



# Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2020

JANNE RUUTH | TONI KESKITALO | TUOMAS TALVITIE | KARI T. KORHONEN



# Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2020

JANNE RUUTH  
TONI KESKITALO  
TUOMAS TALVITIE  
KARI T. KORHONEN

RAPORTEJA 15 | 2021

Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2020

Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus

Taitto: Scanseri Oy

Kansikuva: Janne Ruuth

Kartat: Toni Keskitalo

Painotalo: Scanseri Oy

ISBN 978-952-314-917-5 (painettu)

ISBN 978-952-314-918-2 (PDF)

ISSN 2242-2846

ISSN 2242-2846 (painettu)

ISSN 2242-2854 (verkkojulkaisu)

URN:ISBN: 978-952-314-918-2

[www.doria.fi/ely-keskus](http://www.doria.fi/ely-keskus)

# Sisältö

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Tutkimusalue .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Yleiskuvaus .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Tutkimusalueen ilmanlaatu .....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Päästöt .....	8
2.2.2 Ilmanlaatu tausta-aseilla .....	21
<b>3. Tutkimusaineisto ja -menetelmät .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Havaintoalat.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Tutkimusryhmä ja maastotöiden ajankohta.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Havupuiden epifyyttijäkälien kartoittaminen .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4 IAP-indeksi.....</b>	<b>35</b>
<b>3.5 Jäkäläkartoituksen virhelähteet ja luotettavuus.....</b>	<b>36</b>
<b>3.6 Sammalnäytteiden alkuainepitoisuudet ja niiden määrittäminen .....</b>	<b>37</b>
3.6.1 Sammalnäytteet.....	38
3.6.2 Sammalen alkuainepitoisuuksien analysointiin liittyvät virhelähteet ja luotettavuus .....	38
<b>3.7 Paikkatietomenetelmät .....</b>	<b>38</b>
<b>3.8 Tilastomenetelmät.....</b>	<b>39</b>
3.8.1 Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot .....	39
3.8.2 Vuosien väliset vertailut .....	39
3.8.3 Regressioanalyysi.....	40
3.8.4 Pääkomponenttianalyysi .....	40
<b>4. Tulokset.....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Runkojäkälät.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste .....	41
4.1.2 Yleinen vaurioaste .....	44
4.1.3 Jäkälälajien määrät ja yleisyys.....	47
4.1.4 Peittävyudet .....	56
4.1.5 IAP-indeksi .....	58
<b>4.2 Sammalten alkuainepitoisuudet .....</b>	<b>61</b>
<b>5. Tulosten tarkastelu.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1 Taustamuuttujien vaikutus.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2 Tutkittujen muuttujien välinen riippuvuus .....</b>	<b>78</b>
5.2.1 Jäkälämuuttujat.....	78
5.2.2 Sammalten alkuainepitoisuudet.....	81
<b>5.3 Regressioanalyysit .....</b>	<b>82</b>
5.3.1 IAP-indeksi .....	83
5.3.2 Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajien lukumäärä .....	83
5.3.3 Sormipaisukarpeen vaurioaste .....	83
5.3.4 Yleinen vaurioaste .....	84
5.3.5 Sormipaisukarpeen peittävyys.....	84
5.3.6 Luppojen peittävyys .....	85
5.3.7 Levän yleisyys .....	85

<b>5.4 Pääkomponenttianalyysi .....</b>	<b>86</b>
<b>5.5 Yhteenveto .....</b>	<b>91</b>
<b>6. Vertailu .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1 Vuosien välinen vertailu .....</b>	<b>92</b>
6.1.1 Runkojäkälät .....	92
6.1.2 Sarmalten alkuainepitoisuudet .....	97
<b>6.2 Vertailu muualla Suomessa tehtyihin tutkimuksiin sekä alueen kuntien välillä.....</b>	<b>99</b>
6.2.1 Runkojäkälät .....	99
6.2.2 Sarmalten alkuainepitoisuudet .....	100
<b>6.3 Metsätuhoalan muutokset .....</b>	<b>101</b>
<b>7. Johtopäätökset .....</b>	<b>104</b>
<b>8. Lähdeluettelo .....</b>	<b>107</b>
<b>9. Kuvailulehti .....</b>	<b>109</b>

## Termien ja lyhenteiden selityksiä

Termi tai lyhenne	Selitys	Lyhennys sanoista
CIT	metsätyyppi: jäkälätyyppi (karukkokangas)	
CT	metsätyyppi: kanervatyyppi (kuiva kangas)	
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntaliittymä	
MT	metsätyyppi: mustikkatyyppi (tuore kangas)	
NO	typpioksidi	
NO <sub>2</sub>	typpidioksidi	
NO <sub>x</sub>	typen oksidit; tarkoittaa yhteisenä käsitteenä typpi-dioksidia ja typpioksidia	
O <sub>3</sub>	otsoni; hapen muoto, joka on maanpinnalla haitallista eliöille ja joka vaikuttaa typpidioksidin ja typpioksidin muuntumiseen toisikseen	
OMT	metsätyyppi: käenkaali-mustikkatyyppi (lehtomainen kangas)	
PM	hiukkaset	particulate matter
PM <sub>10</sub>	hengitettävät hiukkaset; hiukkaskokoluokka, jossa hiukkasten koko on enintään 10 µm	particulate matter, 10 µm
PM <sub>2.5</sub>	pienhiukkaset; hiukkaskokoluokka, jossa hiukkasten koko on enintään 2,5 µm	particulate matter, 2.5 µm
ppb	miljardisosa; pitoisuuden mittayksikkö, esim. millilitra tuhannessa kuutiometrissä	parts per billion
ppm	miljoonasosa; pitoisuuden mittayksikkö, esim. millilitra kuutiometrissä	parts per million
SO <sub>2</sub>	rikkidioksidi	
SOMO35	kumulatiivinen summapitoisuus (µg/m <sup>3</sup> ) kynnysarvon 35 ppb eli 70 µg/m <sup>3</sup> ylittävistä otsonipitoisuuksista vuoden ajalta	sum of means over 35
spp.	lajit; tarkoittaa suvun kaikkia lajeja luppen ja naivojen kohdalla	species
VT	metsätyyppi: puolukkatyyppi (kuivahko kangas)	

# 1. Johdanto

Bioindikaattoreina käytetään eliölajeja, jotka ilmaisevat ympäristön tilaa ja siinä tapahtuvia muutoksia. Ympäristön tilassa tapahtuvat muutokset voidaan havaita esimerkiksi eliölajin rakenteen, eliöiden alkuainepitoisuuksien, runsauden ja levinneisyyden sekä eliöyhteisöjen rakenteen muutoksina. Vuoden 2020 seurannassa ilman epäpuhtauksien vaikutuksien ilmentäjänä käytettiin männyllä kasvavia runkojäkäliä ja sammalten alkuainepitoisuuksia. Seuranta toteutettiin 315 havaintoalalla, koska maakunnan uusien toimintojen sekä Ilomantsin Pötsönvaaraan uusitun ilmanlaadun tausta-aseman yhteyteen nähtiin tarpeelliseksi perustaa yhteensä 15 uutta alaa. Epifyyttijäkälälajiston esiintyminen, runsaus ja kunto havainnoitiin 5 männyltä jokaiselta havaintoalalta. Sammalten alkuainepitoisuudet määritettiin 101 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 aina myös luontaiset tekijät, jotka voivat joko puskuroida tai voimistaa sitä. Lisäksi tutkimuksessa analysoitiin kemiallisesti sammalien raskasmetallipitoisuuksia. Sammalten kemiallinen analyysi on hyvä menetelmä raskasmetallilaskeuman tutkimiseen, sillä tiheä sammalmatto pidättää lähes kaiken hiukkasten muodossa tulevan laskeuman.

Pohjois-Karjalan ilmanlaatua on selvitetty 1980- ja 1990-luvuilla useissa kuntakohtaisissa ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa (Paavo Ristola Oy 1988, Paavo Ristola Oy 1989, Lehtonen-Saira & Hokkanen 1990, 1991a, 1991b, 1992a). Näiden taajama-alueiden ilmanlaadun selvittämiseen keskittyneiden tutkimusten lisäksi vuonna 1992 tutkittiin Pohjois-Karjalan tausta-alueiden ilmanlaatua bioindikaattoreiden avulla (Lehtonen-Saira & Hokkanen 1992b). Näissä tutkimuksissa ilmanlaadun bioindikaattoreina käytettiin mäntyjen elinvoimaisuutta, männyn neulasten rikkipitoisuutta ja männyn runkojäkäliä.

Vuosina 1998-1999 tehtiin koko Pohjois-Karjalan maakunnan kattava ilmanlaadun bioindikaattoriselvitys, johon osallistuivat Kiihtelysvaaraa, Tuupovaaraa, Värtsilää ja Juukaa lukuun ottamatta kaikki Pohjois-Karjalan kunnat. Tutkimuksessa perustettiin maakunnan alueelle 611 pysyvää tutkimusala, joilta tutkittiin mäntyjen runkojäkäliä, mäntyjen elinvoimaisuutta sekä männyn neulasten ja sammalten alkuainepitoisuuksia (Niskanen ym. 1999). Vuonna 2010 tutkimus toteutettiin samoilla tutkimusaloilla kuin edeltävä tutkimus, mutta seurantaverkko harvennettiin 300 tutkimusalaan.

Vuonna 2020 Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus (ELY-keskus) kilpailutti bioindikaattoritutkimuksen järjestämisen vuodelle 2020-2021. Vuoden 2020 tutkimuksesta päätettiin jättää pois neulasten alkuainepitoisuus ja harsuuntumisarvioinnit. Työn tekijäksi valittiin kilpailutuksen perusteella Ramboll Finland Oy. Tutkimusta koordinoi ohjausryhmä, joka koostui yhteensä kuudesta ELY-keskuksen, kuntien, Luken ja Rambollin asiantuntijasta. Ohjausryhmässä oli lisäksi 2 kpl yritysedustajaa ja 2 kpl kuntien edustajaa. Ohjausryhmä kokoontui tutkimuksen aikana yhteensä kolme kertaa; 25.5.2021, 25.11.2020 sekä 21.4.2021. Tutkimuksen rahoittajille lähetettiin kuusi infokirjettä tutkimuksen etenemisestä. Lisäksi rahoittajille sekä medialle järjestettiin mahdollisuus maastotöihin tutustumiseen Joensuussa 9.10.2020. Tutkimuksesta uutisoitiin paikallislehdissä sekä radiossa. Tutkimuksen rahoitukseen osallistuivat kaikki Pohjois-Karjalan kunnat (pl.Heinävesi, joka liittyi 2021), Pohjois-Karjalan maakuntaliitto, Pohjois-Savon ELY-keskus, Liikenne- ja infrastruktuuri -vastuualue ja seuraavat alueelliset yritykset:

Kitee:

Surfactor Finland Oy

Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Kiteen saha

Hexion Oy

Joensuu:

UPM Plywood Oy, Joensuun vaneritehdas  
KM-yhtymä Oy  
Savon Voima Joensuu Oy, Joensuun voimalaitos  
Savon Voima Joensuu Oy, Käpykankaan lämpökeskus  
Abloy Oy  
Stora Enso Oyj, Enocellin tehdas  
Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Uimaharjun saha  
Valio Oy, Joensuun tehdas  
Kaivospuu Oy

Outokumpu:

Elementis Minerals B.V. Branch Finland, Vuonoksen tehdas

Polvijärvi:

Elementis Minerals B.V. Branch Finland, Karnukan kaivos

Nurmes:

ScanPole Oy, Höljäkän kyllästämö

Lieksa:

Pankakoski Mill Oy  
Amcors Flexibles Finland Oy  
Nevel Oy, Kevätniemen voimalaitos

Kontiolahti:

Adven Oy, Jotwire Oy:n energiantuotantolaitos  
Adven Oy, Kontiorannan energiantuotantolaitos

Tutkimuksen tuloksia verrattiin vuoden 2010 toteutetun tutkimuksen tuloksiin männyn runkojäkälien ja sammalten alkuainepitoisuuksien osalta. Tuloksia tulkittiin tarkastelemalla ilman laatua kuvaavien indikaattorimuuttujien vaihtelua suhteessa päästölähteisiin, vertailemalla lajistosuhteissa ja jäkälien kunnossa tapahtuneita muutoksia eri vuosina sekä vertaamalla jäkälälajiston ja sammalten alkuainepitoisuuksien muutoksia päästömäärien kehitykseen. Lisäksi tuloksia vertailtiin samaan aikaan muualla Suomessa tehtyihin ilmanlaadun bioindikaattoritutkimusten tuloksiin. Maastotyöt tehtiin syksyllä 2020, ja niihin osallistuivat ympäristöasiantuntija Tuomas Talvitie ja projektipäällikkö Janne Ruuth. Tutkimuspäällikkö Toni Keskitalo ja projektipäällikkö Janne Ruuth analysoivat tutkimusaineiston ja kirjoittivat tämän tutkimusraportin.

Metsäntutkimuslaitos (Metla) nykyään Luonnonvarakeskus (Luke) on tutkinut Pohjois-Karjalan metsien terveydentilaa osana valtakunnallista metsien seurainta, jota on toteutettu pysyville koelohjoilla vuodesta 1985 lähtien. Luke tuotti aineistoa tutkimukseen metsätuhojen pinta-alan kehityksestä 2010-luvulla Pohjois-Karjalassa. Aineistona oli Luonnonvarakeskuksen valtakunnan metsien inventoinnin koelohjo Pohjois-Karjalassa (VMI11 2009-2013 ja VMI12 2014-2018, osittain myös VMI13 2019-2020). Kari T. Korhonen Lukelta analysoi ja kirjoitti aineiston metsätuhojen pinta-alan kehityksestä (kappale 6.3) tähän raporttiin.



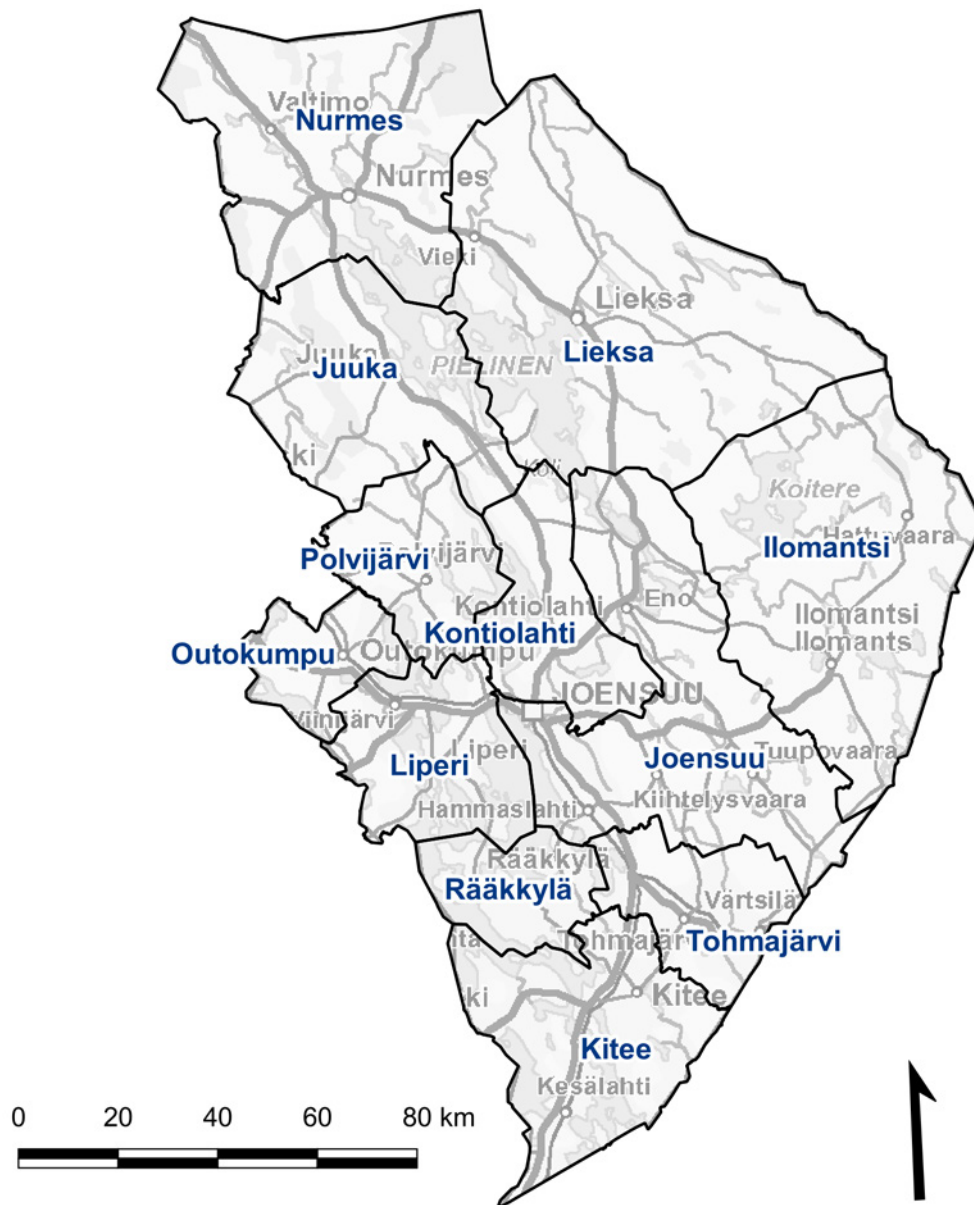
## 2. Tutkimusalue

### 2.1 Yleiskuvaus

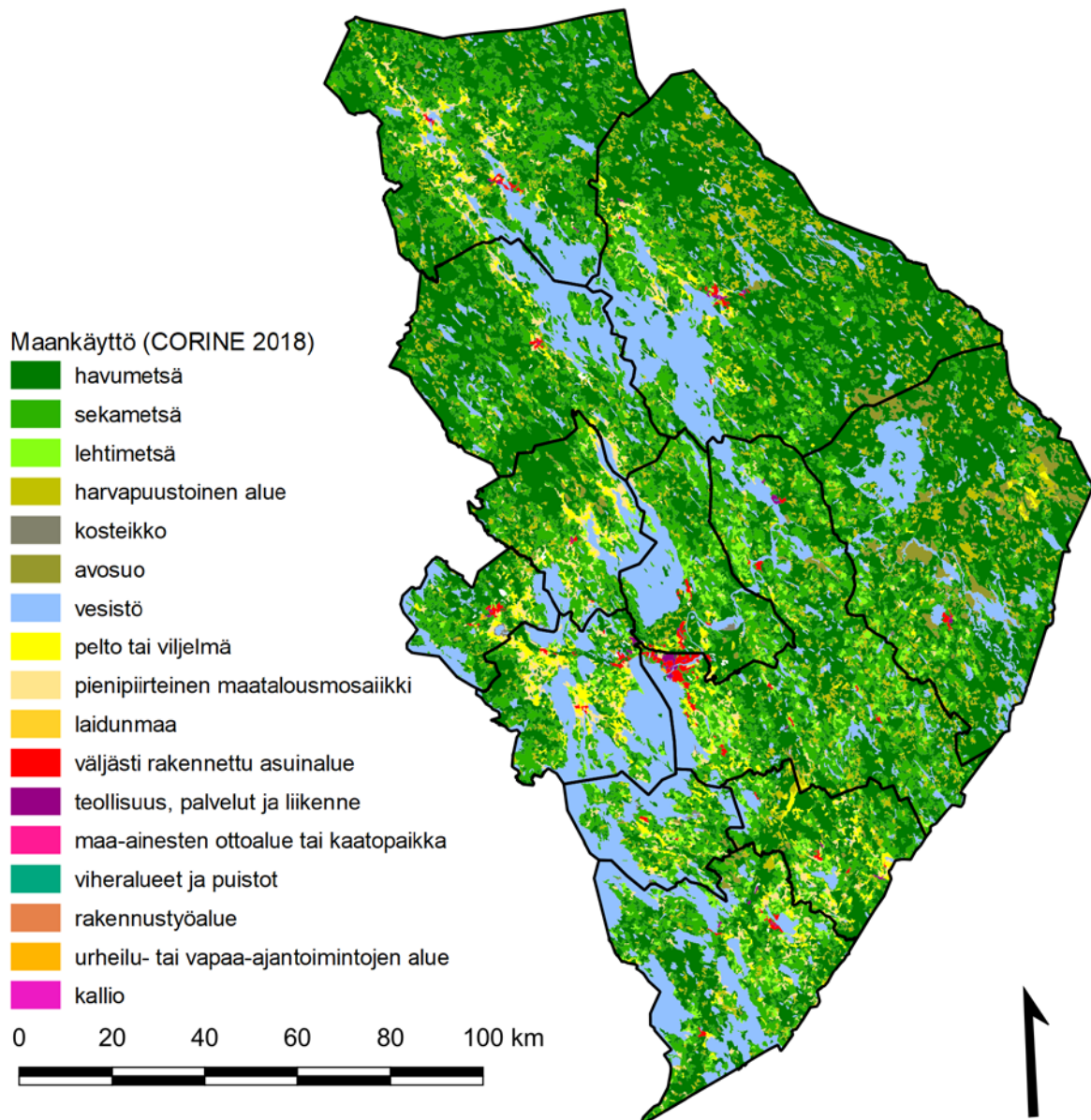
Tutkimusalue kattoi Pohjois-Karjalan maakunnan alueen kokonaisuudessaan (Kuva 1). Pohjois-Karjalan luonto on monimuotoista ja omaleimaista. Maakunnan eteläosa kuuluu eteläboreaaliseen Järvi-Suomen vyöhykkeeseen ja pohjoisosa keskiboreaaliseen Pohjois-Karjalan-Kainuun vyöhykkeeseen. Maakunta on myös mantereisen ja mereisen ilmaston kohtaamisaluetta .

Maakunnan vilkkaimmin liikennöityjä teitä ovat valtatie 6 (Kesälahdelta pohjoiseen läpi maakunnan), 9 (Joensuusta länteen) ja 23 (Liperistä lounaaseen). Tihein asutus maakunnassa on keskittynyt kaupunki- ja kuntakeskusten yhteyteen etenkin Joensuun kaupungin alueelle. Valtaosa Pohjois-Karjalan maakunnan pinta-alasta on metsää ja suota. Myös järvet, joista suurimpia ovat Pielinen, Orivesi, Pyhäselkä ja Höytiäinen, peittävät suurta osaa maakunnasta. Viljelyalueet ovat keskittyneet etenkin Joensuun ja Liperin seudulle, Keski-Karjalaan, Höytiäisen pohjoisrannoille sekä Pielisen pohjois- ja luoteispuolelle (Kuva 2). Pohjois-Karjalan maakunnan taloudellinen toiminta perustuu pääasiassa mittavien metsävarojen hyödyntämiseen, mikä on vähentänyt maakunnan metsä- ja suoluonnon monimuotoisuutta. Metsätalouden ohella myös kaivostoiminta ja kaivannaisteollisuus ovat merkittävässä asemassa alueella, mutta valtaosa väestöstä saa elantonsa palveluelinkeinoista (Pohjois-Karjalan ympäristökeskus 2008).

Vuoden 2010 jälkeen Pohjois-Karjalassa on tapahtunut muutamia kuntaliitoksia. Nykyään Kesälahden alue kuuluu Kiteeseen ja Valtimon alue Nurmekseen. Havaintoalojen numerointi on säilytetty ennallaan. Kuntakohtaisissa tarkasteluissa aluejako on vuoden 2020 kuntajaon mukainen. Heinävesi on liittynyt Pohjois-Karjalan maakuntaan vuoden 2021 alusta, joten se ei ole ollut mukana tässä tutkimuksessa, jonka maastotyöt tehtiin vuonna 2020.

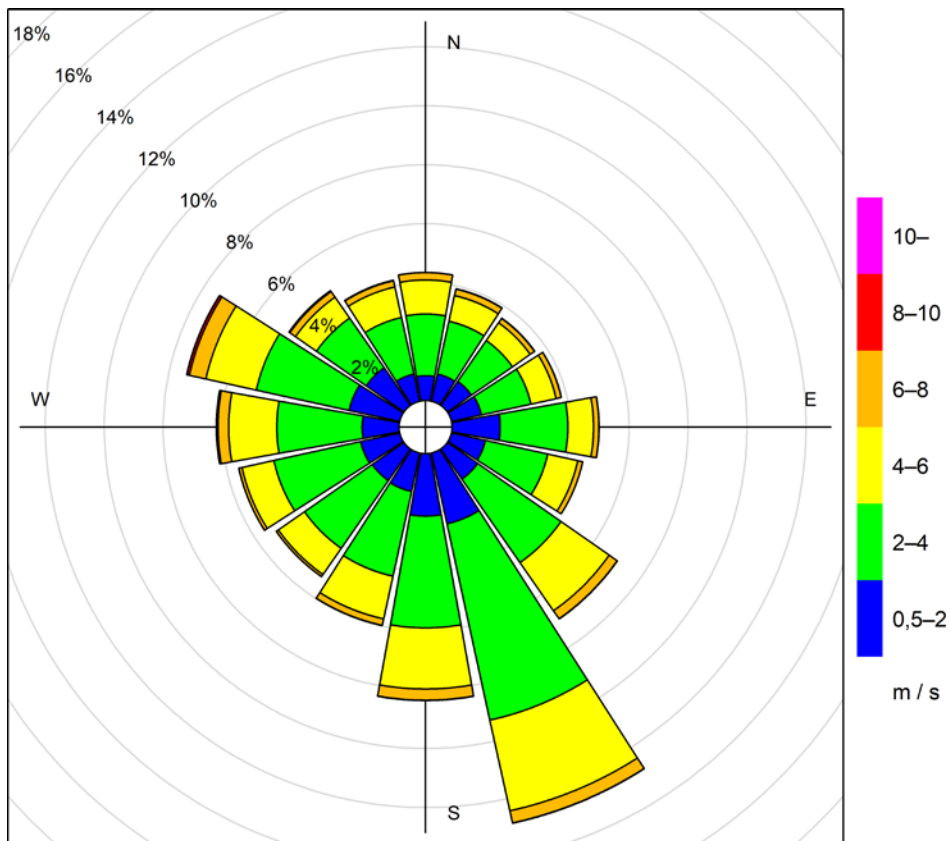


Kuva 1. Pohjois-Karjalan ilmanlaadun bioindikaattoriseurantaan vuonna 2020 osallistuneet kunnat.

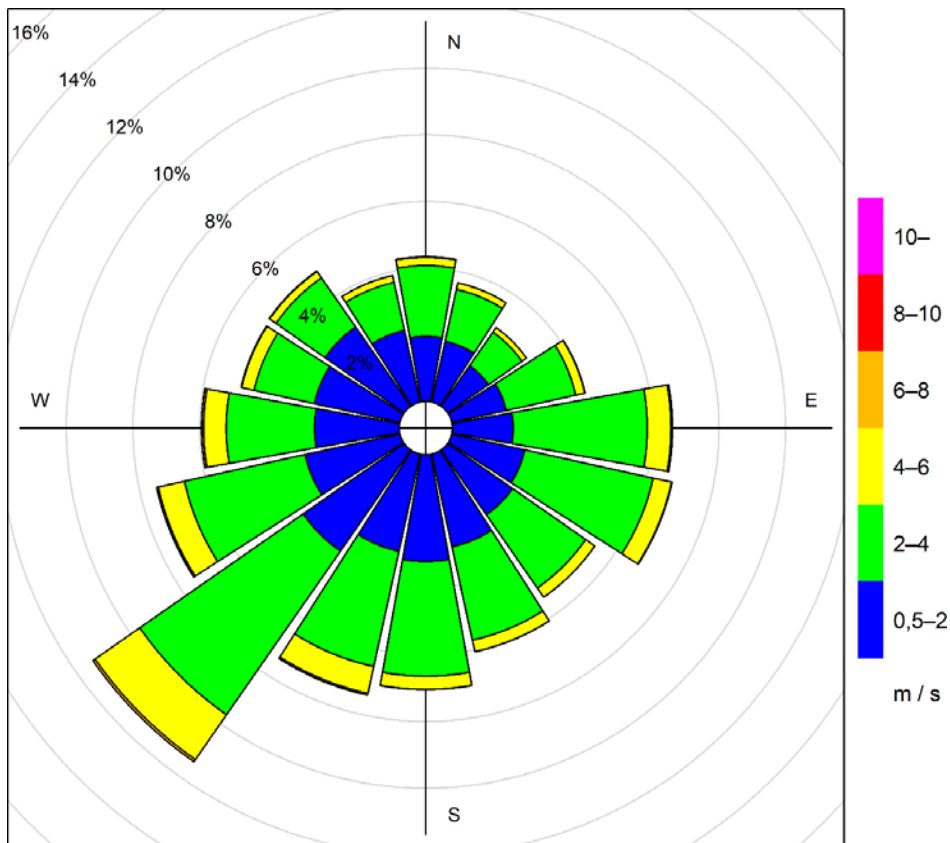


Kuva 2. Maankäyttö Pohjois-Karjalan alueella (CORINE 2018, Lähde: SYKE (osittain LUKE, MAVI, LIVI, DVV, EU, MML Maastotietokanta 01/2017)).

Pohjois-Karjalassa yleisimmät tuulen suunnat jaksolla 2010–2019 olivat eteläsektorissa, mutta yleisin suunta vaihteli havaintoasemasta riippuen. Joensuun lentoasemalla Liperissä yleisin oli mainitulla jaksolla eteläkaakko (13 % ajasta) (Kuva 3) ja Ilomantsin Pötsönvaarassa lounas (11 % ajasta) (Kuva 4). Joensuun lentoasemalla Pyhäselän ja Höytiäisen välissä tuulet olivat keskimäärin voimakkaampia kuin Pötsönvaarassa.



Kuva 3. Tuulen suunnat ja nopeudet Joensuun lentoasemalla tuntiavoista laskettuna vuosina 2010–2019. (Ilmatieteen laitos, avoin data)



Kuva 4. Tuulen suunnat ja nopeudet Ilomantsin Pötsönvaaran sääaseman tuntiavoista laskettuna vuosina 2010–2019. (Ilmatieteen laitos, avoin data)

## 2.2 Tutkimusalueen ilmanlaatu

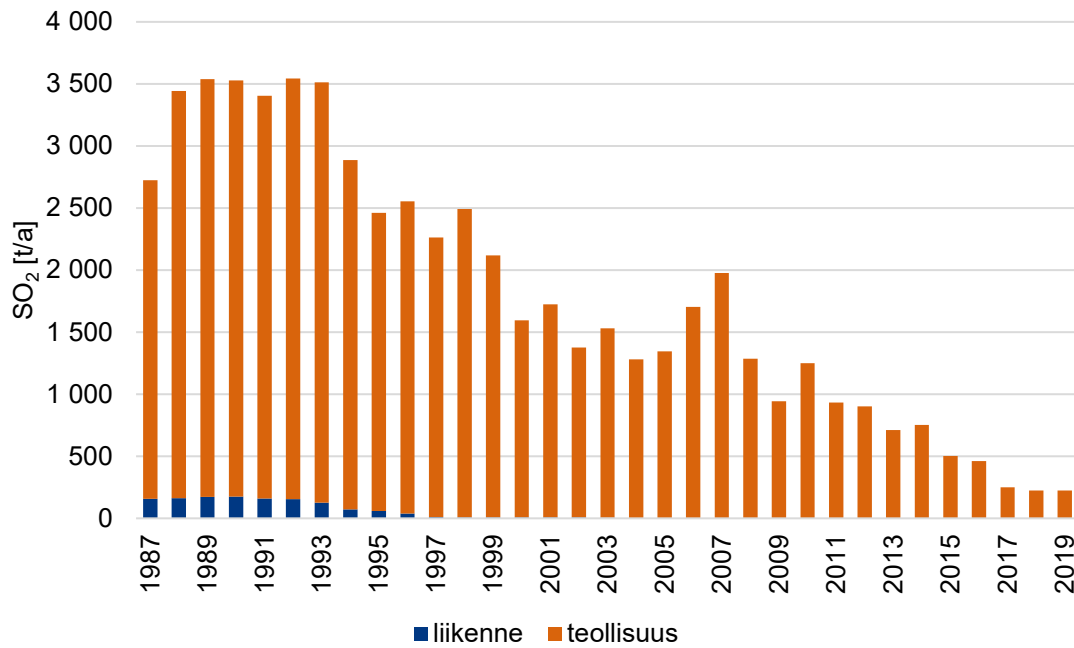
### 2.2.1 Päästöt

Tässä luvussa esitetään päästömäärien kehitys lupavelvollisten laitosten ja liikenteen osalta tutkimusalueella vuodesta 1987 alkaen (ympäristöhallinnon Vahti-tietokanta, YLVA-tietojärjestelmä, LIISA-laskentajärjestelmä). Lisäksi esitetään kuntakohtaiset päästömäärät vuonna 2019 sekä lupavelvollisten päästölähteiden päästömäärät 2019. Päästötiedot on raportoitu asiakkaan toimittamien tietojen perusteella (ELY-keskus, Pohjois-Karjala kunnat 2020), ja liikenteen päästötiedot on laskettu LIISA 2019 - laskentamallin tuloksista (VTT 2020). Vahti- ja YLVA-tietojärjestelmien päästötiedot kattavat lupavelvolliset laitokset. Tiedot esitetään alkaen vuodesta 1987.

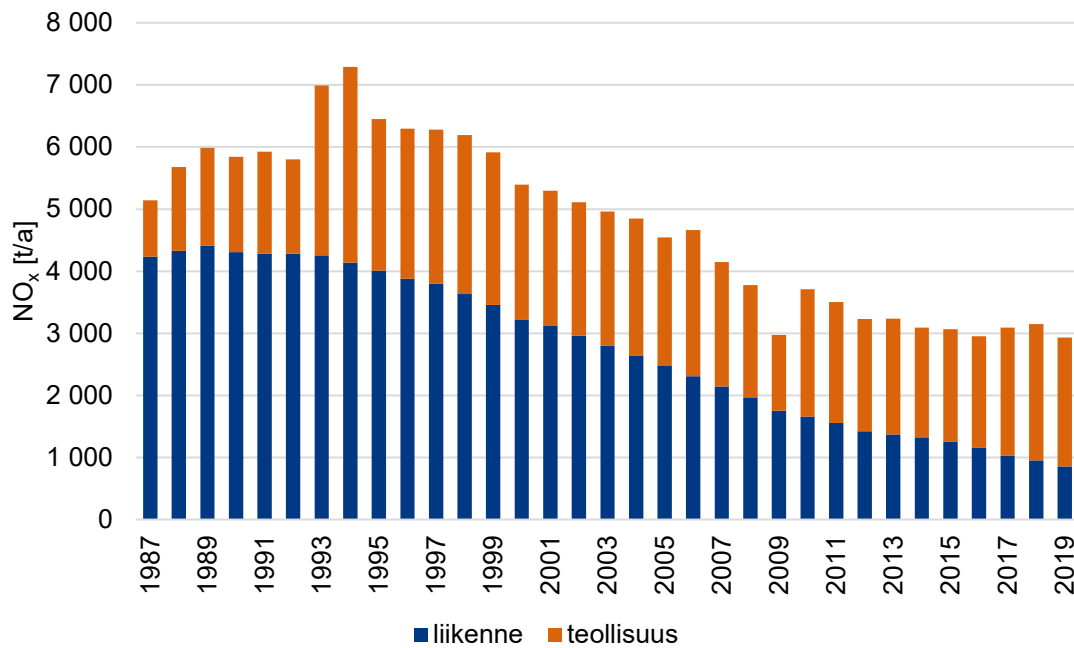
Kuvissa 5-7 on esitetty tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten sekä liikenteen päästöjen kehittyminen vuodesta 1987 vuoteen 2019 rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten osalta. Rikkidioksidin päästöt ovat laskeneet melko tasaisesti 1980-luvun lopulta 2000-luvun alkuun saakka. 2000-luvun alkupuolella rikkidioksidin päästöt ovat pysytelleet pääasiassa 1000-1500 tonnin vuositasolla, mutta vuosina 2004-2007 päästöt ovat selvästi kasvaneet, lähes 2000 tonniin vuodessa. Rikkidioksidin päästöt olivat alimmillaan vuonna 2009, jonka jälkeen ne palasivat lähes 2007 tasolle. Tämän jälkeen rikkidioksidin päästöt ovat laskeneet melko tasaisesti 2010-luvun lopulta vuoteen 2017 saakka. Vuoden 2017 jälkeen rikkidioksidin päästöt ovat pysytelleet pääasiassa 400 tonnin vuositasolla. Liikenteen osuus rikkidioksidin päästöistä on koko tarkasteluajanjaksolla ollut hyvin pieni.

Typen oksidien päästöt ovat tarkasteluajanjakson alun kasvun jälkeen vähentyneet tasaisesti vuoteen 2017 saakka. Liikenteen osuus typen oksidien kokonaispäästömäärästä on 1980- ja 1990-lukujen vaihteessa ollut huomattava. Päästöt ovat kuitenkin pienentyneet vuoteen 2017 asti, jonka jälkeen päästöt ovat olleet pienessä kasvussa, kunnes päästöt ovat jälleen kääntyneet laskuun vuonna 2019. Liikenteen osuus typen oksidien kokonaispäästömäärästä on laskenut tasaisesti koko tarkastelujakson ajan.

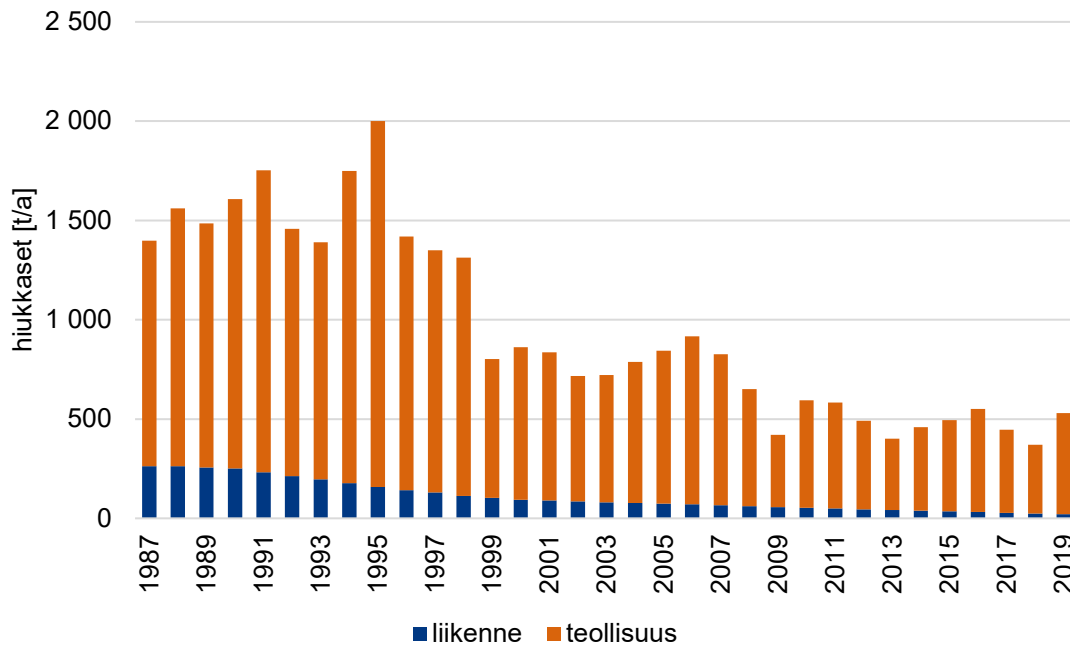
Hiukkaspäästöt ovat 2000-luvulle tultaessa pudonneet noin puoleen 1980-luvun lopun ja 1990-luvun päästömäärästä. Hiukkaspäästöt ovat 2000-luvulla pysytelleet jokseenkin samalla tasolla 600–700 tonnin tuntumassa, mutta vuonna 2009 kokonaishiukkaspäästöt putosivat alle 400 tonniin. Tämä johtui pääosin Enocellin tehtaan pitkästä seisokista vuonna 2009, jolloin tehtaan päästöt pienenevät yli puolella muihin vuosiin verrattuna. Tämän jälkeen päästöt palasivat likimain vuoden 2007 tasolle vuonna 2010, jonka jälkeen hiukkaspäästöjen määrä on vaihdellut 400-500 tonnin välillä. Liikenteen osuus Pohjois-Karjalan hiukkaspäästöistä on pieni.



Kuva 5. Tutkimusalueen teollisuuslaitosten ja liikenteen rikkidioksidin päästöt (t/a) vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020 ja LIISA 2020).



