujaan paitsi sormipaisukarpeen peittävyys-teen. Suurim-mat ilmanpuhtausindeksiarvot ja lajimäärät olivat karukkokankailla (CIT), kuivilla kankailla (CT) sekä kuivah-koilla kankailla (VT). Pienin ilmanpuhtausindeksi ja lajimäärä olivat lehtomaisilla kankailla (OMT). Yleinen vau-rioaste ja levän yleisyys olivat suurimmat OMT-tyypin metsiköissä ja pienimmät CIT-, CT- ja VT-tyypin metsi-köissä. Lupot olivat yleisimpiä ja peittävyydeltään runsaimpia kuivahkoilla kankailla (VT). Rehevämmissä met-sätyypeissä, kuten lehtomaisilla kankailla (OMT) ja tuoreilla kankailla (MT), on sulkeutuneempi latvuseros ja

enemmän kasvillisuutta pensaskeroksessa. Näiden aiheuttama varjostus voi heikentää jäkälän elinmahdollisuuksia sekä pienentää IAP-indeksin arvoa ja lajilukumäärää. Vastaavasti varjostus voi myös lisätä jäkälän vaurioita.

IAP-indeksin arvot ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälän lajimäärä olivat pääsääntöisesti pienempiä, vaurioasteet olivat suurempia ja levä yleisempää luokan "muu" metsätyypeissä verrattuna muihin tarkemmin määriteltyihin metsätyyppeihin. Nämä voivat selittyä sillä, että luokka sisältää muun muassa taajamien puistometsiköt, joihin kohdistuu enemmän ilman epäpuhtauksien vaikutuksia. Lisäksi luokkaan "muu" kuuluu bioindikaattoritutkimukseen ylipäättänsä huonosti soveltuvia kasvillisuustyyppejä, kuten soistuneita ja reheviä metsätyyppejä.

Tutkimusmetsän kehitysluokalla oli tilastollisesti merkitsevää vaikutusta sormipaisukarpeen vaurioasteeseen ja peittävyteen sekä levän yleisyyteen. Sormipaisukarpeen peittävyys oli suurin nuorissa ja varttuneissa metsiköissä. Kypsissä metsiköissä peittävyys oli pienintä. Sormipaisukarpeen vaurioaste oli suurin kypsissä metsiköissä ja pienin nuorissa metsiköissä. Sormipaisukarve kasvaa usein runsaana nuorehkojen mäntyjen rungoilla, mutta sen peittävyys pienenee puun iän ja ympärysmitan kasvaessa. Etenkin kilpikaarنوittuvien vanhojen mäntyjen rungot ovat sormipaisukarpeelle melko huono kasvualusta nuorempiin mäntyihin verrattuna. Levä oli yleisintä kypsissä metsiköissä, mikä selittyy puisto- ja taajama-alueiden iäkkäillä puilla.

Taulukko 5-1. Taustamuuttujien suhteen tarkasteltujen ilmanlaatua kuvaavien muuttujien tilastollisten analyysien testisuureet ja niiden merkitsevyydet (p). Melkein merkitsevä (p < 0,05) testitulokset on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä (p < 0,01) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä (p < 0,001) kolmella (***).

Tarkasteltu muuttuja	Soveltuvuus			Metsätyyppi			Kehitysluokka		
	Testisuure	p		Testisuure	p		Testisuure	p	
Sormipaisukarpeen vaurioaste	25,8	2,47E-06	***	34,6	1,80E-06	***	16,5	0,00026	***
Yleinen vaurioaste	41,5	9,71E-10	***	75,3	7,89E-15	***	1,2	5,56E-01	
Lajimäärä	27,2	1,22E-06	***	68,8	1,80E-13	***	0,1	9,39E-01	
Ilmanpuhtausindeksi	35,9	1,63E-08	***	75,0	9,28E-15	***	1,4	4,88E-01	
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	7,2	0,027	*	14,4	0,013	*	20,5	3,55E-05	***
Luppojen peittävyys (%)	20,1	4,25E-05	***	22,6	0,00040	***	1,2	0,55	
Levän yleisyys	38,8	3,71E-09	***	45,4	1,20E-08	***	22,7	1,18E-05	***
Luppojen yleisyys	26,6	1,69E-06	***	58,9	0,000	***	1,8	0,40	

Jatkuvien taustamuuttujien ja tutkittujen muuttujien välisiä korrelaatioita on tarkasteltu taulukossa 5-2.

Havaintoalan etäisyys lähimmästä päästölähteestä korreloi useiden ilmanlaatua kuvaavien muuttujien kanssa. Ilmanpuhtausindeksi, ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälän lajilukumäärä ja luppojen ja sormipaisukarpeen peittävyys kasvoivat, kun etäisyys lähimpään päästölähteeseen kasvoi. Vastaavasti sormipaisukarpeen vaurioaste ja yleinen vaurioaste olivat suurimmillaan lähellä päästölähdettä. Myös levä yleistyi etäisyyden pienessä päästölähteeseen. Tutkimuspuiden läpimitan sekä puiden iän ja etäisyyden päästölähteestä välillä havaittiin negatiivinen riippuvuus: etäisyyden kasvaessa tutkimuspuiden läpimitta pieneni ja puut olivat nuorempia. Tutkimusalueen merkittävimmät päästölähteet sijaitsevat taajama-alueella, joilla tutkimusmännyt ovat usein puistometsien iäkkäitä ja läpimitaltaan suuria puita.

Puiden iän ja sormipaisukarpeen peittävyden välillä oli erittäin merkitsevä korrelaatio: mitä vanhempia tutkimuspuut olivat, sitä pienempi oli sormipaisukarpeen peittävyys. Sormipaisukarpeen peittävyden ja puuston iän osalta havaittu korrelaatio tukee tilastollisesti merkitsevää vaikutusta, jossa sormipaisukarpeen peittävyys oli suurempi varttuneissa kuin kypsissä metsissä. Levämäärä ei korreloinut merkitsevästi iän kanssa, vaikka korrelaatio on havaittavissa puun ympärysmitan kanssa. Tämä voi johtua siitä, että puiden ikää arvioitiin silmämääräisesti ja kun puut sijaitsevat maantieteellisesti samalla alueella, voi ympärysmitta olla parempi mittari ille kuin silmämääräinen arviointi.

Puiden ympärysmitan kasvaessa sormipaisukarpeen vaurioaste ja levämäärä kasvoivat. Sormipaisukarpeen peittävyys taas väheni puiden ympärysmitan kasvaessa. Tähän voi vaikuttaa erittäin iäkkäiden puiden sijoittuminen taajamien puistomaisiin metsiin, joissa myös lajisto voi olla köyhtyneempää ja vauriot suurempia kuin muilla aloilla. Samoin paksujen ja kilpikaarnoittuvien mäntyjen rungot ovat huono kasvualusta etenkin sormipaisukarpeelle.

Taulukko 5-2. Tutkittujen muuttujien ja jatkuvien taustamuuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Välillä -0,3–0,3 korrelaatioita ei yleisesti katsota merkitykselliseksi.

Muuttuja	Etäisyys päästölähteestä	Pohjapinta-ala	Puiden ikä	Puiden pituus	Puiden halkaisija
Etäisyys päästölähteestä	1				
Pohjapinta-ala	-0,025	1			
Puiden ikä	-0,311	0,027	1		
Puiden pituus	-0,109	-0,008	0,329	1	
Puiden halkaisija	-0,427	-0,003	0,837	0,408	1
Sormipaisukarpeen vaurioaste	-0,601	-0,172	0,397	0,095	0,427
Yleinen vaurioaste	-0,488	-0,159	0,140	0,191	0,206
Lajimäärä	0,417	0,138	-0,181	-0,184	-0,217
Ilmanpuhtausindeksi	0,466	0,103	-0,254	-0,201	-0,290
Sormipaisukarpeen peittävyys	0,385	0,116	-0,438	-0,063	-0,402
Luppojen peittävyys	0,316	0,093	-0,104	-0,070	-0,160
Levän yleisyys	-0,467	0,164	0,249	-0,015	0,337

5.2 Tutkittujen muuttujien välinen riippuvuus

Useiden ilmanlaatua kuvaavien jäkälämuuttujien välillä havaittiin tilastollisesti merkitseviä riippuvuuksia (taulukko 5-3). Ilmanpuhtausindeksi, ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lukumäärä ja luppojen yleisyys korreloivat negatiivisesti sormipaisukarpeen vaurioasteen ja yleisen vaurioasteen kanssa, eli vaurioasteiden kasvaessa (heikentyessä) ilmanpuhtausindeksin arvo ja ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lukumäärä heikkenivät ja lupot harvinaistuivat.

Luppojen peittävyys ja yleisyys korreloivat keskenään. Luppojen peittävyys ja yleisyys korreloivat positiivisesti ilmanpuhtausindeksin ja lajimäärän kanssa, eli luppojen peittävyys ja yleisyys kasvoivat ilmanpuhtausindeksin ja lajilukumäärän kasvaessa. Ilmanpuhtausindeksin, ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lajilukumäärän ja luppojen peittävyyden sekä yleisyyden väliset positiiviset korrelaatiot olivat odotettuja, sillä ne kaikki ovat ilman epäpuhtauksien negatiivisia indikaattoreita eli niiden arvojen oletetaan olevan sitä suurempia mitä puhtaampaa ilma on.

Yleinen vaurioaste korreloi sormipaisukarpeen vaurioasteen ja levän yleisyyden kanssa. Koska levä on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori, on odotettavaa, että levän yleistyessä myös jäkälien vauriot ovat suurempia. Yleinen vaurioaste huomioi erikseen lehti- ja pensasmaisten lajien esiintymisen, joten havaintopuulla havaittujen jäkälien lajimäärä vaikuttaa sen vaurioluokitukseen. Toisaalta vaurioluokitukseen vaikuttaa myös sormipaisukarpeen vaurioaste.

Taulukko 5-3. Muuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Välillä -0,3–0,3 korrelaatioita ei yleisesti katsota merkitykselliseksi.

	Hyp. phy. vaurioaste	Yleinen vaurioaste	Lajimäärä	IAP-indeksi	Hyp. phy. peittävyys	Luppojen peittävyys	Levän yleisyys	Luppojen yleisyys
Hyp. phy. vaurioaste	1							
Yleinen vaurioaste	0,418	1						
Lajimäärä	-0,328	-0,841	1					
IAP-indeksi	-0,417	-0,871	0,911	1				
Hyp. phy. peittävyys	-0,583	-0,237	0,220	0,309	1			
Luppojen peittävyys	-0,274	-0,447	0,396	0,448	0,091	1		
Levän yleisyys	0,376	0,280	-0,209	-0,276	-0,237	-0,240	1	
Luppojen yleisyys	-0,302	-0,733	0,751	0,735	0,116	0,535	-0,188	1

5.3 Regressioanalyysit

Regressioanalyysin avulla tutkittiin taustamuuttujien vaikutusta seitsemään muuttuajaan, joiden oletetaan kuvaavan ilmanlaatua: IAP-indeksiin, ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lajilukumäärään, yleiseen vaurioasteeseen, sormipaisukarpeen vaurioasteeseen, sormipaisukarpeen peittävyysasteeseen, luppojen yleisyyteen ja levän yleisyyteen. Myös luppojen peittävyydelle tehtiin regressioanalyysi, mutta analyysit eivät osoittaneet, että tehtaisten läheisyydellä olisi tilastollista merkityksellisyyttä luppojen peittävyysasteeseen. Regressioanalyysissä hyödynnettiin ilmanlaatatietoina etäisyyttä lähimpään luppavelvolliseen laitokseen sekä tämän laitoksen rikkidioksidi-, hiukkas- ja typen oksidien päästöjä (ks. luku 2.2.1). Lähimmän luppavelvollisen laitoksen etäisyyden ja päästö- ja hiukkasmäärien suhteen esimerkiksi vallitsevia tuulensuuntia tai muita päästöjen leviämisolosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä ei tarkasteluissa otettu huomioon. Selittävinä havaintoalaa kuvaavina taustamuuttujina mallissa käytettiin havaintoalan puuston keskimääräistä ikää, pituutta, pohjapinta-alaa ja läpimittaa.

Taulukoissa esiintyvä arvio (regressiokerroin) kertoo selitettävän muuttujan riippuvuutta selittävästä muuttujasta eli se kuvaa selitettävän muuttujan muutoksen vaikutuksen suuruutta selitettävän muuttujan arvoihin. Vakion etumerkki kertoo riippuvuuden suunnan. Keskvirhe kertoo regressiokertoimen luottavuudesta. Näiden kertoimien avulla voidaan vertailla eri muuttujien keskinäistä tärkeyttä tarkasteltavan muuttujan selittäjinä. Testisuure t:n ja p-arvon avulla voidaan tarkastella regressiomalliin kuuluvien termien tilastollista merkitsevyyttä.

Saadut tulokset osoittavat, että jäkälämuuttujien ja päästölähteiden välillä on malliin sisältyvistä epävarmuustekijöistä ja rajoitteista huolimatta melko selvä yhteys. Selitysasteet olivat kuitenkin melko pieniä kaikkien tutkittujen muuttujien suhteen, mikä kertoo lähinnä siitä, että malleissa eivät todennäköisesti olleet mukana kaikki selitettäviin muuttujiin vaikuttavat tekijät. Esimerkiksi laajempien ja yksityiskohtaisempien päästö- ja ilmanlaatumuuttujien mukaan ottaminen analyysiin selittäviksi muuttujiksi olisi todennäköisesti nostanut regressiomallien selitysasteita. Myöskään liikenteen päästöjen vaikutuksia ei tässä erikseen tilastollisesti tarkasteltu, mikä todennäköisesti vaikuttaa saatuihin selitysasteisiin. Seuraavassa regressioanalyysin tuloksia käsitellään yksityiskohtaisemmin muuttujakohtaisesti.

5.3.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste

Sormipaisukarve on ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa keskeinen laji, joka ilmentää ilman epäpuhtauksien kuormitusta sekä ulkomuodollaan että runsaudellaan. Sormipaisukarve on hyvin yleinen laji, joka puuttuu ainoastaan kaikkein kuormitetuimmilta alueilta, ja bioindikaattoritutkimukseen soveltuvilla aloilla vain harvoin luontaisten tekijöiden vaikutuksesta.

Neljän selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 37,7 % sormipaisukarpeen vaurioasteen vaihtelusta. Suurimman osan sormipaisukarpeen vaihtelusta selitti etäisyys päästölähteestä (25,9 %). Puuston ikä ja vallitsevan lajiston pohjan pinta-ala selittivät 8,2 % ja 2,4 % vaurioasteen vaihtelusta. Sormipaisukarpeen vaurioaste oli sitä suurempi mitä lähempänä päästölähdettä havaintoala sijaitti. Regressiomallin mukaan puuston iän kasvaessa sormipaisukarpeen vaurioasteet kasvoivat, mutta vallitsevan puuston pohjapinta-alan kasvaessa vaurioasteet pienenevät (taulukko 5-4.)

Etäisyys lähimpään päästölähteeseen selitti melko suuren osan sormipaisukarpeen vaurioasteessa havaitusta vaihtelusta. Tämä vahvistaa käsitystä siitä, että sormipaisukarpeen vaurioaste on hyvä ilman laatua kuvaava indikaattori.

Taulukko 5-4. Sormipaisukarpeen vaurioasteelle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***).

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	2,720	0,306	8,88	< 2E-16	***
Etäisyys	-0,033	0,004	-8,95	< 2E-16	***
Puuston ikä	0,013	0,002	5,89	1,34E-08	***
Puuston pituus	-0,024	0,011	-2,19	0,02963	*
Puuston pohjapinta-ala	-0,019	0,006	-3,01	0,00289	**

5.3.2 Yleinen vaurioaste

Yleisen vaurioasteen vaihtelusta 24,2 % selittyi kolmen selittävän muuttujan hierarkkisella regressiomallilla. Etäisyys päästölähteestä selitti 20,3 % yleisen vaurioasteen vaihtelusta. Regressiomallin mukaan yleinen vaurioaste pieneni etäisyyden kasvaessa päästölähteeseen, eli kauempana päästölähteistä jäkälät olivat vähemmän vaurioituneita (taulukko 5-5). Odotetusti yleisen vaurioasteen regressiomalli muistuttaa muiden lajistotunnusten regressiomallia: yleinen vaurioaste pyrkii kuvaamaan useiden ilman epäpuhtauksiin reagoivien lajien muutoksia.

Taulukko 5-5. Yleiselle vaurioasteelle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***).

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	3,290	0,344	9,57	< 2E-16	***
Etäisyys	-0,037	0,005	-7,75	2,56E-13	***
Puuston pituus	0,035	0,014	2,58	1,05E-02	*
Puuston pohjapinta-ala	-0,020	0,008	-2,40	0,0171	*

5.3.3 Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajit

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 15,0 % ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkäläen lajilukumäärän vaihtelusta. Etäisyys lähimpään päästölähteeseen selitti 13,1 % lajilukumäärän vaihtelusta. Kun etäisyys lähimpään lupavelvolliseen päästölähteeseen kasvoi, kasvoi myös alakohtainen jäkäläen lajilukumäärä (taulukko 5-6).

Taulukko 5-6. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lajilukumäärälle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***).

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	3,860	0,357	10,80	< 2E-16	***
Etäisyys	0,063	0,010	6,19	2,50E-09	***
Puuston pohjapinta-ala	0,042	0,018	2,33	2,07E-02	*

5.3.4 IAP-indeksi

Kolmen selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 21,8 % ilmanpuhtausindeksin vaihtelusta. Vaihtelusta 19,0 % selittyi etäisyydellä päästölähteestä ja 2,8 % selittyi puuston iällä. Ilmanpuhtausindeksin arvot kasvoivat eli parantuivat, kun etäisyys lähimpään lupavelvolliseen päästölähteeseen kasvoi. Ilmanpuhtausindeksin arvot puolestaan pienenevät, kun puuston ikä kasvoi (taulukko 5-7).

Taulukko 5-7. Ilmanpuhtausindeksille tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***).

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	2,440	0,241	10,13	< 2E-16	***
Etäisyys	0,027	0,004	6,97	2,99E-11	***
Puuston ikä	-0,007	0,002	-2,94	0,00364	**

Etäisyys päästölähteestä selitti suuremman osan ilmanpuhtausindeksin vaihtelusta kuin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän vaihtelusta. Tämä johtuu siitä, että IAP-indeksi ottaa huomioon eri lajien herkkyiden epäpuhtauksille, kun taas lajilukumäärä käsittelee herkkyydeltään erilaisia lajeja samanarvoisina.

5.3.5 Sormipaisukarpeen peittävyys

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 17,0 % sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelusta. Etäisyys päästölähteestä selitti vain 6,8 % vaihtelusta ja etäisyyden kasvaessa sormipaisukarpeen peittävyys kasvoi. Suuremman osan vaihtelusta selitti puuston ikä (10,2 %). Puuston vanhetessa sormipaisukarpeen peittävyys pieneni (taulukko 5-8). Paksujen ja kilpikaarnoittuvien mäntyjen rungot ovat huono kasvualusta sormipaisukarpeelle, mikä voi selittää sormipaisukarpeen peittävyyden ja iän välistä yhteyttä.

Taulukko 5-8. Sormipaisukarpeen peittävyydelle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***).

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	15,950	2,039	7,82	1,60E-13	***
Etäisyys	0,111	0,033	3,35	9,51E-04	***
Puuston ikä	-0,104	0,019	-5,44	1,29E-07	***

5.3.6 Levän esiintyminen

Neljän selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 23,0 % levän esiintyvyyden vaihtelusta. Etäisyys päästölähteestä selitti 13,8 % vaihtelusta. Puuston pitoisuuden, halkaisijan ja puuston pohjapinta-alan yhteisvaikutus oli 9,2 %. Levän peittävyys väheni, kun etäisyys lähimpään päästölähteeseen kasvoi. Puiden pitoisuuden

kasvaessa levää oli myös vähemmän. Puiden ympärysmitan kasvaessa levämäärä puolestaan kasvoi (taulukko 5-9). Tutkimusalueen merkittävimmät päästölähteet sijaitsevat taajama-alueilla, joiden tutkimusmännyt ovat usein puistometsien ympärysmitaltaan suuria puita.

Taulukko 5-9. Levän esiintymiselle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***)

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	0,100	0,871	0,11	9,11E-01	
Etäisyys	-0,054	0,011	-4,98	1,25E-06	***
Puuston pituus	-0,094	0,032	-2,93	3,74E-03	**
Puuston pohjapinta-ala	0,043	0,018	2,34	2,03E-02	*
Puiden halkaisija	0,030	0,006	4,85	2,22E-06	***

5.3.7 Luppojen esiintyminen

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 13,3 % luppojen esiintyvyyden vaihtelusta. Etäisyys päästölähteestä selitti 11,6 % vaihtelusta ja puuston pohja-pinta-ala 1,7 %. Lupot yleistyivät etäisyyden päästölähteestä kasvaessa (taulukko 5-10).

Taulukko 5-10. Luppojen esiintymiselle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***)

	Arvio	Keskivirhe	Testisuure	p-arvo	p-arvo
Vakio	-0,120	0,240	-0,49	6,22E-01	
Etäisyys	0,040	0,007	5,77	2,43E-08	***
Puuston pohjapinta-ala	0,026	0,012	2,19	2,96E-02	*

5.4 Yhteenveto

Luontaiset tekijät vaikuttavat jäkälälajeihin, ja tätä vaikutusta voidaan vakioida sijoittamalla havaintoalat indikaattorilajien kannalta soveltuvimpiin metsiin. Havaintoalojen sijoittelussa on tehtävä kuitenkin myös kompromisseja havaintoalaverkoston kattavuuden ja pysyvyyden varmistamiseksi vuosien välillä.