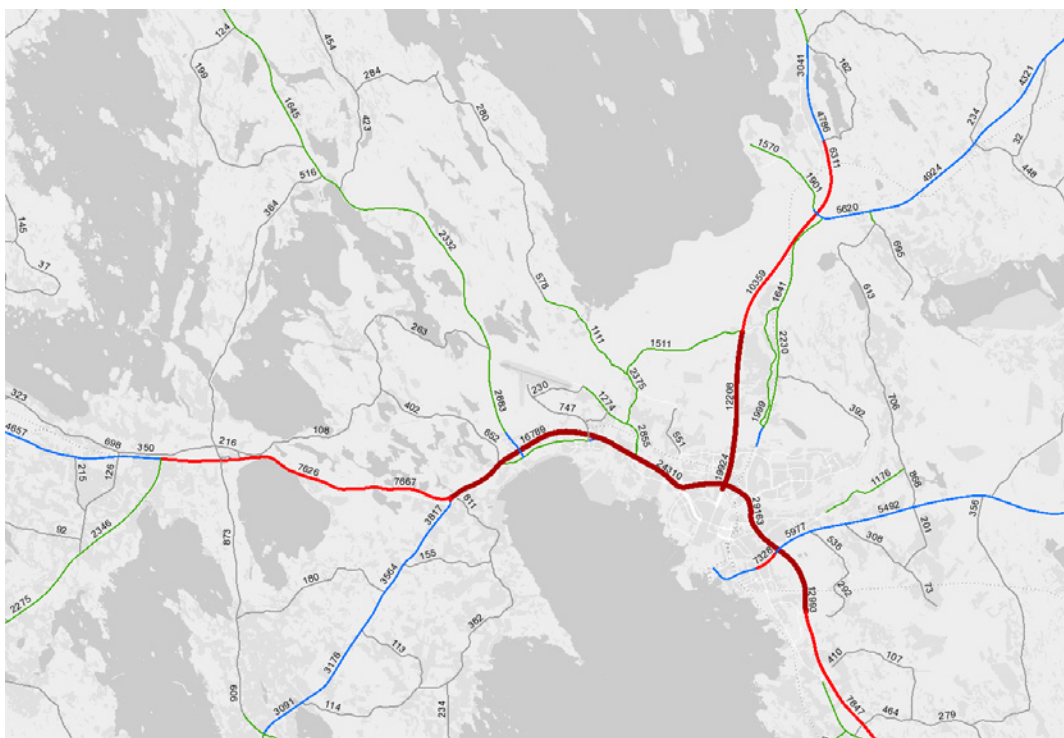
Kuva 6. Tutkimusalueen teollisuuslaitosten ja liikenteen typen oksidien päästöt (t/a) vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020 ja LIISA 2020).



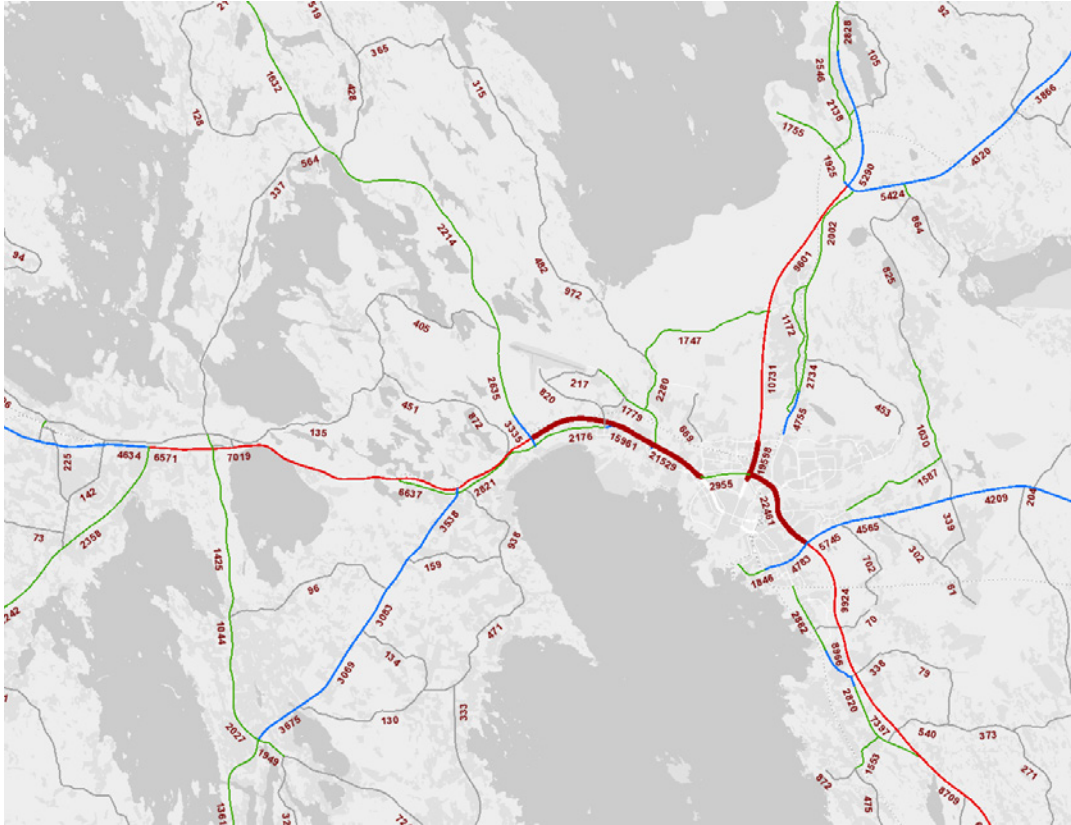
Kuva 7. Tutkimusalueen teollisuuslaitosten ja liikenteen hiukkaspäästöt (t/a) vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020 ja LIISA 2020).

Kuvissa (Kuva 8 ja Kuva 9) on esitetty keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla 2012 ja 2019. Liikennemäärät ovat Joensuun seudulla kasvaneet tutkimusvuosien välillä hieman. Esimerkiksi maakuntaa halkovalla 6-tiellä liikennemäärät ovat Joensuun eteläpuolella kasvaneet paikoin 30 % tutkimusten välillä ja 13% Joensuun läpi itä-länsi suuntaan kulkevalla tiellä 9. Joillakin osuuksilla liikenne on myös pysynyt likimain samana, kuten Liperistä lounaaseen kulkevalla valtatie 23:lla.

Liikennemäärät ovatkin Pohjois-Karjalassa kasvaneet kahden prosentin vuosivauhdilla aivan viime vuosiin asti. Liikennemäärän kasvusta huolimatta liikenteen päästöt ovat tarkasteluajanjaksolla tutkimusalueella pienentyneet (Kuva 8, Kuva 7, Kuva 9).



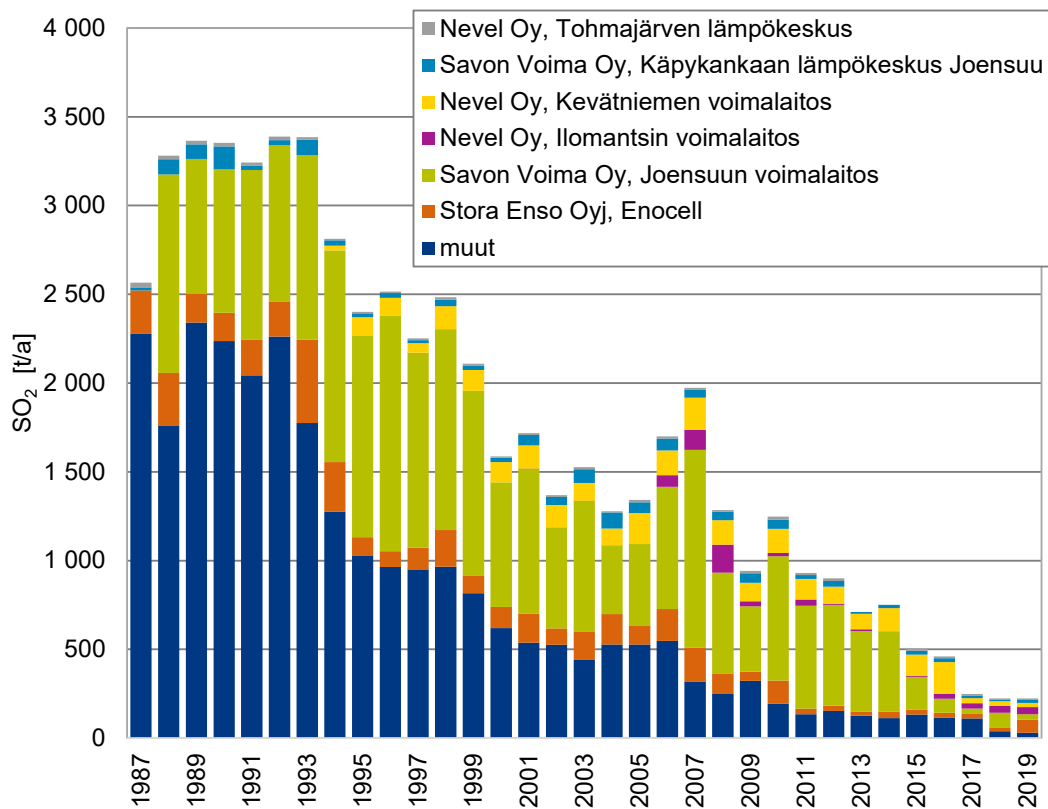
Kuva 8. Keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla vuonna 2019 (Väylävirasto 2021).



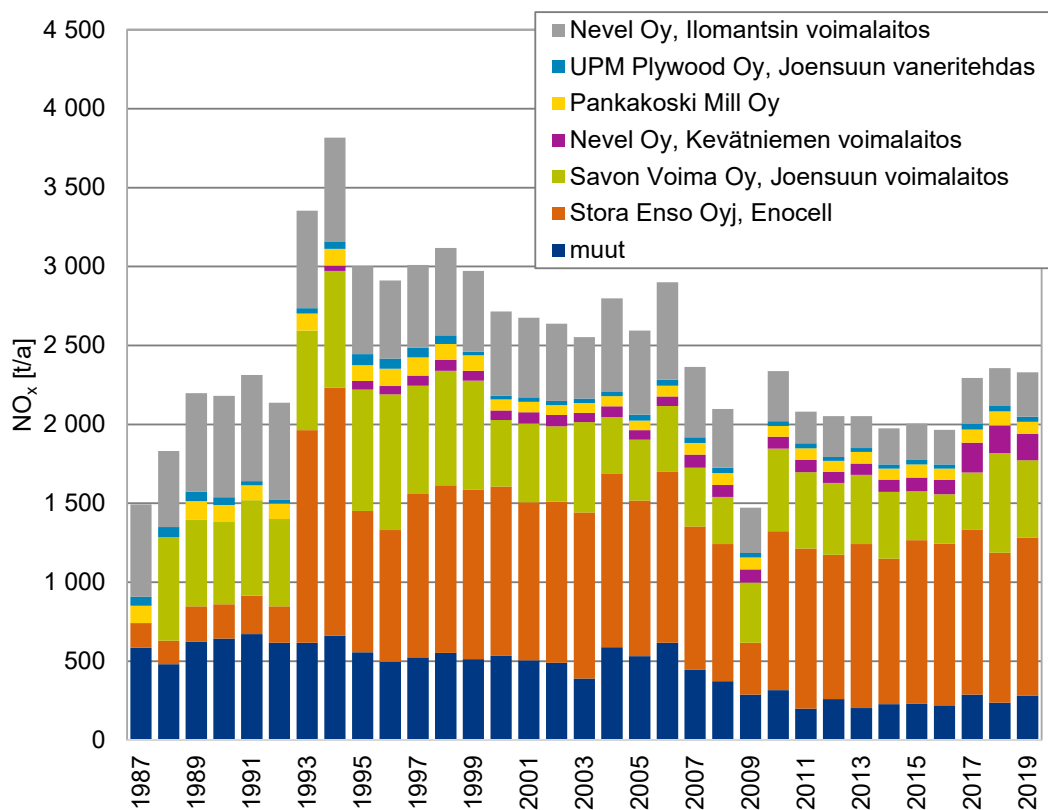
Kuva 9. Keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla vuonna 2012 (Väylävirasto 2021).

Kuvissa (Kuva 10, Kuva 11, Kuva 12) on esitetty SO<sub>2</sub>:n, NO<sub>x</sub>:n ja hiukkasten kohdalla kullekin kuusi merkittävää päästölähdettä ja muut päästöt yhteensä.

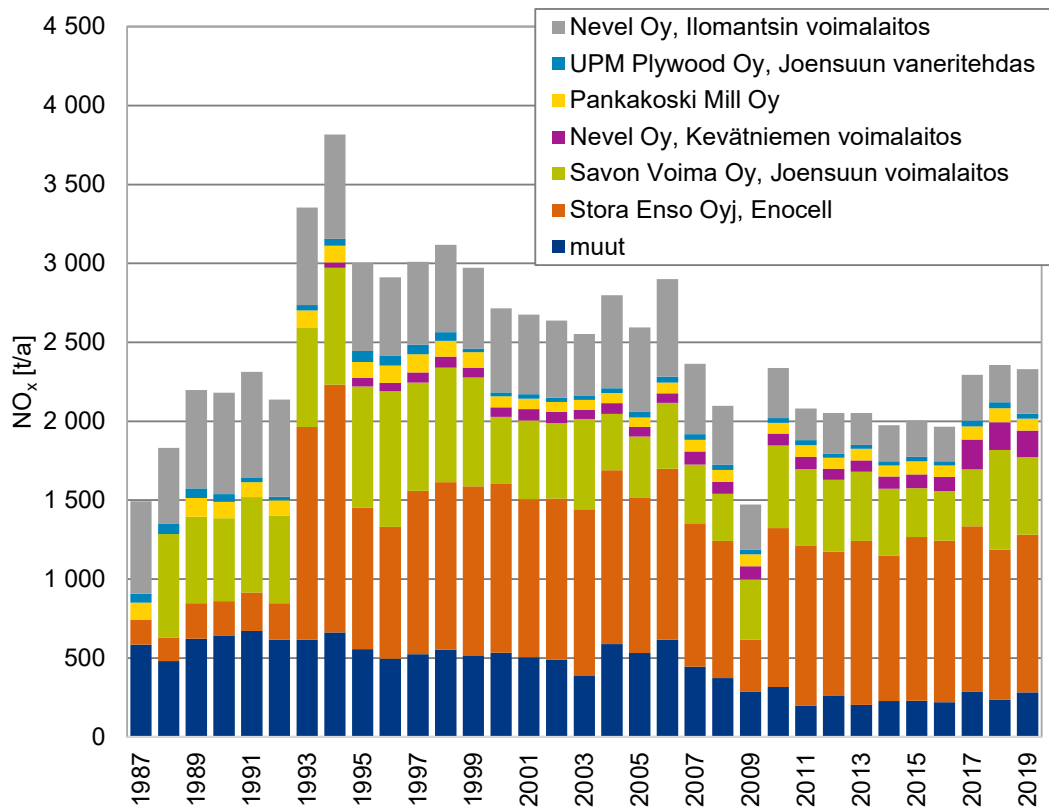




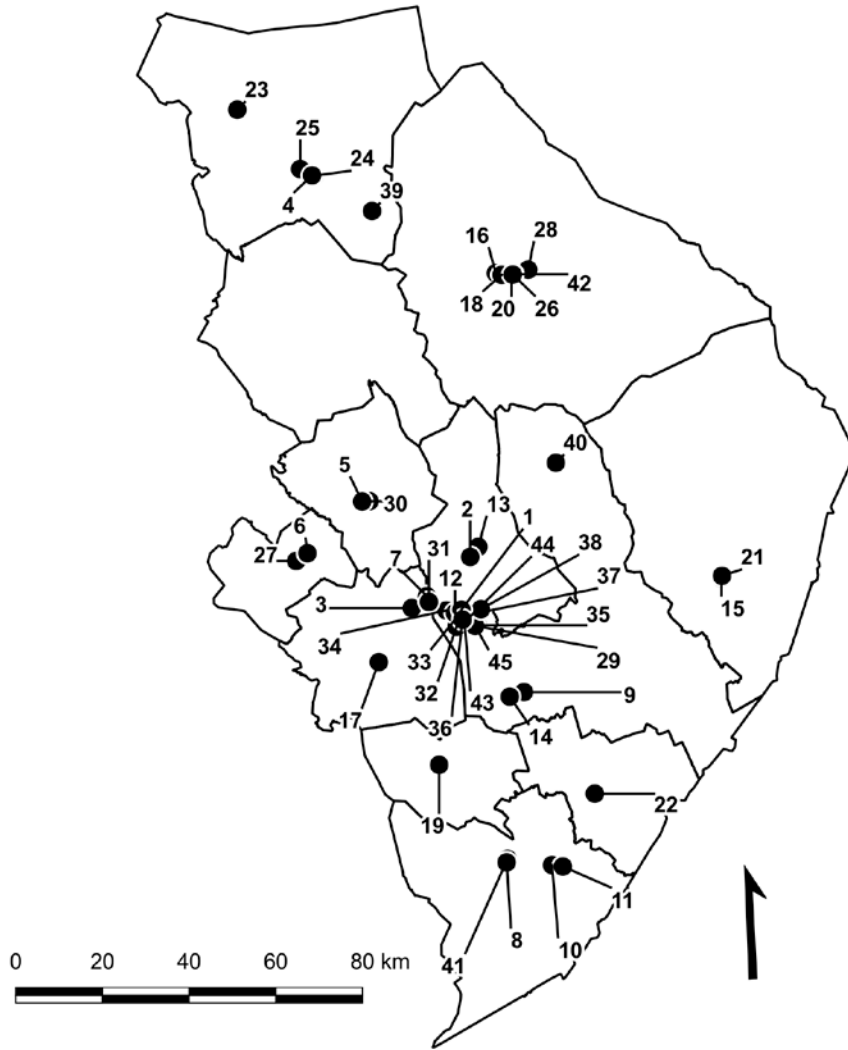
Kuva 10. Tutkimusalueen teollisuuden rikkidioksidipäästöt (t/a) päästölähteittäin vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).



Kuva 11. Tutkimusalueen teollisuuden tyyppien oksidien päästöt (t/a) päästölähteittäin vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).

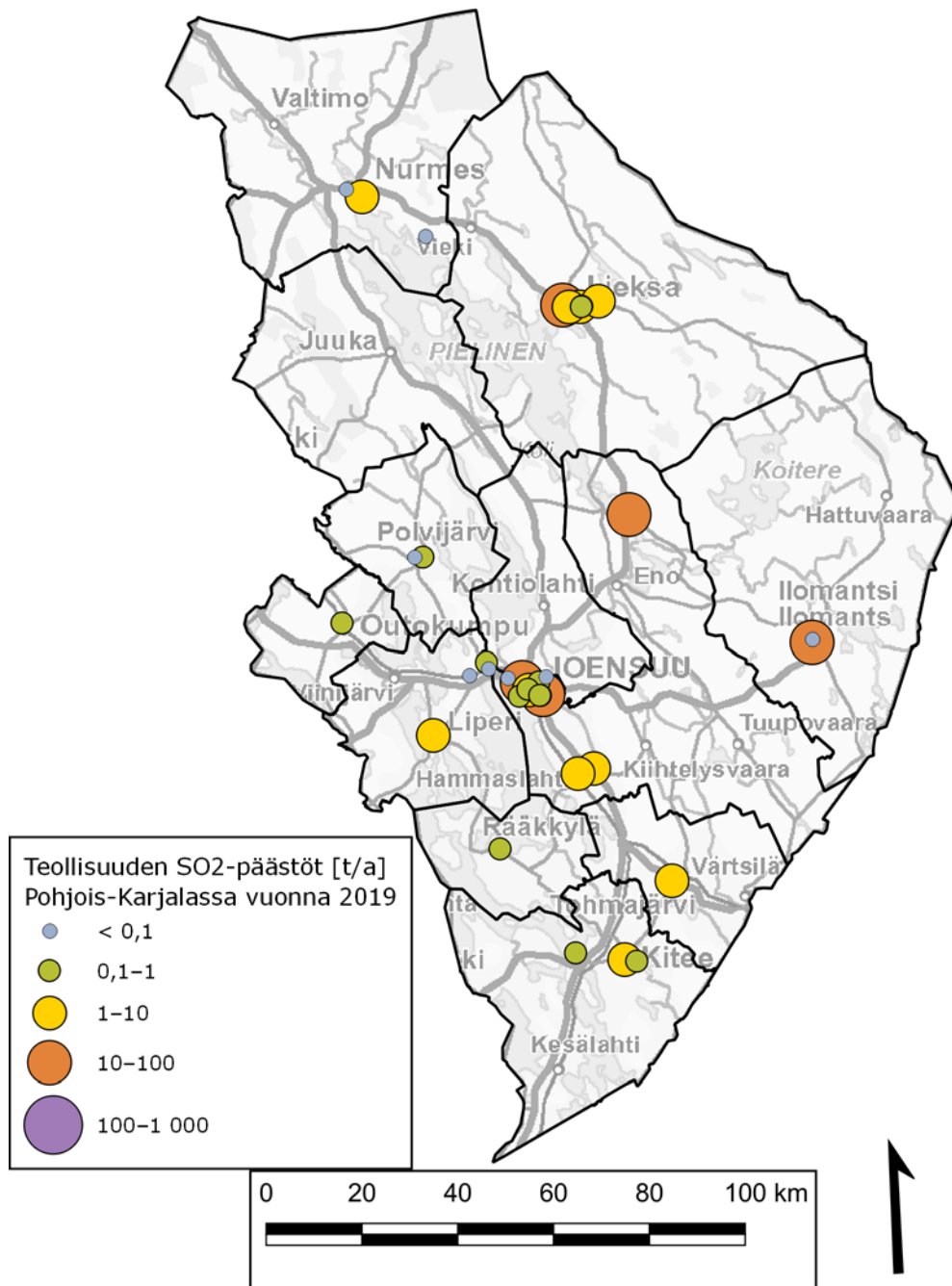


Kuva 12. Tutkimusalueen teollisuuden hiukkaspäästöt (t/a) päästölähteittäin vuosina 1987–2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).

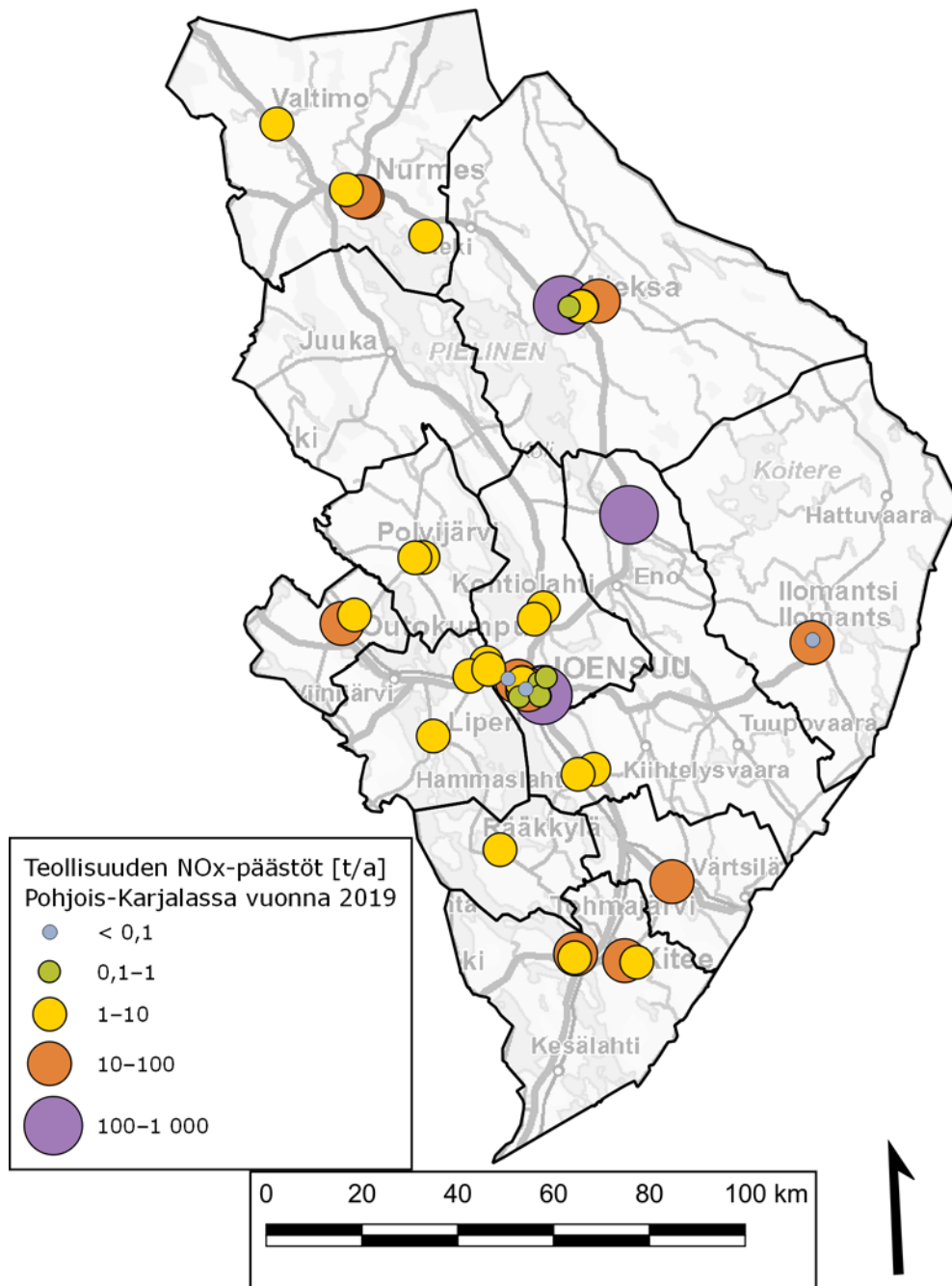


Kuva 13. Ilmoitetut pistepäästölähteet Pohjois-Karjalan alueella vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).

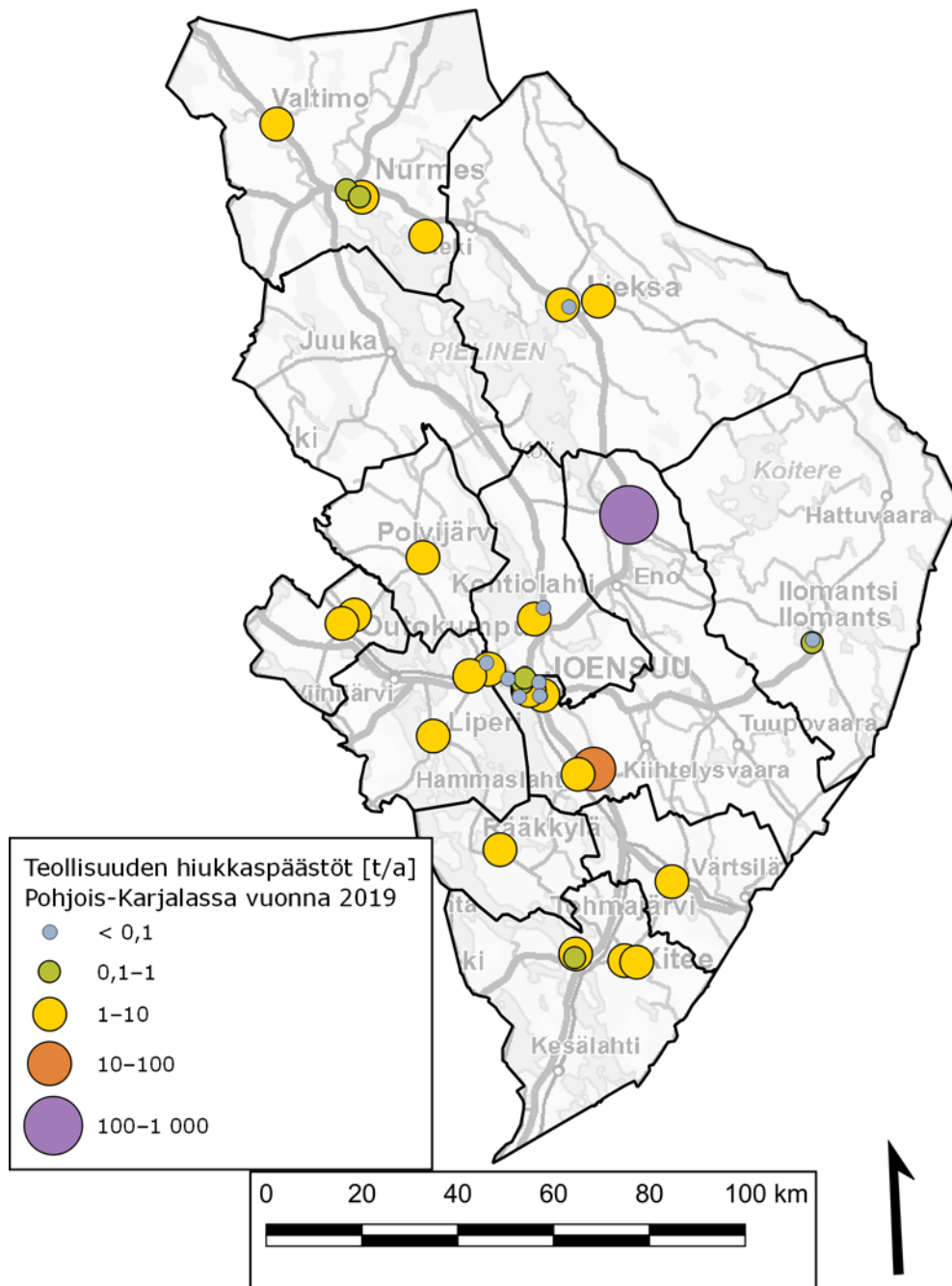
nro	Laitos	nro	Laitos
1	Abloy Oy	24	Nurmeksen Lämpö Oy, Ritoniemen lämpökeskus
2	Adven Oy, Lk 171 Kontioranta	25	Nurmeksen Lämpö Oy, Vinkerlahden lämpökeskus
3	Adven Oy, Ylämyllyn lämpökeskus	26	One1 Oy, energiantuotantolaitos
4	Binderholz Nordic Oy, Nurmeksen sahan voimalaitos	27	Outokummun Energia Oy, Lämpökeskus Miilu
5	Boliden Kylylahti, Kylylahden kaivos	28	Pankakoski Mill Oy
6	Elementis Minerals B.V. Branch Finland, Vuonoksen tehdas	29	Peab Industri Oy, kiinteä asfalttiasema
7	Finavia Oyj, Joensuun lentoasema	30	Polvijärven kunta, kaukolämpölaitos
8	Hexion Oy	31	Puutarha Päivänpaiste, Irja ja Esko Asikainen Ay, lämpökeskus
9	Kaivospuu Oy, Saha- ja lämpölaitos	32	Savon Voima Joensuu Oy, Hasanniemen lämpökeskus
10	Kiteen Lämpö Oy, Arppentien lämpökeskus	33	Savon Voima Joensuu Oy, Käpykankaan lämpökeskus
11	Kiteen Lämpö Oy, Selkueen lämpökeskus	34	Savon Voima Joensuu Oy, Naljakan lämpökeskus
12	Km-Yhtymä Oy, Km-Pakkaus	35	Savon Voima Joensuu Oy, Joensuun voimalaitos
13	Kontiolahden Kunta, kirkonkylän aluelämpökeskus	36	Savon Voima Joensuu Oy, Pötkän lämpökeskus
14	Nevel Oy, Hammaslahden aluelämpökeskus	37	Savon Voima Joensuu Oy, Rantakylän lämpökeskus
15	Nevel Oy, Ilomantsin voimalaitos	38	Savon Voima Joensuu Oy, Utran lämpökeskus
16	Nevel Oy, Keväniemen voimalaitos	39	Scanpole Oy, Höljäkän kyllästämö
17	Nevel Oy, Liperin osuusmeijerin lämpökeskus	40	Stora Enso Oyj, Enocellin tehdas
18	Nevel Oy, Rantakylän lämpökeskus	41	Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Kiteen saha
19	Nevel Oy, Rääkkylän lämpökeskus	42	Suomen Rengastehdas Oy, Lieksa
20	Nevel Oy, Teollisuuskylän lämpökeskus Lieksa	43	UPM Plywood Oy, Joensuun vaneritehdas
21	Nevel Oy, Teollisuustien lämpökeskus Ilomantsi	44	Valio Oy, Joensuun tehdas
22	Nevel Oy, Tohmajärven lämpökeskus	45	YIT Suomi Oy, asfalttiasema Joensuu Ivontie 7
23	Nurmeksen Lämpö Oy - Valtimon kaukolämpölaitos		



Kuva 14. Lupavelvollisten laitosten rikkidioksidipäästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).



Kuva 15. Lupavelvollisten laitosten typen oksidien päästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).



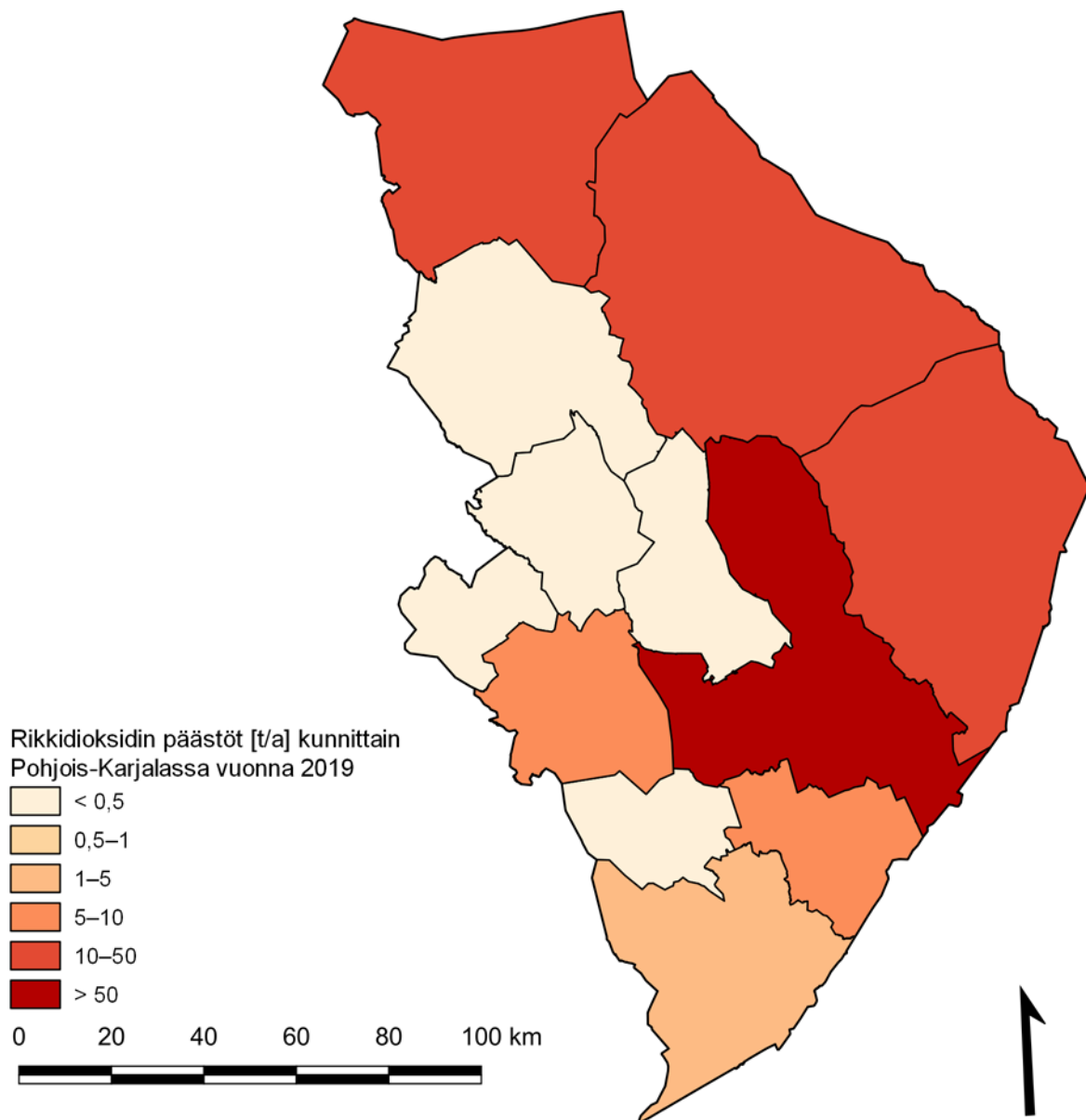
Kuva 16. Lupavelvollisten laitosten hiukaspäästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).

Taulukko 1. Tutkimusalueen ilmoitetut teollisuuden päästöt rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (t/a) kunnittain vuonna 2019 (Juuan tiedot ja Kontiolahten SO<sub>2</sub> vuodelta 2017) (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020).

Kunta	SO <sub>2</sub> -päästöt 2019 [t/a]	NO <sub>2</sub> -päästöt 2019 [t/a]	Hiukkaspäästöt 2019 [t/a]
Ilomantsi	41	29	0,55
Joensuu	130	1 600	450
Juuka (2017)	0,22	8,4	2,6
Kitee	2,2	46	7,7
Kontiolahti (SO <sub>2</sub> 2017)	0,07	5,9	1,5
Lieksa	33	250	9,3
Liperi	5,9	20	7,8
Nurmes	11	80	12
Outokumpu	0,20	19	5,3
Polvijärvi	0,29	6,6	6,0
Rääkkylä	0,40	2,4	3,8
Tohmajärvi	7,7	20	2,7

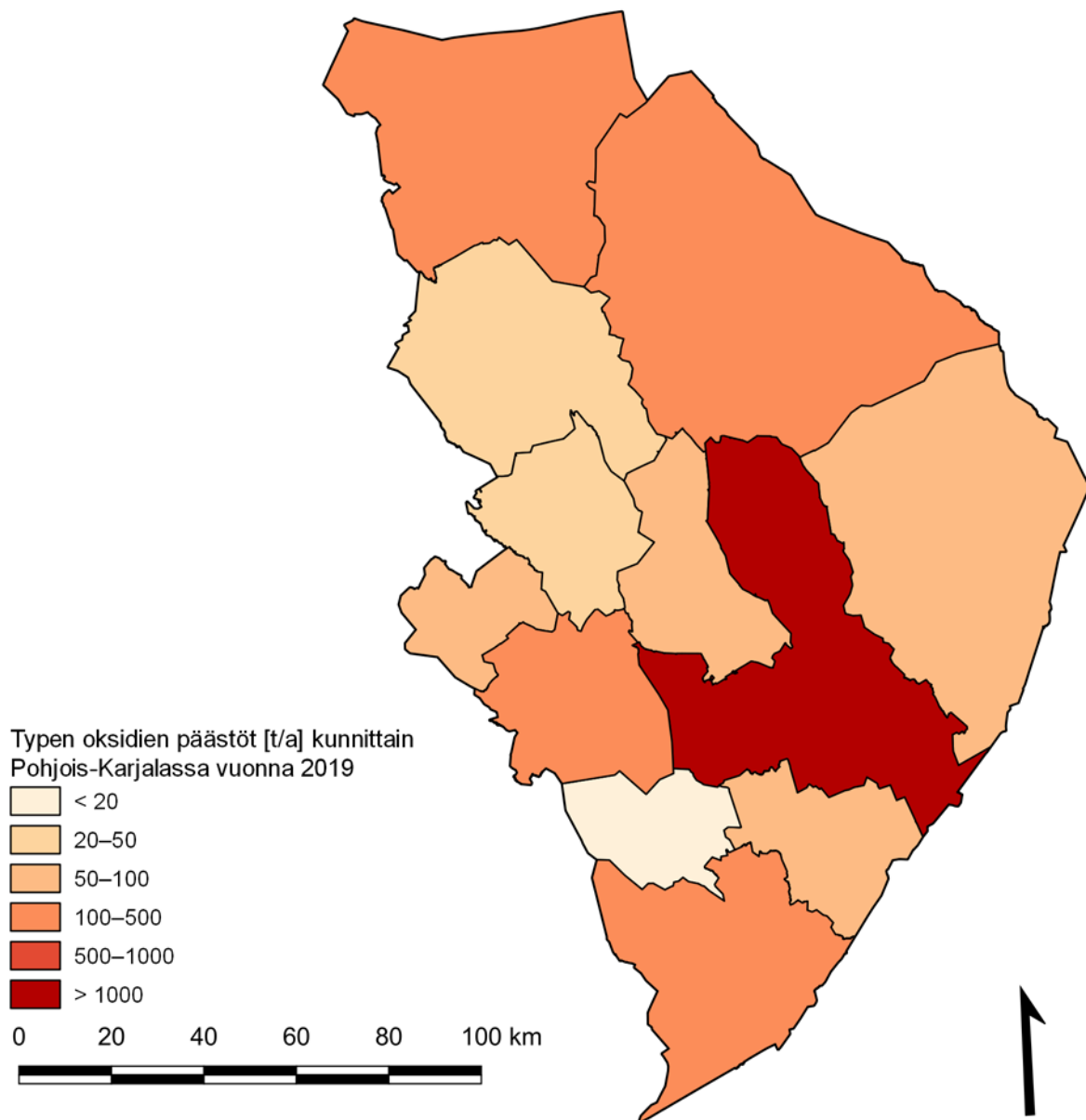
Taulukko 2. Tutkimusalueen laskennalliset tieliikenteen päästöt rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (t/a) kunnittain vuonna 2019 (VTT 2020).