Tilastomenetelmillä on mahdollista erotella luontaisten tekijöiden ja ilmanlaatuun liittyvien tekijöiden vaikutuksia. Tulosten perusteella jäkälämuuttujien yhteys ilmanlaatuun oli melko selvä. Parhaiten ilmanlaatua kuvaivat yleinen vaurioaste, sormipaisukarpeen peittävyys ja ilmanpuhtausindeksi. Regressioanalyysin perusteella havaintoalojen etäisyydellä lähimpään päästölähteeseen ei ollut tilastollisesti merkittävää vaikutusta luppojen peittävyteen. Puolestaan luppojen yleisyyteen etäisyyden havaittiin vaikuttavan. Tähän voi vaikuttaa se, että luppojen rihmamainen kasvutapa heikentää pistefrekvenssimenetelmän käyttökelpoisuutta luppojen peittävyden arvioinnissa. Luppojen yleisyyden arviointiin kasvutavalla ei puolestaan ole merkitystä. On myös mahdollista, että luppojen peittävyteen vaikuttaa suuresti joku muu tekijä.

Toisin kuin tutkimuksessa 2012, vuonna 2022 laitosten rikkidioksidi-, hiukkas- ja typpioksidipäästöt eivät vaikuttaneet tilastollisesti merkittävästi mihinkään muuttujaan, joiden oletetaan kuvaavan ilmanlaatua. Syy tälle voi olla se, ettei kolmelta laitokselta ollut saatavissa päästömääriä ja tämän takia noin 30 %:lle havaintoaloista ei ollut saatavissa lähimmän laitoksen päästötietoja. Tutkimuksessa on myös oletettu, että päästöt jakaantuvat tasaisesti laitoksen ympäri eli vallitsevia tuulensuuntia otettu huomioon. Lisäksi Imatran lähellä on Svetogorskin kaupungin teollisuuslaitoksia, joiden päästöistä ei ole tietoa.

6. VERTAILU

6.1 Vuosien välinen vertailu

Vertailu vuosien 2012 ja 2022 välillä

Vuosien 2012 ja 2022 välillä samoina pysyneillä havaintoaloilla jäkälää kuvaavien tunnusten arvot olivat pääasiassa heikentyneet (taulukko 6-1). Ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja havaittiin keskimäärin yksi laji vähemmän kuin vuonna 2012. Vähentynyt lajimäärän näkyi myös IAP-indeksin heikkenemisenä. Vuonna 2012 suurin osa aloista luokiteltiin IAP-indeksin perusteella lievästi köyhtyneeksi ja vuonna 2022 köyhtyneeksi (kuva 6-1). Keskimääräisen IAP-indeksiarvon mukaan lajisto oli molempina tutkimusvuosina keskimäärin lievästi köyhtynyttä.

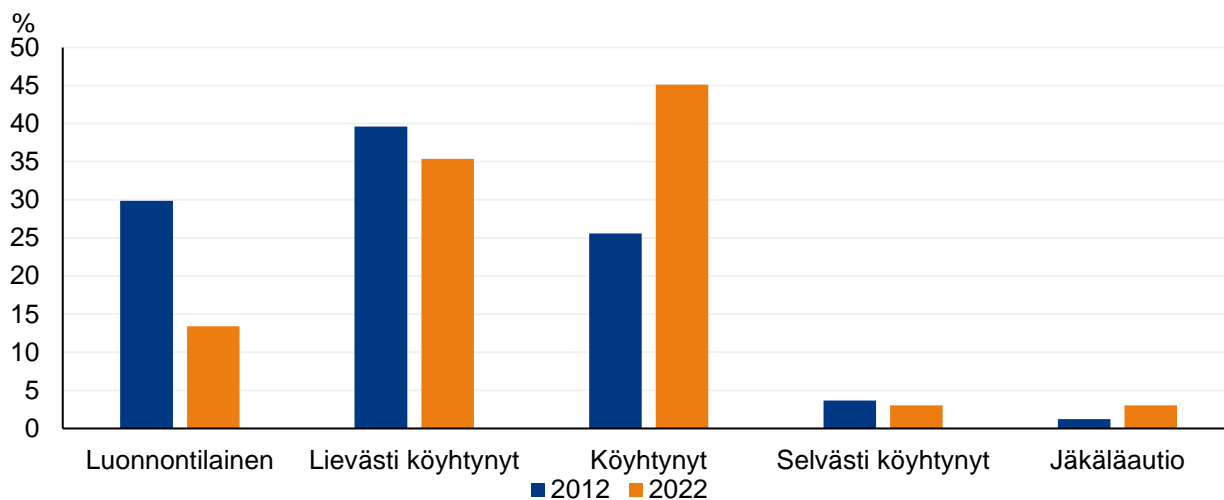
Sormipaisukarpeen peittävyysprosentti oli vähentynyt yli 50 % kymmenen vuoden takaiseen verrattuna. Lisäksi sormipaisukarpeet luokiteltiin keskimäärin 0,8 yksikköä vaurioituneemmiksi. Sormipaisukarpeen osalta täysin terveeksi luokiteltuja aloja ei havaittu yhtään kappaletta ja kuolleeksi tai puuttuvaksi luokiteltujen alojen määrä oli yli kaksinkertaistunut vuoteen 2012 verrattuna (kuva 6-2). Vuonna 2012 suurin osa aloista oli lievästi vaurioituneita, mutta vuonna 2022 selvän vaurion luokka oli runsain.

Yleinen vaurioaste oli puolestaan heikentynyt 0,2 yksikköä kymmenen vuoden takaiseen verrattuna. Terveiksi ja lievästi vaurioituneiksi luokiteltujen alojen määrä oli lähes vuoden 2012 tasolla, selvästi vaurioituneiden alojen määrä oli vähentynyt ja pahasti vaurioituneiden ja jäkäläautioiden määrä lisääntynyt (kuva 6-3). Yleisen vaurioasteen heikentyminen selvästi vaurioituneesta luokista suurempiin vaurioasteisiin viittaa pensasmaisten jäkäläien vähentymiseen, sillä ero selvästi ja pahasti vaurioituneiden alojen välillä perustuu lähinnä pensasmaisten jäkäläien esiintymiseen.

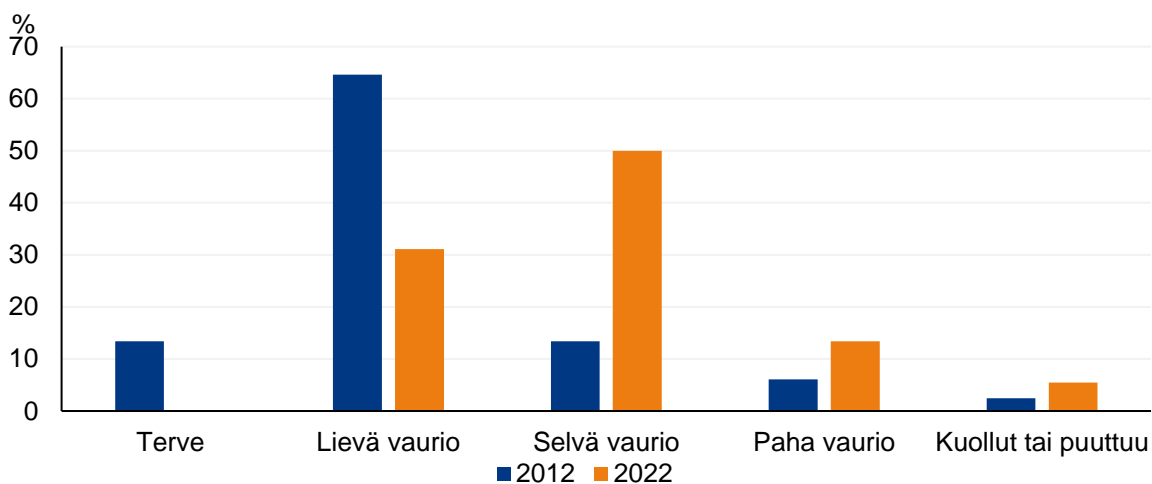
Vuonna 2022 luppojen peittävyysprosentti oli saman suuruinen kuin vuonna 2012 ja peittävyuden maksimiarvo oli kasvanut hieman. Levän esiintyminen oli vähentynyt noin kolmanneksella ja vuonna 2022 levää esiintyi keskimäärin alle kahdella rungolla per ala.

Taulukko 6-1. Männyn runkojäkälää kuvaavia tunnuslukuja Etelä-Karjalan samoina pysyneillä havaintoaloilla (n = 164) vuosina 2012 (Lehkonen ym. 2013) ja 2022.

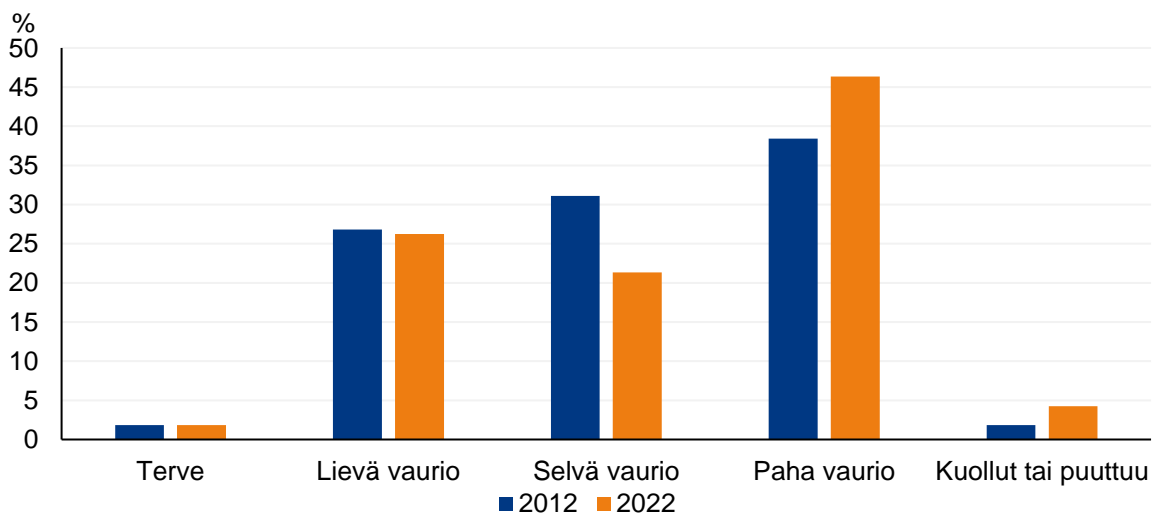
	Vuosi	Ka	Min	Max	S.D.
IAP-indeksi	2022	2,1	0	3,8	0,76
	2012	2,5	0	4,6	0,94
Lajimäärä / näyteala	2022	5,3	0	9,0	1,93
	2012	6,3	0	10,0	2,03
Sormipaisukarpeen vaurioaste	2022	3,0	1,7	5,0	0,77
	2012	2,2	1,2	5,0	0,78
Yleinen vaurioaste	2022	3,3	1,3	5,0	0,93
	2012	3,1	1,5	5,0	0,84
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	2022	5,8	0	31,2	5,57
	2012	12,7	0	53,0	10,42
Luppojen peittävyys (%)	2022	0,1	0	2,5	0,27
	2012	0,1	0	2,2	0,29
Levän yleisyys	2022	1,7	0	5,0	2,00
	2012	2,5	0	5,0	1,97



Kuva 6-1. Samana pysyneet havaintoalat (n = 164) IAP-indeksin mukaan luokiteltuna vuosina 2012 ja 2022.



Kuva 6-2. Samana pysyneet havaintoalat (n = 164) sormipaisukarpeen vaurioasteen mukaan luokiteltuna vuosina 2012 ja 2022.

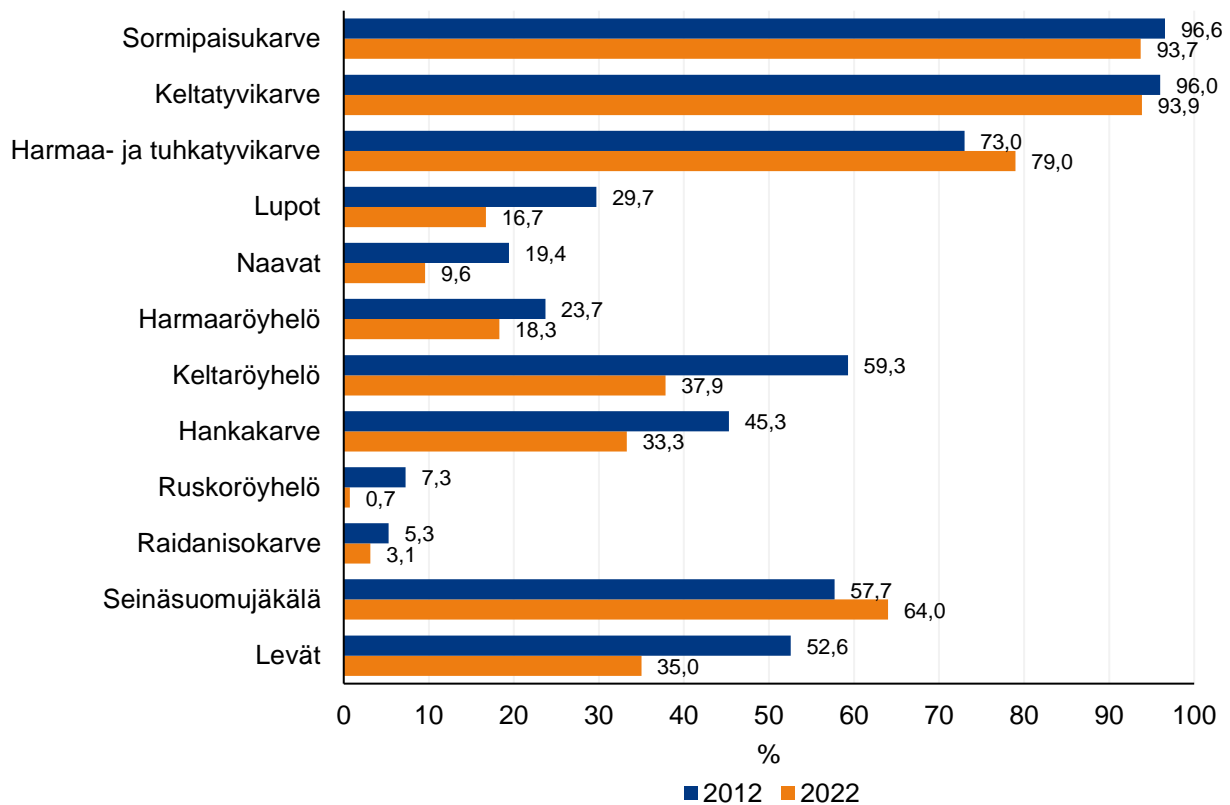


Kuva 6-3. Samana pysyneet havaintoalat (n = 164) yleisen vaurioasteen mukaan luokiteltuna vuosina 2012 ja 2022.

Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit samana pysyneillä rungoilla vuosina 2012 ja 2022 on esitetty kuvassa 6-4. Jäkälälajien esiintymisfrekvenssien tarkastelussa samoina pysyneistä havaintoaloista karsittiin pois ne alat, joilla osa tutkimuspuista oltiin jouduttu vaihtamaan esimerkiksi harvennusten takia. Vuosien välistä muutosta tarkasteltiin lajien esiintymisfrekvenssin prosentuaalisena muutoksena.

Tutkitut ilman epäpuhtauksista kärsivät bioindikaattorimuuttujat olivat harvinaistuneet harmaa- ja tuhkatyvikarvetta lukuun ottamatta tutkimusvuosien 2012 ja 2022 välillä (kuva 6-4). Jo vuonna 2012 harvakseltaan esiintynyt ruskoröyhelö oli harvinaistunut eniten (90 %) ja sitä esiintyi vuonna 2022 ainoastaan 0,7 %:lla tutkimusrungoista. Ilmansaasteille herkimpien indikaattorilajien määrät olivat vähentyneet myös huomattavasti. Vuoteen 2012 verrattuna naavojen esiintymisfrekvenssi oli vähentynyt yli puolella ja luppojen lähes 44 %:lla. Ilman epäpuhtauksille herkempien lajien harvinaistumista oli havaittu myös aikaisempien tutkimusvuosien (2005–2012) välillä. Vuonna 2022 myös raidanisokarpeen, keltaröyhelön, hankakarpeen ja harmaaröyhelön esiintymisfrekvenssit olivat vähentyneet merkittävästi (23–41 %). Sormipaisukarpeen ja keltatyvikarpeen esiintymisfrekvenssit olivat alentuneet vain 2–3 %. Harmaa- ja tuhkatyvikarpeen esiintyminen oli runsastunut 8 %:lla.

Ilman epäpuhtauksien positiivisena indikaattorina pidetty viherlevä harvinaistui tutkimusvuosien 2012–2022 välillä noin kolmanneksella (kuva 6-4). Toinen positiivinen indikaattori, seinäsuomujäkälä, puolestaan yleisty. Samanlaista kehityssuuntaa oli havaittavissa tutkimusvuosien 2005–2012 välillä. Viherlevän on arvioitu hyötyvän erityisesti ilman typpikuormituksesta, joten typpikuormituksen väheneminen voi olla levän esiintymisfrekvenssin pienenemisen taustalla.



Kuva 6-4. Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit samoina pysyneillä tutkimusrungoilla (n = 700) vuosina 2012 ja 2022.

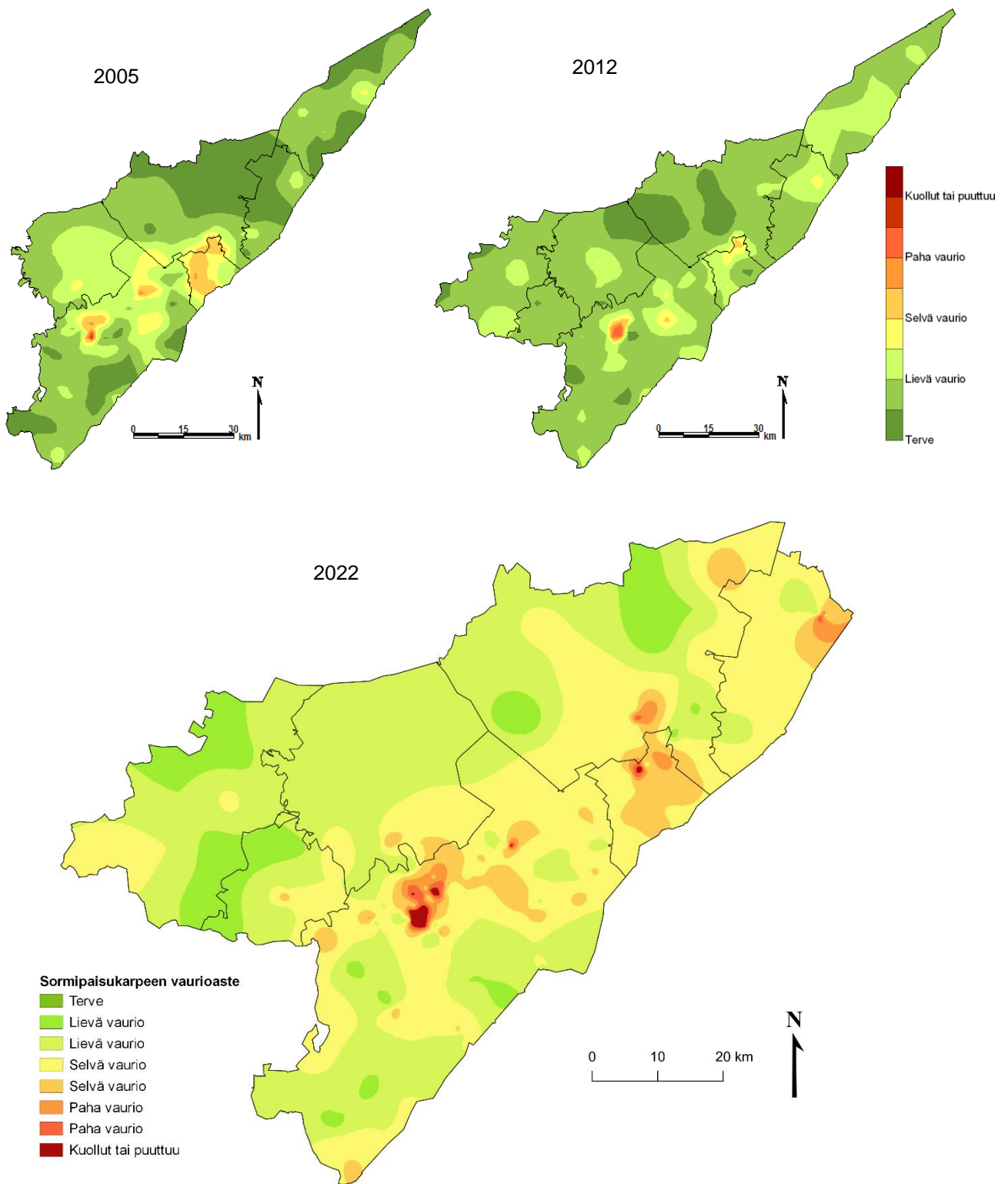
Vertailu vuosien 2005, 2012 ja 2022 välillä

Vuoden 2022 tuloksia verrattiin aikaisempien vuosien (Haahla ym. 2006, Lehtonen ym. 2013) bioindikaattoritutkimusten tuloksiin vertailemalla jäkälämuuttujien keski- ja ääriarvoissa tapahtuneita muutoksia sekä muutosten tilastollista merkitsevyyttä. Vertailua havainnollistettiin vyöhykekartoilla sormipaisukarpeen vaurioasteesta, ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärästä sekä IAP-indeksistä. Keski- ja ääriarvojen vertailussa käytettiin ainoastaan vuosien 2005–2022 välillä samoina pysyneitä havaintoaloja. Lemi ja Savitai-pale liittyivät mukaan tutkimukseen vasta vuonna 2012, joten kuntien tulokset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Vyöhykekarttoja laadittaessa vaihtuneita aloja sekä Lemm ja Savitai-paleen alueita ei puolestaan jätetty tarkastelusta pois, ja kartat antavat yleiskuvaa jäkälän indikoimasta ilmanlaadun vaihtelusta alueella eri vuosina.