Kunta	SO <sub>2</sub> -päästöt 2019 [t/a]	NO <sub>2</sub> -päästöt 2019 [t/a]	Hiukkaspäästöt 2019 [t/a]
Ilomantsi	0,044	25	0,62
Joensuu	0,46	280	7,2
Juuka	0,068	40	0,98
Kitee	0,14	85	2,0
Kontiolahti	0,15	87	2,2
Lieksa	0,10	62	1,5
Liperi	0,15	91	2,3
Nurmes	0,12	70	1,7
Outokumpu	0,057	34	0,81
Polvijärvi	0,042	24	0,59
Rääkkylä	0,019	10	0,25
Tohmajärvi	0,082	49	1,1

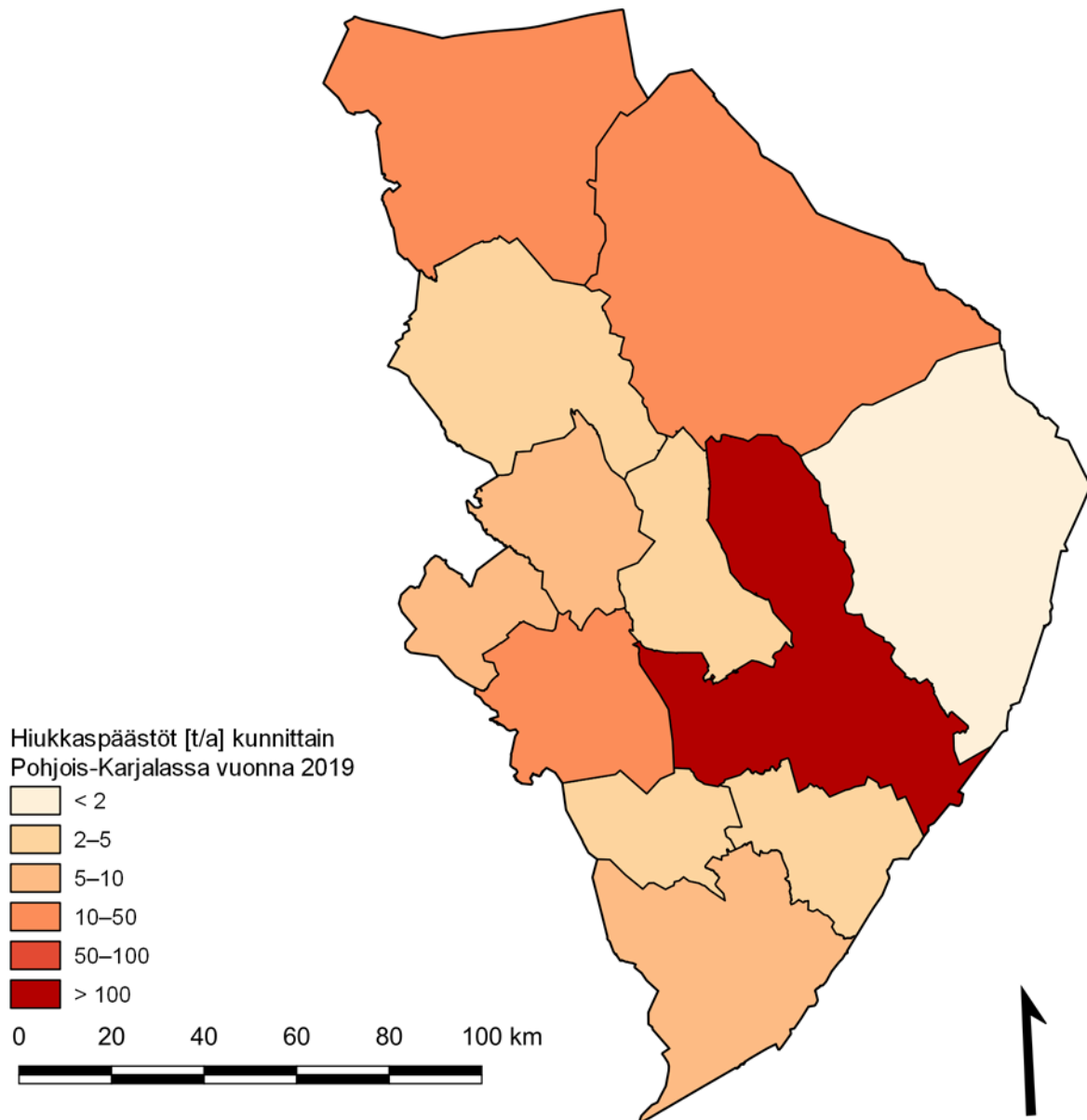


Kuva 17. Teollisuuden ja tieliikenteen aiheuttamat rikkidioksidin päästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020, VTT 2020). Juuassa ja Kontiolahdella teollisuuden SO<sub>2</sub>-päästöt olivat vuodelta 2017.





Kuva 18. Teollisuuden ja tieliikenteen aiheuttamat typen oksidien päästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020, VTT 2020). Juuassa teollisuuden NO<sub>x</sub>-päästö olivat vuodelta 2017.



Kuva 19. Teollisuuden ja tieliikenteen aiheuttamat hiukkaspäästöt (t/a) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2019 (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020, VTT 2020). Juuassa teollisuuden hiukkaspäästöt olivat vuodelta 2017.

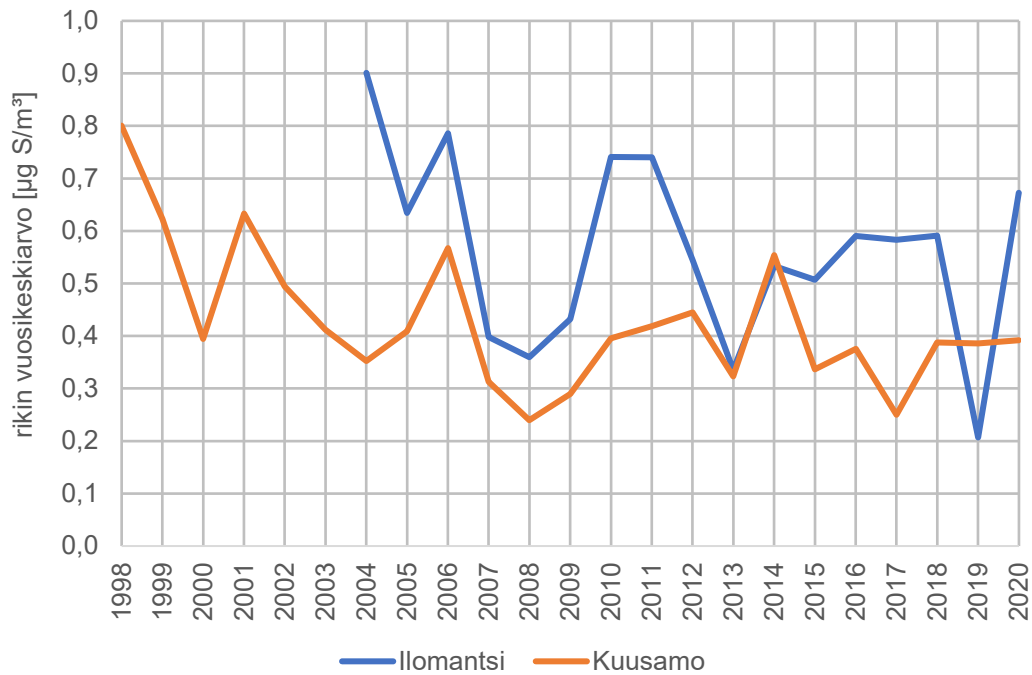
## 2.2.2 Ilmanlaatu tausta-asevilla

Lähes kaikkien merkittävimpien ilman epäpuhtauksien pitoisuudet tausta-asevilla ovat vähentyneet 1980-luvun alusta lähtien tarkasteltuna voimakkaasti. Pitkäaikaisissa mittauksissa näkyy erityisen selkeästi rikkiyhdisteiden pitoisuuksien ja laskeuman pienentyminen viimeisten vuosikymmenien aikana. Ilman epäpuhtauksien vähentyminen jatkui vielä 1990-luvulla, vaikkakin hitaammin Etelä-Suomessa kuin Pohjois-Suomessa. (Kulmala ym. 1998.)

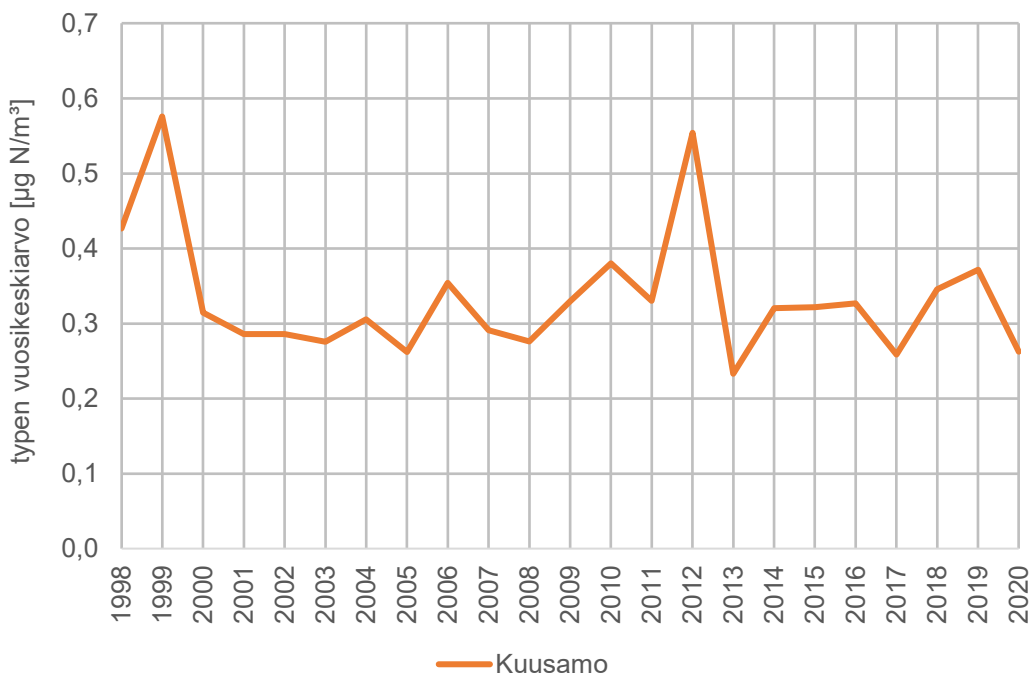
Tässä kappaleessa on esitetty rikkidioksidin ja typpidioksidin keskimääräiset vuosipitoisuudet ilmassa Ilmatieteen laitoksen Ilomantsin ja Kuusamon valtakunnallisilla tausta-asevilla (Kuva 20, Kuva 21). Lisäksi on esitetty rikin ja typen vuosilaskeumat Lieksan Hietajärven mittausasemalla (Kuva 22, Kuva 23, Kuva 24).

Rikkidioksidin pitoisuus ilmassa on ollut 2010-luvulla pienempi Kuusamon mittausasemalla kuin 1990-luvun lopulla, ja sama pätee Ilomantsissa vuosien 2004–2006 jälkeen. Viimeisen kymmenen vuoden aikana ei rikkidioksidin määrässä ole ollut selvää trendiä kummallakaan mittausasemalla. Pitoisuus on Ilomantsissa ollut useimpina vuosina jonkin verran suurempi kuin Kuusamossa. (Kuva 20)

Typpidioksidin pitoisuus Kuusamon mittausasemalla ei ole merkittävästi muuttunut vuoden 1998 jälkeen. Pitoisuus on ollut kaiken kaikkiaan mittausjaksolla koko ajan pieni pysyen välillä 0,2–0,6  $\mu\text{g S}/\text{m}^3$ . Jaksolla on havaittavissa kaksi selvästi erottuvaa suurinta pitoisuutta vuosina 1999 ja 2012. (Kuva 21)



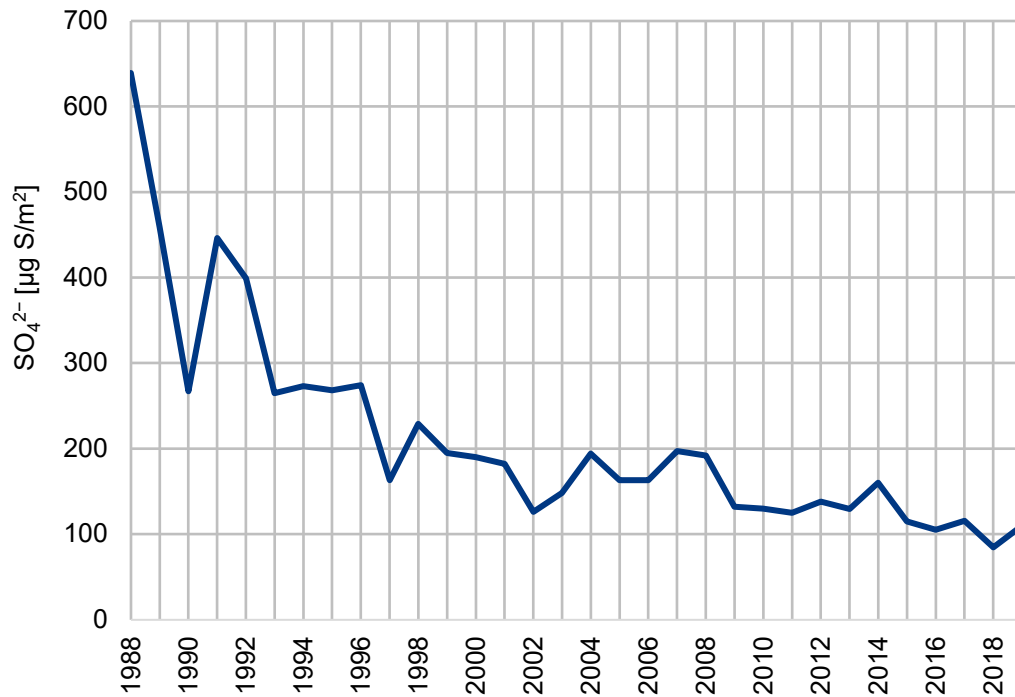
Kuva 20. Rikkidioksidin pitoisuuden vuosikeskiarvot rikkiä ilmassa Ilomantsin Pötsönvaarassa ja Kuusamon Juumassa vuosina 1998–2020. (Ilmatieteen laitos, avoin data)



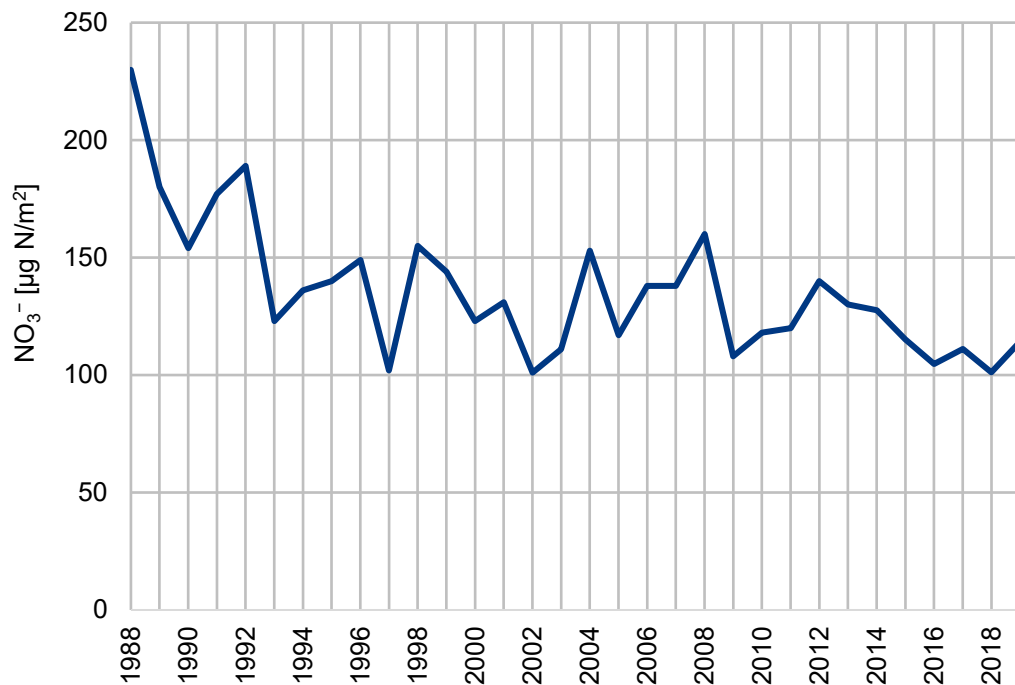
Kuva 21. Typpidioksidin pitoisuus typpenä ilmassa Kuusamon Juumassa vuosina 1998–2000. (Ilmatieteen laitos, avoin data)

Sulfaattirikin laskeuma Lieksassa on pienentynyt vuoden 1988 jälkeen aluksi nopeasti vuoteen 2000 mennessä ja sen jälkeen hitaammin aina vuoteen 2019 asti (Kuva 22). Nitraattitypen vuosilaskeuma pieneni noin vuoteen 2000 saakka, jonka jälkeen se vaihteli vuodesta toiseen. 2010-luvulla vaihtelu on vaimentunut

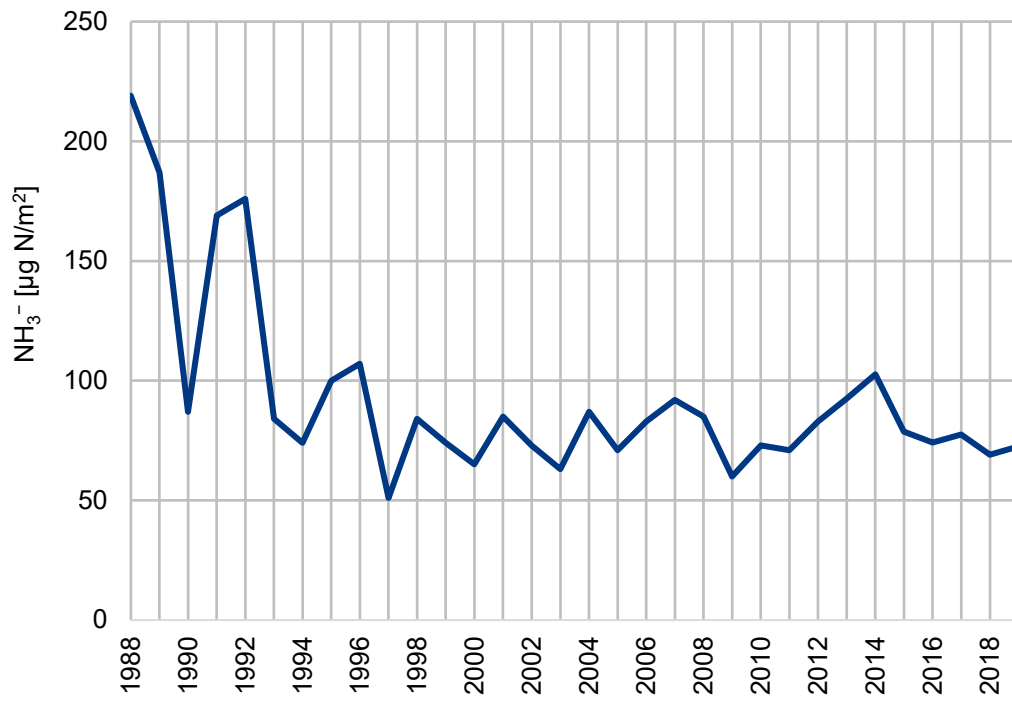
(Kuva 23). Ammoniumitypen laskeuma puolestaan pienei vuoteen 1997 saakka, jonka jälkeen ei ole ollut merkittävää muutosta suuntaan tai toiseen (Kuva 24).



Kuva 22. Sulfaattirikin vuosilaskeuma (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> [S mg/m<sup>3</sup>]) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988–2019 (Ilmatieteen laitos 2020).



Kuva 23. Nitraattitypen vuosilaskeuma (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [N mg/m<sup>3</sup>]) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988–2019 (Ilmatieteen laitos 2020).



Kuva 24. Ammoniumtyypen vuosilaskeuma (NH<sub>3</sub><sup>-</sup> [N mg/m<sup>2</sup>]) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988–2019 (Ilmatieteen laitos 2020).

# 3. Tutkimusaineisto ja -menetelmät

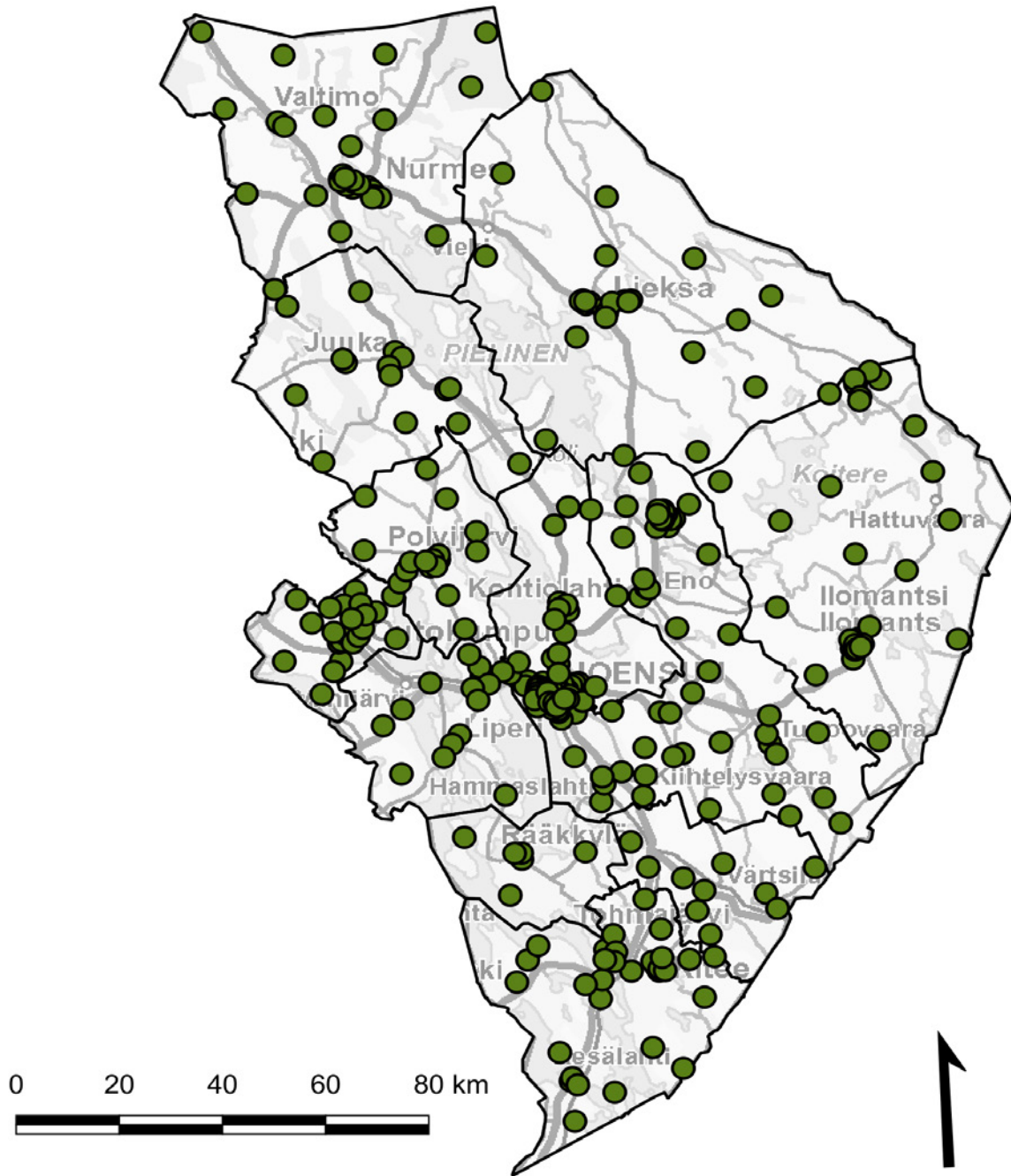
## 3.1 Havaintoalat

Tutkimus tehtiin 315 havaintoalalla, joista 100 alalta määritettiin sammalten alkuainepitoisuudet. Jäkälälajisto arvioitiin viideltä puulta kultakin tutkimusalalta. Kartoitukset pyrittiin tekemään samoilla havaintoaloilla ja –puilla kuin aiemmassa tutkimuksessa vuonna 2010, mutta maankäytön muutosten vuoksi uutena perustettiin 101 alaa. Merkittävien uusien teollisuustoimintojen ympärille, kuten Nurmeksen bioteollisuus alueelle, Vapon Ilomantsin aktiivihiihlaitokselle ja Lieksan Green Fuel Nordic Kevätniemen alueelle perustettiin myös uusia aloja. Lisäksi perustettiin 6 alaa ilmatieteen laitoksen Pötsönvaaran ilmanlaadun tausta-aseman ympäristöön. Kaikki muutokset kirjattiin, ja ne huomioitiin vuosien välisiä tuloksia vertailtaessa.

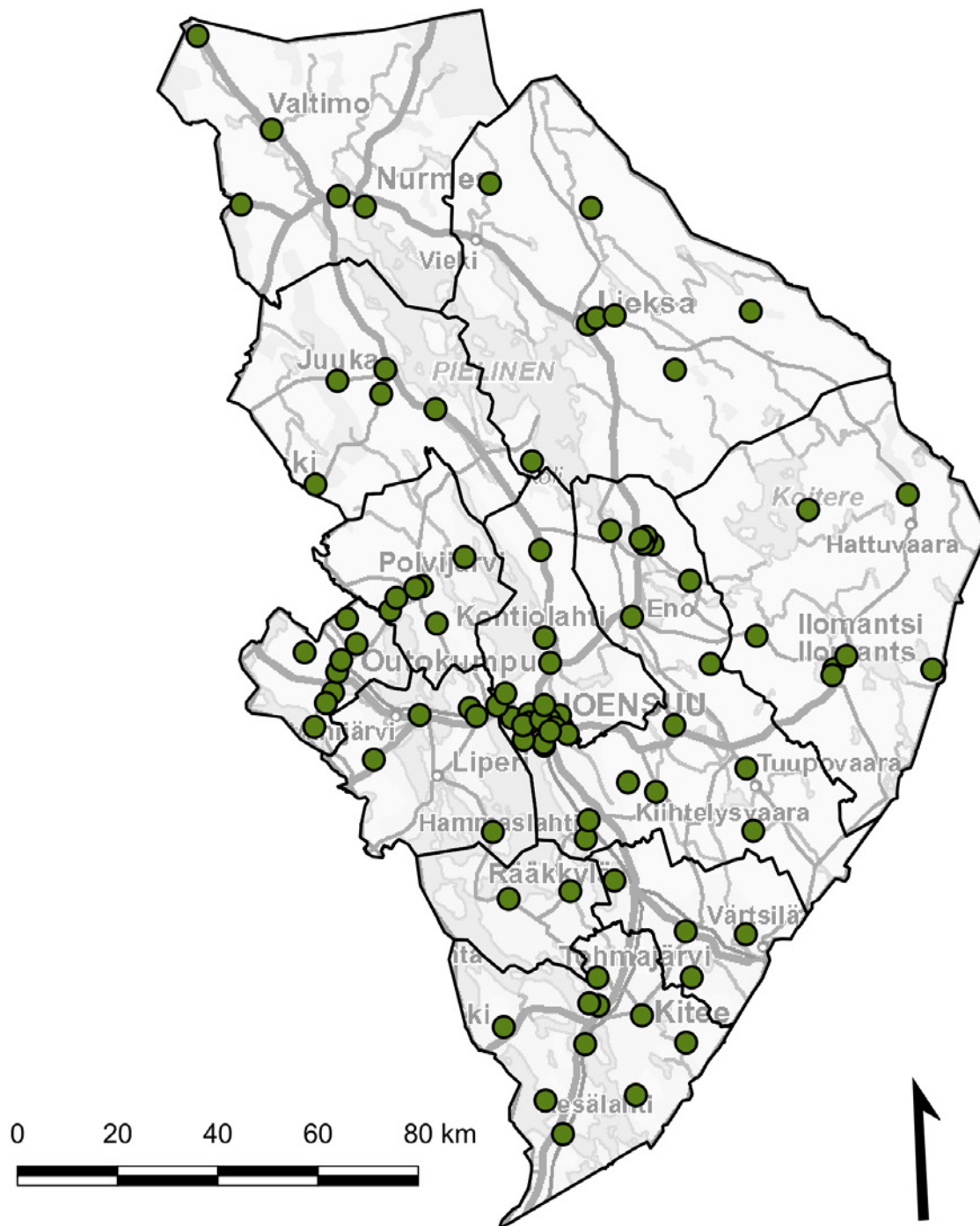
Näytealan sijainti määritettiin GPS-laitteella, ja kustakin havaintoalasta täytettiin taustatietolomake, johon merkittiin alan etsintäohje ja puiden sijainti. Havaintoalan metsätyyppi, puuston kehitysluokka sekä ikä ja pituus ja valtalajien pohjapinta-alat sekä havaintoalan topografia kirjattiin ylös. Lisäksi havaintoalan soveltuvuus luokiteltiin käyttäen asteikkoa hyvä-kohtalainen-huono. Havaintoalan soveltuvuus on havainnoitsijan subjektiivinen arvio havaintoalan soveltuvuudesta bioindikaattoritutkimukseen, ja sitä arvioitaessa huomioidaan jäkäläkartoitukseen käytettävää metsikköä koskevat kriteerit. Pohjapinta-alat määritettiin relaskoopin avulla, ja puuston ikä ja pituus määritettiin silmämääräisesti.

Havaintoalat sijoitettiin hilaruutujen sisään jäkäläkartoituksen kriteerit täyttävään männikköön. Tutkimusvuosien välillä tuhoutuneiden alojen tilalle perustettiin uudet alat lähimmälle jäkäläkartoitukseen soveltuvalla paikalla. Kriteerit jäkäläkartoituksessa käytettävälle metsikölle on esitetty standardissa SFS 5670. Näistä tärkeimpiä ovat metsikön ikä, puuston tiheys sekä aluskasvillisuuden esiintyminen. Valintakriteerien suhteen optimaaliset havaintoalat sijaitsevat kuivahkoilla tai kuivilla kankailla, joilla aluskasvillisuus on matalaa ja metsä melko harvaa. Havaintoalojen valinnalla pyritään eliminoimaan luontaiset jäkälälajiston koostumukseen sekä vaurioihin vaikuttavat mikroilmastolliset tekijät, joista tärkein on valoisuuden ja varjoisuuden suhde. Uusia tutkimusmetsiköitä valittaessa pyritään lisäksi välttämään reunavaikutusta tai esim. suppia ja paisterinteitä, joissa vallitsee poikkeava mikroilmasto. Myös hiljattain käsitellyt, esim. kolmen edellisen vuoden aikana harvennettuja metsiköitä vältettiin. Havaintopuut valittiin siten, että ne olivat läpimitaltaan vähintään 20 cm, ja kolmen metrin korkeudelle oksattomia. Pensaiden tai taimien ympäröimiä puita tai hyvin lähellä toisia puita kasvavia puita ei hyväksytty mukaan kartoitukseen.

Tutkimuksen havaintoaloista 47 % sijaitsi tuoreilla kankailla (mustikkatyyppi, MT), 33 % kuivahkoilla kankailla (puolukkatyyppi, VT) ja lehtomaisilla kankailla (käenkaali-mustikkatyyppi, OMT) 9,5 %. Kuivilla kankailla (kanervatyyppi, CT) sijaitsi 6 % havaintoaloista, ja metsätyyppi oli jokin muu 5 %:lla aloista. Muuhun metsätyyppiin luokitellut alat olivat monessa tapauksessa turvekankaita tai soistumia tai taajamien puistomaisia metsikköjä. Havaintopuiden keskimääräinen pituus oli 18,5 metriä. Valtaosa tutkimusaloista sijaitsi bioindikaattoritutkimukseen hyvin soveltuvissa kypsissä, 80–120-vuotiaissa männiköissä. Läpimitaltaan havaintopuut olivat keskimäärin 35 cm, ja puuston keskimääräinen pohjapinta-ala oli 19 m<sup>2</sup>/ha. Valtaosalla aloista valtapuulaji oli mänty ja toinen valtalaji oli useimmiten kuusi tai koivu. Lisäksi toinen, kolmas tai neljäs valtapuulaji oli pienellä määrällä aloja haapa, leppä, mänty, pihlaja, raita, sembramänty tai vaahtera.



Kuva 25. Havaintoalojen (315 kpl) sijainti tutkimusalueella vuonna 2020.



Kuva 26. Sammalnäytealojen (101 kpl) sijainti tutkimusalueella vuonna 2020.



Taulukko 3. Havaintoalojen lukumäärä kunnittain sekä uutena perustettujen havaintoalojen määrät (kaikki havaintoalat sekä sammalalat) vuonna 2020 Pohjois-Karjalassa.

Kunta	Vanhat alat	Uudet alat	Yhteensä	Vanhat sammalalat	Uudet sammalalat	Sammalalat yhteensä
Ilomantsi	15	14	29	5	2	7
Joensuu	73	19	92	26	5	31
Juuka	13	3	16	5	0	5
Kitee	21	10	31	6	4	10
Kontiolahti	9	6	15	5	1	6
Lieksa	18	8	26	7	1	8
Liperi	8	7	15	3	2	5
Nurmes	25	7	32	7	2	9
Outokumpu	11	14	25	3	5	8
Polvijärvi	12	5	17	3	3	6
Rääkkylä	3	3	6	0	2	2
Tohmajärvi	6	5	11	3	1	4
12 kuntaa yhteensä	214	101	315	73	28	101

Taulukko 4. Metsätyyppien jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Metsätyyppi	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
OMT	30	9,5 %
MT	147	46,7 %
VT	105	33,3 %
CT	18	5,7 %
CIT	0	0,0 %
muu	15	4,8 %

Taulukko 5. Valtapuulajin jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Valtalaji	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
mänty	309	98,1 %
kuusi	6	1,9 %

Taulukko 6. Toiseksi yleisimmän puulajin jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

2. valtalaji	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
haapa	4	1,3 %
koivu	89	28,3 %
kuusi	118	37,5 %
leppä	2	0,6 %
mänty	7	2,2 %
pihlaja	1	0,3 %
raita	3	1,0 %
sembrämänty	1	0,3 %
vaahtera	2	0,6 %

Taulukko 7. Valtapuiden pituuden jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Pituus [m]	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
< 10	0	0,0 %
10–15	36	11,4 %
16–20	220	69,8 %
21–25	58	18,4 %
> 25	1	0,3 %

Taulukko 8. Puuston pohjapinta-alan [m<sup>2</sup>/ha] luokittelun jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Pohjapinta-ala [m <sup>2</sup> /ha]	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
< 10	145	46,0 %
10–15	86	27,3 %
15–20	35	11,1 %
20–25	20	6,3 %
25–30	17	5,4 %
> 30	12	3,8 %

Taulukko 9. Havaintopuiden keskimääräisen läpimitan [cm] luokittelun jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Läpimitta [cm]	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
< 25	5	1,6 %
25–30	39	12,4 %
30–35	123	39,0 %
35–40	94	29,8 %
> 40	54	17,1 %

Taulukko 10. Havaintoalojen kehitysluokan jakautuminen Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

Kehitysluokka	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
kypsä	282	89,5 %
varttunut	32	10,2 %
nuori	1	0,3 %

Taulukko 11. Puuston ikien [a] jakautuminen havaintoaloilla Pohjois-Karjalassavuonna 2020.

Ikä [a]	Alojen lukumäärä	Osuus kaikista aloista
< 60	9	2,9 %
60–79	39	12,4 %
80–99	129	41,0 %
100–119	95	30,2 %
> 119	43	13,7 %

## 3.2 Tutkimusryhmä ja maastotöiden ajankohta

Pohjois-Karjalan jäkäläkartoitus tehtiin 14.9.2020–6.11.2020 välisenä aikana. Maastotöihin osallistuivat Ramboll Finland Oy:stä ympäristöasiantuntija Tuomas Talvitie ja projektipäällikkö Janne Ruuth. Yhdessä määritettyjä havaintoaloja oli noin 2 % kaikista aloista. Maastotyöt alkoivat läntisestä- ja pohjoisesta Pohjois-Karjalasta ja viimeisenä kartoitus tehtiin etelässä.

### 3.3 Havupuiden epifyyttijäkälien kartoittaminen

Tässä tutkimuksessa indikaattorilajeina käytettiin standardin SFS 5670 mukaisesti 12 männyillä yleisesti kasvavaa jäkälälajia (taulukot). Kartoituksessa harmaatyvikarve ja tuhkkakarve havainnoidaan yhtenä lajina.

Jäkälät koostuvat symbioosissa elävistä lehtivihreättömästä sieniosakkaasta ja yhteyttävästä leväosakkaasta. Ne menestyvät hyvin niukkaravinteisessa ja kuivassa elinympäristössä, missä putkilokasvit eivät selviä. Jäkälät kasvavat löyhärakenteisina sekovarsina ilman suojaavia pintasolukerroksia ja ilmarakoja 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. Talviaikaan, jolloin ilmassa on yleensä enemmän epäpuhtauksia, runkojäkälät eivät ole pysyvästi lumikerroksen suojaamia. Leudolla säällä niiden solutoiminta voi aktivoitua.

Jäkälät ilmentävät ilman epäpuhtauksien vaikutuksia yksilökohtaisesti. Epäpuhtaudet näkyvät silmin havaittavina morfologisina tai kemiallisina muutoksina, peittävyiden muutoksina ja jäkäläyhteisöjen lajikoostumuksen muutoksina (Lodenius ym. 2002). Jäkälälajit reagoivat ilman epäpuhtauksiin eri tavoin. Ensimmäisenä ne vaikuttavat ilmansaasteille herkkiin lajeihin, joiden peittävydet puiden rungoilla pienenevät, kunnes laji ei enää pysty menestymään kasvupaikallaan. Tällöin kestävämmät lajit saattavat vallata vapautunutta elintilaa. Eräät lajit myös hyötyvät kuormituksesta. Taulukossa (Taulukko 12) on luokiteltu indikaattorilajit herkkyytensä mukaan neljään luokkaan. Jäkälälajin esiintymiseen vaikuttavat lajin saasteherkkyyden lisäksi myös luontaiset ympäristöolosuhteet, jonka vuoksi eri lajien indikaattoriarvot ovat erilaisia. Jotkin lajit suosivat valoisa ja kuivia metsiköitä, kun toiset suosivat kosteampia sulkeutuneita metsiköitä. Osa lajeista suosii nuorempia ja osa vanhempia puita. Lajien erityispiirteitä sekä niiden indikaattoriarvot on kuvattu taulukossa (Taulukko 13).

Sormipaisukarve on sopiva laji ilman epäpuhtauksien indikaattoriksi, sillä se kestää hyvin suuriakin saastepitoisuuksia ja indikoi niitä morfologisilla muutoksilla, joita arvioidaan vaurioasteen 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 peittävyiden kasvamisena lievässä kuormitustasossa. 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 pitoisuuksissa. Usein vaikutukset näkyvät vielä vuosienkin päästä kuormituksen vähennyttä, koska jäkälät ovat hyvin hidaskasvuisia ja vaikutukset saattavat välittyä niihin myös kasvualustan muutosten kautta (Jussila ym. 1999).




Tärkein jäkäliin vaikuttava ilman epäpuhtaus on rikkidioksidi, mutta myös typpiyhdisteillä on vaikutusta, samoin alkalisilla päästöillä, jotka muuttavat erityisesti havupuulla kasvavien jäkäliden normaalisti hapanta kasvualustaa emäksisemmäksi.



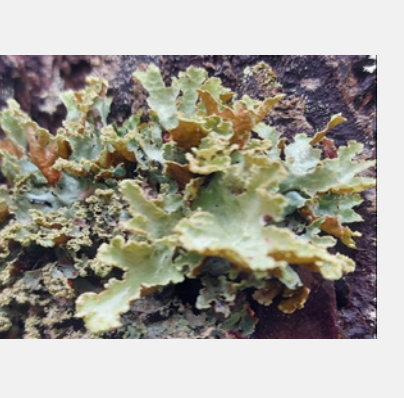

Morfologisena muutoksena tässä tutkimuksessa arvioitiin sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioastetta sekä yleistä vaurioastetta. Jäkäläyhteisöjen lajikoostumuksen muutoksia arvioitiin lajilukumäärän ja ilmanpuhtausindeksin avulla. Peittävyksiä arvioitiin sormipaisukarpeen sekä loppojen (*Bryoria* spp.) osalta pistefrekvenssimenetelmällä.

Taulukko 12. Kartoitetut jäkälälajit ja niiden herkkyydet rikkidioksidille (Kuusinen ym. 1990). Taulukkoon on merkitty näkyviin auktori tieteellisen nimen jälkeen. Lyhenne "spp." tarkoittaa 'lajit', eli lupot ja naavat käsitellään sukutasolla. Harmaaröyhelön tieteellinen nimi on ollut aikaisemmin *Cetraria chlorophylla* (Willd.) Vain.

<b>Herkkyys</b>	<b>Laji (tieteellinen nimi)</b>	<b>Laji (suomenkielinen nimi)</b>
kestävä, hyötyvä	<i>Algae &amp; Scoliciosporum</i> (Stenh.) Vězda	leväpeite ja vihersukkulajäkälä
kestävä, hyötyvä	<i>Hypenecomyce scalaris</i> (Ach ex. Lilj.) M. Choisy	seinäsuomujäkälä
melko kestävä	<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Ach	sormipaisukarve
melko kestävä	<i>Parmeliopsis ambigua</i> (Wulfen) Nyl.	keltatyvikarve
melko kestävä	<i>Tuckermanniopsis chlorophylla</i> (Willd.) Hale	ruskoröyhelö
melko kestävä	<i>Vulpicida pinastri</i> (Scop.) J. E. Matsson & M. J. Lai	keltaröyhelö
melko herkkä	<i>Parmeliopsis hyperopta</i> (Ach.) Arnold	harmaatyvikarve
melko herkkä	<i>Imshaugia aleurites</i> (Ach.) S.L.F. Mey.	tuhkakarve
melko herkkä	<i>Platismatia glauca</i> (L.) W. L. Culb. & C. F. Culb.	harmaaröyhelö
melko herkkä	<i>Pseudevernia furfuracea</i> (L.) Zopf	hankakarve
melko herkkä	<i>Parmelia sulcata</i> Taylor	raidanisokarve
herkkä	<i>Bryoria</i> Brodo & D. Hawksw. spp.	lupot
herkkä	<i>Usnea</i> Dill. ex Adans. spp.	naavat

Taulukko 13. Standardin SFS 5670 mukaiset jäkälälajit ilmanlaadun indikaattoreina. Indikaattoriarvon luokitus: +++ = hyvä, ++ = kohtalainen, + = vähäinen, - = huono. Seuralaislajien lukumäärät on laskettu tämän tutkimuksen ja Pohjois-Karjalan vuoden 2010 bioindikaattoritutkimuksen havainnoista.