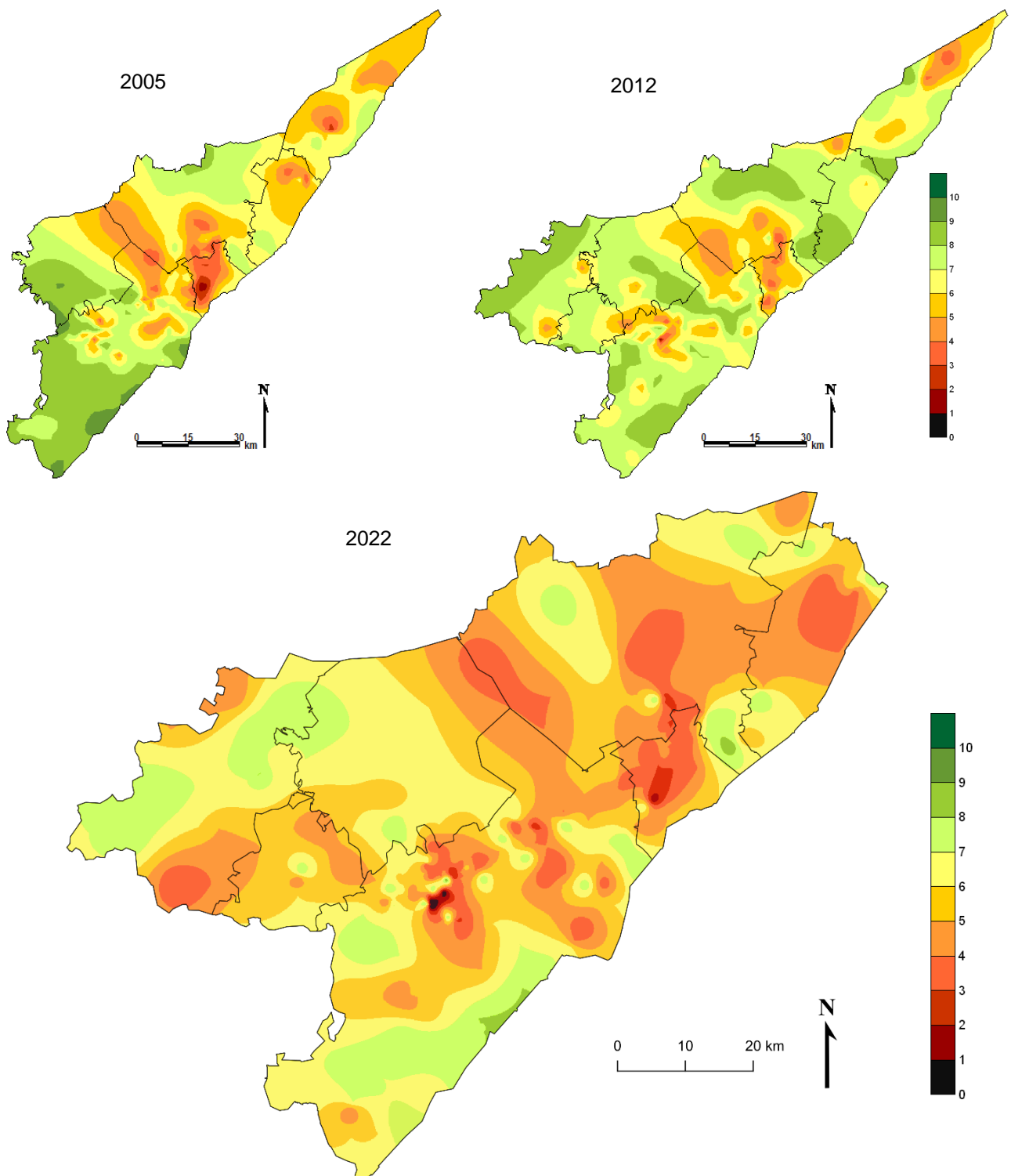
Sormipaisukarpeen suurimmat vauriot sijoittuivat kaikkina tutkimusvuosina Lappeenrannan keskusta-alueen seudulle, Imatralle sekä entisen Joutsenon alueelle (kuva 6-5). Terveen sormipaisukarpeen vyöhykkeet pienenevät vuosien 2005–2012 välillä ja vuonna 2022 terveet vyöhykkeet katosivat kokonaan. Selvien vaurioiden vyöhykkeet kasvoivat aikaisempiin tutkimuksiin nähden huomattavasti. Lisäksi pahojen vaurioiden vyöhyke Lappeenrannassa laajeni ja uusia pahojen vaurioiden vyöhykkeitä muodostui Imatralla, Rautjärvelle sekä pienemmissä määrin Ruokolahdelle. Lappeenrannan, Imatran sekä entisen Joutsenon alueille muodostui myös kuolleen sormipaisukarpeen vyöhykkeet. Lievien vaurioiden vyöhykettä esiintyi lähinnä Savitai-paleen, Taipal-saaren ja Ruokolahden alueella sekä Lappeenrannan eteläpuoliskolla.

Kaikkina tutkimusvuosina jäkälälajistoltaan köyhtyneimmät alueet sijaitsivat Imatralla, Lappeenrannan keskustan tuntumassa sekä entisen Joutsenon alueella (kuva 6-6). Vuosien 2005–2012 lajirikkaimpien alueiden vyöhykkeet pienenevät alueen eteläosassa, mutta laajenivat pohjoisemmassa. Vuonna 2022 lajimäärät romahtivat aikaisempiin vuosiin verrattuna ja köyhtyneempien alojen vyöhykkeet kasvoivat huomattavasti. Lappeenrannan eteläosan luonnontilaisen lajiston vyöhyke pieneni entisestään ja alueen pohjoisemmalla puoliskolla luonnontilaista vyöhykettä esiintyi ainoastaan Ruokolahden eteläosassa. Lappeenrannan keskusta-alueelle muodostui selkeät erittäin köyhtyneen lajiston vyöhykkeet. Erittäin köyhtyneen lajiston alue muodostui myös Imatralla. Selvästi köyhtyneitä vyöhykkeitä muodostui Lappeenrantaan, Imatralla, Ruokolahdelle ja Rautjärvelle sekä Savitai-paleen eteläosaan.

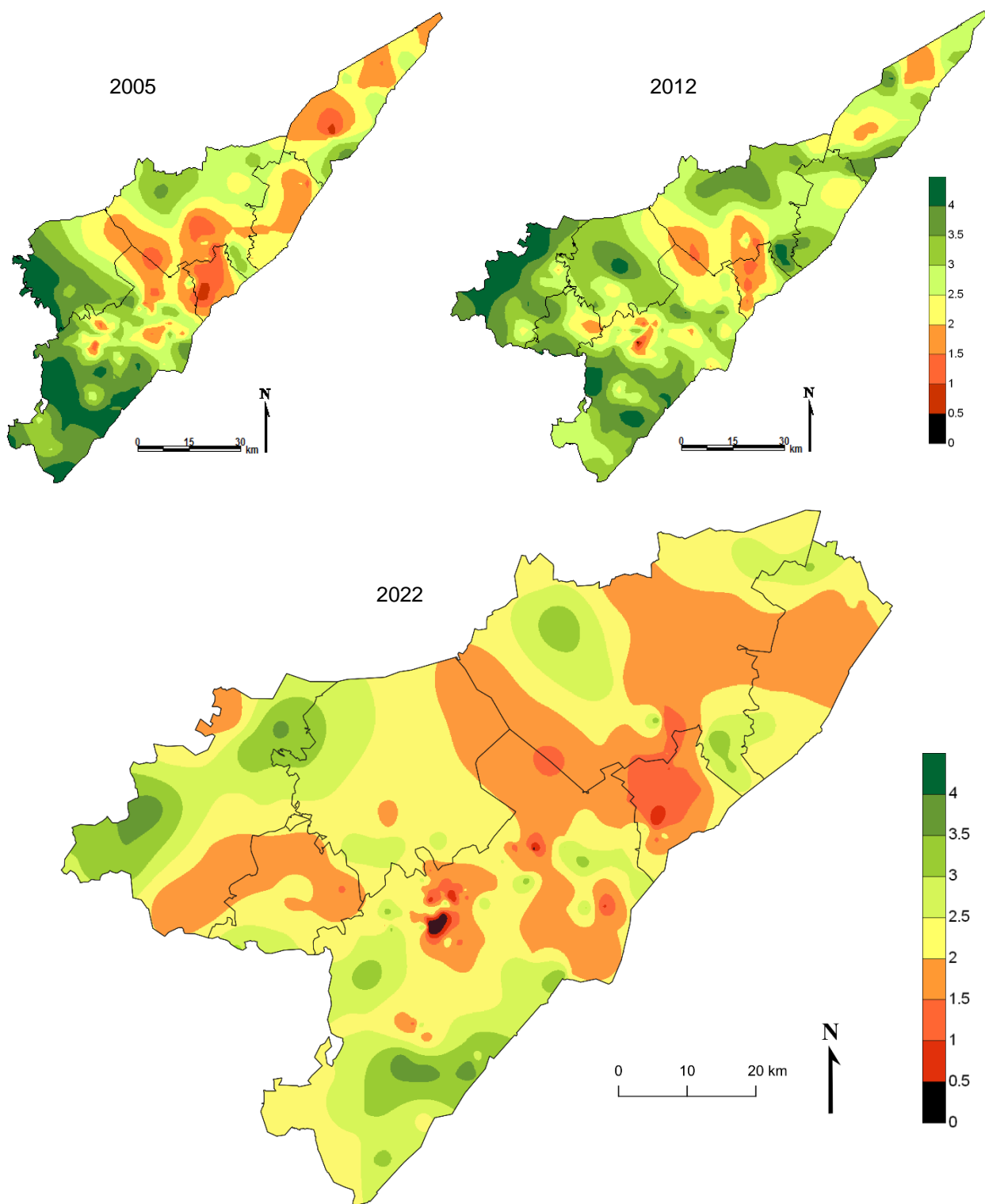
IAP-indeksin vaihtelu eri tutkimusvuosina oli hyvin samankaltaista kuin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän vaihtelu (kuva 6-7). IAP-indeksin perusteella lajistoltaan köyhtyneempien alueiden vyöhykkeet olivat hieman suppeampia kuin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän perusteella muodostetut. IAP-indeksin perusteella luonnontilaisen lajiston vyöhykkeet muodostuivat pääasiassa Savitai-paleen pohjoisosiin, Lappeenrannan eteläosiin sekä Ruokolahdelle.



Kuva 6-5. Sormipaisukarpeen vaurioasteet tutkimusalueella vuosina 2005, 2012 ja 2022.



Kuva 6-6. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lukumäärät havaintoaloilla vyöhykkeittäin vuosina 2005, 2012 ja 2022.



Kuva 6-7. IAP-indeksin vyöhykkeet tutkimusalueella vuosina 2005, 2012 ja 2022.

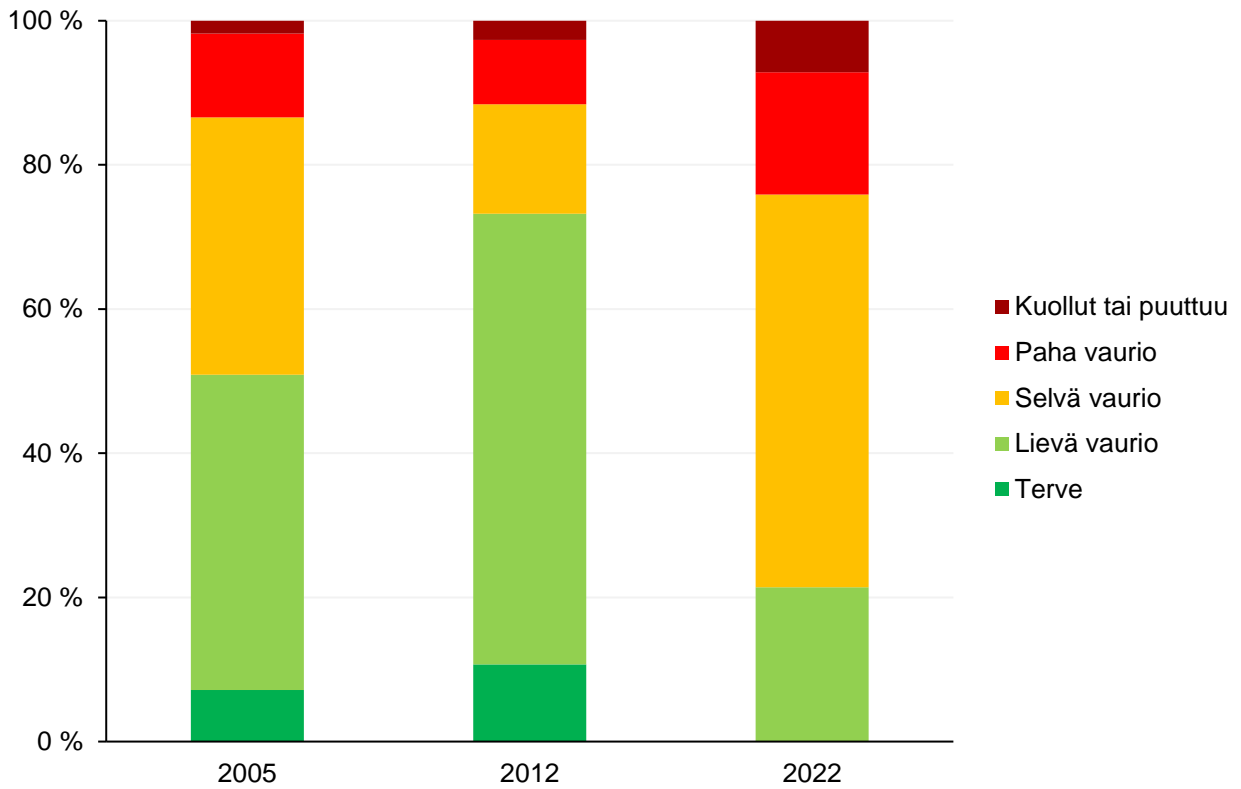
Vuosiin 2012 ja 2005 verrattuna tarkasteltujen alojen keskimääräinen IAP-indeksiluokitus oli heikentynyt tilastollisesti merkittävästi 0,5 yksikköä ja ilman epäpuhtauksista kärsiviä lajeja esiintyi aloittain tarkasteltuna keskimäärin yksi kappale vähemmän (taulukko 6-2). Sormipaisukarpeen keskimääräinen vaurioasteluokitus oli heikentynyt ja keskimääräinen peittävyys oli laskenut huomattavasti aikaisempiin vuosiin nähden. Luppojen keskimääräinen peittävyys ei ollut muuttunut tutkimusvuosien välillä ja levämäärän kehitys on ollut laskusuuntaista koko tarkastelujakson ajan.

Taulukko 6-2. Männyn runkojäkäliä kuvaavia tunnuslukuja Etelä-Karjalan samoina pysyneillä havaintoaloilla (n = 112) vuosina 2005 (Haahla ym. 2006), 2012 (Lehkonen ym. 2013) ja 2022.

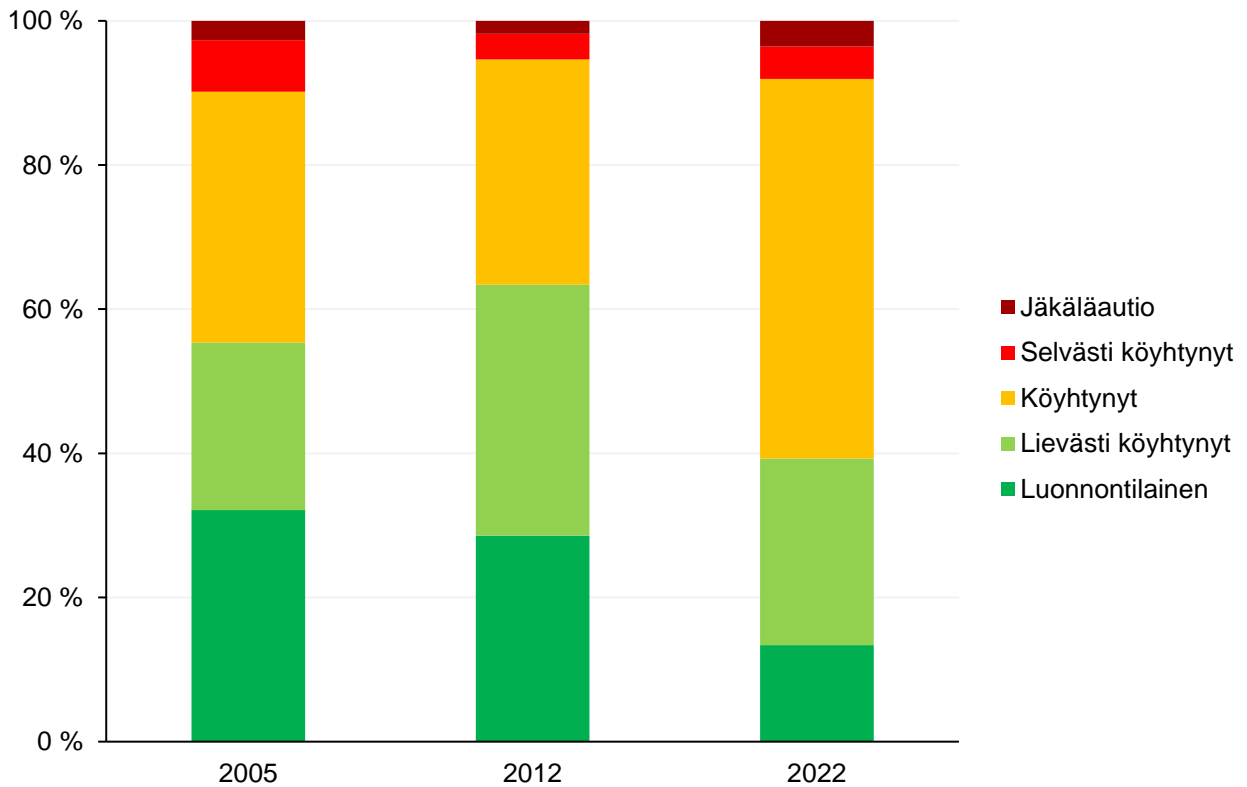
	Vuosi	Ka	Min	Max	S.D.	Testisuure	p-arvo	
IAP-indeksi	2022	1,9	0	3,8	0,78			
	2012	2,4	0	4,6	0,96	46,46	8,17E-11	***
	2005	2,4	0,2	4,5	1,09			
Lajimäärä/näyteala	2022	5,0	0	9,0	1,90			
	2012	6,1	0	10,0	2,05	49,30	1,97E-11	***
	2005	6,1	1,0	10,0	2,30			
Sormipaisukarpeen vaurioaste	2022	3,1	1,8	5,0	0,79			
	2012	2,3	1,2	5,0	0,84	119,31	<2,2E-16	***
	2005	2,7	1,0	5,0	0,77			
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	2022	4,3	0	22,5	4,25			
	2012	10,8	0	44,1	9,18	140,98	<2,2E-16	***
	2005	8,1	0	29,8	6,77			
Luppojen peittävyys (%)	2022	0,1	0	2,5	0,26			
	2012	0,1	0	2,2	0,33	2,38	0,304	
	2005	0,1	0	1,5	0,23			
Levän yleisyys	2022	2,0	0	5,0	2,09			
	2012	2,8	0	5,0	2,00	33,86	4,44E-08	***
	2005	3,3	0	5,0	1,99			

Tarkasteltujen alojen sormipaisukarpeen vaurioaste parantui vuosien 2005–2012 välillä, mutta heikentyi vuosien 2012–2022 välillä (kuva 6-8). Sormipaisukarpeen suurempien vaurioasteiden (luokat III, IV ja V) prosentuaalinen osuus oli kasvanut aikaisempiin vuosiin verrattuna, kun taas pienempien vaurioasteiden (I ja II) osuudet olivat pienentyneet. Kuolleeksi tai puuttuvaksi luokiteltujen alojen määrä on kasvanut vuodesta 2005 eteenpäin ja vuonna 2022 luokan prosentuaalinen osuus oli yli kaksinkertaistunut vuoteen 2012 verrattuna. Vuosina 2005 ja 2012 suurin osa tarkastelluista aloista luokiteltiin lievästi vaurioituneeksi, kun taas vuonna 2022 selvästi vaurioituneeksi.

IAP-indeksin osalta luonnontilaisen alojen osuus on vähentynyt vuosien 2005–2012 välillä (kuva 6-9). Vuosien 2005-2012 välillä lievästi köyhtyneiden alojen luokka kasvoi, kun taas köyhtyneiden, selvästi köyhtyneiden ja jäkäläautioiden määrä väheni. Vuosien 2012-2022 välillä puolestaan lievästi köyhtyneiden alojen määrä väheni ja köyhtyneiden, selvästi köyhtyneiden sekä jäkäläautioiden määrät kasvoivat. Vuonna 2012 suurin osa aloista luokiteltiin lievästi köyhtyneeksi, kun taas vuosina 2005 ja 2022 köyhtyneeksi.



Kuva 6-8. Samana pysyneet havaintoalat (n = 112) sormipaisukarpeen vaurioasteen mukaan luokiteltuna vuosina 2005, 2012 ja 2022.



Kuva 6-9. Samana pysyneet havaintoalat (n = 112) IAP-indeksin mukaan luokiteltuna vuosina 2005, 2012 ja 2022.

6.2 Vertailu muualla Suomessa tehtyihin tutkimuksiin sekä alueen kuntien välillä

Etelä-Karjalan maakunnan alueen bioindikaattoritutkimuksen tuloksia verrattiin eri puolilla Suomea tehtyjen tutkimusten tuloksiin sormipaisukarpeen vaurioasteen ja ilmanpuhtausindeksin osalta (taulukko 6-3). Keskimääräinen sormipaisukarpeen vaurioaste oli Etelä-Karjalan maakunnassa lähellä samaa tasoa kuin Uudella maalla, Etelä-Pohjanmaalla ja Kokkolan ja Pietarsaaren alueella. Ilmanpuhtausindeksin perusteella Etelä-Karjalan jäkälälajisto oli edellä mainittuja alueita terveempi. Pohjois-Karjalaan verrattuna Etelä-Karjalan jäkälälajisto on heikompi kuntoinen.