Laji, indikaattoriarvo ja seuralaislajien määrä	Kuva	Kuvaus
<p>sormipaisukarve <i>Hypogymnia physodes</i> indikaattoriarvo: +++ seuralaislajien lukumäärä: 4,74</p>		<p>Sormipaisukarve on käytetyistä indikaattorilajeista kestävin ja yleisin laji, joka sietää eniten ilman epäpuhtauksia. Sormipaisukarpeen esiintymisfrekvenssit eli peittävyys pienentyvät vasta voimakkaasti kuormitetuilla alueilla. Sormipaisukarve on hyvä ilmanlaadun indikaattori, sillä myös sekovarren näkyvät vauriot kuvastavat ilman epäpuhtauksien kuormitusta.</p>
<p>keltatyvikarve <i>Parmeliopsis ambigua</i> indikaattoriarvo: +++ seuralaislajien lukumäärä: 4,74</p>		<p>Keltatyvikarve sietää myös hyvin ilman epäpuhtauksia ja sen esiintymisfrekvenssit noudattavat ilman epäpuhtauksien kuormitusvyöhykkeitä. Keltatyvikarve viihtyy parhaiten sulkeutuneissa kosteissa metsissä (Pihlström &amp; Myllyvirta 1995). Keltatyvikarvetta esiintyy hyvin yleisesti, ja se on ilman epäpuhtauksia kestävä, hyvä indikaattorilaji.</p>
<p>harmaatyvikarve ja tuhkararve <i>Parmeliopsis hyperopta</i> &amp; <i>Imshaugia aleurites</i> indikaattoriarvo: +++ seuralaislajien lukumäärä: 4,96</p>		<p>Tuhkararve 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 ilmaansaasteita sietäviä, hyviä indikaattorilajeja, jotka tosin suosivat kuivia ja valoisia kalliomänniköitä.</p>
<p>seinäsuomujäkälä <i>Hypocenomyce scalaris</i> indikaattoriarvo: ++ seuralaislajien lukumäärä: 5,55</p>		<p>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 typpilaskeman rehevöittävä vaikutusta.</p>

<p>lupot <i>Usnea</i> spp. indikaattoriarvo: ++ seuralaislajien lukumäärä: 5,82</p>		<p>Lupot ovat herkkiä ilman epäpuhtauksille. Luppojen esiintymisfrekvenssit noudattavat yleensä ilmansaasteiden kuormitusta. Luppojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Lupot ovat hyviä ilman laadun indikaattoreita.</p>
<p>naavat <i>Bryoria</i> spp. indikaattoriarvo: ++ seuralaislajien lukumäärä: 5,79</p>		<p>Naavojen esiintymisfrekvenssit vaihtelevat ilmansaastekuormituksen mukaan yleensä samalla tavalla kuin lupoilakin. Niillä on paljon seuralaislajeja kuten lupoilakin, mikä osoittaa näiden jäkälälajien herkkyyttä ilman epäpuhtauksille. Naavojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Rannikon läheisyys suosii naavojen esiintymistä.</p>
<p>harmaaröyhelö <i>Platismatia glauca</i> indikaattoriarvo: ++ seuralaislajien lukumäärä: 6,19</p>		<p>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.</p>
<p>keltaröyhelö <i>Vulpicida pinastri</i> indikaattoriarvo: + seuralaislajien lukumäärä: 5,13</p>		<p>Keltaröyhelön esiintyminen on usein varsin satunnaista, sitä voidaan löytää voimakkaasti kuormitetuilta alueita ja toisaalta se saattaa puuttua tausta-alueilta. Keltaröyhelön luontainen esiintyminen vaihtelee suuresti, mutta mahdollisesti myös ilman epäpuhtauksilla on vaikutusta sen esiintymiseen. Keltaröyhelön arvo ilmanlaadun indikaattorina jää kuitenkin pieneksi.</p>

<p>hankakarve  <i>Pseudevernia furfuracea</i>  indikaattoriarvo: ++  seuralaislajien lukumäärä: 5,86</p>		<p>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. Rannikon läheisyys suosii hankakarpeen esiintymistä, sillä se viihtyy valoisissa, kuivissa kalliomänniköissä. Indikaattorina se on kohtalainen.</p>
<p>ruskoröyhelö  <i>Tuckermanniopsis chlorophylla</i>  indikaattoriarvo: –  seuralaislajien lukumäärä: 6,61</p>		<p>Ruskoröyhelö on 12 indikaattorilajin joukossa yleensä yksi harvinaisimmista lajeista. Sen esiintyminen vaihtelee usein hyvin satunnaisesti ja sitä voidaan löytää voimakkaasti kuormitetuillakin alueilta. Ilmanlaadun indikaattorina ruskoröyhelö on huono.</p>
<p>raidanisokarve  <i>Parmelia sulcata</i>  indikaattoriarvo: +  seuralaislajien lukumäärä: 6,31</p>		<p>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.</p>
<p>leväpeite ja vihersukkulajäkälä  Algae &amp; <i>Scoliciosporum</i>  indikaattoriarvo: +++  seuralaislajien lukumäärä: 4,85</p>		<p>Viherleväpeite lisääntyy lähinnä kasvaneen tyyppilaskeuman vaikutuksesta eli se on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori. Viherleväpeite ja vihersukkulajäkälä ovat hyviä tyyppikuormituksen indikaattoreita.</p>

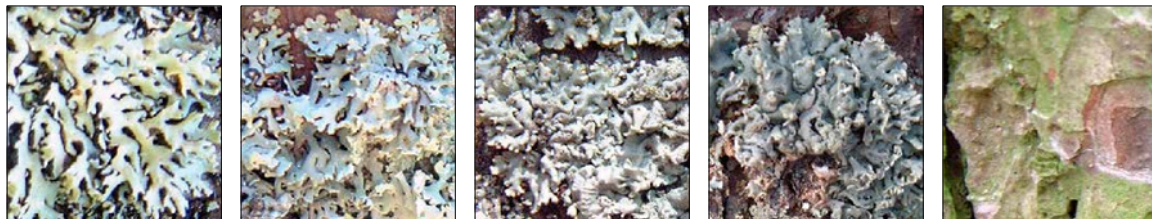
Mäntyjen rungoilta tutkittiin 12 jäkälälajin esiintyminen standardin SFS 5670 mukaan kuitenkin laajentaen standardinmukaista menetelmää siten, että kunkin lajin runsaus arvioitiin kolmiasteisella luokituksella (Taulukko 14). Kullakin havaintoalalla oli 5 tutkimuspuuta, joiden jäkälälajisto arvioitiin 50–200 cm:n korkeudelta. Sormipaisukarpeen vaurioaste ja yleinen vaurioaste arvioitiin viisiasteisella luokituksella puolen vaurioluokan tarkkuudella (Taulukko 15, Kuva 27). Yleisessä vaurioasteessa eritellään kasvutavaltaan pensasmaisiksi lupot, naavat ja hankakarve, loput lajit ovat lehtimäisiä. Sormipaisukarpeen ja luppen (*Bryoria* spp.) esiintymisfrekvenssit laskettiin sapluunarudukolta 1,2 metrin korkeudelta itä-koillisesta ja länsi-lounaasta. Esiintymisfrekvensseistä laskettiin kullekin puulle näiden lajien suhteellinen peittävyys.

Taulukko 14. Jäkälien runsauden luokittelu. Leväpeite (Algae & *Scoliciosporum*) ja seinäsuomujäkälä (*Hypocenomyce scalaris*) on luokiteltu peittävytensä (%), muut lajit sekovarsien lukumäärän perusteella.

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

Taulukko 15. Sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioluokitus ja jäkälälajiston yleinen vaurioluokitus (SFS 5670).

Vaurioluokka	Sormipaisukarpeen muutokset	Lajiston yleiset muutokset
I terve	jäkälät terveitä tai lähes terveitä	kaikkien lajien ulkonäkö ja kasvu muuttumattomia
II lievä vaurio	lievästi kitukasvuisia, lieviä värimuutoksia	pensasmaiset kitukasvuisia, lehtimäiset normaaleja
III selvä vaurio	jäkälät kitukasvuisia, vihertyneitä tai tummuneita tai kumpiakin	pensasmaiset pieniä, lehtimäiset vaurioituneita
IV paha vaurio	jäkälät pieniä, ryppyisiä, vihertyneitä tai tummuneita tai sekä että	pensasmaiset puuttuvat, lehtimäiset pahoin vaurioituneita
V kuollut tai puuttuu		myös lehtimäiset puuttuvat, leväpeitettä voi esiintyä



I = terve      II = lievä vaurio      III = selvä vaurio      IV = paha vaurio      V = kuollut tai puuttuu

Kuva 27. Sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioluokitus (SFS 5670:n mukaan).

Kullekin tutkimuspuulle ja -alalle laskettiin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärä. Ala- ja puukohtaisia lajilukumääriä laskettaessa ei huomioitu ilman epäpuhtauksista hyötyviä seinäsuomujäkälää sekä levää ja vihersukulajäkälää, jolloin lajeja saattoi olla puuta tai alaa kohti enimmillään 10. Puhtailla tausta-alueilla havaitaan yleensä enemmän jäkälälajeja kuin kuormitetuilla alueilla. (Taulukko 16).

Taulukko 16. Jäkälälajiston luokittelu lajilukumäärän perusteella.

Lajilukumäärä	Lajiston kuvaus
0–1	erittäin selvästi köyhtynyt
2–3	selvästi köyhtynyt
4–5	köyhtynyt
6–7	lievästi köyhtynyt
≥ 8	normaali jäkälälajisto

### 3.4 IAP-indeksi

Kullekin havaintopaikalle laskettiin havaintopaikan jäkäläkasvillisuutta kuvaava IAP-indeksi (Index of Atmospheric Purity, ilmanpuhtausindeksi) (LeBlanc ja DeSloover 1970). IAP-indeksillä voidaan esittää eri jäkälälajien esiintymisfrekvenssit yhtenä lukuarvona, jossa on otettu huomioon eri lajien herkkyudet ilman epäpuhtauksille. Korkea indeksiarvo kertoo runsaasta jäkälälajistosta ja siten hyvästä ilmanlaadusta,



matalan indeksin arvon saavat puolestaan lajistoltaan köyhtyneet havaintoalat (Taulukko 17). Indeksi laskettiin kullekin havaintoalalle seuraavasti:

$$IAP = \sum_{i=1}^n \frac{Q \cdot f}{10}$$

missä  $Q$  = kunkin jäkälälajin keskimääräinen seuralaislajien lukumäärä (ks. Taulukko 13)

$f$  = jäkälälajin suhteellinen frekvenssi näytealalla (0–1)

$n$  = jäkälälajien lukumäärä (10)

IAP-indeksi laskettiin tässä tutkimuksessa käyttäen kymmentä standardin SFS 5670 mukaista indikaattorilajia. Laskennassa ei käytetty seinäsuomujäkälää (*Hypocenomyce scalaris*) eikä leväpeitettä ja vihersukulajäkälää (*Algae + Scoliciosporum*), jotka hyötyvät kuormituksesta.

Myös aiemmissa Pohjois-Karjalan alueilla tehdyissä ilman laadun bioindikaattoritutkimuksissa IAP-indeksin arvot on laskettu alkuperäisen yhtälön (LeBlanc & DeSloover 1970) mukaisesti. Sovellettava seuralaislajien lukumäärä on kuitenkin vaihdellut tutkimusvuosittain. Edellisessä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään vuoden 2000 Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan bioindikaattoritutkimuksen seuralaislajien lukumääriä ilmeisesti indeksin vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi. Kuitenkin eri puolella Suomea runkojäkälillä on erilaiset kasvuolosuhteet ja ympäristötekijät ovat erilaisia. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa seuralaislajien lukumäärät laskettiin tämän tutkimuksen sekä vuoden 2010 Pohjois-Karjalan bioindikaattoritutkimuksen yhdistetystä aineistosta, johon kuului kaikkiaan 3075 tutkimusrunkoa.

Taulukko 17. Jäkälälajiston luokitus IAP-indeksin perusteella.

IAP-indeksi	Jäkälälajiston kuvaus
≥ 3	luonnontilainen lajisto, mukana herkkiä jäkälälajeja
2–3	lajistossa on lieviä muutoksia, herkimpiä lajeja puuttuu yleisesti
1–2	lajisto on köyhtynyt, herkimpiä lajeja voi esiintyä yksittäisillä rungoilla
0,5–1	lajisto on erittäin selvästi köyhtynyt, herkimmat lajit puuttuvat yleisesti, rungoilla esiintyy yleisesti ilmansaasteista hyötyviä lajeja
< 0,5	jäkäläautio tai lähes jäkäläautio

### 3.5 Jäkäläkartoituksen virhelähteet ja luotettavuus

Jäkäläkartoituksen tulosten luotettavuuteen vaikuttavat erityisesti kartoituksen tekijöiden lajintuntemus sekä kokemus bioindikaattoritutkimusten tekemisessä. Ainoastaan standardissa SFS 5670 esitettyjen 12 indikaattorilajin hallitseminen ei riitä, sillä lajintuntemuksen ollessa suppea voivat indikaattorilajit sekoittua muihin lajeihin. Ilman epäpuhtaudet voivat aiheuttaa lajien ulkonäköön huomattavia muutoksia, minkä vuoksi vain luonnontilaisten jäkälän tunteminen ei ole tutkimuksen kannalta riittävää.

Eri jäkälälajien esiintymisen kirjaaminen voi vaihdella eri arvioitsijoiden kesken. Leväpeitteen ja seinäsuomujäkälän kasvutavan vuoksi niiden havainnointi on erityisen hankalaa. Leväpeitettä voi esiintyä hyvinkin pieninä vihertävinä laikkuina. Seinäsuomujäkälä kasvaa yksittäisinä alle 1 millimetrin kokoisina suomuina. Tämä suomupeite voi olla lähes yhtenäinen, selvästi havaittava peite kaarnalla, tai niukimmillaan lähes yksittäisiä suomuja. Tyvikarpeiden osalta on kirjattu esiintymiseksi vain selvästi erottuva sekovarsi, ei kaarnan pinnalla oleva kellertävä tai vaalea jauhomainen kasvusto. Edellä esitettyjen syiden vuoksi näiden lajien havainnointiin ja runsauden arviointiin liittyvät erityisen suuret virhelähteet, kun verrataan eri tutkijoiden tuloksia keskenään.

Subjektiviisiin arvioihin pohjautuva jäkälän näkyvien vaurioiden arviointi ja luokittelu aiheuttaa myös tutkijakohtaisia eroja jäkäläkartoituksen tuloksiin. Näiden virhelähteiden pienentämiseksi maastoryhmä koulutettiin ja arviointitasot saatettiin samalle tasolle testien avulla ennen maastokauden alkua.

Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksen selvityksessä (Polojärvi ym. 2005a) männyn epifyyttijäkälien ja sormipaisukarpeen vaurioiden havainnoinnin virhelähteistä todettiin, että arviot sormipaisukarpeen vaurioista eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi eri havainnoijien arvioiden välillä. Havainnot ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärästä eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi havainnoijien omien havaintokertojen välillä, mutta eri havainnoijien välillä todettiin muutamia tilastollisesti merkitseviä eroja. Sormipaisukarpeen suhteellisissa peittävyyksissä todettiin tilastollisesti merkitseviä eroja sekä havainnoijien omien että eri havainnoijien tekemien mittausten välillä, kuten myös leväpeitteen arvioinnissa. Jäkälähavainnoista leväpeitteen havainnointi osoittautui tarkkuudeltaan epävarmimmaksi. Arviot leväpeitteen esiintymisestä poikkesivat havaintoaloilla, joilla leväpeitettä esiintyi mäntyjen rungoilla hyvin pieninä vihertävinä laikkuina. Leväpeitteestä poiketen seinäsuomujäkälän havainnoinnissa ei eroja todettu. (Taulukko 18)

Taulukko 18. Jäkälähavaintojen mittaustarkkuus 95 %:n luottamusvälillä (Polojärvi ym. 2005a).

Suure	Vaihtelun tyyppi	Arviointitarkkuus	Ero tuloksissa
sormipaisukarpeen vauriot	yhden havainnoijan arvioiden välinen vaihtelu	3–12 %	0,1–0,2 vaurioluokkaa
sormipaisukarpeen vauriot	usean havainnoijan välinen vaihtelu yhdellä havaintoalalla	10–16 %	0,2–0,4 vaurioluokkaa
jäkälälajien lukumäärä	yhden havainnoijan arvioiden välinen vaihtelu	11–23 %	0,9–1,6 lajia
jäkälälajien lukumäärä	usean havainnoijan välinen vaihtelu yhdellä havaintoalalla	0–5 %	0–0,9 lajia
sormipaisukarpeen peittävyys	yhden havainnoijan arvioiden välinen vaihtelu	34–42 %	3,3–3,0 %-yks.
sormipaisukarpeen peittävyys	usean havainnoijan välinen vaihtelu yhdellä havaintoalalla	11–22 %	0,7–4,9 %-yks.

### 3.6 Sammalnäytteiden alkuainepitoisuudet ja niiden määrittäminen

Suomessa raskasmetallien päästölähteitä ovat erityisesti fossiilisia polttoaineita käyttävä energiantuotanto, teollisuusprosessit, metallien tuotanto ja jalostus, liikenne ja jätteenpolto. Näistä etenkin jätteenpolton vaikutukset ovat huonosti tunnettuja. Sammalten elohopeapitoisuudet kuvaavat lähinnä jätteenpolton ja kaukokulkeuman aiheuttamaa kuormitusta, kun taas kadmium ja vanadiini ovat peräisin pääosin fossiilisista polttoaineista. Aikaisemmin lyijypitoisen bensiinin käyttö aiheutti kohonneita lyijypitoisuuksia sammalissa.

Ihmistoiminnasta voi myös aiheutua kohonneita sammalten raskasmetallipitoisuuksia ilman selvää yksittäistä päästölähdettä. Usein taajamissa pitoisuudet ovat korkeampia kuin harvaan asutuilla alueilla. Raskasmetalleilla on myös luonnollisia päästölähteitä, joiden osalta paikallinen vaihtelu on suurta. (Suomen ympäristökeskus 2006.) Niiden vaikutus mitattuihin pitoisuuksiin voi olla huomattava, esim. jo tiepöly saattaa nostaa sammalten rautapitoisuuksia (ks. esim. Rühling ym. 1987). Kaikkiaan raskasmetallipitoisuudet metsäsammalissa ovat muutaman kymmenen vuoden aikajänteellä vähentyneet (Poikolainen ym. 2004).

Sammalten kemiallinen analyysi on hyvä menetelmä raskasmetallilaskeuman tutkimiseen, sillä tiheä sammalmatto pidättää lähes kaiken hiukkasten muodossa tulevan laskeuman. Koska sammalilla ei ole juuria, ne ottavat tarvitsemansa alkuaineet sadevedestä suoraan solukoihinsa (Jussila ym. 1999). Samalla niihin kertyy myös erilaisia ilman epäpuhtauksia. Ravinteiden ja epäpuhtauksien ottoa edistävät heikosti kehittynyt kutikula, suuri pinta-ala suhteessa painoon ja tapa kasvaa tiheinä mattoina. Muita biomonitorointiin sopivia ominaisuuksia ovat mm. hidaskasvuisuus, vähäiset morfologiset muutokset eliniän aikana, monivuotisuus ja laaja levinneisyys. Sammalia on helppo kerätä näytteiksi ja pitoisuudet on mahdollista määrittää vuosikasvuista. Ravinteet ja epäpuhtaudet kulkeutuvat sammaliin sadeveteen

liuennena, kaasumaisina tai partikkeleina. Ne sitoutuvat soluihin lähinnä kationinvaihdon kautta. Ilman epäpuhtauksien ottotehokkuus sammalilla vaihtelee ja se on suurempaa märkälaskeumasta kuin kuivalaskeumasta. Esimerkiksi raskasmetalleista sammat keräävät herkästi lyijyä, kohtalaisen hyvin kromia ja kuparia, mutta suhteellisen huonosti sinkkiä. Muun muassa tämän takia raskasmetallien pitoisuudet eivät esiinny sammalissa toisiinsa nähden samassa suhteessa kuin laskeumassa. Sammalten pitoisuuksien perusteella saadaan kuitenkin suhteellinen kuva ilman epäpuhtauksien laskeumasta ja ilman laadusta (Poikolainen 2004). Sammalia onkin käytetty raskasmetallipitoisuuksien kartoittamiseen Euroopassa laajalti. Sammalten metallipitoisuuksien ja absoluuttisten laskeumamäärien välillä on todettu olevan tilastollisesti erittäin merkitsevä korrelaatio (Rühling ym. 1987, Berg 1995b). Kerrossammalen (*Hylocomium splendens*) raskasmetallien pidentävyys eri metallien osalta noudattaa järjestystä  $Cu > Pb > Ni > Co > Zn$  (Rühling ja Tyler 1970). Kerrossammalen raskasmetallipitoisuuksissa ei ole merkittäviä eroja seinäsammalien (*Pleurozium schreberi*) pitoisuuksiin nähden (Rinne ja Mäkinen 1988).

### 3.6.1 Sammalnäytteet

Näytteisiin kerättiin seinäsammalta. Sammalista analysoitiin arseenin (As), fosforin (P), kadmiumin (Cd), kromin (Cr), kuparin (Cu), lyijyn (Pb), magnesiumin (Mg), nikkelin (Ni), raudan (Fe), rikin (S), sinkin (Zn) ja vanadiinin (V) pitoisuudet standardin SFS 5671 mukaisesti. Jokaiselta näytealalta kerättiin vähintään viisi osanäytettä eri paikoista mahdollisimman puhtailta sammalkasvustoilta. Osanäytteet pyrittiin ottamaan siten, että etäisyys lähimpään puuhun oli vähintään 5 metriä. Myös aluskasvillisuuden suojavaikutusta vältettiin. Sammalista leikattiin maastossa kolme nuorinta vuosikasvainta, jotka pakattiin muovipusseihin. Laboratoriossa (SGS Group (SGS SA)) sammalnäytteet puhdistettiin ja kuivattiin lämpökaapissa noin 40 °C:n lämpötilassa. Sammalten alkuainepitoisuudet määritettiin ICP-OES- ja ICP-MS-laitteistoilla.

### 3.6.2 Sammalen alkuainepitoisuuksien analysointiin liittyvät virhelähteet ja luotettavuus

Pääkaupunkiseudun ilmanlaadun bioindikaattoriseurannan yhteydessä on arvioitu sammalen metallipitoisuuksien määrittämisen mittaustarkkuutta (Veijola ja Niskanen 1998). Selvityksessä analysoitiin erikseen samoilta kahdelta näytealoilta (Nuukio ja Puolarmetsä) otetut 10 sammalnäytettä kokoomanäytteen tarkkuuden arvioimiseksi. Mitattaville muuttujille arvioitiin luottamusvälit, kun kokoomanäytteet oletettiin koostuvan 5-15 osanäytteestä. Jotta muuttujan mittaustarkkuus olisi helpompi mieltää, esitettiin tulokset standardoimalla keskiarvo sadaksi. Käytännössä esim. luottamusväli  $100 \pm 40$  voidaan tulkita niin, että eri alueiden tai vuosien välisen eron tulee olla suurempi kuin 40 %, jotta ne tilastollisesti eroaisivat toisistaan.

Sammalnäytteistä tutkittiin kadmiumin, lyijyn, vanadiinin, nikkelin, raudan, sinkin ja elohopean pitoisuudet.

## 3.7 Paikkatietomenetelmät

Paikkatietoaineistojen käsittelyssä, tuottamisessa ja visualisoinnissa hyödynnettiin Qgis 3.10 ja Surfer 16 -ohjelmistoja. Vyöhykekartat interpoloitiin kriging-menetelmällä. Kriging-menetelmä laskee tuntemattomaan pisteeseen arvon painottamalla lähimpien tunnettujen pisteiden arvoja, mutta painotus ei perustu pelkästään pisteiden väliseen etäisyyteen ja ennustettuun 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 muistuttavat toisiaan keskimäärin enemmän kuin toisistaan kaukana olevissa paikoissa.

Vyöhykekarttoja tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että interpolointitulos 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, mutta harvan havaintoalaverkon alueilla interpoloinnin tulokseen tulee huomattavasti enemmän epävarmuustekijöitä. Kun havaintoalaverkosto on harva, yksittäisen havaintoalan tulos vaikuttaa laajempiin alueisiin kuin jos havaintoalaverkko olisi tiheä. Pohjois-Karjalassa havaintoalaverkko on tiheämpi taajamissa ja harvempi tausta-alueilla, mikä voi vaikuttaa vyöhykekarttojen luotettavuuteen. Sammalten alkuainepitoisuuksien vyöhykekarttojen luotettavuutta vähentää sammalalojen pienempi lukumäärä (101 kpl) ja harva verkosto taajamien ulkopuolella.

## 3.8 Tilastomenetelmät

Tilastolliset tarkastelut tehtiin käyttäen R-ympäristöä. R on S-kieleen perustuva vapaasti saatavissa oleva ja käytettävä ohjelmointikieli, jota käytetään tilastollisten analyysien tekoon (R Development Core Team 2020). Sääaineistoa käsiteltiin R:n lisäosalla `openair` (versio 2.7.6), joka on tehty ilmanlaadun ja säätietojen tarkastelua varten (Carslaw ja Ropkins 2012). Käyttöliittymänä R-kieleen käytettiin Rstudiota (versio 1.1.463) sekä `Rcmdr`-lisäosaa (versio 2.7.1, Fox ja Bouchet-Valat 2020). Lisäksi regressioiden selitystarkasteluissa hyödynnettiin R:n lisäosaa `relaimpo` (Grömping 2006) ja merkkitestin osalta lisäosaa `BSDA` (Arnholt ja Evans 2017).

Mikäli tarkastellut muuttujat eivät noudattaneet parametristen testien oletuksia, tehtiin niille logaritmi- ( $\log(X+1)$ ), potenssi- tai neliöjuurimuunnos. Jos muuttujat eivät muunnoksista huolimatta noudattaneet parametristen testien oletuksia, käytettiin parametrittomia testejä.

### 3.8.1 Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot

Luokittelevien taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin jäkälämuuttujiin testattiin parametrittamalla Kruskal-Wallis- ja Mann-Whitney- $U$ -testillä. Jälkimmäistä testiä käytettiin, jos luokittelevalla muuttujalla oli kaksi eri arvoa. Luokittelevina muuttujina käytettiin metsätyyppiä, metsikön kehitystasetta ja metsikön soveltuvuutta tutkimukseen. Jatkuvien taustamuuttujien ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien välisiä riippuvuuksia tarkasteltiin Spearmanin järjestyskorrelaatioiden avulla. Samoin jäkälämuuttujien ja sammalten alkuainepitoisuuksien keskinäisiä korrelaatioita tarkasteltiin Spearmanin järjestyskorrelaatioiden 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 jakautuivat 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 1 tyypin virhe, eli hylätä nollahypoteesi sen ollessa tosi, kasvaa (Ranta ym. 1989).

### 3.8.2 Vuosien väliset vertailut

Vuosien 2010 ja 2020 välisiä eroja jäkälämuuttujissa testattiin parametrittamalla parittaisten otosten merkkitestillä.

### 3.8.3 Regressioanalyysi

Tärkeimpien jäkälämuuttujien riippuvuutta jatkuvista tausta- ja ilmanlaatua kuvaavista muuttujista tarkasteltiin usean selittävän muuttujan hierarkkisen regressioanalyysin avulla. Regressioanalyysin avulla pyrittiin vastaamaan siihen, miten selitettävän muuttujan arvojen vaihtelu riippuu selittävien muuttujien arvoista ja näiden muutoksista. Hierarkkisen regressioanalyysin avulla voitiin selvittää, mikä lopulta on ilmanlaatua kuvaavien muuttujien osuus jäkälämuuttujien vaihtelun selittämisessä, kun muut mahdolliset jäkälämuuttujiin vaikuttavat (tausta-)tekijät on huomioitu. Selittävät muuttujat lisättiin mukaan regressiomalliin tilastollisella STEPWISE-menetelmällä, joka tarkastaa aina jokaisen uuden mukaan otetun muuttujan jälkeen, onko jokin mallissa oleva muuttuja menettänyt merkityksensä. Tällöin vain merkitsevät selittävät muuttujat jäävät malliin mukaan. Mikäli regressioanalyysiin liittyvät oletukset (normaalisuus, lineaarisuus, homoskedastisuus, selittävien muuttujien korreloimattomuus, jäännösten riippumattomuus) eivät toteutuneet, yritettiin tilannetta korjata tekemällä selitettävälle muuttujalla logaritimuunnos ( $\lg(X+1)$ ). Joissain tapauksissa jäännökset kuitenkin riippuivat toisistaan eli olivat positiivisesti autokorreloituneita, mikä heikentää regressioanalyysiin liittyvää pienimmän neliösumman estimointia ja t- ja F-testien tulosta. Autokorreloituneisuutta mitataan Durbinin–Watsonin testillä (d): käytännössä jäännökset ovat riippumattomia jos  $1,6 < d < 2,4$ .

### 3.8.4 Pääkomponenttianalyysi

Pääkomponenttianalyysissa (*principal component analysis*, PCA) alkuperäisistä muuttujista muodostetaan uusia muuttujia (pääkomponentteja), jotka ovat alkuperäisistä muuttujista muodostettuja lineaarisia lausekkeita ja, jotka parhaassa tapauksessa yhdistävät samalle komponentille useamman alkuperäisen muuttujan sisältämää vaihtelua. Analyysissa alkuperäiset muuttujat muunnetaan keskenään korreloimattomiksi ja ensimmäinen pääkomponentti sisältää mahdollisimman suuren osan alkuperäisessä aineistossa olevasta vaihtelusta, toinen pääkomponentti selittää mahdollisimman paljon siitä vaihtelusta, joka jäi ensimmäiseltä selittämättä jne. Analyysista saatuja pääkomponenttikohtaisia pistearvoja voidaan käyttää muiden analyysien lähtöarvoina. Pääkomponenttianalyysissä saadaan siis eräänlaisia indeksejä, joiden ajatellaan olevan parempia ilmiön kuvaajia kuin yksittäinen muuttuja, jonka arvoon analyysivirhe voi vaikuttaa selvemmin. (Ranta ym. 1989.) Bioindikaattoritutkimuksissa pääkomponenttianalyysiä voidaan hyödyntää esimerkiksi sammalten raskasmetallipitoisuuksille (Berg ym. 1995a). Tässä tutkimuksessa sammalten alkuainepitoisuuksien sisältämää vaihtelua tiivistettiin pääkomponenttianalyysin avulla. Pääkomponentit laskettiin korrelaatiomatriisin pohjalta, mikä on kovarianssipohjaista analyysiä luotettavampi analyysimenetelmä. Vain sellaiset pääkomponentit, joiden ominaisarvot olivat yli yhden, hyväksyttiin.

# 4. Tulokset

## 4.1 Runkojäkälät

Mäntyjen jäkälälajistoa kuvaavien muuttujien keskiarvot, suurin ja pienin arvo sekä keskihajonta on esitetty seuraavassa (Taulukko 19). Kutakin jäkälälajistoa kuvaavaa muuttujaa on tarkasteltu tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Taulukko 19. Runkojäkälien ilmanpuhtausindeksin, alakohtaisen ja puukohtaisen lajimäärän, sormipaisukarpeen vaurioasteen, yleisen vaurioasteen, sormipaisukarpeen peittävyden, luppojen peittävyden ja levän yleisyyden keskiarvo, keskihajonta ja pienin ja suurin arvo. Lajilukumääriä laskettaessa ei ole otettu huomioon levää eikä seinäsuomujäkälää. n = 315.

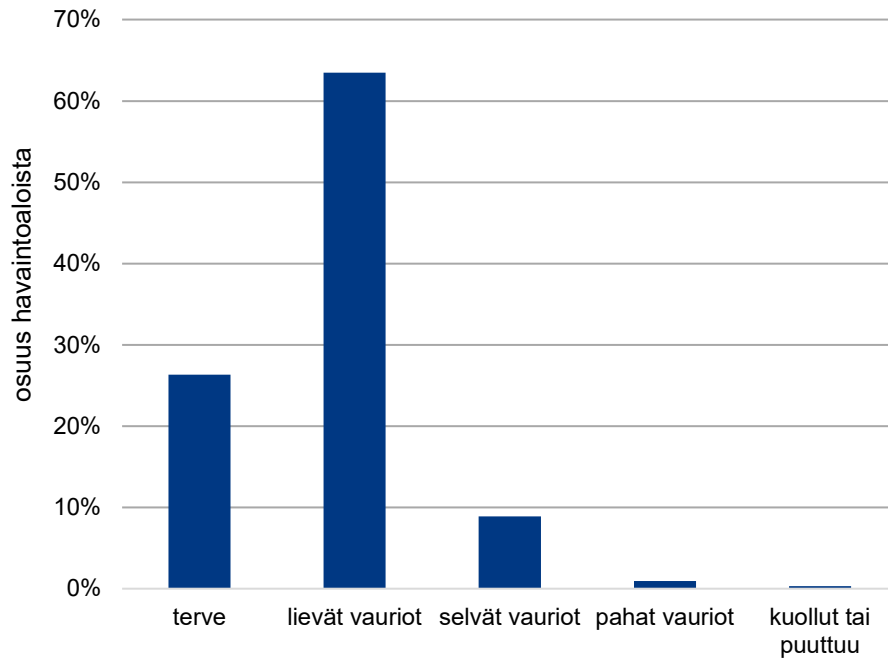
n = 315	Keskiarvo	Keskihajonta	Pienin	Suurin
lajilukumäärä/ala	6,94	1,68	1	10
lajilukumäärä/runko	5,46	1,55	0,2	9,4
sormipaisukarpeen vaurioaste	1,91	0,51	1	5
yleinen vaurioaste	2,70	0,85	1,3	4,9
sormipaisukarpeen peittävyys (%)	6,99	5,14	0	42,15
luppojen peittävyys(%)	0,25	0,65	0	4,8
levän yleisyys	1,44	1,89	0	5
IAP-indeksi	2,87	0,90	0,10	5,25

### 4.1.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste

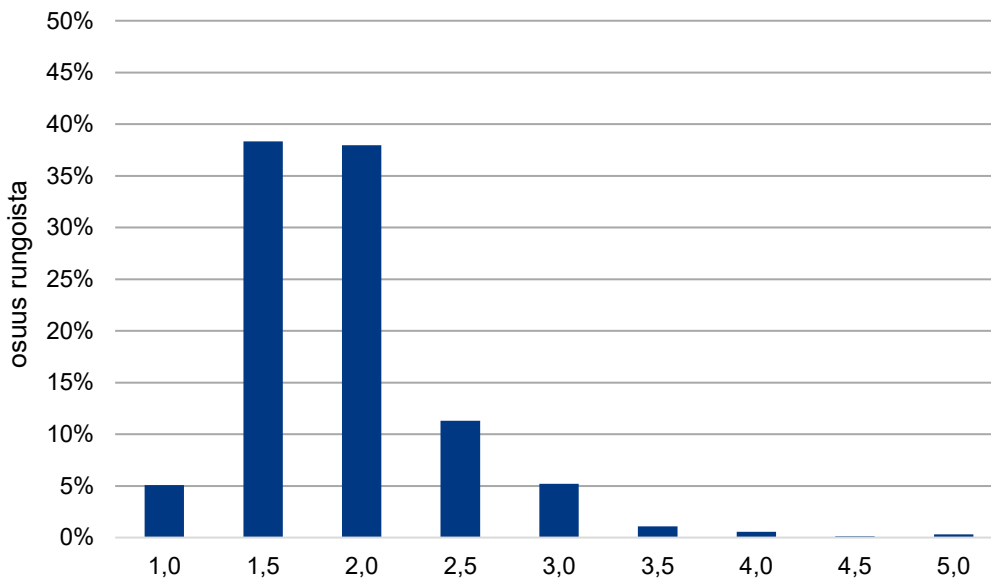
Sormipaisukarpeen vaurioasteita arvioitiin puolen vaurioluokan välein viisiportaisella asteikolla (ks. Taulukko 15 ja Kuva 27), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Vaurioita arvioitiin puittain, minkä perusteella laskettiin havaintoalan keskimääräinen vaurioaste.

Keskimääräinen vaurioaste Pohjois-Karjalassa vuonna 2020 oli 1,9, mikä luokitellaan lieviksi vaurioiksi. Vaurioasteet vaihtelivat tutkimusalueella terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (Kuva 28). Vaurioiden jakaantumista koko aineistossa tutkittiin luokittelemalla vaurioasteet sekä havaintoaloittain että havaintopuittain (Kuva 28, Kuva 29). Suurimmalla osalla (63 %) havaintoaloista sormipaisukarve oli lievästi vaurioitunutta. Sormipaisukarve oli tervettä 26 %:lla havaintoaloista, selvästi vaurioitunutta 8,9 %:lla havaintoaloista ja pahasti vaurioitunutta 1,0 %:lla havaintoaloista. Sormipaisukarve oli kuollutta yhdellä Juuassa sijaitsevalla havaintoalalla (ala 125).

Tutkimuspuittain tarkasteltuna sormipaisukarve oli tervettä tai melkein tervettä (vaurioaste 1 tai 1,5) 43 %:lla rungoista. Sormipaisukarve oli lievästi vaurioitunutta suurella osalla havaintopuista (38 %), ja 11 %:lla vauriot olivat lievän ja selvän välillä (vaurioaste 2,5). Selviä ja tätä suurempia vaurioita havaittiin 7 %:lla puista. Rungoista 0,3 %:lla (5 runkoa) sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui.



Kuva 28. Sormipaisukarpeen vaurioaste Pohjois-Karjalassa havaintoaloilla luokittain vuonna 2020. n = 315.

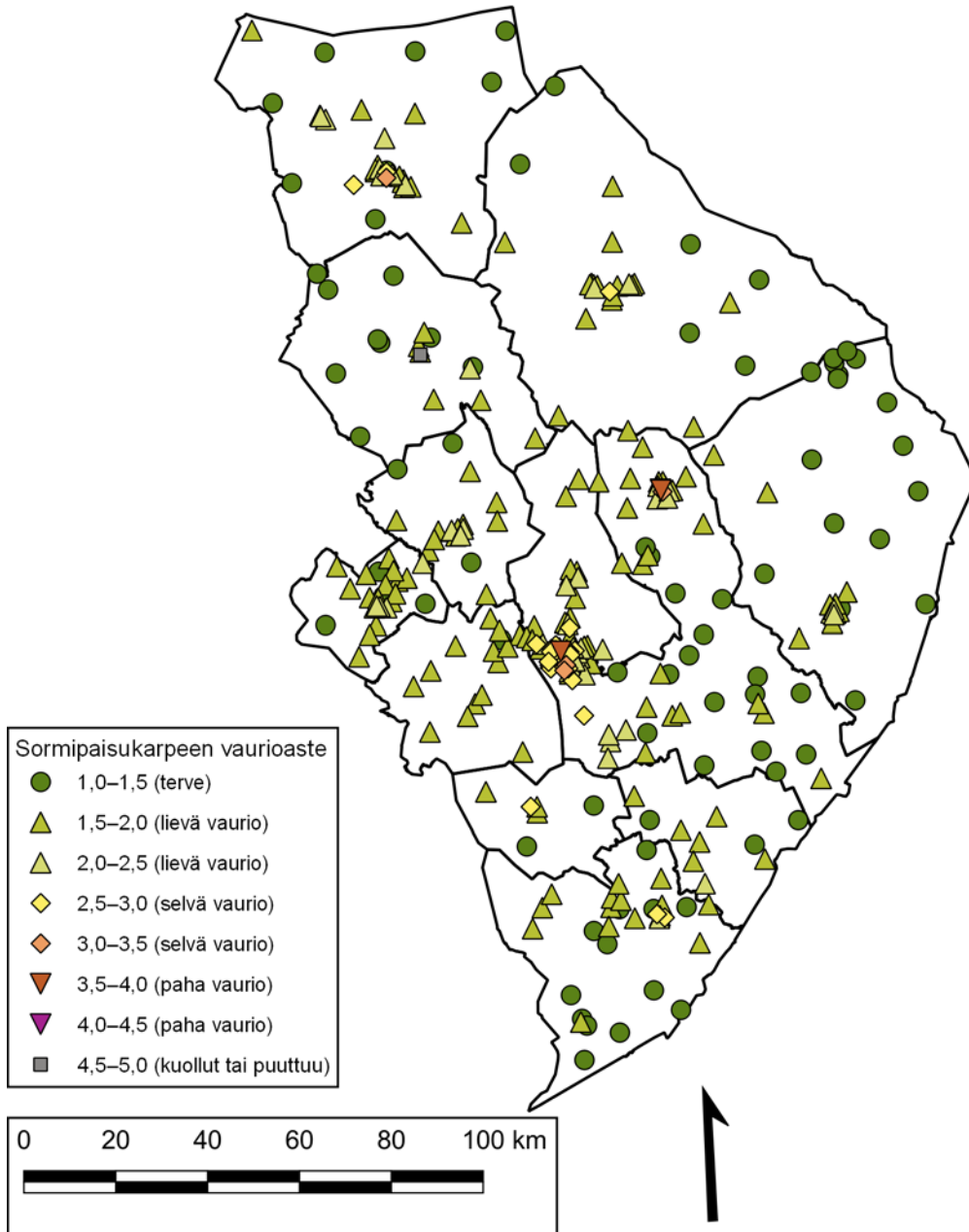


Kuva 29. Sormipaisukarpeen vaurioaste Pohjois-Karjalassa luokiteltuna rungoittain vuonna 2020. n = 1575.

Sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui yhdeltä havaintoalalta, joka sijaitsi Juuassa, noin 4,5 km Juuan keskustasta lounaaseen, jo yli kymmenen vuotta sitten toiminnan lopettaneen turkistarhan läheisyydessä. Pahoja vaurioita havaittiin yhdellä havaintoalalla Joensuun keskusta-alueella sekä kahdella alalla Uimaharjussa. Selviä vaurioita havaittiin 28 havaintoalalla, jotka sijaitsivat pääasiassa Joensuun, Lieksan ja Nurmeksen keskusta-alueella sekä Uimaharjussa. Lieviä vaurioita havaittiin 200 havaintoalalla, jotka sijaitsivat joka puolella Pohjois-Karjalaa. Sormipaisukarve oli tervettä 83 havaintoalalla, jotka sijaitsivat melko tasaisesti lukuun ottamatta Kontiolahtea, Joensuun kaupunkialuetta, Lieksan keskustaa ja Liperiä. (Kuva 30)

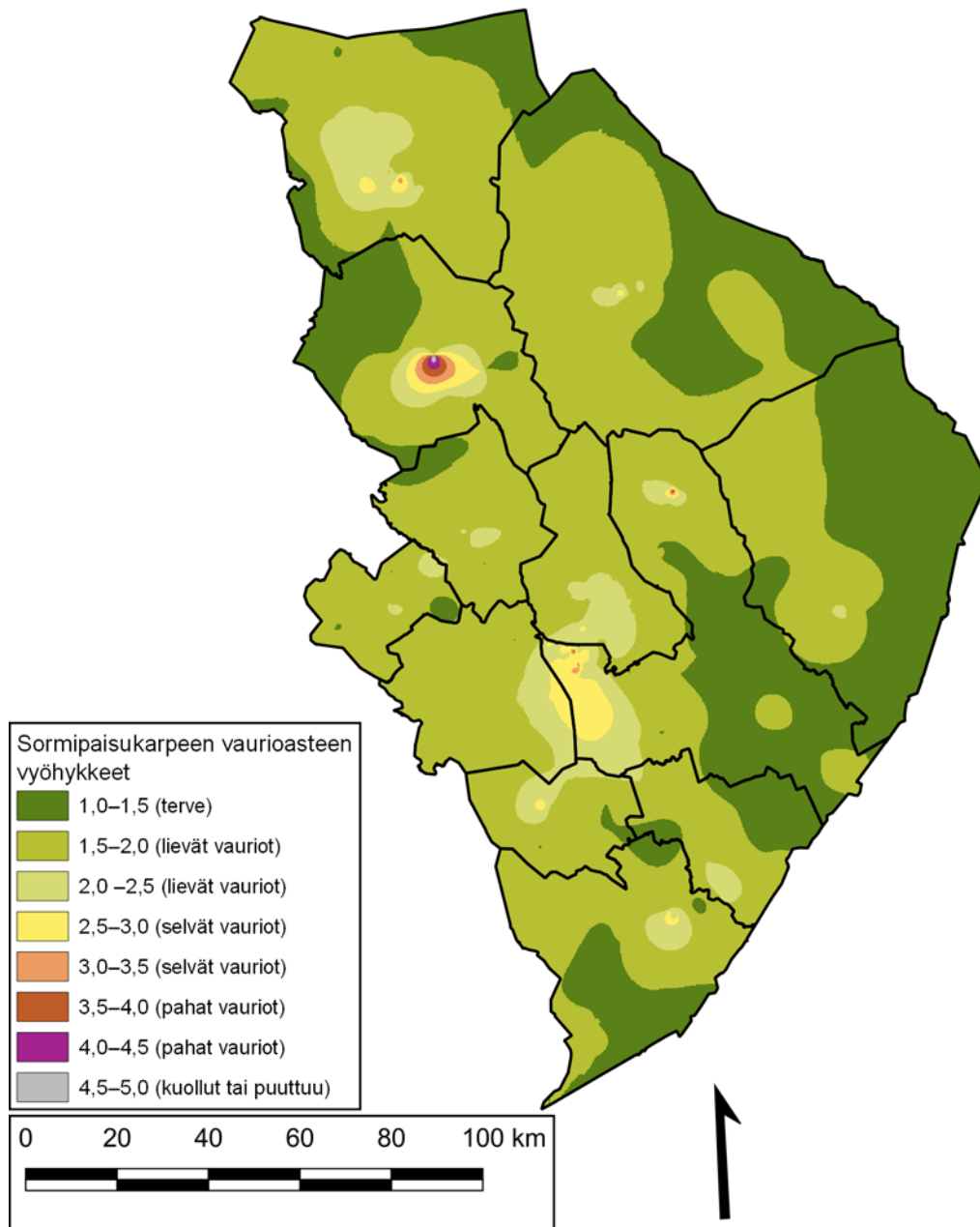
Terveen (vaurioaste 1–1,5) sormipaisukarpeen vyöhykkeet sijoittuivat itärajalle, Joensuun Enon ja Kiihtelysvaaran alueelle, Kiteen Kesälahdelle ja Pohjois-Savon rajalle Nurmeksen ja Juuan länsiosiin. Lievästi vaurioituneen (vaurioaste 1,5–2,5) sormipaisukarpeen vyöhykkeet kattoivat valtaosan

tutkimusalueesta. Selvästi vaurioituneen sormipaisukarpeen vyöhykkeitä muodostui Joensuun keskusta-alueelle ja siitä etelään Hammaslahteen sekä Juuan kunnan alueella sijaitsevan entisen turkistarhan ympäristöön, ja lisäksi oli pienialaisia selvien vaurioiden vyöhykkeitä Nurmeksessa ja Lieksan keskustassa, Rääkkylän kirkonkylällä sekä Kiteen keskustassa. Tutkimusalueen pahojen sormipaisukarpeen vaurioiden vyöhykkeet sijoittuivat Uimaharjuun Stora Enso Oyj Enocellin tehtaan ja Juukaan mainitun entisen turkistarhan ympäristöön. (Kuva 30)



Kuva 30. Sormipaisukarpeen vaurioaste havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.





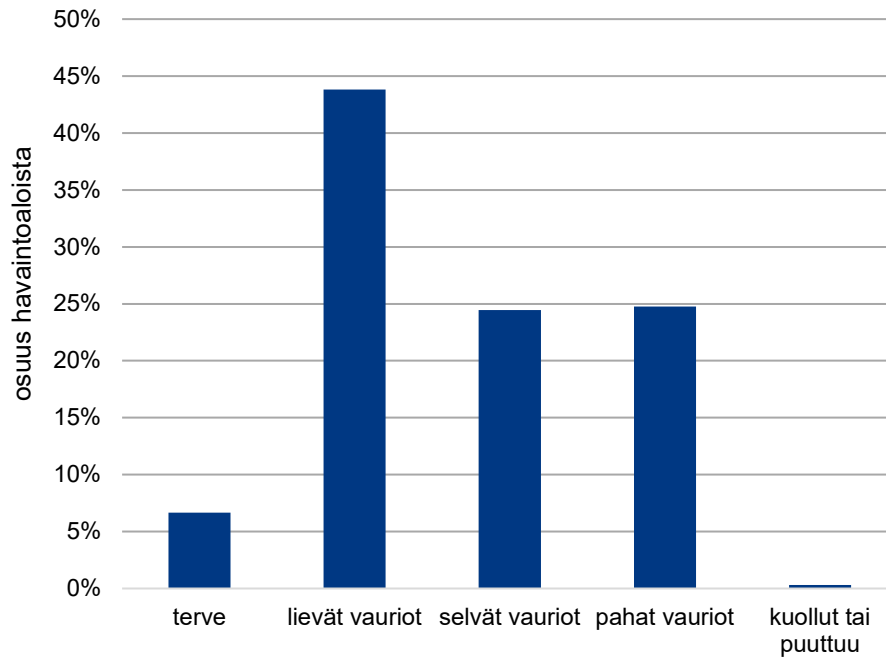
Kuva 31. Sormipaisukarpeen vaurioastetta kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

#### 4.1.2 Yleinen vaurioaste

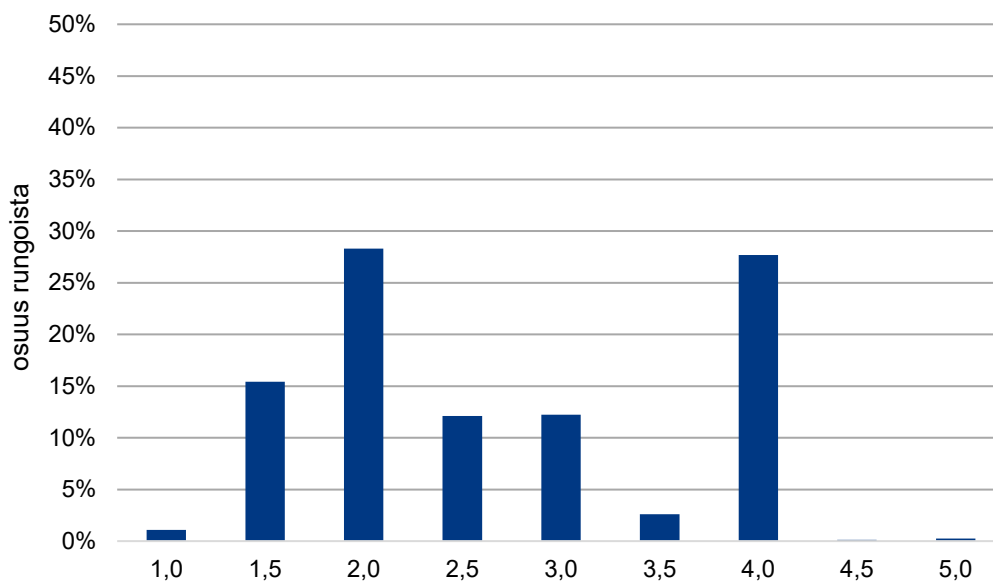
Yleistä vaurioastetta arvioitiin jäkälälajiston kunnon ja koostumuksen perusteella viisiportaisella asteikolla puolen vaurioluokan välein (ks. Taulukko 15), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Vaurioita arvioitiin puittain, jonka perusteella arvioitiin havaintoalan keskimääräinen vaurioaste.

Yleinen vaurioaste oli keskimäärin 2,7, eli jäkälälajisto oli tutkimusalueella keskimäärin selvästi vaurioitunutta. Vaurioasteet vaihtelivat koko välillä terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (Taulukko 15). Vaurioiden jakaantumista aineistossa tutkittiin luokittelemalla vaurioasteet sekä havaintoaloittain (Kuva 32) että havaintopuittain (Kuva 33). Yleisin luokka oli lievien vaurioiden luokka, johon kuului 44 % tutkimusaloista. Terveitä jäkälät olivat 7 %:lla aloista. Lajit luokiteltiin selvästi vaurioituneeksi 24 %:lla, pahasti vaurioituneeksi 25 %:lla ja kuolleeksi tai puuttuvaksi 0,3 %:lla (1 ala) havaintoaloista.

Tutkimuspuittain tarkasteltuna lajisto oli täysin tervettä 17 rungolla (1,1 %) ja 243 rungolla (15 %) melkein tervettä (vaurioaste 1,5). Yleisimmät vaurioluokat runkotasolla olivat lievät vauriot (28 % rungoista) sekä pahat vauriot (28 %). Seuraavaksi yleisin vaurioaste oli selvät vauriot (12 % rungoista), lievän ja selvän väliltä vaurioasteella (12 %) ja selvän ja pahan vaurioasteen väliltä (3 %). Normaalijakaumasta poikkeava jakauma selittyy yleisen vaurioasteen arviointiperusteella: puun jäkälälajisto luokitellaan pahasti vaurioituneeksi, jos puulla ei kasva pensasmaisia lajeja (luppoja, naavoja tai hankakarvetta), vaikka lehtimäiset lajit olisivatkin vain lievästi tai selvästi vaurioituneita.



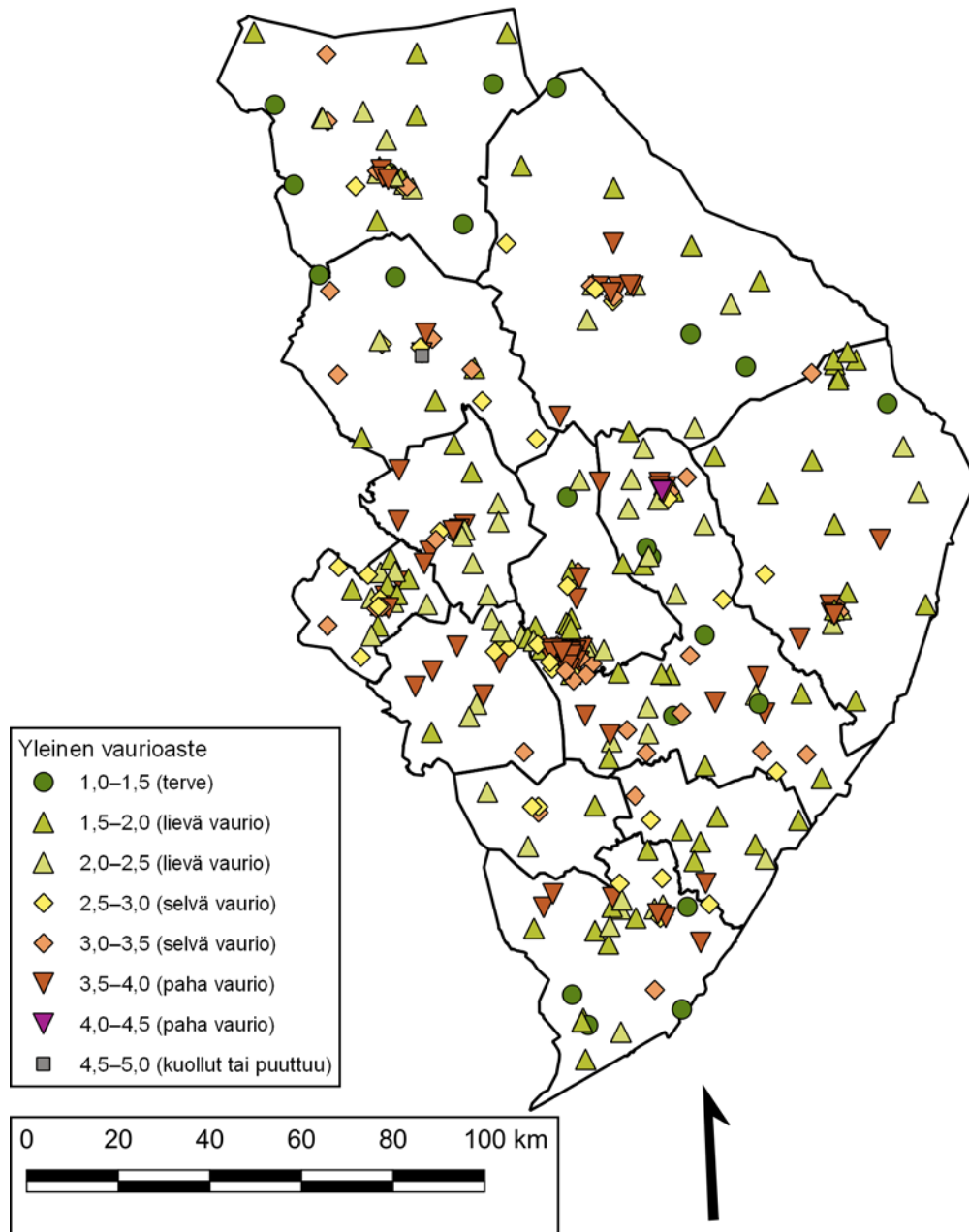
Kuva 32. Yleinen vaurioaste Pohjois-Karjalassa havaintoaloilla luokittain vuonna 2020. n = 315.



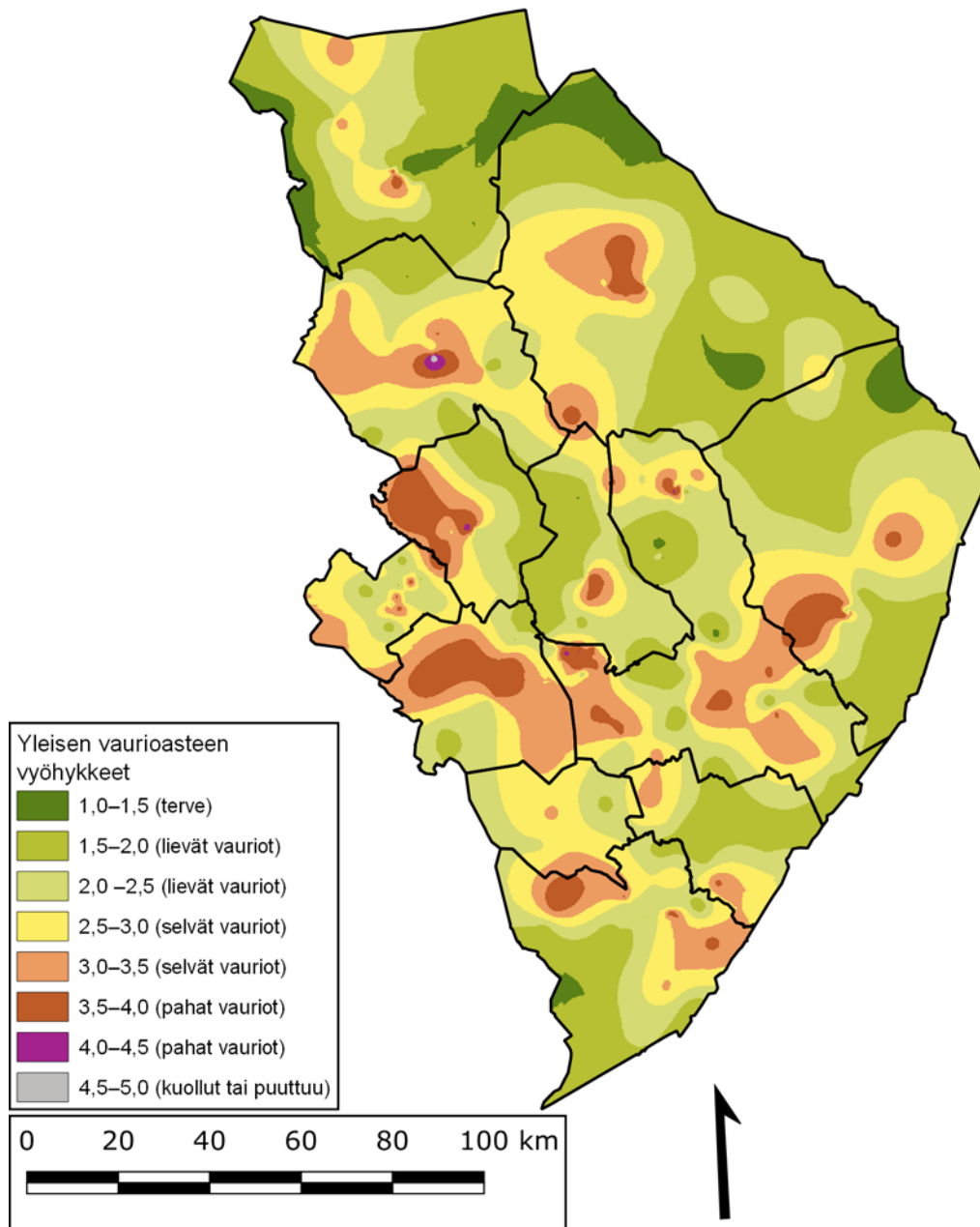
Kuva 33. Yleinen vaurioaste Pohjois-Karjalassa luokiteltuna rungoittain vuonna 2020. n = 1575.

Yleisen vaurioasteen luokkaa selvät vauriot esiintyi laajasti Pohjois-Karjalassa, myös siellä missä sormipaisukarve oli tervettä. Yleinen vaurioaste oli laajalti 0,5–1,5 vaurioluokkaa suurempi kuin sormipaisukarpeen vaurioaste. Selvien tai suurempien vaurioiden vyöhykkeitä esiintyi teollisuuslaitosten

lähellä, kuten Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen ja Uimaharjussa Stora Enso Oyj Enocellin ympäristössä. Niitä esiintyi myös taajamissa ja niiden ympäristössä, mutta myös alueilla, joissa ei ole mitään selvää päästölähdettä, kuten Kolilla sekä Kiteen ja Rääkkylän välisellä alueella. Terveimpiä jäkälät olivat yleisen vaurioasteen valossa Ilomantsin pohjoisosassa, Lieksan itä- ja pohjoisosissa sekä Nurmeksessa harvaan asutuilla alueilla sekä Höytiäisen ympäristössä ja Kesälahdella.



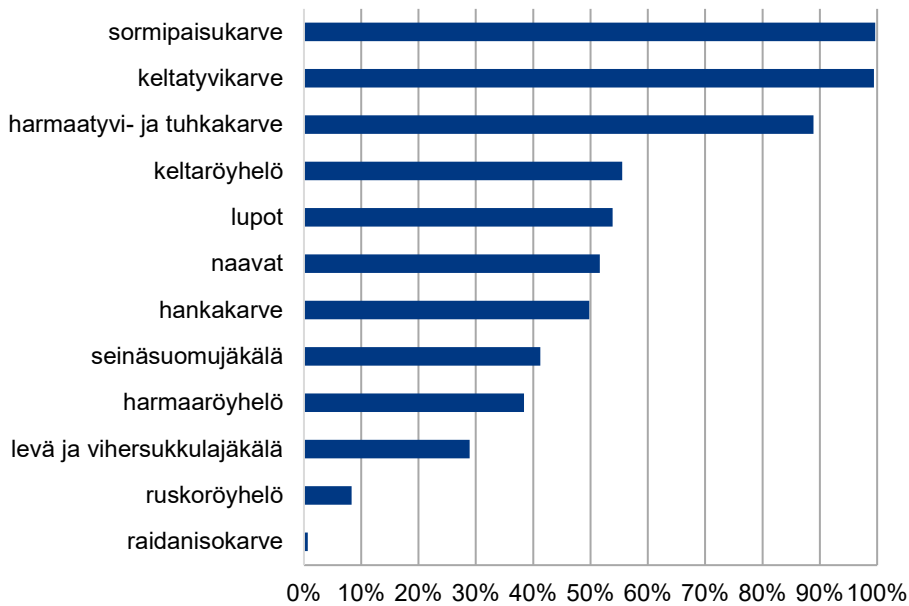
Kuva 34. Yleinen vaurioaste havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 35. Yleistä vaurioastetta kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

#### 4.1.3 Jäkälälajien määrät ja yleisyys

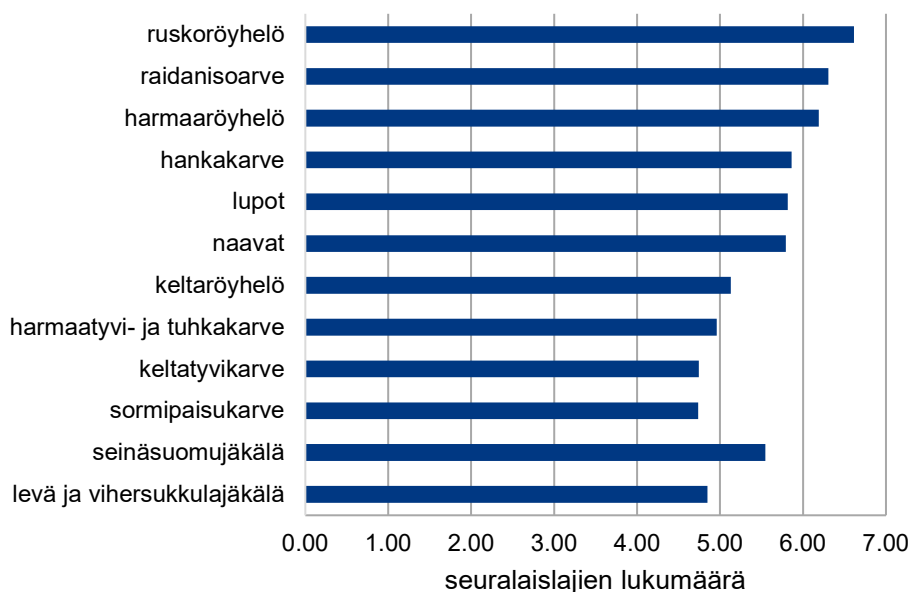
Yleisimmät lajit tutkimusalueella olivat sormipaisukarve ja keltatyvikarve, joita esiintyi lähes jokaisella tutkimuspuulla. Myös harmaa- ja tuhkatyvikarvetta kasvoi suurella osalla (89 %) tutkimuspuista. Yli puolella tutkimuspuista esiintyi myös keltaröyhelöä (56 %), luppoja 54 % ja naavoja 52 %. Hankakarvetta esiintyi puolella tutkimuspuista 50 %:lla, seinäsuomujäkälää 41 %:lla, harmaaröyhelöä 38 %:lla ja viherlevää 29 %:lla. Harvinaisimmat lajit tässä tutkimuksessa olivat ruskoröyhelö 8 % ja raidanisokarve 11 rungolla eli (0,7 %) rungoista (Kuva 36).



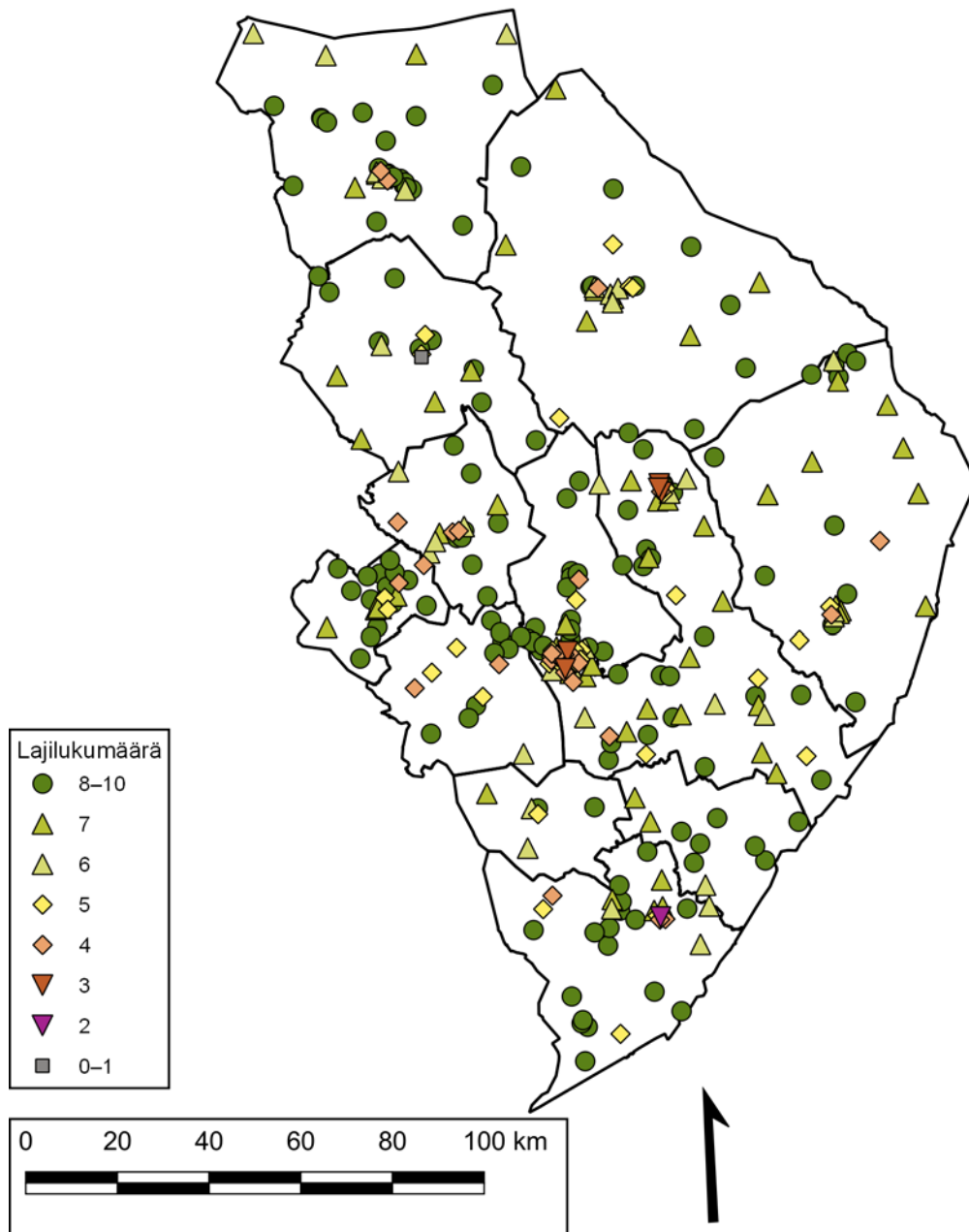
Kuva 36. Runkojäkälien esiintymistiheys havaintopuiden rungoilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. n = 1575.

Tutkimuksessa havaitut seuralaislajimäärät noudattavat melko hyvin oletuksia jäkälien herkkydestä ilman epäpuhtauksille. Eniten seuralaislajeja oli harvinaisimmilla ruskoröyhelöllä ja raidanisokarpeella, joiden indikaattoriarvo on kuitenkin satunnaisen esiintymisen vuoksi pieni. Hyviä indikaattorilajeja ovat seuralaislajien ja yleisyyden puolesta harmaaröyhelö, harmaahankakarve, lupot ja naavat sekä harmaa- ja tuhkatyvikarve. Keltaröyhelö on melko yleinen, mutta esiintyy satunnaisesti, eikä sen indikaattoriarvo ole erityisen hyvä. Vähiten seuralaislajeja oli kuormitusta hyvin kestäville lajeille keltatyvikarpeella, sormipaisukarpeella ja viherlevällä. Seinäsuomujäkälä on hyvin kuormitusta kestävä laji, mutta sillä oli melko paljon seuralaislajeja Pohjois-Karjalassa. Toisaalta seinäsuomujäkälä viihtyy hyvin vanhoilla, kilpikaarnoittuvilla männyillä, mikä voi vaikuttaa sen seuralaislajien lukumäärään.

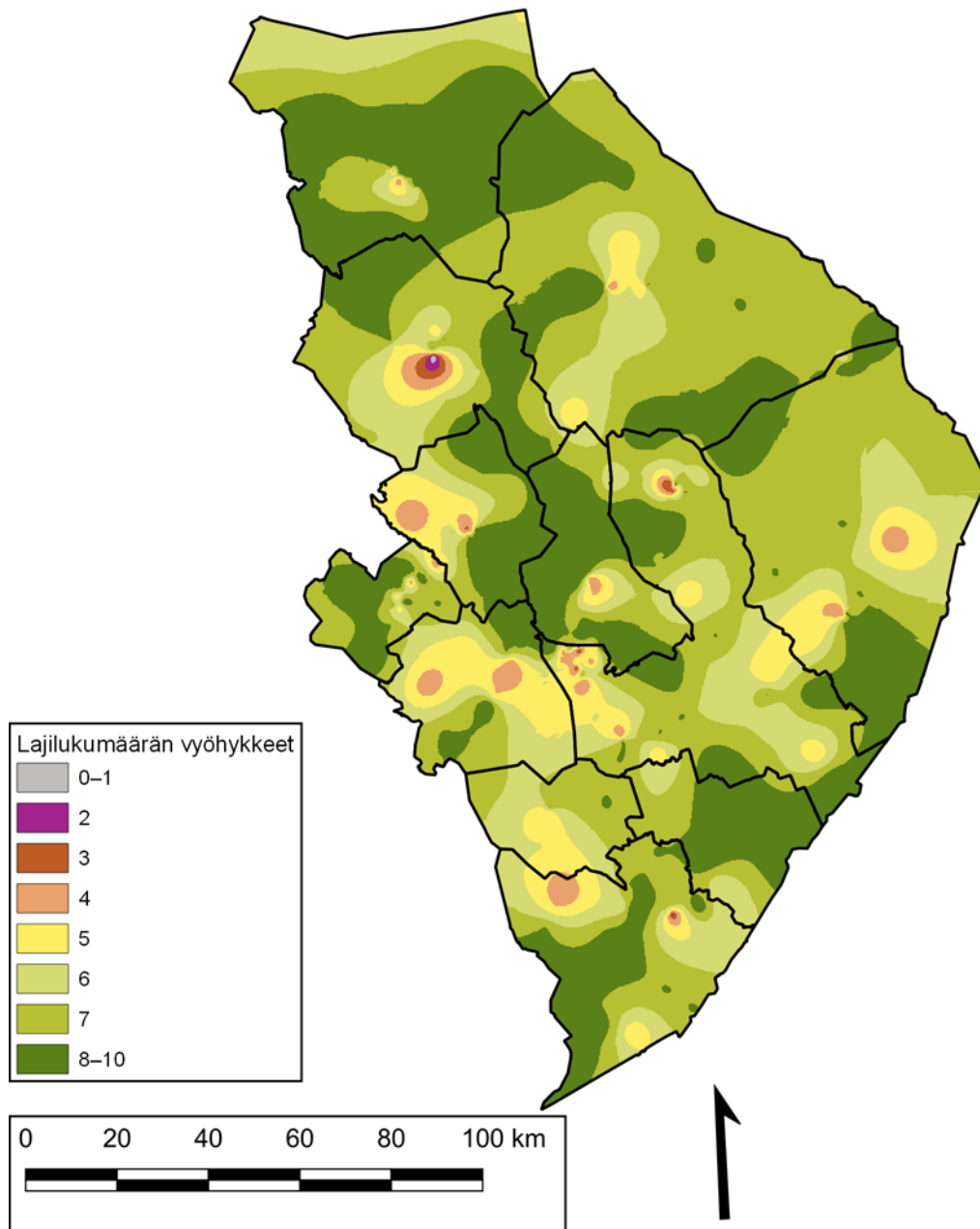
Tässä tutkimuksessa käytetty IAP-indeksi laskennassa käytetyt seuralaislukumäärät laskettiin Pohjois-Karjalan vuoden 2010 ja tämän tutkimuksen havaintojen perusteella.



Kuva 37. Runkojäkälien seuralaislajien lukumäärät Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. Lukumäärät on laskettu tämän tutkimuksen havaintojen perusteella.



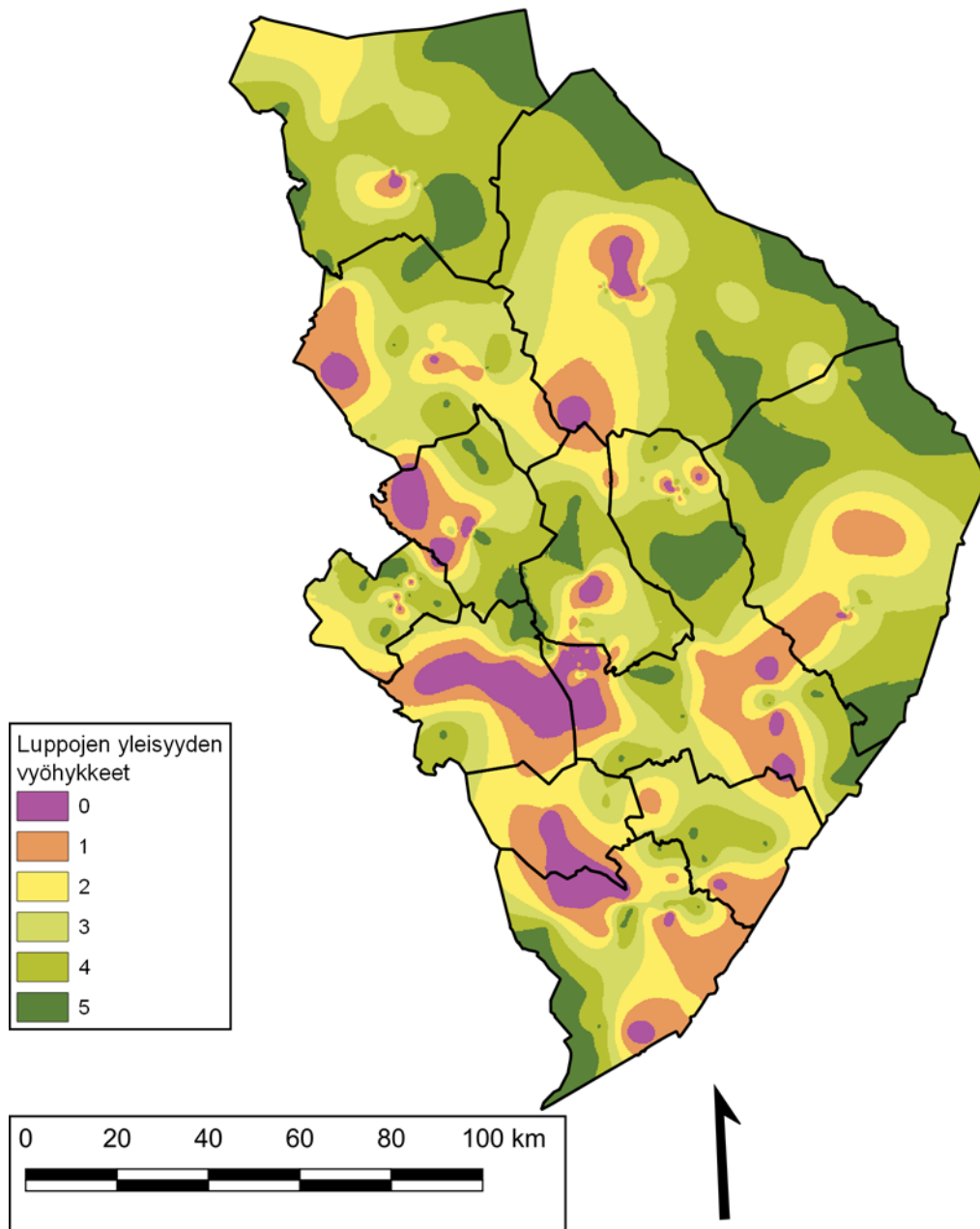
Kuva 38. Ilman epäpuhtausista kärsivien jäkälälajien lukumäärät havaintoaloilla Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 39. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärää kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

### Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien yleisyydet

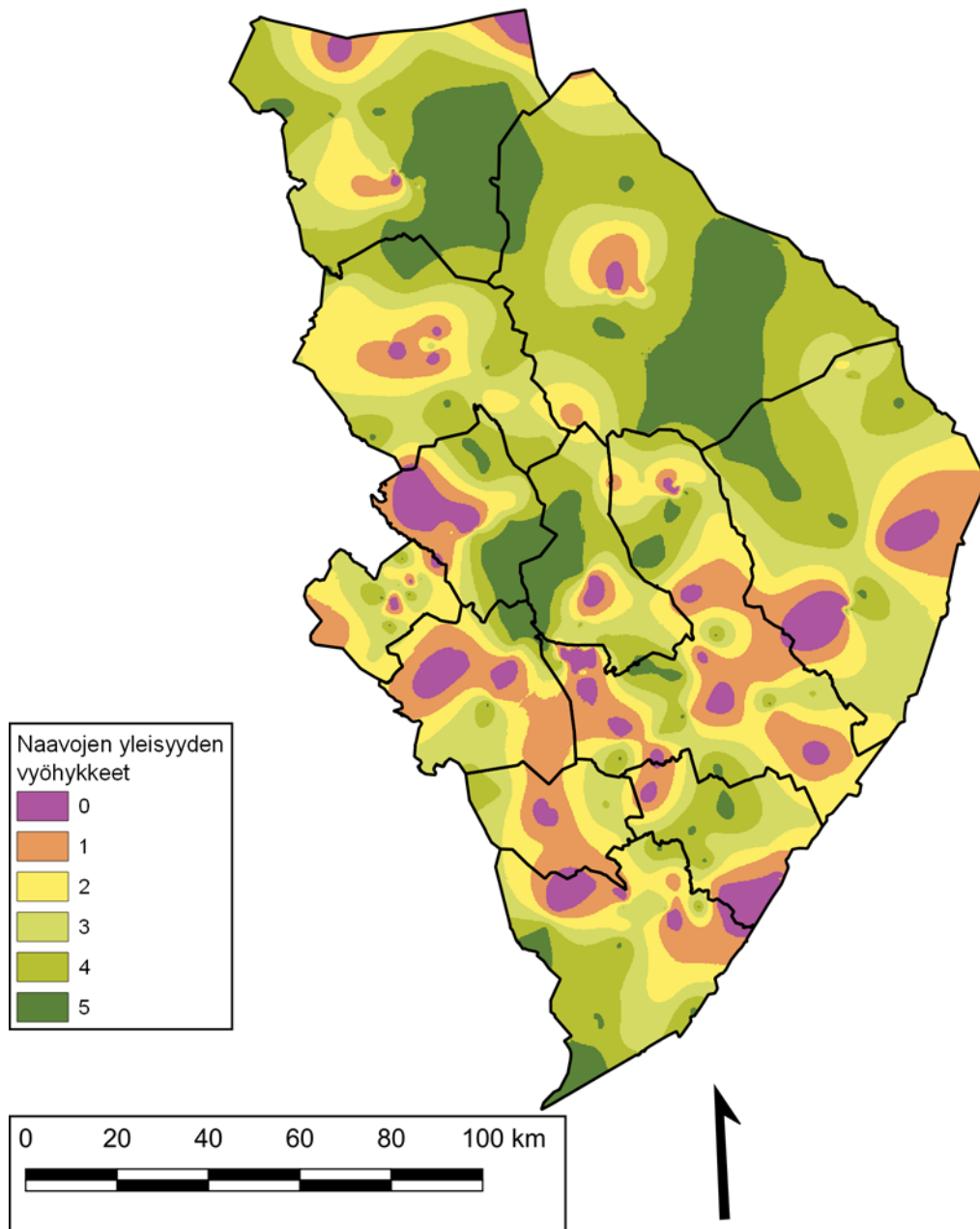
Alla (Kuva 40, Kuva 41, Kuva 42, Kuva 43) on esitetty ilman epäpuhtauksista kärsivien luppojen, naavojen, harmaaröyhelön, harmaahankakarpeen sekä harmaa- ja tuhkatyvikarpeiden yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0–5 (0 = lajia ei havaittu tutkimusalalla lainkaan, 5 = lajia havaittiin jokaisella tutkimuspuulla).