Taulukko 6-3. Männyn runkojäkäliä kuvaavat sormipaisukarpeen vaurioaste ja ilmanpuhtausindeksi (IAP = Index of Air Purity) Etelä-Pohjanmaan alueen bioindikaattoritutkimuksessa 2022 sekä eri puolella Suomea toteutetuissa tutkimuksissa (Huuskonen ym. 2013, Keskitalo ym. 2015, Rundgren 2013, Ruuth ym. 2016a, Ruuth ym. 2016b, Toivanen ym. 2016, Lappalainen ym. 2017, Lappalainen & Leppänen 2019, Ruuth ym. 2021, Ruuth & keskitalo 2021, Osmala ym. 2022).

Alue	n	Vuosi	Sormipaisukarpeen vaurioaste, ka	IAP
Etelä-Karjala	245	2022	2,8	2,1
Etelä-Pohjanmaa	96	2022	3,0	1,6
Uusimaa	501	2020	2,5	1,5
Pohjois-Karjala	315	2020	1,9	2,9
Kokkola ja Pietarsaari	240	2018	2,6	1,6
Eteläpohjanmaa	97	2017	2,5	2,0
Uusimaa	734	2014	3,1	1,7
Pori-Harjavalta	107	2014	2,4	1,9
Kanta- ja Päijät-Häme	304	2014	2,5	2,4
Kuopio	50	2013	2,5	1,7
Vaasan seutu	53	2013	2,3	2,3
Kokkola ja Pietarsaari	238	2012	2,3	2,1

Tutkimusalueen kuntia vertailtiin keskenään IAP-indeksiin, lajilukumäärän sormipaisukarpeen vaurioasteen, yleisen vaurioasteen sekä levän yleisyyden osalta (taulukko 6-4). IAP-indeksiin perusteella Imatran jäkälälajisto oli köyhtynyttä ja muissa kunnissa lajistossa esiintyi lieviä muutoksia. Jäkälälajistoltaan luonnontilaisimmat kunnat olivat Savitaipale, Taipalsaari ja Rautjärvi. Lajimäärän perusteella lajirikkaimmat kunnat olivat Savitaipale ja Taipalsaari, kun taas Imatran kaupungin alue oli lajistoltaan köyhtynein.

Sormipaisukarve oli terveintä Savitaipaleella ja Lemillä. Muiden kuntien alueella vauriot olivat keskimäärin selviä ja vaurioaste oli suurin Imatran kaupungin alueella. Yleisen vaurioasteen perusteella jäkälälajisto oli lievästi vaurioitunutta Taipalsaaren kunnan alueella, pahasi vaurioitunutta Imatran kaupungin alueella ja selvästi vaurioitunutta muiden kuntien alueella. Levää esiintyi eniten Lappeenrannan ja Imatran alueella ja vähiten Rautjärvellä, Savitaipaleella ja Taipalsaarella.

Taulukko 6-4. Jäkälää kuvaavia tunnuksia Etelä-Karjalan tutkimuskunnissa sekä koko tutkimusalueella vuonna 2022 (n = 245).

Kunta		IAP	Laji- määrä	Hyp.phys vaurioaste	Yleinen vaurioaste	Levän yleisyys
Imatra	ka	1,5	4,1	3,2	4,1	1,4
	min	0,5	1,0	2,5	3,0	0,0
	max	2,6	7,0	5,0	4,7	5,0
Lappeenranta	ka	2,0	5,2	2,9	3,3	1,9
	min	0,0	0,0	1,6	1,3	0,0
	max	3,8	9,0	5,0	5,0	5,0
Lemi	ka	2,1	5,3	2,3	3,1	1,1
	min	1,4	4,0	1,9	1,6	0,0
	max	3,1	8,0	3,4	4,1	4,0
Rautjärvi	ka	2,2	5,5	2,8	3,4	0,3
	min	1,5	3,0	2,0	1,6	0,0
	max	3,2	8,0	4,5	4,4	2,0
Ruokolahti	ka	2,1	5,0	2,7	3,5	0,8
	min	1,1	3,0	1,5	2,0	0,0
	max	3,5	9,0	4,4	4,5	5,0
Savitaipale	ka	2,6	6,4	2,2	2,7	0,4
	min	1,5	3,0	1,6	1,2	0,0
	max	3,8	8,0	2,9	4,0	5,0
Taipalsaari	ka	2,4	6,5	2,5	2,4	0,4
	min	1,8	5,0	2,1	1,7	0,0
	max	2,9	8,0	3,4	3,7	1,0
Koko alue	ka	2,1	5,3	2,8	3,3	1,5
	min	0,0	0,0	1,5	1,2	0,0
	max	3,8	9,0	5,0	5,0	5,0

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilman epäpuhtauksien vaikutuksia männyn runkojäkäliin tutkittiin Etelä-Karjalan alueella vuonna 2022. Tutkituissa bioindikaattorimuuttujissa oli nähtävissä sekä myönteisiä että kielteisiä kehityssuuntia. Etelä-Karjalan alueella on runsaasti puunjalostusteollisuutta ja siihen liittyvää kemianteollisuutta sekä energiantuotantoa. Teollisuus keskittyy pääasiassa Lappeenrantaan, entisen Joutsenon alueelle, Imatralla sekä pienemmässä mitakaavassa Rautjärvelle. Merkittäviä päästöjä tutkimusalueella aiheuttavat myös Imatralla sijaitseva terästehdas ja Lappeenrannassa Ihalaisen teollisuusalue, jossa suoritetaan mineraalien louhintaa ja jatkojalostusta. Imatran ilmanlaatuun vaikuttavat myös venäläisen naapurikaupungin Svetogorskin päästöt. Maaseutualueilla myös maataloustoiminnoilla voi olla paikallisia ilmanlaatuvaikutuksia.

Pidemmällä aikavälillä Etelä-Karjalan alueen päästöt ovat pienentyneet selvästi 1980-luvun lopun tilanteesta. Tehtaiden prosessi uudistusten myötä erityisesti kasvillisuudelle haitallisen rikkidioksidin päästöt ovat pienentyneet. Liikenteen osalta rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästö määrät ovat pidemmällä aikavälillä vähentyneet selvästi, mutta paikallisesti muun muassa taajamissa liikenteen typen oksidien päästöillä voi olla huomattava merkitys. Myös ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ja laskeumat ovat pitkällä aikavälillä pääasiassa laskeneet. Tutkimusalueen suurimmat pistemäiset rikkidioksidin päästölähteet sijaitsivat Lappeenrannassa. Suurimmat typen oksidien ja hiukkasten päästölähteet sijaitsivat Imatran ja Lappeenrannan alueella. Vähiten päästöjä syntyi Lemillä, Savitaipaleella ja Taipalsaarella. Alueen vilkkaimmin liikennöidyt tiet ovat valtatie 6, 13 ja 62.

Etelä-Karjalan runkojäkälien indikaattoriarvot olivat heikentyneet edelliseen tutkimusajankohtaan verrattuna. Muun muassa ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien esiintymistiheydet olivat pääasiassa laskeneet ja ilman epäpuhtauksista hyötyvän seinäsuomujäkälän määrä oli lisääntynyt. Ilman epäpuhtauksille herkimmat naavat

ja lupot olivat vähentyneet erittäin huomattavasti. Ilman epäpuhtauksille herkimpien lajien harvinaistumista oli havaittu myös aikaisempien tutkimusvuosien (2005–2012) välillä. Lajimäärien muutokset näkyivät ilmanpuh-
tausindeksin arvon heikkenemisenä. Ilman epäpuhtauksille herkimpien indikaattorilajien runsasmittainen har-
vinaistuminen näkyi myös jäkäliden yleisen vaurioasteen luokituksen selvänä heikkenemisenä, sillä jäkäliden
yleinen vaurioaste luokitellaan pahasti vaurioituneeksi, jos pensasmaiset jäkälät puuttuvat. Myös sormipai-
sukarve oli keskimäärin edellistä tutkimusta vaurioituneempaa ja kasvustojen peittävyys olivat alentuneet.
Sormipaisukarvekasvustot olivat hävinneet useilta tutkimusaloilta kokonaan. Jäkälälajisto oli köyhtyneintä ja
vaurioituneinta teollisuuskeskittymien ympäristöissä ja taajamissa. Tulosten tilastollinen tarkastelu vahvisti,
että etäisyys päästölähteestä oli merkittävin jäkälämuuttujiin vaikuttanut tekijä. Edelliseen tutkimukseen ver-
rattuna tulosten heikentymistä oli tapahtunut kuitenkin erityisesti tausta-alueiksi luokiteltavilla alueilla.

Edellä kuvatut jäkälissä tapahtuneet muutokset voivat indikoida ilmanlaadun heikentymistä standardin SFS
5670 mukaan, vaikka epäpuhtauksien päästöt ovatkin pääasiassa pienentyneet. Muun muassa erilaiset luon-
taiset tekijät, kuten sateisuus, kuivuus tai kovat helteet, voivat vaikuttaa tuloksiin puskuroimalla tai voimista-
malla ilman epäpuhtauksien vaikutuksia. Luontaisten tekijöiden vaikutusten seurauksena bioindikaattorilajien
vasteet eivät aina yksiselitteisesti seuraa päästömäärissä tapahtuvia muutoksia. Päästömäärien kehityksestä
ainakin osittain riippumattomasti jäkälätunnusten heikentymistä on tapahtunut Etelä-Karjalan lisäksi myös muu-
alla Suomessa, joten jäkäliden kunnan ja monimuotoisuuden heikkenemisen taustalla voi olla myös laajempia-
laisia tekijöitä, kuten ilmastonmuutos ja muun muassa tästä johtuva metsien yleinen rehevöitymiskehitys. Il-
mastonmuutos lisää myös talvilämpötilan vaihtelua nollan molemmiin puoliin, mikä voi hankaloittaa jäkäliden
talvehtimistä ja heikentää niiden elinmahdollisuuksia. Jäkäliden yleisimmän leväosakasryhmän (*Trebouxia* spp.)
on myös havaittu sopeutuvan ilmastonmuutoksen aiheuttamiin muutoksiin vaadittua hitaammin (Nelsen ym.
2022).

Päästömääriltään vähäiset kunnat, Savitaipale ja Taipalsaari, erottuivat jäkälälajistoltaan monipuolisimpana ja
lievimmin vaurioituneina. Imatran alueen jäkälälajisto oli huomattavasti muita kuntia heikommassa kunnossa.
IAP-indeksin, epäpuhtauksille herkempien lajien sekä sormipaisukarpeen vaurioasteen osalta muutosta huonom-
paan suuntaan oli havaittavissa kaikkien kuntien alueella. Edelliseen tutkimukseen verrattuna keskimääräinen
IAP-indeksiarvo oli heikentynyt eniten Lemmin ja Savitaipaleen kuntien alueella. Vähiten muutosta aikaisem-
paan oli Imatralla, jossa IAP-indeksiarvo oli jo ennestäänkin selvästi muita kuntia heikompi. Ilman epäpuhtauk-
sille herkempien lajien määrät olivat vähentyneet huomattavimmin Rautjärven ja Lemmin alueilla. Taipalsaaren alu-
eella muutos aikaisempaan oli vähäisin. Sormipaisukarpeen vaurioaste oli heikentynyt huomattavimmin Ru-
okolahden, Taipalsaaren ja Rautjärven alueilla. Vähiten muutosta aikaisempaan oli Savitaipaleen alueella. Ver-
rattaessa tuloksia muiden viimeaikaisten alueellisten ilmanlaadun bioindikaattoritutkimusten tuloksiin, keskei-
simmät ilmanlaatua kuvaavat jäkälämuuttujat osoittavat ilmanlaadun olevan Etelä-Karjalan alueella pääasi-
assa samalla tasolla kuin muualla Suomessa. Pohjois-Karjalaan verrattuna Etelä-Karjalan ilmanlaatu oli kui-
tenkin heikompi.