Kuva 40. Luppojen yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.

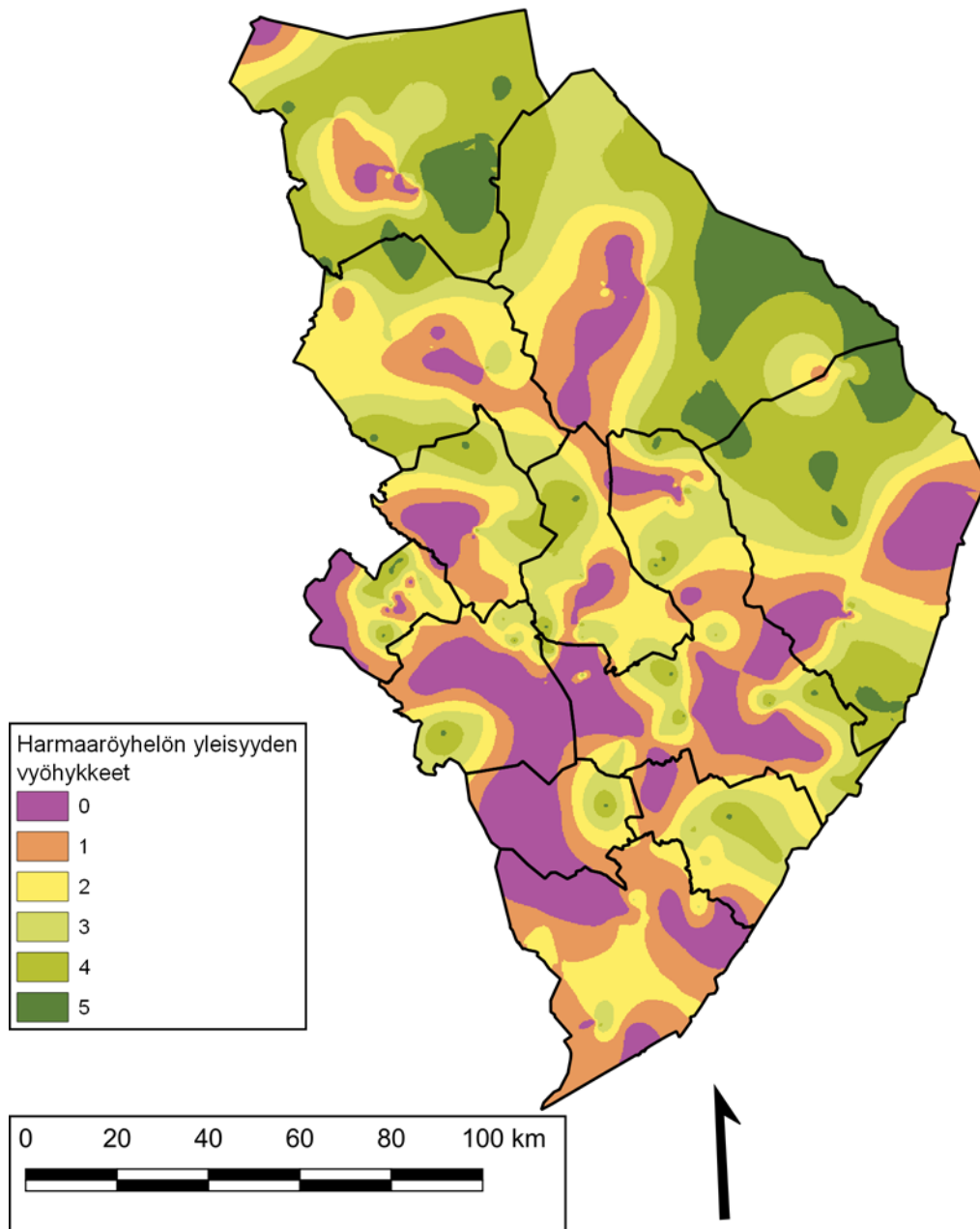
Luppoja havaittiin Pohjois-Karjalassa vuonna 78 %:lla aloista ja 54 %:lla rungoista. Keskimäärin luppoja oli 2,7 rungolla kullakin havaintoalalla. Yleisimpiä lupot olivat etäällä taajamista. Lupot puuttuivat laikuittain esimerkiksi Joensuun läheltä ja länsipuolelta, Koliilta, Lieksan keskustasta ja pohjoispuolelta sekä Rääkkylän ja Puhoksen väliltä. Muualla oli myös pienempiä puuttuvien luppojen alueita (Kuva 40).





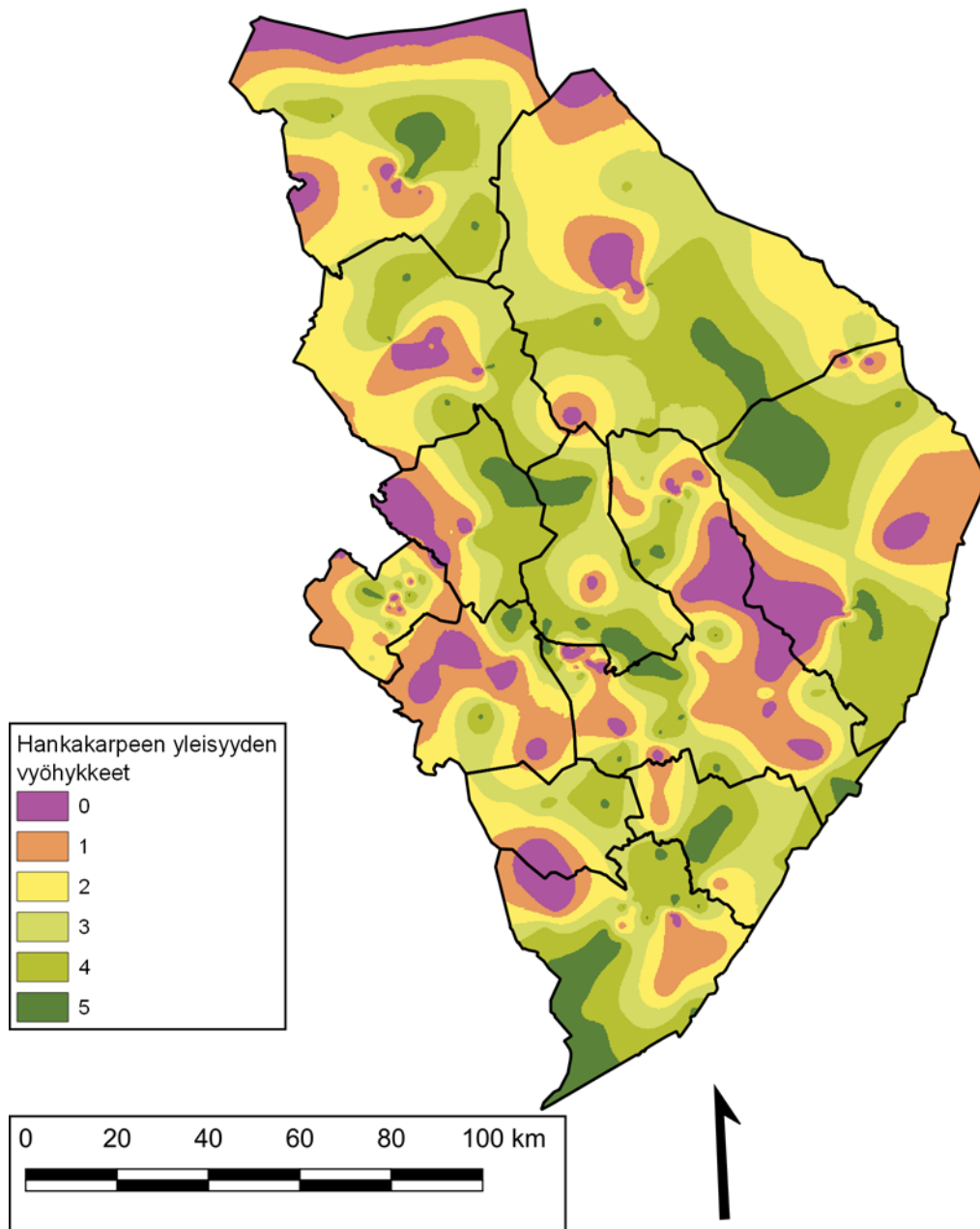
Kuva 41. Naavojen yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.

Naavoja esiintyi Pohjois-Karjalassa 76 %:lla tutkimusaloista ja 52 %:lla tutkimusrungoista. Myös naavat olivat yleisimpiä etäällä taajamista loppujen tapaan. Naavoja esiintyi keskimäärin niukasti niillä alueilla, joilla myös loppoja oli vähän. Selvimmät alueet, joilta naavat puuttuivat tai olivat niukkoja, sijaitsivat Joensuun keskustassa sekä sen länsi- ja eteläpuolella, Ilomantsin keskustan länsipuolella sekä Polvijärvellä (Kuva 41).



Kuva 42. Harmaaröyhelön yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.

Harmaaröyhelö oli keskimäärin harvinaisempaa kuin lupot ja naavat. Sitä havaittiin 59 %:lla havaintoaloista ja 38 %:lla rungoista. Aukkoja harmaaröyhelön levinneisyydessä havaittiin Joensuun keskustassa sekä isojen järvien kuten Pyhäselän ja Pielisen läheisyydessä mutta myös esim. Kiteellä, Ilomantsin ja Tuupovaaran seudulla sekä Polvijärvellä (Kuva 42).



Kuva 43. Hankakarpeen yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.

Hankakarve oli likimain yhtä yleistä kuin lupot ja naavat. Sitä havaittiin 76 %:lla havaintoaloista sekä 50 %:lla tutkimusrungoista. Yleisintä hankakarve oli vyöhykkeillä Ilomantsissa ja Lieksassa, Nurmeksessa, Kesälahdella sekä Polvijärven ja Kontiolahden alueella. Hankakarve puuttui Joensuun keskustasta, useista muista taajamista sekä teollisuuslaitosten läheisyydestä (Kuva 43).

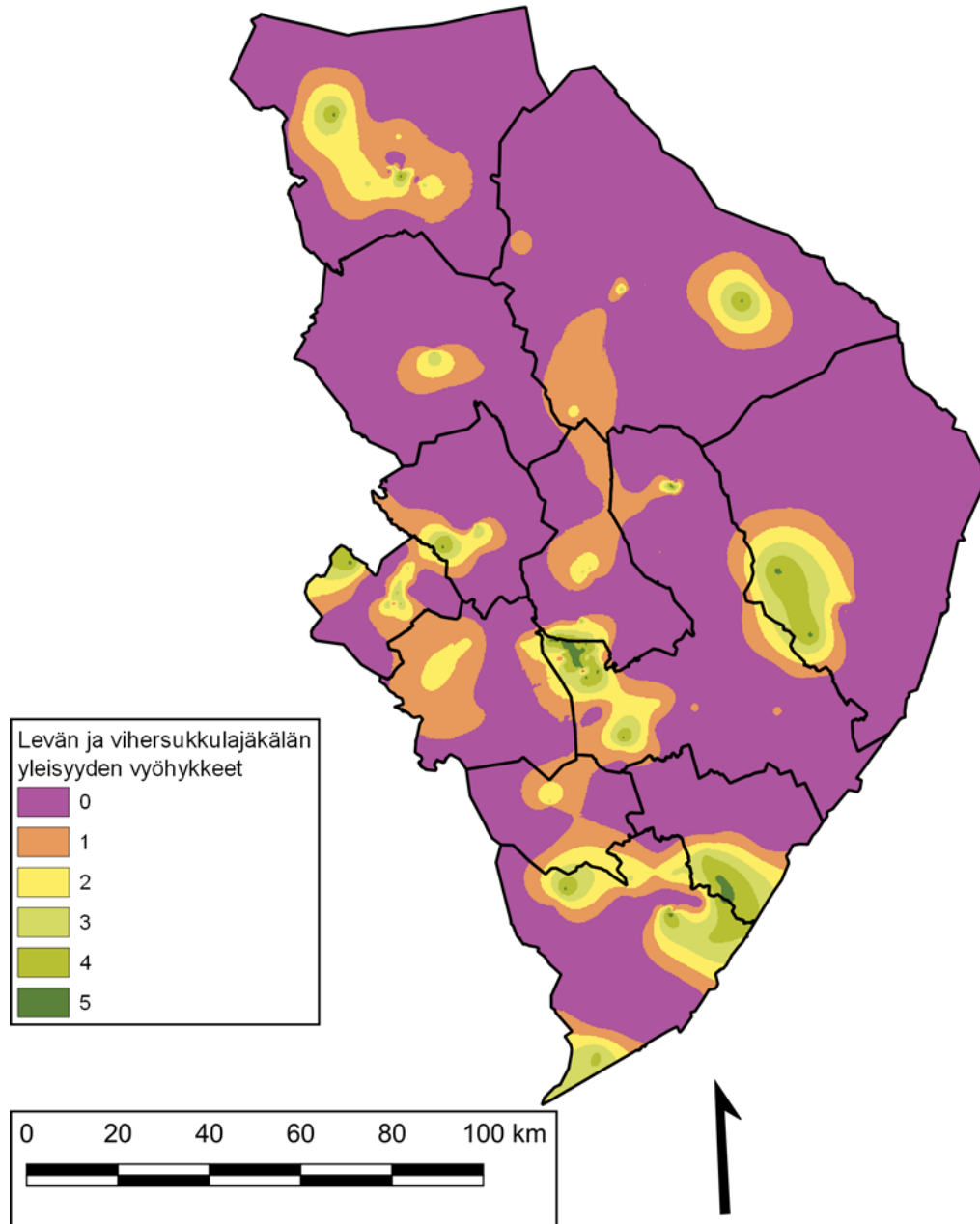
### Ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien yleisyydet

Seuraavassa (Kuva 44, Kuva 45) on esitetty ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien viherlevän ja seinäsuomujäkälän yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0–5. Keskimäärin levää havaittiin 0,4 havaintopuulla havaintoalaa kohti ja seinäsuomujäkälää 0,5 havaintopuulla havaintoalaa kohti. Levää havaittiin 46 %:lla havaintoaloista ja seinäsuomujäkälää 71 %:lla havaintoaloista.

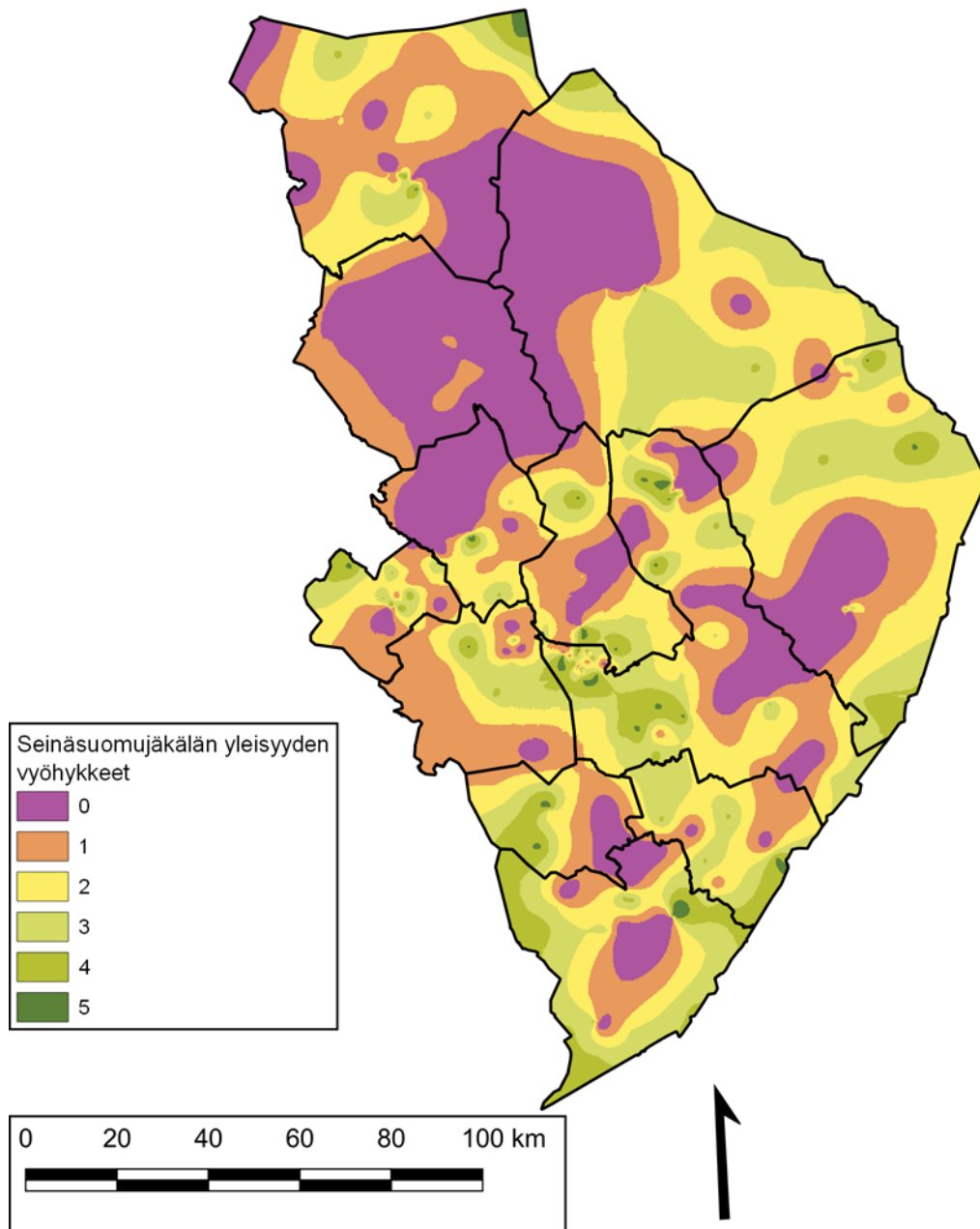
Leväpeitteen ja seinäsuomujäkälän levinneisyys oli pääpiirteissään vastakkainen verrattuna herkkiin lajeihin. Levää oli runsaiten Joensuun keskustassa, Uimaharjussa Stora Enso Oyj:n Enocellin tehtaan

lähellä ja useissa taajamissa. Leväpeitettä havaittiin muutamilla aloilla, joilla ei ollut selvää kuormittavaa tekijää kuten Tohmajärven ja Kiteen rajalla sekä Lieksassa Hatunkylässä (Kuva 44).

Seinäsuomujäkälää havaittiin keskimäärin enemmän tutkimusalueen eteläpuoliskossa, mutta sen levinneisyydessä oli selviä aukkoja Ilomantsissa, Rääkkylän ja Tohmajärven seudulla, Kiteellä sekä Öllölän lähellä. Eniten sitä havaittiin Joensuun keskustassa Uimaharjussa, Kiteellä sekä yksittäisillä aloilla (Kuva 45).



Kuva 44. Leväpeitteen ja vihersukkulajäkälän yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.



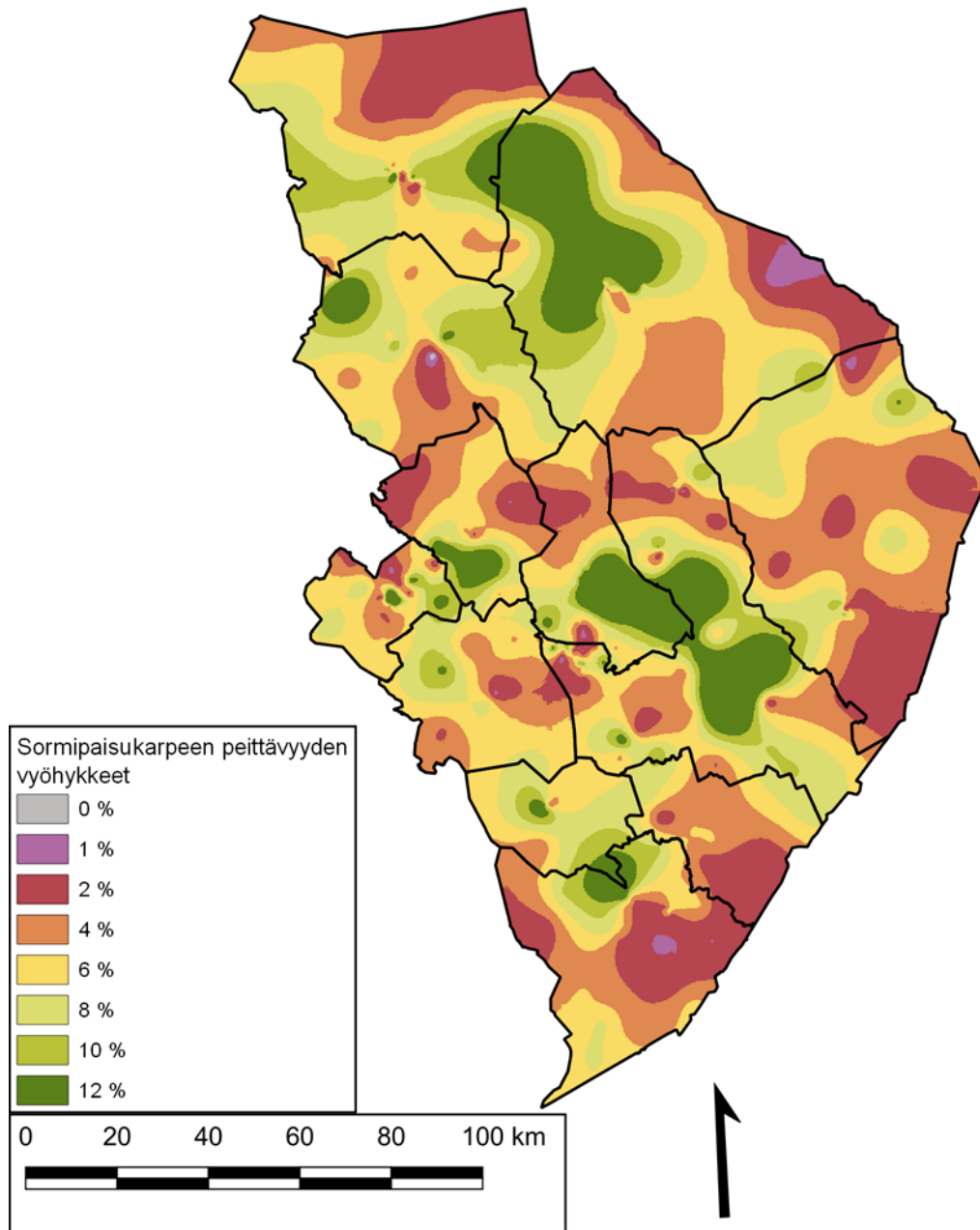
Kuva 45. Seinäsuomujäkälän yleisyyttä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. 0 = laji ei esiinny havaintoalalla; 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella rungolla.

#### 4.1.4 Peittävydet

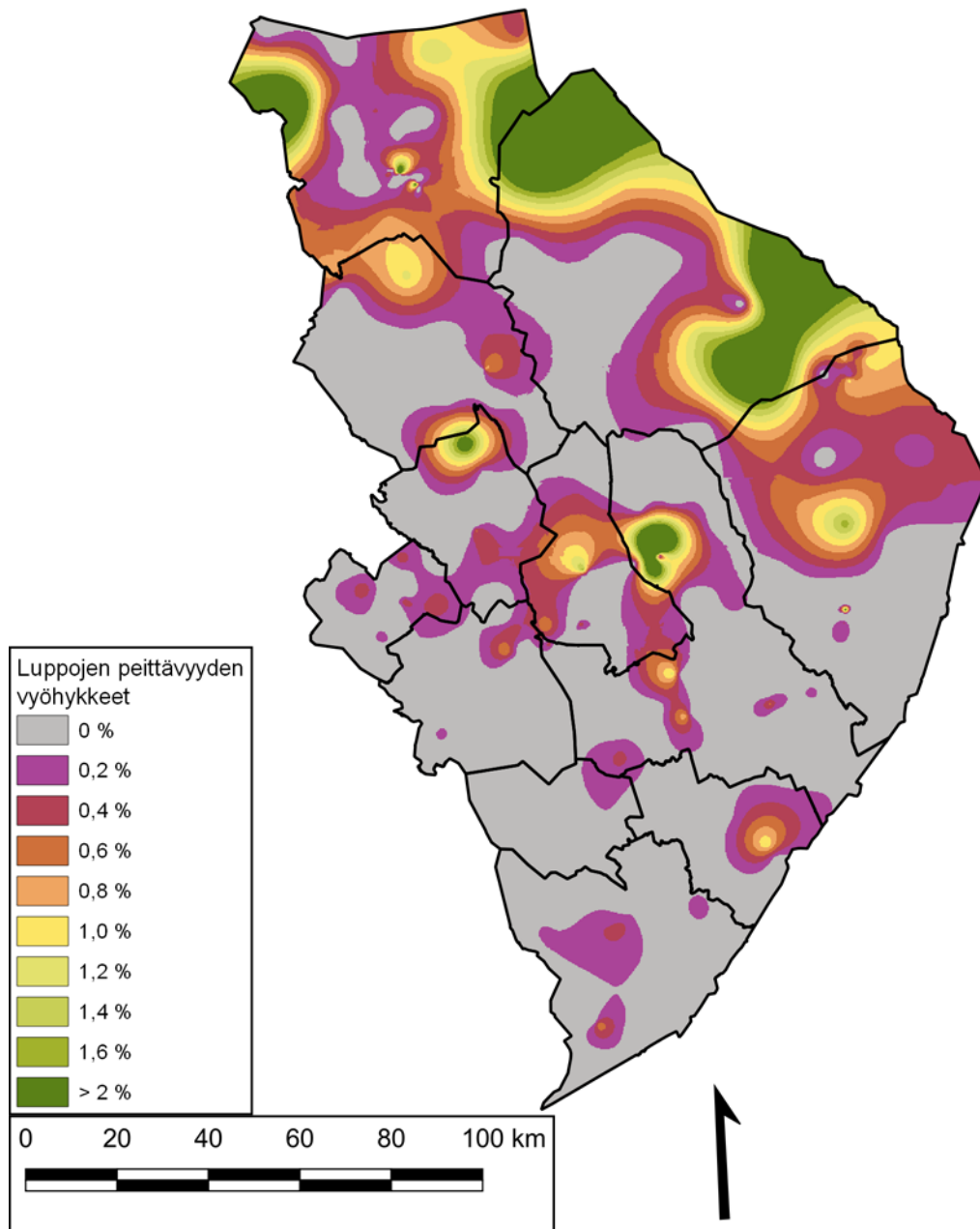
Tässä kappaleessa (Kuva 46, Kuva 47) on esitetty sormipaisukarpeen sekä luppojen pistefrekvenssimenetelmällä lasketut peittävydet mäntyjen rungoilla havaintoalakohtaisista keskiarvoista yleistettyinä vyöhykkeinä. Karttoja tarkasteltaessa on huomioitava, että erityisesti sormipaisukarpeen peittävyys reagoi ilman epäpuhtauksiin epälineaarisesti: lajin peittävyys usein ensin kasvaa epäpuhtauksien vaikutuksesta, ja kuormitustason edelleen kasvaessa peittävyys jälleen pienenee. Lisäksi luontaiset tekijät vaikuttavat peittävyysiin melko voimakkaasti, esim. sormipaisukarpeen peittävyys on suurempi varttuneissa kuin vanhoissa männiköissä.

Sormipaisukarpeen suurimpia peittävyksiä havaittiin Lieksassa, Kontiolahden ja itäisen Joensuun alueella sekä pienempialaisena Juuassa, Polvijärvellä, Rääkkylässä ja Kiteellä. Pienen peittävyden vyöhykkeet muodostivat nauhoja Polvijärveltä Ilomantsiin sekä Liperistä Tohmajärvelle ja Kiteelle. Lisäksi Joensuun keskustassa sekä useilla aloilla itärajan lähellä peittävyys oli pieni (Kuva 46).

Lupot esiintyivät peittävinä kasvustoina tutkimusalueen pohjois- ja itäosissa Nurmeksessa, Lieksassa ja Ilimantsissa sekä pienemmällä alueella Kontiolahdella ja Enon kirkonkylän lähellä. Kuormitetuilla alueilla ei havaittu luppoja peittävinä (Kuva 47).



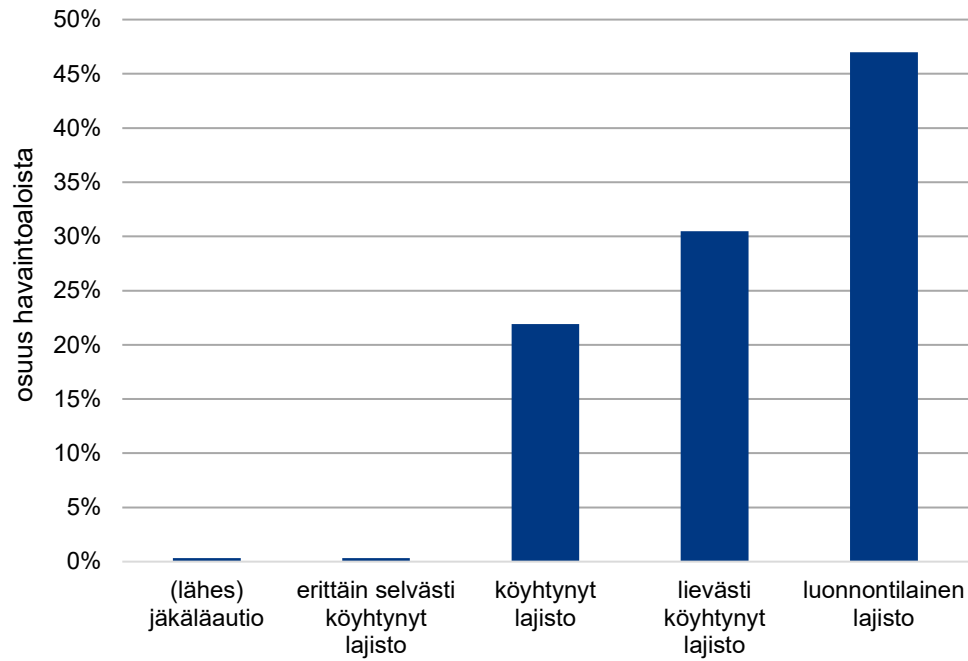
Kuva 46. Sormipaisukarpeen keskimääräistä peittävyttä (%) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 47. Luppojen keskimääräistä peittävyttä (%) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

#### 4.1.5 IAP-indeksi

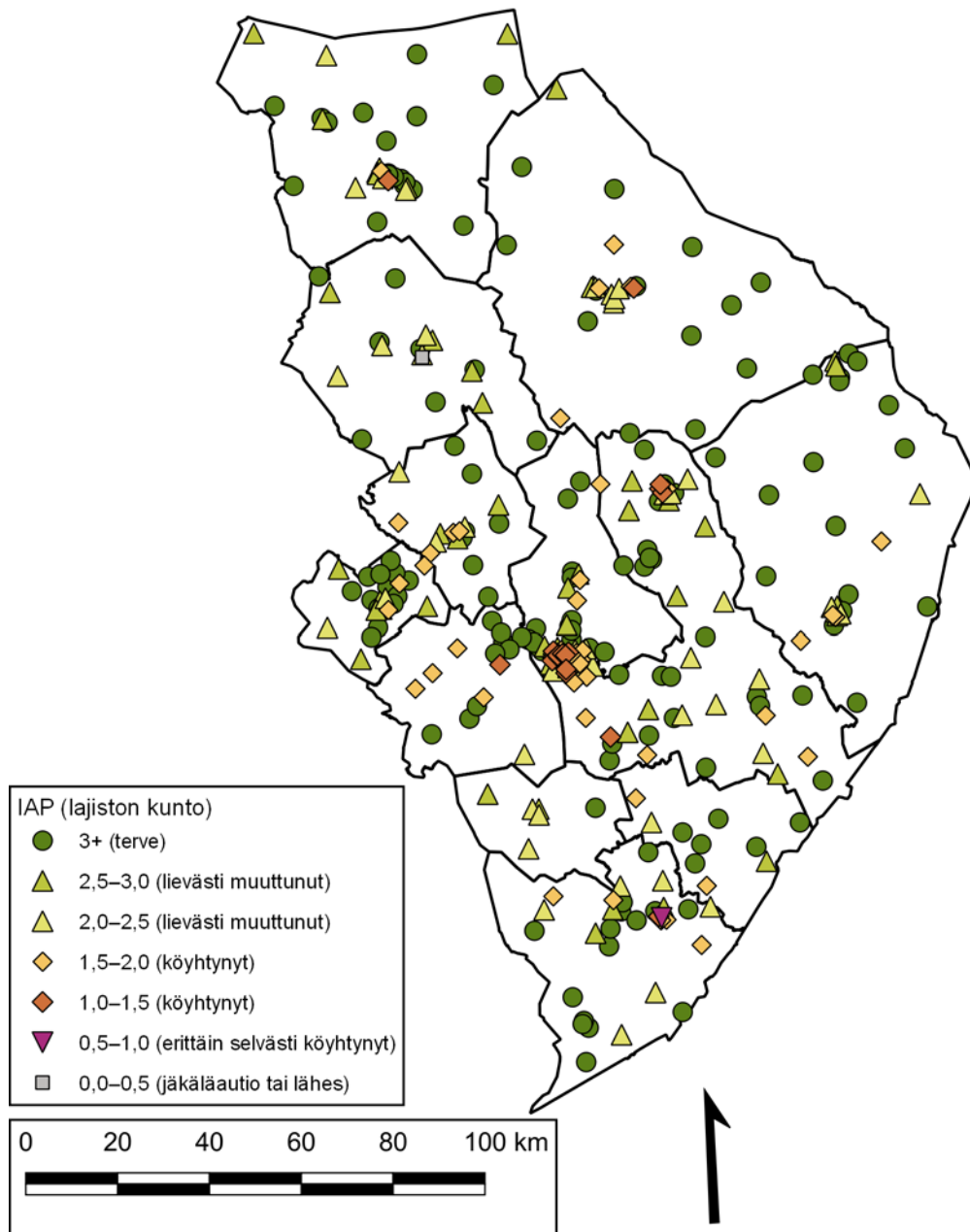
IAP-indeksi oli tutkimusalueella keskimäärin 2,9, minkä perusteella lajistoa voi kuvailla lievästi muuttuneeksi. Pienin IAP-indeksin arvo oli 0,10 (jäkäläautio tai lähes jäkäläautio) ja suurin 4,7 (luonnontilainen lajisto) (ks. Taulukko 17). Suurimmalla osalla (47 % aloista) tutkimusaloista oli IAP-indeksin arvon perusteella luonnontilaista. Toiseksi suurin luokka oli lievästi köyhtynyt lajisto (30 %). Lajisto oli köyhtynyttä 22 %:lla havaintoaloista. Selvästi köyhtynyttä lajisto oli yhdellä havaintoalalla (0,3 %), ja jäkäläautioksi tai melkein jäkäläautioksi luokiteltiin samoin yksi ala (0,3 %). (Kuva 48)



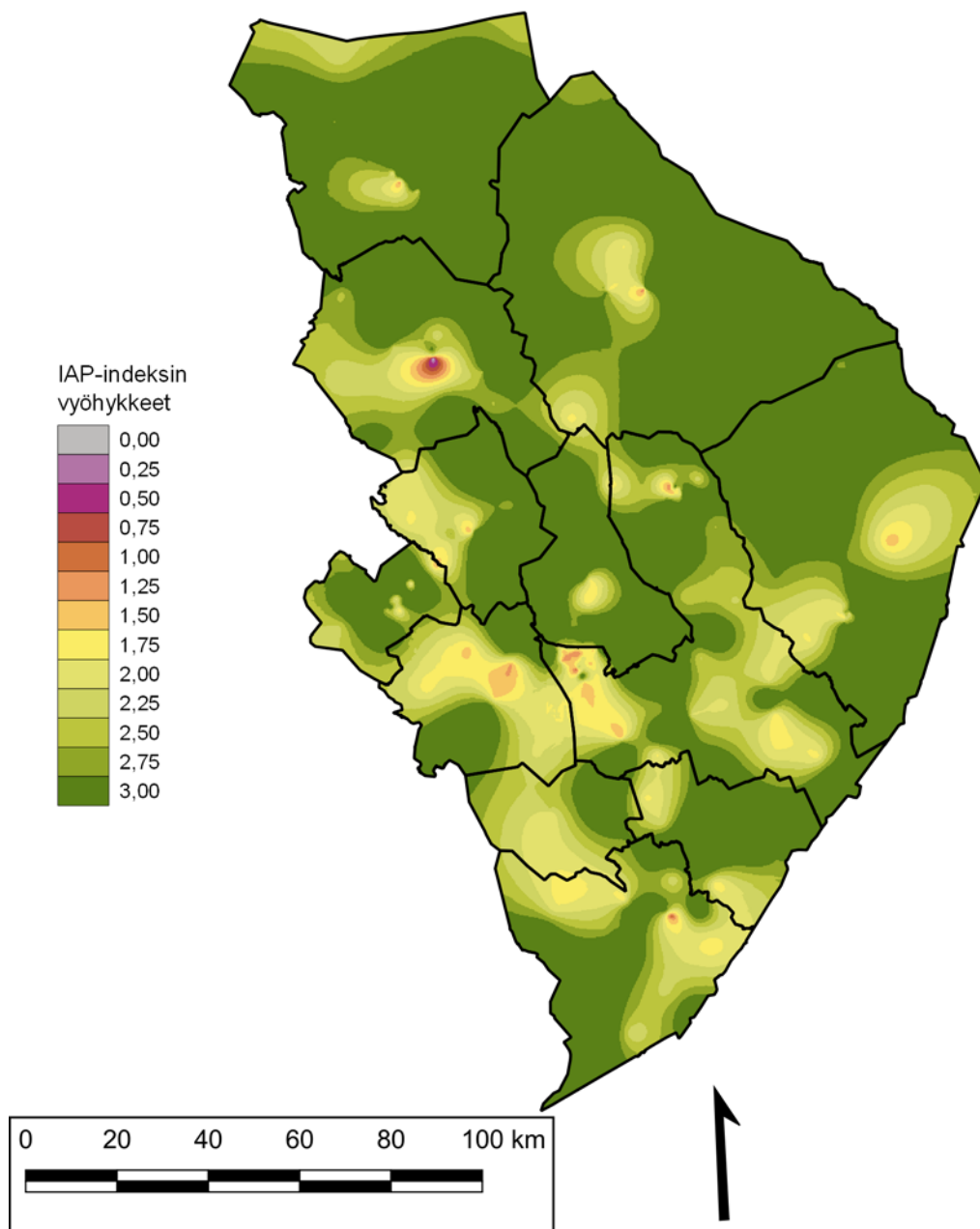
Kuva 48. IAP-indeksi Pohjois-Karjalassa havaintoaloilla luokittain vuonna 2020. n = 315.

Täysin muuttumaton jäkälälajisto (IAP-indeksi arvo vähintään 3) Pohjois-Karjalassa vuonna 2020 havaittiin 148 tutkimusalalla, ja niiden sijainti ei keskittynyt selvästi mihinkään tiettyyn osaan maakuntaa. Lievästi muuttunut jäkälälajisto esiintyi 96 alalla eri puolilla Pohjois-Karjalaa mutta välttämättä harvaan asuttuja seutuja. Erittäin selvästi köyhtyneen lajiston ala sijaitsi Kiteen keskustassa, ja jäkälät puuttuivat yhdeltä alalta Juuassa.





Kuva 49. IAP-indeksi Pohjois-Karjalassa havaintoaloilla vuonna 2020.