Vuoden 2022 jäkälätulosten vertailukelpoisuutta aikaisempien vuosien tuloksiin heikensi se, että kolmannes
havaintoaloista jouduttiin vaihtamaan muun muassa metsähakkuiden takia. Lisäksi useilla havaintoaloilla oli
suoritettu metsänhoidollisia toimenpiteitä, kuten harvennuksia, jotka muuttavat metsiköiden mikroilmastollisia
ominaisuuksia. Myös varjostavan aluskasvillisuuden voimistuminen oli havaittavissa usealla havaintoalalla.

Bioindikaattoriseuranta olisi jatkossa hyvä toteuttaa vähintään 10 vuoden välein koko maakunnan laajuusena.
Myös lyhyen aikavälin muutosten seuranta olisi hyvä tehdä muun muassa suurimpien pistemäisten päästö-
lähteiden lähistöllä. Tällöin saataisiin tarkempaa tietoa paikallisen ilmanlaadun lyhytaikaisista muutoksista.
Seuraavassa maakunnan kattavassa bioindikaattoritutkimuksessa muun muassa tutkimusvuosien välisten
säätilaerojen huomioiminen helpottaisi luontaisten tekijöiden vaikutusten voimakkuuden arviointia. Myös kaar-
nan pH-mittaukset voisivat mahdollisesti tarjota selittävää tietoa eri jäkälälajien taantumisesta, sillä kaarnan
pH-arvo vaikuttaa eri lajeihin eri tavoin, riippuen suosivatko lajit happamampaa vai emäksisempää kasvuymp-
äristöä.

LÄHTEET

- Ahonen, A. 2022. Lupavelvollisten laitosten sijainti Imatran seudulla vuonna 2022. Imatran seudun ympäristötoimi. Kirjallinen tiedonanto 11/2022.
- Anttonen, T. 1990. Laskeuman ravinteiden vaikutus sormipaisukarvejäkälän (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.) kasvuun. Kuopion yliopisto, ekologisen ympäristöhygienian laitos. Opinnäytetutkielma.
- Dinno A (2017). `_dunn.test: Dunn's Test of Multiple Comparisons Using Rank Sums_`. R package version 1.3.5, <https://CRAN.R-project.org/package=dunn.test>.
- Haahla, A., Niskanen, I., Polojärvi, K., & Ellonen, T. 2006. Etelä-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2005-2006. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 161. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. ISBN 951-40-1270-4.
- Huuskonen, I., Lehtonen, E., Keskitalo, T. & Laita, M. 2010. Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2009. Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 4/2010. Helsinki, 184 s.
- Huuskonen, I. & Lehtonen, E. 2012. Kokkolan ja Pietarsaaren bioindikaattoritutkimus vuonna 2012. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Huuskonen, I., Lehtonen, E. ja Laita, M. 2013. Kokkolan ja Pietarsaaren seudun ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2012. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 177. Jyväskylän yliopisto.
- Ilmatieteenlaitos, 2022. Havaintojen lataus. Ilmatieteenlaitoksen avoimen datan verkkopalvelu. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- Imatran kaupunki. 2019. Imatran, Lappeenrannan ja Svetogorskin ilmanlaatu vuonna 2018. Imatra.
- Imatran kaupunki. 2020. Imatran, Lappeenrannan ja Svetogorskin ilmanlaatu vuonna 2019. Imatra.
- Imatran kaupunki. 2021. Imatran ja Lappeenrannan ilmanlaatu vuonna 2020, Imatra.
- Imatran kaupunki 2022. Imatran ja Lappeenrannan ilmanlaatu vuonna 2021. Imatra.
- Jokinen, J., Säynätkari, T., Häkkinen, A. J. & Laine, E. 1990. Imatran ilman epäpuhtauksien biologisten vaikutusten seuranta vuonna 1989. Ilmatieteen laitos. Ilmanlaatuosasto.
- Jokinen, J., Haarala, S., Mäkinen, E. & Leppänen, A. 1995. Imatra-Svetogorsk-Joutseno-LappeenrantaRautjärvi-Ruokolahti-alueen näkyvien metsävaurioiden kartoitus vuonna. Ilmatieteen laitos. Ilmanlaatuosasto. Helsinki 1995.
- Jokinen, J., Haarala, S., Jokela, T. & Pesonen, R. 2000. Imatran-Joutsenon-Rautjärven-Ruokolahden seudun ilmanlaadun vaikutusten seurattanutkimus vuonna 1999. Mäntypuuston vauriokartoitus ja mittaukset värin-tunnistimella. Ilmatieteen laitos - Ilmanlaadun tutkimus. Helsinki.
- Jussila, I., Joensuu, E. & Laiho, P. 1999. Ilman laadun bioindikaattoriseuranta metsäympäristössä. Ympäristöopas 59. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto. Edita, Helsinki.
- Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 2000. Kaakkois-Suomen ympäristön tila - raportti.
- Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 2008. Kaakkois-Suomi - Ympäristön tila.
- Keskitalo, T., Laita, M., Järvisalo, K., Ruuth, J. ja Toivanen, H. 2015. Uudenmaan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2014. Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 109/2015.
- Korttinen, M. 1998. Lappeenrannan, Joutsenon, Imatran ja Rautjärven jäkäläkartoitus 1998. Imatran kaupunki. Ympäristötoimi/Ympäristönsuojelu.
- Kuusinen, K., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E.-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960s to 1980s in Finland. Teoksessa Kauppi, P., Anttila, P. ja Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-52213-1. S. 397-420.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Lehtonen, E., & Ellonen, T. 2008a. Vakka-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 164. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.

- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Lehkonen, E., & Ellonen, T. 2008b. Länsi-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Lappalainen, N., Lahti, T., Puro, H. & Väyrynen T. 2017. Seinäjoen seudun ja Etelä-Pohjanmaan bioindikaattoritutkimus 2017. Ahma ympäristö Oy.
- Lappalainen, N. & Leppänen, E-M. 2019. Kokkolan ja Pietarsaaren seudun ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2018. Eurofins Ahma Oy.
- Lehkonen, E., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Nevalainen, S., Poikolainen, J. & Laita, M. 2011. Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2010. Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 2/2011.
- Lehkonen, E., Huuskonen, I., Keskitalo, T. ja Laita, M. 2013. Etelä-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2012. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 176. Jyväskylän yliopisto.
- LIISA-laskentajärjestelmä 2022. [Tiedot tallennettu 11/2022].
- Lodenius, M., Manninen, S., Nieminen, T., Raiskinen, H., Ranta, P. & Willamo, R. 2002. Bioindikaattorit. Ympäristönsuojelun opetusmonisteita N:o 21. Helsingin yliopisto, Limnologian ja ympäristönsuojelun laitos. ISSN 1456-8284.
- Markert, B.M., Fraenzle, S. ja Fomin, A. 2004. From the biological system of the elements to biomonitoring. Teoksessa Merian, E., Anke, M., Inhat, M. ja Stoepler, M. (toim.): Elements and their compounds in the environments. Wiley-Vch.
- Nelsen, M., Leavitt, S., Heller, K., Muggia, L. & Lumbsch, H. 2022. Contrasting Patterns of Climatic Niche Divergence in *Trebouxia*—A Clade of Lichen-Forming Algae. *Front. Microbiol.* 13:791546
- Niskanen, I., Veijola, H. & Ellonen, T. 1996. Pääkaupunkiseudun ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 1996. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996: 17.
- Niskanen, I., Polojärvi, K., Witick, A., Haahla, A. & Laitakari, V. 2003a. Kokkolan seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuonna 2002. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 156. Jyväskylän yliopisto. ISBN 951-39-1583-2.
- Osmala, T., Kajankari-Shelvey P. & Jokinen J. 2022. Seinäjoen seudun ja Etelä-Pohjanmaan bioindikaattoritutkimus 2022. Eurofins Ahma Oy.
- Partanen, P. & Veijola, H. 1996. Bioindikaattoriseurannan tilastollinen arviointi. YTV, Helsinki. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996:18. ISSN 0357-5454.
- Pihlström, M. & Myllyvirta, T. 1995. Ilman epäpuhtauksien leviämisen ja vaikutustutkimus Itä-Uudellamaalla, Lahden seudulla, Mikkelin läänissä ja Joutsassa 1994-1995. Itä-Uudenmaan ja Porvoonjoen vesien- ja ilmansuojeluyhdistys ry, Porvoo. Tutkimusraportti.
- Piutunen, S. 1993. Imatran alueen jäkäläkartoitus vuonna 1993. Imatran kaupunki. Ympäristönsuojelutoimisto.
- Piutunen, S. 2022. Lupavelvollisten laitosten sijainti Lappeenrannan seudulla vuonna 2022. Lappeenrannan seudun ympäristötoimi. Kirjallinen tiedonanto 11/2022.
- Polojärvi, K., Niskanen, I., Haahla, A. & Ellonen, T. 2005. Mittaustarkkuus mäntyjen runkojäkäläistön ja sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioiden havainnoinnissa. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. Tutkimusraportti 89/2005.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. *Biometria*. Helsinki, Yliopistopaino, 569 s. ISBN 951-570-032-9.
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rundgren, E. 2013. Kuopion kaupungin ilman laatua mittaava jäkäläbioindikaattoritutkimus vuonna 2013.
- Ruuth, J., Toivanen, H., Kuhmonen, I., Leppänen, E. ja Kiljunen, A. 2016a. Kanta- ja Päijät-Hämeen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuonna 2014. Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 6/2016.
- Ruuth, J., Toivanen, H., Kuhmonen, I. ja Kiljunen, A. 2016b. Porin-Harjavallan alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2014-2015. Nab Labs Oy. Tutkimusraportti 31/2016.
- Ruuth, J., Keskitalo, T., Talvitie, T., Korhonen, K. 2020. Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2021. Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 15 /2021.

- Ruuth, J., Keskitalo, T. 2021. Uudenmaan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta 2020. Uudenmaan ELY-keskus. Raportteja 13/2021
- SFS 5670. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Jäkäläkartoitus. 1990. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.
- Toivanen, H., Ruuth, J., Kuhmonen, I. ja Kiljunen, A. 2016. Vaasan seudun bioindikaattoritutkimus vuonna 2013. Nab Labs Oy. Tutkimusraportti 36/2016.
- Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu 2020. Ilman epäpuhtauksien päästöt Suomessa. Suomen ympäristökeskus. Tiedot poimittu 11/2022.