Kuva 50. IAP-indeksiä kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. Laskennassa on käytetty Pohjois-Karjalan vuosien 2010 ja 2020 tutkimusten dataa.

## 4.2 Sammalten alkuainepitoisuudet

Useiden alkuaineiden pitoisuudet olivat suurimmassa osassa Pohjois-Karjalan sammalnäytteitä pieniä. Jotkin nykyiset ja lakkautetut teollisuuslaitokset erottuivat vyöhykekartoissa suurempien pitoisuuksien pienialaisina läikkinä. Fosfori, magnesium, rauta, rikki ja sinkki ovat elämälle välttämättömiä alkuaineita, ja niiden pitoisuuksien normaalitaso on selvästi korkeampi kuin muiden alkuaineiden.

**Arseeni** on luonnossa yleinen, tavallisimmin sulfidimineraalien kanssa esiintyvä puolimetalli. Arseeni on erittäin myrkyllistä vesieläölle, ja se sitoutuu tavallisesti maaperän oksideihin, orgaaniseen ainekseen ja savimineraaleihin. Suomessa maaperän paikallista arseenikuormitusta on aiheuttanut lähinnä arseenin

käyttö puunsuojaukseen CCA-kyllästeinä. (Reinikainen 2007, 93.) Arsenia oli eniten, 1,3 mg/kg, Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä. Muualla pitoisuudet olivat pieniä tai alittivat määritysrajan.

**Fosfori** on olennainen osa kasvisolujen energian varastointi- ja siirtojärjestelmää, ja lisäksi fosforia esiintyy myös proteiineissa ja hiilihydraateissa. Fosforia havaittiin runsaiten Kiteen Puhoksella lakkautetun sahan lähistöllä, jossa pitoisuus oli 3 000 mg/kg. Kohonneita pitoisuuksia oli myös Joensuun Löytöjärvellä (2 600 mg/kg), Tohmajärvellä Kemienvaaran länsipuolella (2 300 mg/kg) ja Lieksassa keskustan itäpuolella (2 300 mg/kg) ja Kiteellä Loukunvaaran lähellä (2 300 mg/kg).

**Kadmiumia** esiintyy luonnossa erityisesti sulfidimalmeissa, ja se on maaperässä suhteellisen helposti kulkeutuvaa, riippuen maaperän happamuudesta ja mm. orgaanisen aineksen määrästä. Kadmiumia on käytetty mm. raudan pintakäsittelyssä, väripigmenteissä sekä paristoissa ja akuissa. (Reinikainen 2007.) Kadmiumia havaittiin eniten Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä, 0,22 mg/kg, ja kohonneita pitoisuuksia oli myös Joensuussa Kalmonniemessä (0,21 mg/kg) sekä Ilomantsin Pogostassa (0,19 mg/kg) ja Kiteen keskustan lähellä (0,19 mg/kg).

**Kromia** esiintyy luonnossa hapetusasteilla +3 ja +6. Kuudenarvoinen kromi on syöpävaarallista ja eliöille kolmenarvoista kromia haitallisempaa, mutta sitä ei luontaisesti ole Suomen maaperässä tavattu. Kolmenarvoinen kromi on ihmiselle välttämätön hivenaine. Kromia on käytetty erityisesti ruostumattoman teräksen valmistuksessa sekä esim. nahka- ja kemianteollisuudessa sekä puunsuojauksessa. (Reinikainen 2007) Suurin pitoisuus kromia, 5,6 mg/kg, havaittiin havaintoalalla Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä. Muualla pitoisuudet olivat selvästi pienempiä; suhteellisesti runsaasti kromia havaittiin myös Joensuussa Hammaslahden eteläpuolella (2,5 mg/kg), Polvijärvellä (1,5–2,1 mg/mg) sekä Juuan Nunnanlahdessa (1,6 mg/kg).

Ihmistoiminnan seurauksena maaperään joutunut **kupari** on usein liukoisemmassa muodossa kuin maaperän mineraaleihin sitoutunut kupari. Maaperän happamuus ja kuparia sitovien aineiden vähäisyys lisäävät kuparin kulkeutuvuutta. Suomessa kuparia on käytetty mm. teollisuuden metalliseoksissa, väripigmenteissä ja puutavaran kyllästysaineissa. (Reinikainen 2007) Myös fossiilisten polttoaineiden käytöstä pääsee ilmaan kuparia (Rautjärvi ja Raitio 2003). Kuparia oli sammalissa eniten Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähistöllä, 27,4 mg/kg. Kohonnut pitoisuus havaittiin myös Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä (16,8 mg/kg). Muualla pitoisuudet olivat selvästi pienempiä.

**Lyijyä** esiintyy tavallisesti kertyneenä maaperän orgaaniseen pintakerrokseen. Lyijyä on käytetty runsaasti mm. elektroniikkateollisuudessa sekä aikaisemmin bensiinin lisäaineena. Maaperän paikallista lyijykuormitusta ovat aiheuttaneet mm. ampumaratojen haulit ja luodit, kuparisulattojen kuonat sekä autojen akut. Kohonneita lyijypitoisuuksia voivat aiheuttaa myös energiantuotannon polttoprosessien ilmalaskeuma. (Reinikainen 2007.) Lyijyä havaittiin runsaiten Ilomantsin keskustassa, 2,2 mg/kg. Sitä oli runsaasti myös Kiteellä Puhoksella lakkautetun sahan lähellä (1,7 mg/kg) ja jonkin verran kohonnut pitoisuus Joensuun keskustassa (1,0–1,2 mg/kg).

**Magnesium** kuuluu kasvien pääravinteisiin, ja valtaosa siitä esiintyy viherhiukkasissa. Magnesiumpuutosta on Suomessa esiintynyt turkistarhojen läheisyydessä, voimakkaasti tyypellä lannoitetuilla turvemaidilla ja karuilla kankailla (Ferm ym. 1988, Raitio 1990, Reinikainen ym. 1998). Magnesiumia havaittiin suurin pitoisuus Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä (2 700 mg/kg). Kohonneita pitoisuuksia erottui myös Kiteellä (2 000 mg/kg), Polvijärvellä Horsmanaholla louhoksen lähellä (2 000 mg/kg), sekä 1 900 mg/kg Joensuussa Satulavaarassa (Niittylahden ja Kiihtelysvaaran puolivälissä), Juuan Nunnanlahdessa, Valtimolla, Tohmajärvellä ja Joensuussa Hammaslahdessa.

**Nikkelin** liikkuvuutta maaperässä säätelevät pH sekä orgaanisen aineksen ja alumiinipitoisten savimineraalien määrä. Nikkeliä käytetään mm. ruostumattoman teräksen ja metalliseosten valmistuksessa,

metallien galvanoinnissa sekä paristoissa. Nikkelin päästölähteitä ovat mm. kaivos- ja metalliteollisuus ja kivihiilen ja öljyn poltto. (Reinikainen 2007, Melanen ym. 1999.) Nikkeliä oli sammalissa eniten Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä, 26,8 mg/kg, ja toiseksi eniten Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähellä, 9,0 mg/kg. Juuassa Nunnanlahdessa nikkeliä oli 2,8 mg/kg. Muualla Pohjois-Karjalassa sitä oli selvästi vähemmän, alle 2,0 mg/kg.

**Rautaa** kertyy kasvien pinnalle maapölystä ja metalli- ja kaivannaisteollisuudesta (Rautjärvi ja Raitio 2003). Rautaa määritettiin eniten havaintoalalla, joka sijaitti Joensuussa Hammaslahden eteläpuolella, 1 000 mg/kg. Seuraavaksi eniten sitä oli Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä (640 mg/kg) ja Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen läheisyydessä (560 mg/kg).

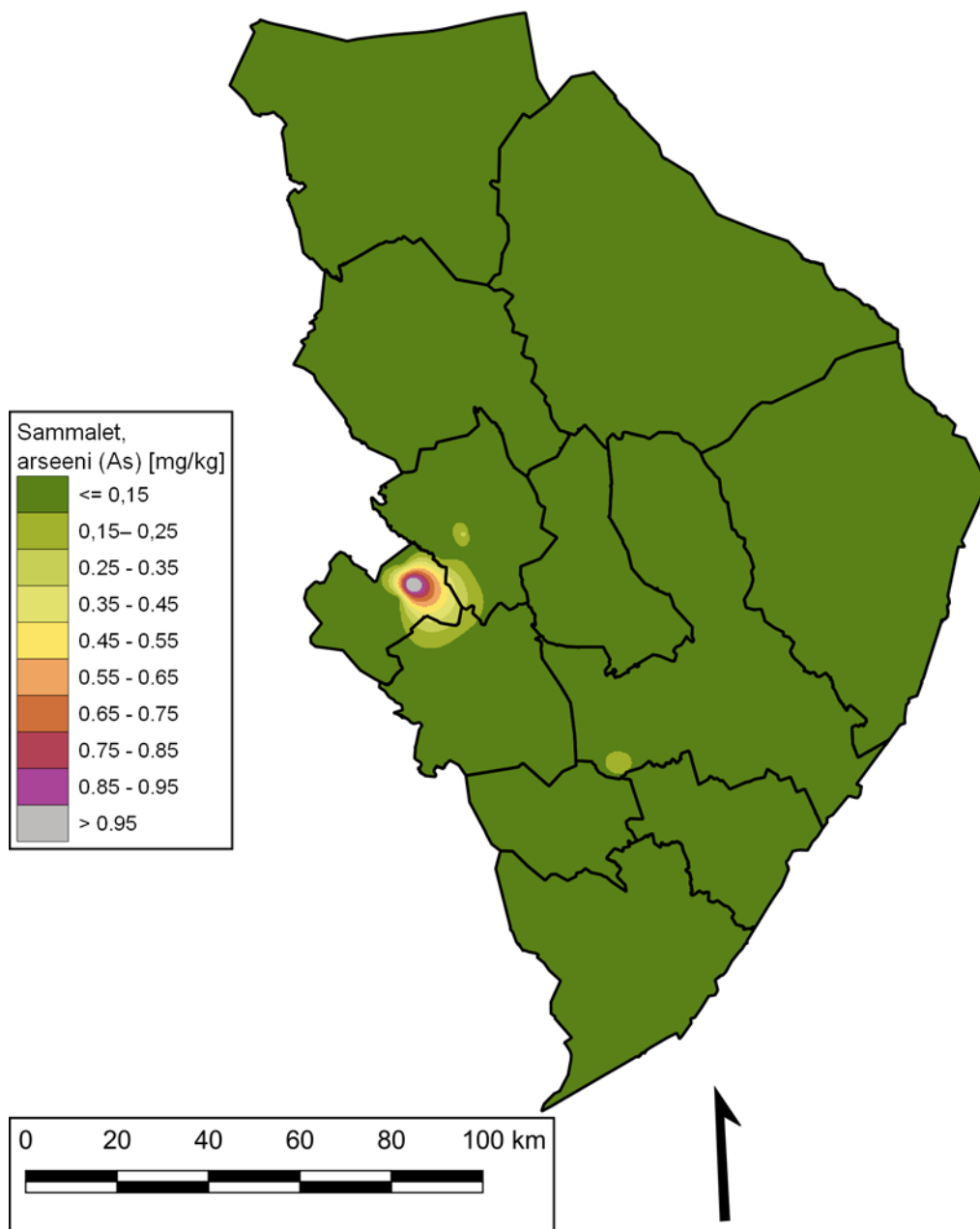
**Rikki** voi kulkeutua ilmakehässä suhteellisen kauas päästölähteestään, ja se esiintyy ilmassa useimmiten kaasumaisena. Rikkipitoisuuden on havaittu kohoavan lähellä päästölähteitä ja laskevan kauempana. Korkeat rikkipitoisuudet vahingoittavat kasveja ja muuttavat niiden kertymiskapasiteettia (Äyräs ym. 1997), toisaalta männyillä rikin on havaittu kuvaavan ensisijaisesti ravinnetilannetta, eikä ilman rikkidioksidipitoisuuden ja neulasten pitoisuuksien välillä ole aina havaittu yhteyttä (Innes 1995, Rautjärvi ja Raitio 2003). Lisäksi kasvien aktiiviset fysiologiset prosessit kontrolloivat rikin kertymistä (Moser ym. 1993). Rikin määrä sammalissa oli suurin Ilomantsin keskustassa, 1 200 mg/kg. Selvästi kohonneita pitoisuuksia havaittiin myös Joensuun Löytöjärvellä (1 000 mg/kg), Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähellä (1 000 mg/kg) sekä Kiteellä ja Tohmajärvellä (830–1 000 mg/kg). Pitoisuudet olivat selvästi tausta-alueita korkeampia Joensuun keskustassa (800–970 mg/kg) ja teollisuuslaitosten läheisyydessä, kuten Stora Enso Oyj:n Enocellin tehdas Uimaharjussa ja Vuonoksen tehdas Outokummussa.

Korkeat **sinkkipitoisuudet** voivat johtaa fosforin puutteeseen (Reinikainen 1998). Sinkkiä käytetään runsaasti metalliteollisuudessa, esim. raudan ja teräksen pinnoituksessa ja messinkiseoksissa. (Reinikainen 2007.) Sinkkiä havaittiin eniten (70 mg/kg) Kiteen Puhoksella lakkautetun sahan lähistöllä. Pitoisuudet olivat kohonneita myös Rääkkylän kirkonkylällä (56 mg/kg), Joensuun keskustan lähellä (40–60 mg/kg), Lieksan keskustassa (44–47 mg/kg), Nurmeksien keskustassa (54 mg/kg) ja Kylylahden kaivoksen lähellä (44 mg/kg) sekä Ilomantsin keskustassa (42 mg/kg).

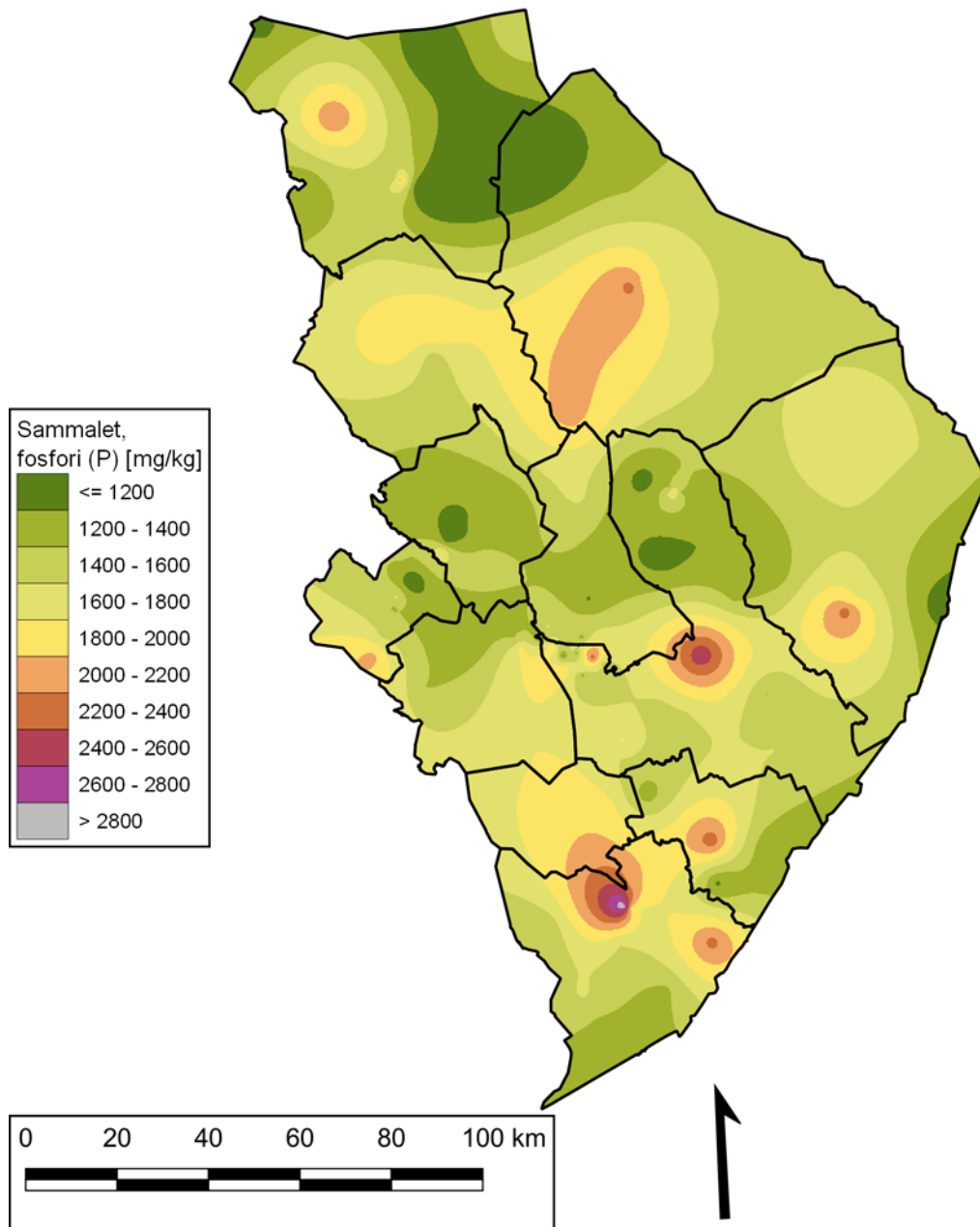
**Vanadiinia** käytetään seosaineena mm. teräksessä, raudattomissa metalliseoksissa sekä kemikaaleissa. (Reinikainen 2007.) Vanadiinipäästöjä syntyy mm. öljynpoltosta (Melanen ym. 1999). Vanadiinin suurin pitoisuus sammalissa (3,0 mg/kg) esiintyi Joensuussa Hammaslahden eteläpuolella. Kohonnut pitoisuus havaittiin Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä (1,7 mg/kg), ja jonkin verran kohonneita pitoisuuksia useiden teollisuuslaitosten lähellä tai taajamissa.

Taulukko 20. Sammalten alkuainepitoisuuksien (mg/kg) keskiarvot, pienimmät ja suurimmat arvot sekä keskihajonta Pohjois-Karjalassa vuonna 2020. Määritysrajan alittavat pitoisuudet on laskettu keskiarvoon käyttäen pitoisuutena määritysrajan puolikasta. Kemialliset merkit: As = arseeni; Cd = kadmium; Cr = kromi; Cu = kupari; Fe = rauta; Mg = magnesium; Ni = nikkeli; P = fosfori; Pb = lyijy; S = rikki; V = vanadiini, Zn = sinkki.

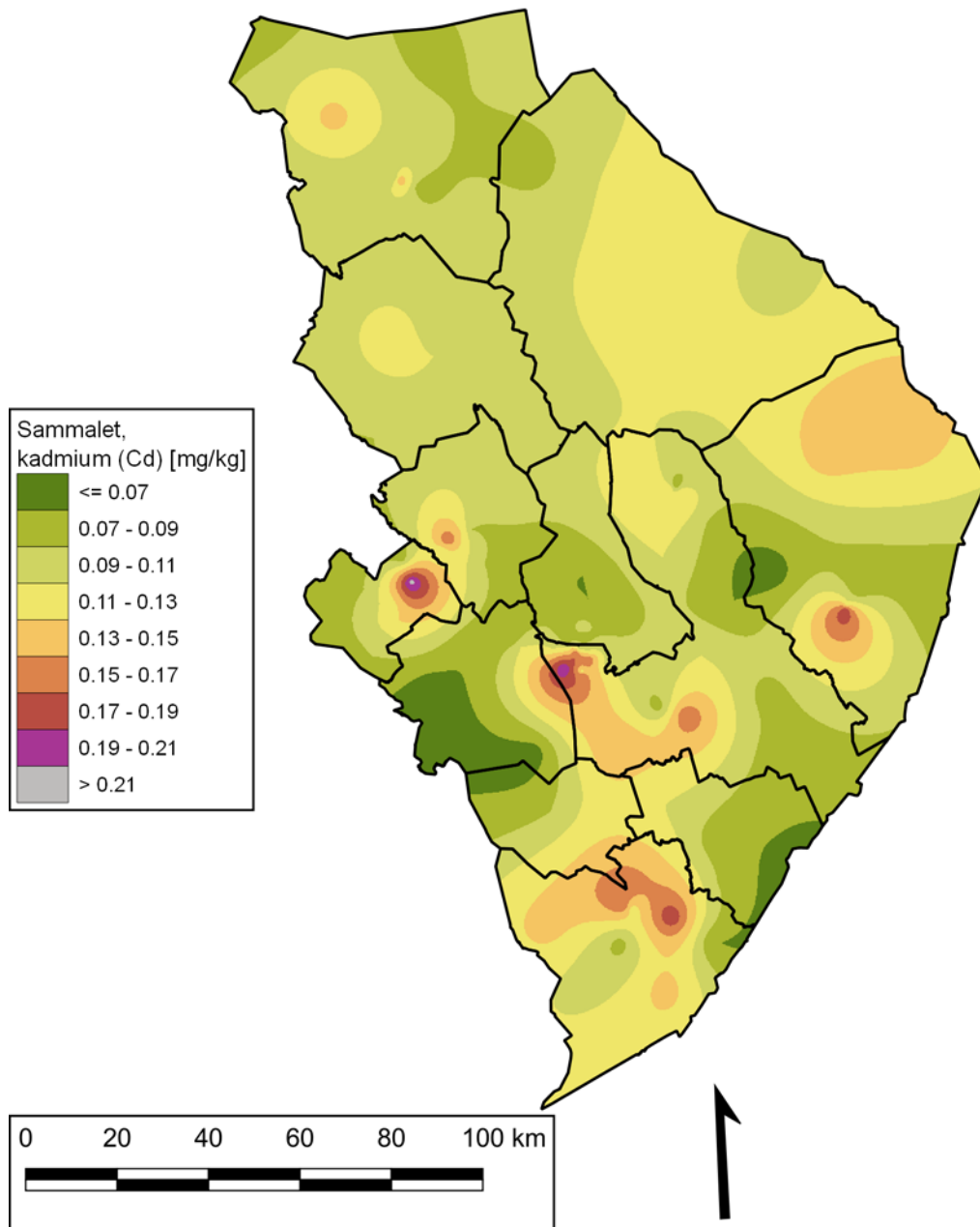
n = 101	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	P	Pb	S	V	Zn
keskiarvo	0,070	0,11	0,56	5,3	190	1 300	1,2	1 600	0,57	750	0,56	34
pienin	< 0,1	0,060	<0,2	3,2	60	790	0,30	920	0,20	430	<0,2	20
suurin	1,3	0,22	5,6	27	1 100	2 700	27	3 000	2,2	1 200	3,0	70
keskihajonta	0,13	0,034	0,64	2,8	150	320	2,7	380	0,31	140	0,42	8,5



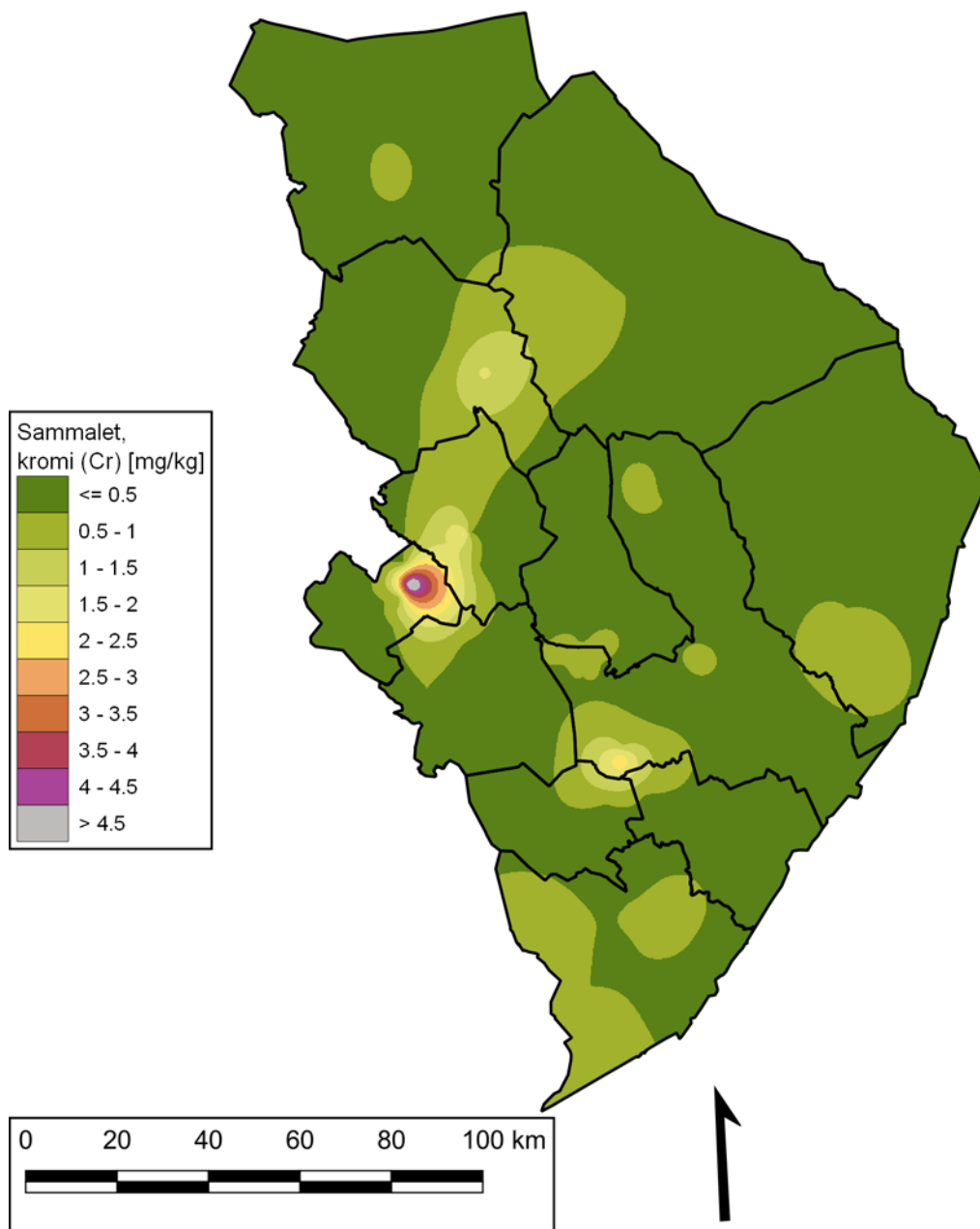
Kuva 51. Sammalten arseenipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 52. Sammalten fosforipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

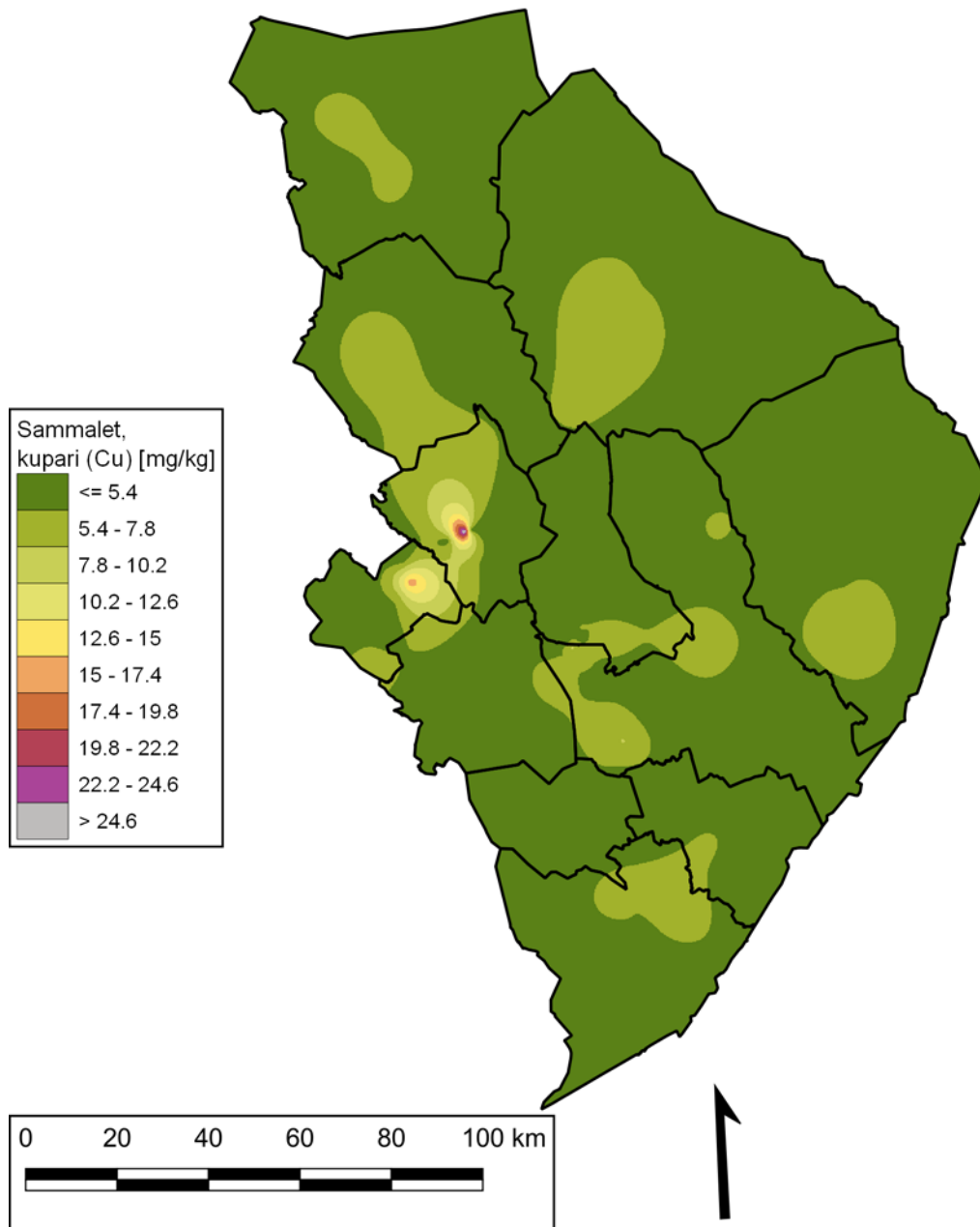


Kuva 53. Sammalten kadmiumpitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

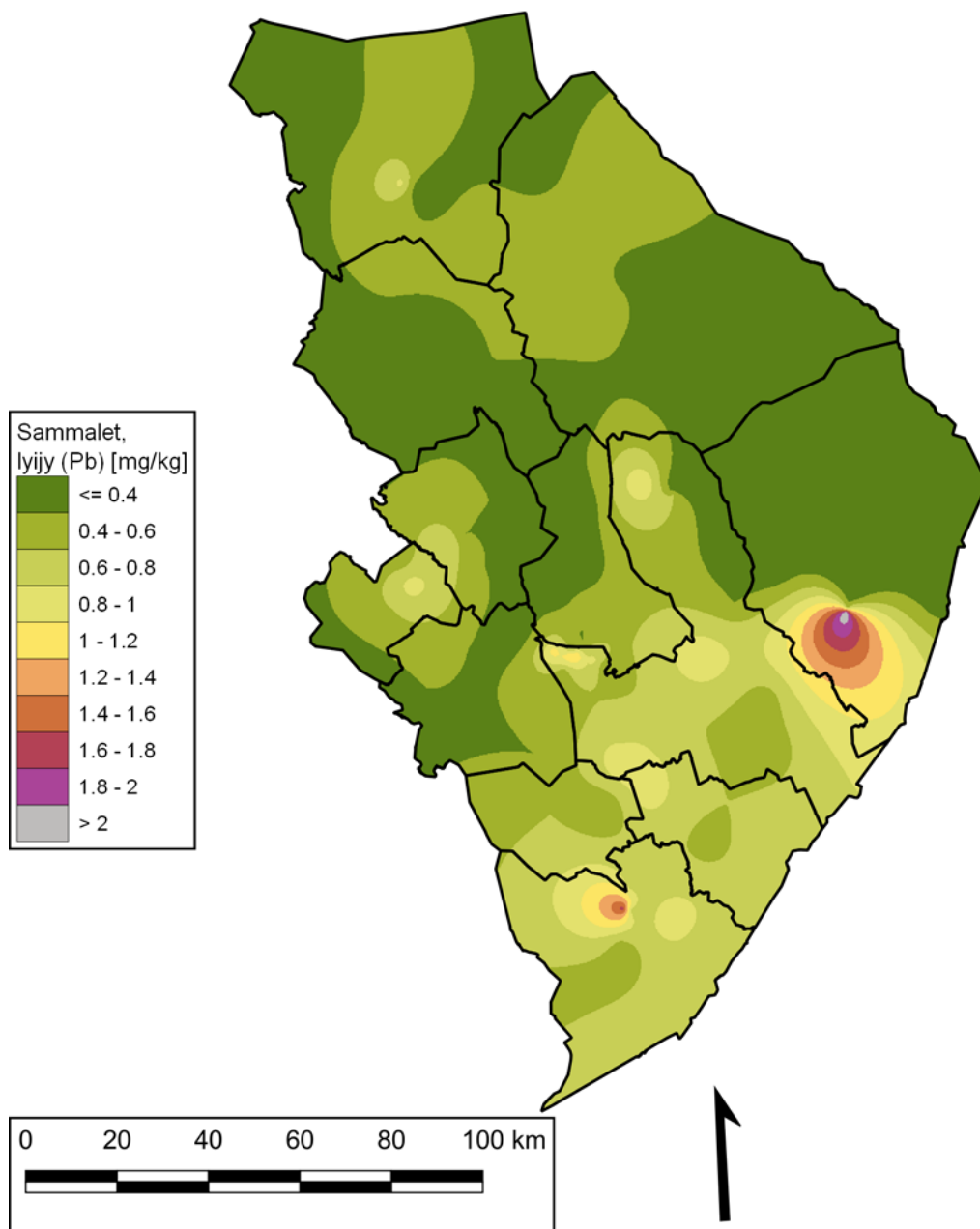


Kuva 54. Sammalten kromipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.

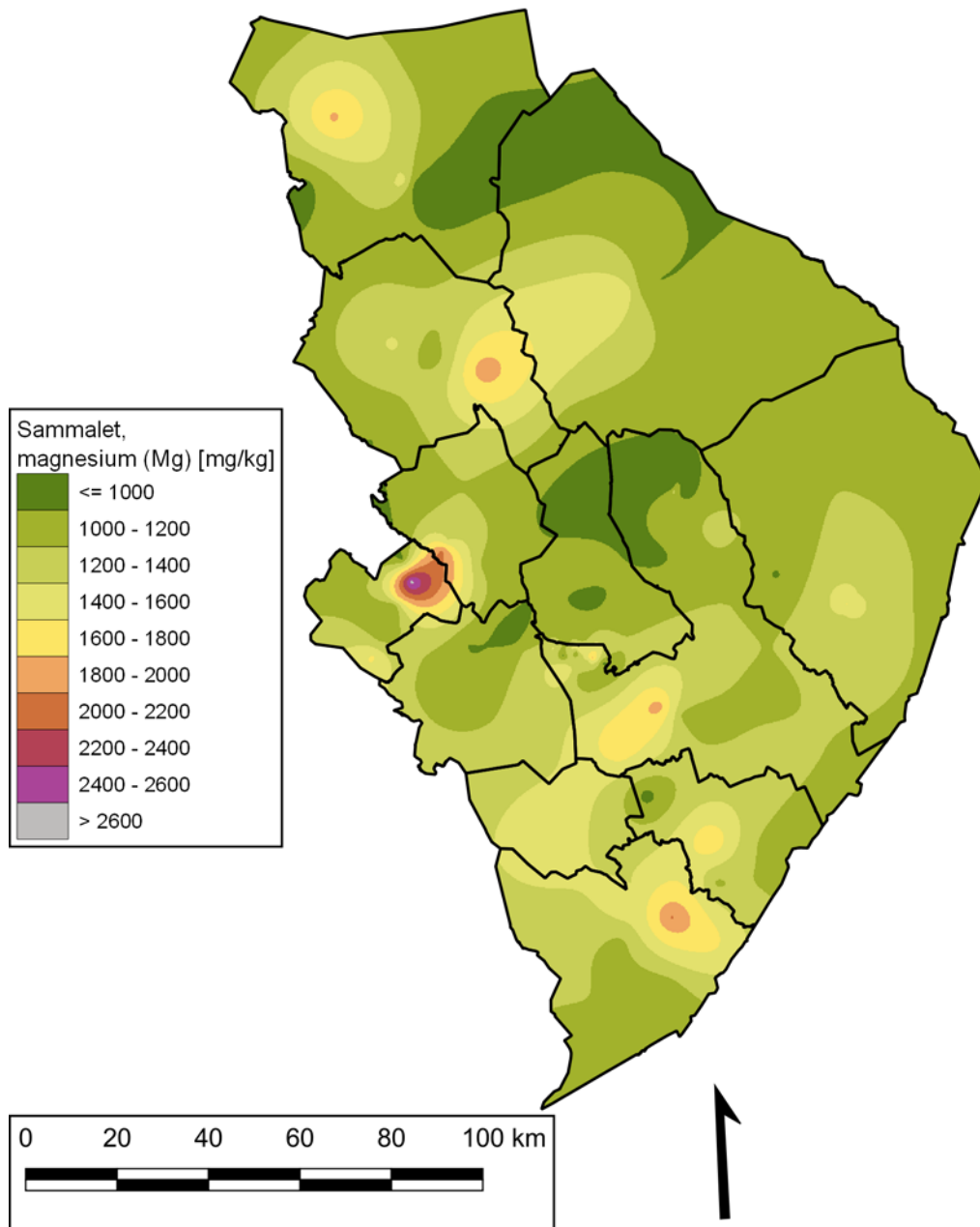




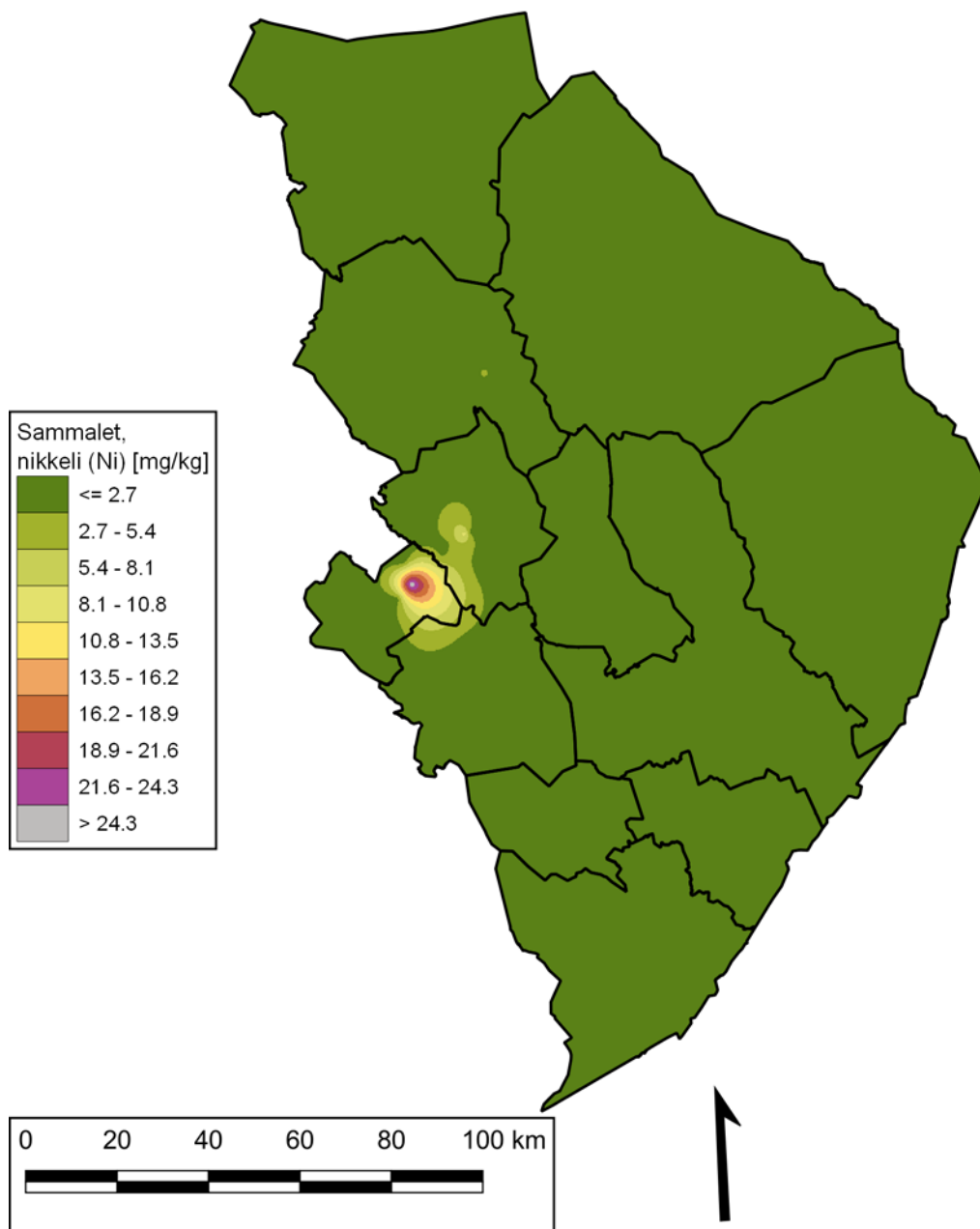
Kuva 55. Sammalten kuparipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



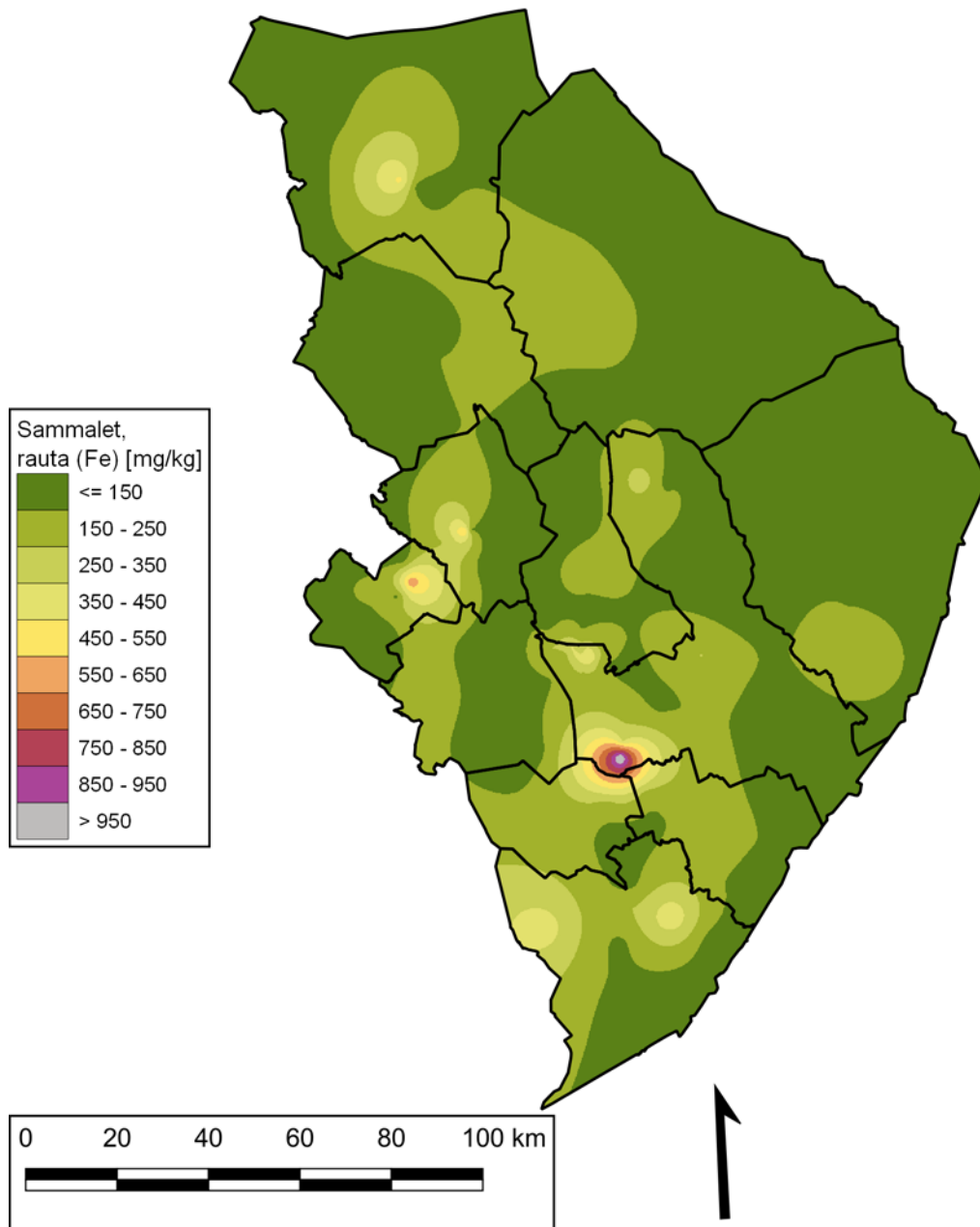
Kuva 56. Sammalten lyijypitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



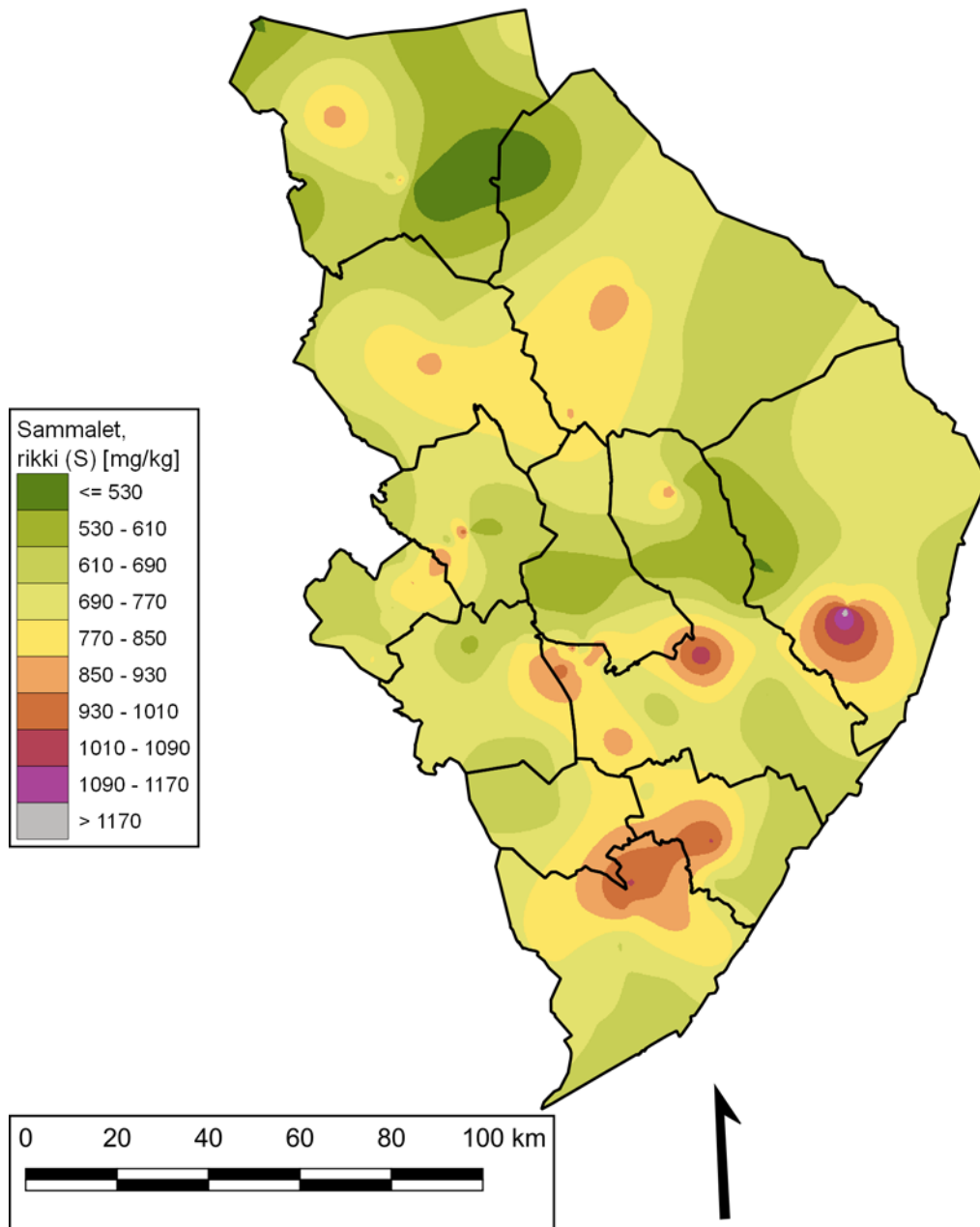
Kuva 57. Sammalten magnesiumipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



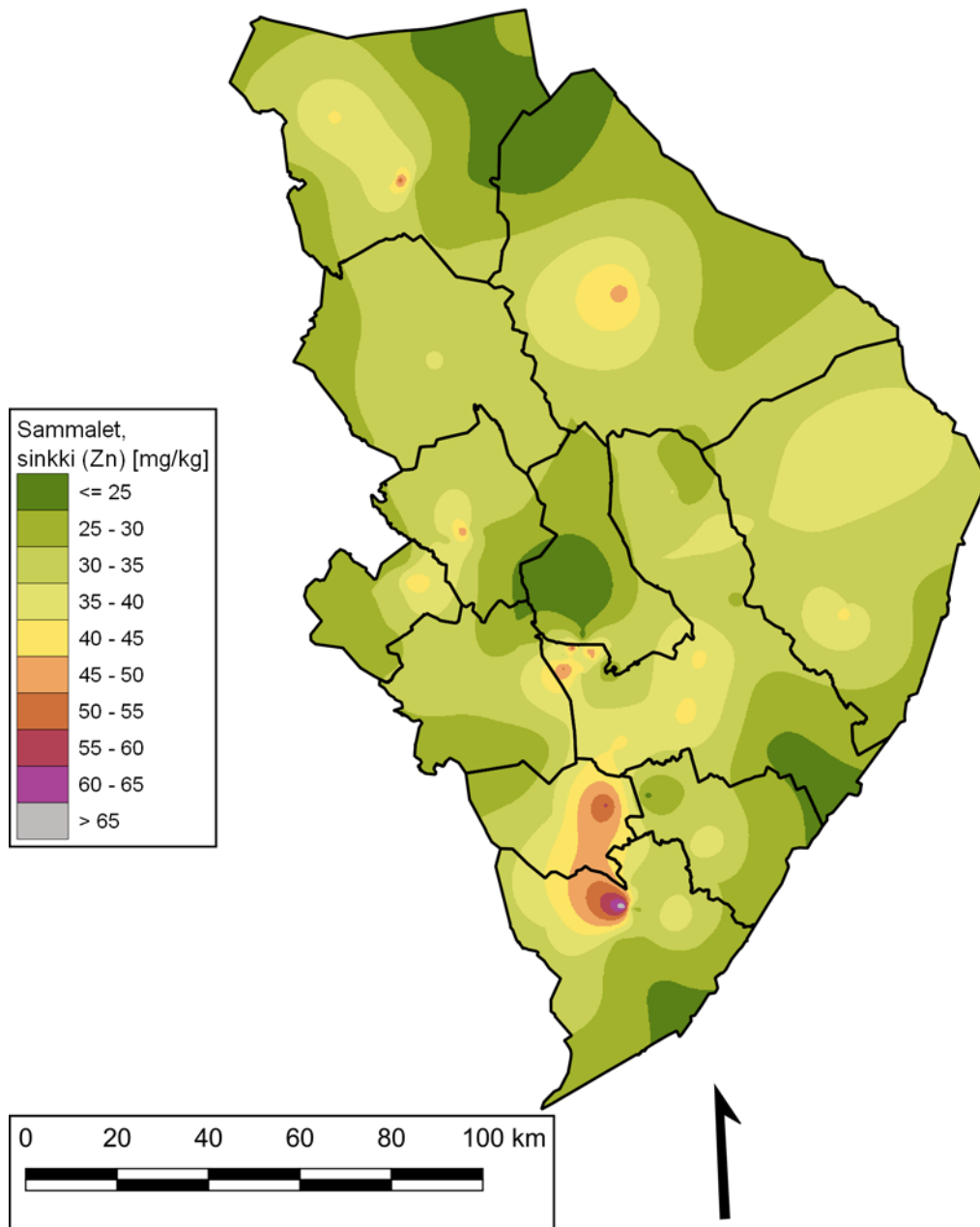
Kuva 58. Sammalten nikkeliipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



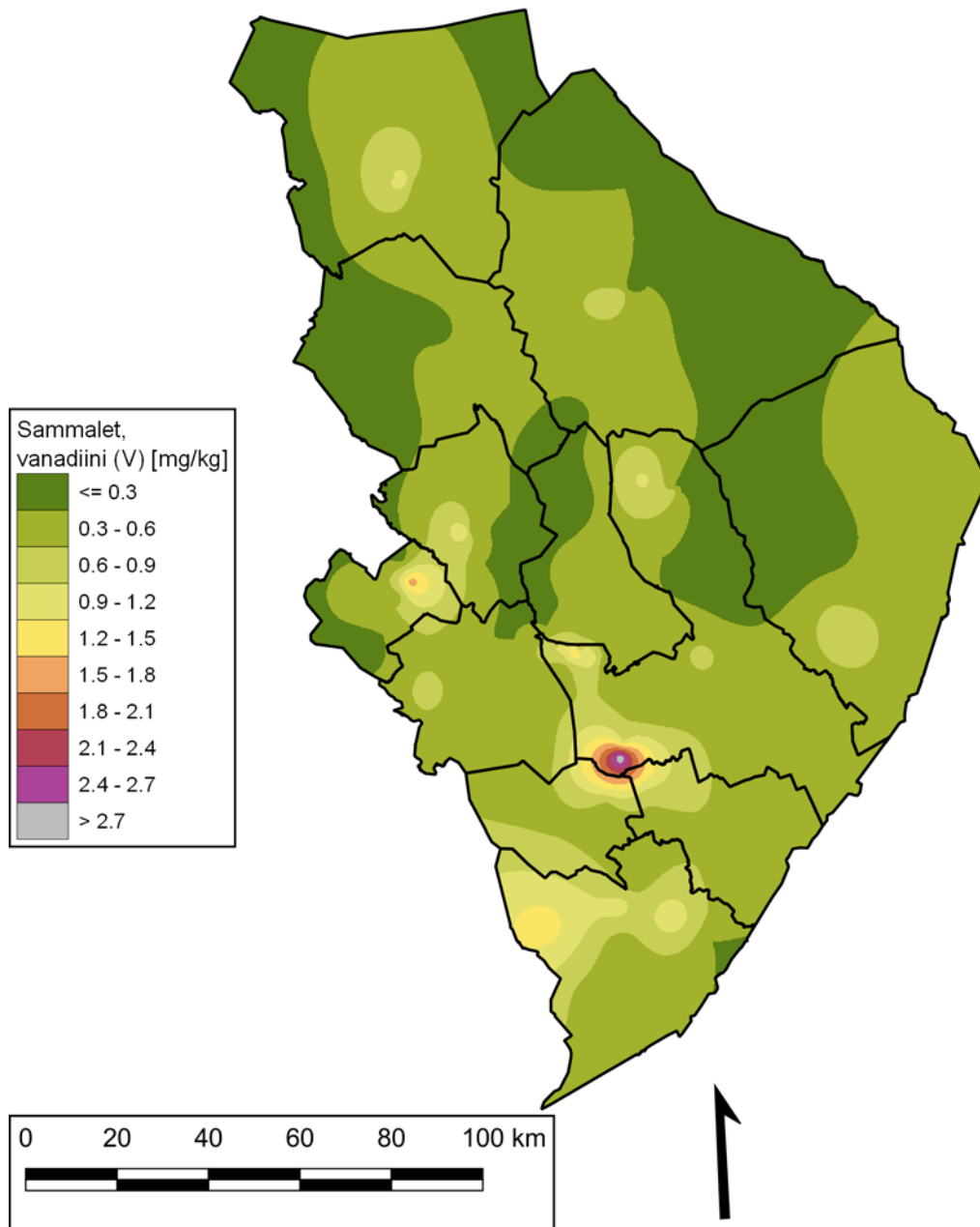
Kuva 59. Sammalten rautapitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 60. Sammalten rikki (S) pitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 61. Sammalten sinkkipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



Kuva 62. Sammalten vanadiinipitoisuutta (mg/kg) kuvaavat vyöhykkeet Pohjois-Karjalassa vuonna 2020.



# 5. Tulosten tarkastelu

Saatuja tuloksia ja niihin vaikuttaneita tekijöitä tarkasteltiin muuttujakohtaisesti tilastollisten menetelmien avulla. Taustamuuttujina käytettiin paitsi havaintoalalta kirjattuja puusto- ja metsikkötunnuksia, myös päästötietoja ja ilmanlaatutietoja sekä etäisyyttä lähimmästä suuresta järvestä. Järvien valinta on jonkin asteisesti luokittelukysymys, mutta tavoitteena oli saada esille suuren, pienilmastoon selvästi vaikuttavan vesistön vaikutus.

Taustamuuttujien vaikutuksia tarkasteltiin regressioanalyysin, varianssianalyysin ja korrelaatiotestien avulla. Lisäksi tarkasteltiin jäkälämuuttujien keskinäisiä ja jäkälämuuttujien ja sammalten alkuainepitoisuuksien välisiä riippuvuuksia sekä tiivistettiin sammalten alkuainepitoisuuksien sisältämää vaihtelua pääkomponenttianalyysin avulla.

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)
- pohjapinta-ala (relaskoopilla kolmesta paikasta mitattujen tulosten keskiarvo, kaikki puulajit)
- havaintopuiden rinnankorkeusläpimitta
- havaintoalan etäisyys suuresta järvestä, joiksi valittiin Suur-Saimaan osat (Pyhäselkä, Orivesi, Puruvesi), Pielinen, Höytiäinen, Koitere, Pyhäjärvi, Viinijärvi, Juojärvi, Suuri- ja Pieni-Onkamo sekä Nuorajärvi (Maanmittauslaitos 2020, avoin data)
- havaintoalan etäisyys Maanmittauslaitoksen luokittelemasta taajaan rakennetusta alueesta (Maanmittauslaitos 2020, avoin data)
- lähimmän pistepäästölähteen hiukkasmaiset, typen oksidien ja rikkidioksidin päästömäärät (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020) havaintoalan etäisyys lähimmästä pistepäästölähteestä (päästölähteet Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2020)
- ilman epäpuhtauksien pitoisuudet Euroopan ympäristövirasto EEA:n neliökilometrin ruutuihin interpoloidusta ilmanlaatudatasta, joka kuvaa vuoden 2017 tilannetta (EEA 2020). Datassa oli saatavilla typpi-dioksidin, otsonin (SOMO35), hengitettävien hiukkasten (PM<sub>10</sub>) ja pienhiukkasten (PM<sub>2.5</sub>) vuosikeskiarvot.

## 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 ja metsän kehitysaste ja pohjapinta-ala. Nämä muuttujat havainnoidaan kaikilta näytealoilta. Ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin on tutkittu varianssianalyysin avulla. Taustamuuttujilla havaittiin olevan vaikutusta varsinaisiin muuttujiin. Myös tässä tutkimuksessa taustamuuttujilla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus useisiin indikaattorimuuttujiin (Taulukko 21). Tässä tutkimuksessa käytettiin pelkästään Kruskallin–Wallisin varianssianalyysia, koska kaikilla luokittelevilla muuttujilla oli enemmän kuin kaksi luokkaa.

Metsätyyppillä oli tilastollisesti merkitsevä tai erittäin merkitsevä vaikutus jokaiseen jäkäläsuureeseen. Lähes aina mitä rehevämpi metsikkö oli, sitä heikompa ilmanlaatua ja jäkälän kuntoa muuttujat indikoivat. Käenkaali-mustikkatyyppin (OMT, lehtomainen kangas) metsiköissä siten IAP-indeksi, lajilukumäärä, loppojen peittävyys ja sormipaisukarpeen peittävyys olivat pienimmillään ja puolukkatyyppin (VT, kuivahko kangas) tai kanervatyyppin (CT, kuiva kangas) metsiköissä suurimmillaan. Kääntäen leväpeite oli yleisintä

sekä sormipaisukarpeen ja yleiset vauriot suurimpia käenkaali-mustikkatyyppin metsiköissä. Bioindikaattorialojen metsätypit painottuvat usein alueellisesti siten, että MT- ja VT-metsätypit painottuvat taajama-aloille ja tausta-alueilla ovat yleisempiä taas karummat CT-metsätypit. Tämä voi osaltaan selittää IAP-indeksin ja jäkälien lajilukumäärän suuremmat arvot, levän harvemman esiintymisen ja vaurioasteiden pienemmät arvot karuimmissa metsätyypeissä. Rehevämissä metsätyypeissä, kuten käenkaali-mustikkatyyppin (OMT) ja MT-tyyppin metsätyypeissä on myös sulkeutuneempi latvuskerros ja enemmän kasvillisuutta pensaskerroksessa, jolloin näiden aiheuttama varjostus voi heikentää jäkälien elinmahdollisuuksia ja pienentää IAP-indeksin arvoa ja lajilukumäärää ja samalla lisätä jäkälien vaurioita.

Havaintometsikön kehitysluokka oli erittäin merkitsevä sormipaisukarpeen peittävyden osalta ja melkein merkitsevä levän yleisyyden osalta. Kypsissä metsiköissä sormipaisukarve peitti pienemmän osan puiden rungosta ja leväpeite oli yleisempää kuin varttuneissa metsiköissä. Sormipaisukarve kasvaa usein runsaana nuorehkojen mäntyjen rungoilla, mutta sen peittävyys pienenee puun iän ja ympärysmittan kasvaessa. Kehitysluokka vaikutti levän yleisyyteen melkein merkitsevästi siten, että kypsissä metsiköissä oli enemmän levää kuin varttuneissa. Leväpeitteen yhteys kehitysluokkaan voi selittyä sillä, että levä on yleisempää taajamissa ja valtaosa aloista on myös taajamissa. Koska valtaosa aloista on myös kehitysluokaltaan kypsiä, niin kypsien ja varttuneiden metsiköiden välille syntyy levän kohdalla tilastollisesti merkitsevä ero.

Metsikön soveltuvuus vaikutti kaikkiin muihin ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin paitsi sormipaisukarpeen peittävyteen. Metsikön soveltuvuutta jäkäläkartoitukseen arvioidaan sen perusteella, kuinka hyvät kasvuolosuhteet metsikössä on päällysjäkälien kannalta. Jäkälien kasvuolosuhteita huonontavat liika varjoisuus, paahteisuus tai epäsuotuisat mikroilmastolliset tekijät. Kasvuolosuhteita arvioidaan puuston iän, puulajisuhteiden, metsätyyppin, puuston pohjapinta-alan ja pituuden perusteella. Havaintoalan soveltuvuus on havainnoijan subjektiivinen arvio siitä, kuinka paljon nämä tekijät vaikuttavat jäkälien 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 jäkälien lajilukumäärät olivat suurempia soveltuvuudeltaan hyväksi luokitelluissa metsiköissä kuin soveltuvuudeltaan kohtalaiseksi tai huonoksi luokitelluissa metsiköissä, ja suurempia soveltuvuudeltaan kohtalaisissa metsiköissä kuin soveltuvuudeltaan huonoissa metsiköissä. Myös luppojen peittävyys oli suurempi soveltuvuudeltaan hyväksi luokitelluissa metsiköissä verrattuna soveltuvuudeltaan kohtalaiseksi luokiteltuihin metsiköihin. Jäkälien yleinen vaurioaste ja sormipaisukarpeen vaurioaste olivat suurimmillaan soveltuvuudeltaan huonoissa metsiköissä, ja suurempia soveltuvuudeltaan kohtalaisissa kuin hyvissä metsiköissä. Levä oli yleisempää soveltuvuudeltaan huonoiksi luokitelluissa metsiköissä kuin soveltuvuudeltaan kohtalaiseksi tai hyväksi luokitelluissa metsiköissä.

Taulukko 21. Luokittelevien taustamuuttujien suhteen Kruskall–Wallisin testillä tarkasteltujen ilmanlaatua kuvaavien muuttujien tilastollisten analyysien testisuureet ja niiden merkitsevyydet (p). Melkein merkitsevä (p < 0,05) testitulos on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä (p < 0,01) kahdella (\*\*) ja erittäin merkitsevä (p < 0,001) kolmella (\*\*\*)

Tarkasteltu jäkäläsuure	Soveltuvuus testisuure	Soveltuvuus p-arvo	Metsätyyppi testisuure	Metsätyyppi p-arvo	Kehitysluokka testisuure	Kehitysluokka p-arvo
sormipaisukarpeen vaurioaste	14,617	0,000 ***	51,394	0,000 ***	4,826	0,090
yleinen vaurioaste	62,449	0,000 ***	68,833	0,000 ***	4,002	0,135
lajilukumäärä	52,084	0,000 ***	54,367	0,000 ***	2,072	0,355
IAP-indeksi	59,400	0,000 ***	73,110	0,000 ***	2,676	0,262
sormipaisukarpeen peittävyys	5,769	0,056	14,661	0,005 **	13,995	0,000 ***
luppojen peittävyys	30,848	0,000 ***	21,666	0,000 ***	0,975	0,614
levän yleisyys	14,684	0,000 ***	51,378	0,000 ***	8,303	0,016 *

Tässä on tarkasteltu jatkuvien taustamuuttujien ja jäkälämuuttujien välisiä korrelaatioita (Taulukko 22). Havaintopuiden iän kanssa erittäin merkitsevästi korreloi negatiivisesti sormipaisukarpeen peittävyys ja positiivisesti sormipaisukarpeen vaurioaste: kun alan havaintopuut olivat vanhempia, niin sormipaisukarve peitti pienemmän osan rungosta ja se oli terveempää. Sormipaisukarpeen peittävyden ja puuston iän

osalta havaittu korrelaatio vahvistaa luokiteltujen taustamuuttujien Kruskallin–Wallisin testien antamaa tulosta, jonka mukaan sormipaisukarpeen peittävyys oli suurempi varttuneissa kuin kypsissä metsissä (Taulukko 21). Sormipaisukarpeen peittävyyden ja puuston iän merkitsevä yhteys heikentää peittävyyden arvoa ilmanlaadun indikaattorina. Sormipaisukarpeen vaurioasteen ja puiden pituuden välillä esiintyi erittäin merkitsevä positiivinen korrelaatio siten, että sormipaisukarpeen vaurioaste kasvoi puun pituuden kasvaessa. Tätä korrelaatiota voivat selittää samat tekijät, jotka selittävät sormipaisukarpeen keskimääräisen peittävyyden eroja kehitysluokan suhteen, vaikka mainittu yhteys ei ollutkaan tilastollisesti merkitsevä.

Havaintopuiden läpimitta korreloi vähintään merkitsevästi negatiivisesti IAP-indeksin ja lajilukumäärän kanssa sekä erittäin merkitsevästi positiivisesti sormipaisukarpeen vaurioasteen, yleisen vaurioasteen, ja levän yleisyyden kanssa. IAP-indeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärä pienenevät ja yleinen ja sormipaisukarpeen vaurioaste kasvoivat sekä levä yleistyivät havaintopuiden halkaisijan kasvaessa. Tähän voi vaikuttaa erittäin iäkkäiden puiden sijoittuminen taajamien puistomaisiin metsiin ja paahteisille kallioille, joissa myös lajisto voi olla köyhtyneempää ja vauriot suurempia kuin muilla aloilla. Lisäksi paksujen ja kilpikaarnoittuvien mäntyjen rungot ovat huono kasvualusta etenkin sormipaisukarpeelle.

Puuston pohjapinta-alalla oli tilastollisesti erittäin merkitsevä positiivinen korrelaatio IAP-indeksin, lajilukumäärän ja yleisen vaurioasteen kanssa. Toisin sanoen, kun metsikkö oli sulkeutuneempi, niin jäkälät olivat terveempiä ja lajeja oli enemmän.

Taulukko 22. Jäkälämuuttujien ja jatkuvien taustamuuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Melkein merkitsevä ( $p < 0,05$ ) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kahdella (\*\*), ja erittäin merkitsevä ( $p < 0,001$ ) kolmella (\*\*\*)

	Havaintopuiden ikä	Havaintopuiden pituus	Pohjapinta-ala	Havaintopuiden läpimitta
havaintopuiden pituus	0,119 *	1		
pohjapinta-ala	0,039	0,088	1	
havaintopuiden läpimitta	0,490 ***	0,461 ***	-0,113 *	1
IAP-indeksi	0,063	-0,193 ***	0,277 ***	-0,260 ***
lajilukumäärä	0,045	-0,102	0,194 ***	-0,179 **
sormipaisukarpeen peittävyys [%]	-0,258 ***	-0,029	-0,005	-0,093
luppojen peittävyys [%]	0,120 *	-0,149 **	0,097	-0,085
sormipaisukarpeen vaurioaste	0,267 ***	0,232 ***	-0,029	0,293 ***
yleinen vaurioaste	-0,121 *	0,206 ***	-0,265 ***	0,214 ***
levän yleisyys	0,193 *	0,229 ***	-0,061	0,300 ***

## 5.2 Tutkittujen muuttujien välinen riippuvuus

### 5.2.1 Jäkälämuuttujat

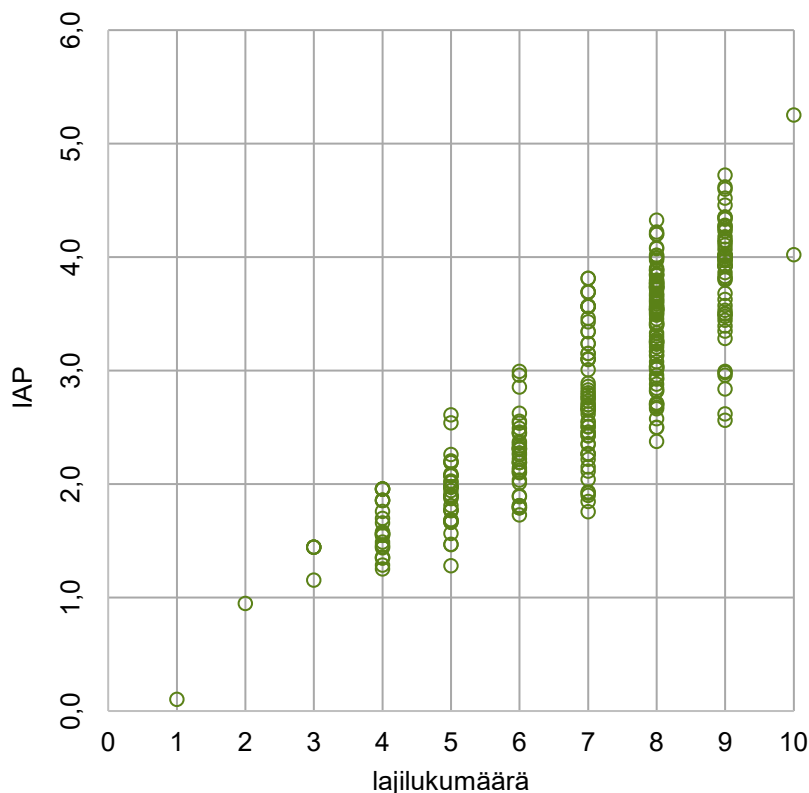
Jäkälämuuttujien välillä havaittiin tilastollisesti erittäin merkitseviä riippuvuuksia lukuun ottamatta sormipaisukarpeen peittävyyttä, joka ei korreloinut minkään muun suureen kanssa (Taulukko 23). Kaikkien voimakkaimmin korreloi IAP-indeksi yleisen vaurioasteen (negatiivinen korrelaatio) (Kuva 64) ja lajilukumäärän (positiivinen korrelaatio) (Kuva 63) kanssa. IAP-indeksi lasketaan lajilukumäärän pohjalta, joten näiden muuttujien välinen positiivinen korrelaatio oli odotettavissa. IAP-indeksin ja lajilukumäärän korrelaatiokertoimet sormipaisukarpeen vaurioasteen kanssa olivat selvästi pienempiä. Sormipaisukarpeen vaurioaste puolestaan korreloi voimakkaasti yleisen vaurioasteen kanssa (Kuva 65). Korrelaatiot kertovat tarkasteltujen muuttujien välisestä lineaarisesta riippuvuudesta, ja niiden väliset korrelaatiot viittaavat siihen, että niiden vasteet muuttujien vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin ovat samankaltaisia. Lajilukumäärä ja IAP-indeksi korreloivat yleisen vaurioasteen kanssa voimakkaammin kuin sormipaisukarpeen vaurioasteen

kanssa sen vuoksi, että yleinen vaurioaste huomioi erikseen lehti- ja pensasmaisten lajien esiintymisen, joten havaintopuulla havaittujen jäkälien lajimäärä vaikuttaa sen vaurioluokitukseen. Toisaalta vaurioluokitukseen vaikuttaa myös sormipaisukarpeen vaurioaste.

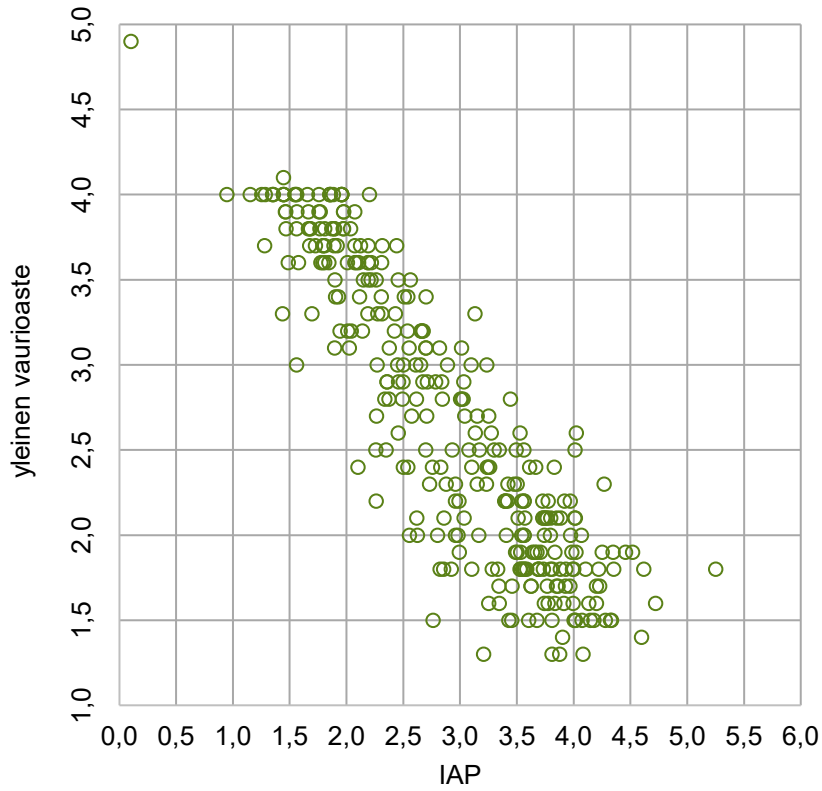
Sekä sormipaisukarpeen että jäkälien yleinen vaurioaste olivat sitä suurempia, mitä yleisempää levä oli. Koska levä on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori, on odotettavaa, että levän yleistyessä myös jäkälien vauriot ovat suurempia. Levän yleistyessä IAP-indeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lajilukumäärä puolestaan pienenevät. Ilmanpuhtausindeksin ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän ja luppojen peittävyden väliset positiiviset korrelaatiot olivat myös odotettavissa, sillä ne kaikki ovat ilman epäpuhtauksien negatiivisia indikaattoreita eli niiden arvojen oletetaan olevan sitä suurempia mitä puhtaampaa ilma on. Odotuksenmukaisesti myös luppojen peittävyys oli suurempi aloilla, joilla yleinen vaurioaste oli pienempi (Kuva 66).

Taulukko 23. Jäkälämuuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Melkein merkitsevä ( $p < 0,05$ ) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kahdella (\*\*) ja erittäin merkitsevä ( $p < 0,001$ ) kolmella (\*\*\*)

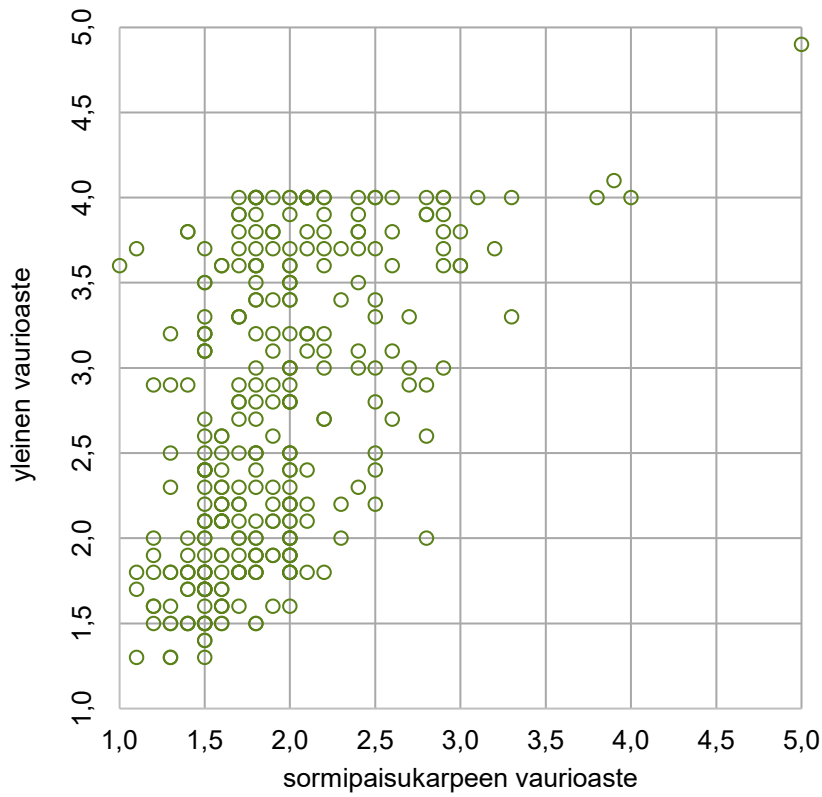
	IAP	levän yleisyys	lajilukumäärä	luppojen peittävyys [%]	sormipaisukarpeen peittävyys [%]	sormipaisukarpeen vaurioaste
levän yleisyys	-0,428 ***	1				
lajilukumäärä	0,864 ***	-0,332 ***	1			
luppojen peittävyys [%]	0,603 ***	-0,371 ***	0,521 ***	1		
sormipaisukarpeen peittävyys [%]	-0,026	-0,023	0,021	-0,029	1	
sormipaisukarpeen vaurioaste	-0,437 ***	0,685 ***	-0,379 ***	-0,377 ***	-0,084	1
yleinen vaurioaste	-0,887 ***	0,522 ***	-0,751 ***	-0,667 ***	0,106	0,545 ***



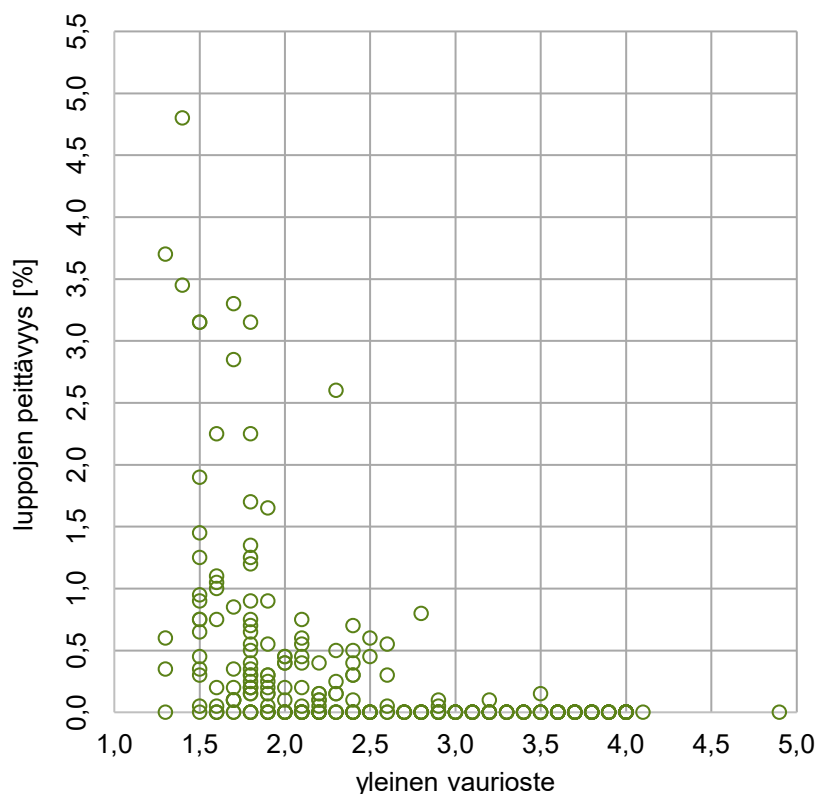
Kuva 63. IAP-indeksin ja lajilukumäärän välinen riippuvuus Pohjois-Karjalan havaintoaloilla vuonna 2020.



Kuva 64. IAP-indeksin ja yleisen vaurioasteen välinen riippuvuus Pohjois-Karjalan havaintoaloilla vuonna 2020.



Kuva 65. Sormipaisukarpeen vaurioasteen ja yleisen vaurioasteen välinen riippuvuus Pohjois-Karjalan havaintoaloilla vuonna 2020.



Kuva 66. Yleisen vauriosteiden ja luppojen peittävyys välillä riippuvuus Pohjois-Karjalan havaintoaloilla vuonna 2020.

## 5.2.2 Sammalten alkuainepitoisuudet

Myös sammalten alkuainepitoisuuksien välisiä riippuvuuksia tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiokertoimen avulla. Tilastollisesti merkitseviä positiivisia korrelaatioita havaittiin lähes kaikkien alkuaineiden välillä. (Taulukko 24). Fosforilla oli vähiten merkitseviä korrelaatioita muiden tutkittujen alkuaineiden sekä jäkälämuuttujien kanssa. Kaikki korrelaatiokertoimet eri alkuaineiden välillä olivat positiivisia. (Taulukko 24)

Raskasmetallien (arseeni, kadmium, kromi, kupari, nikkeli, lyijy) pitoisuuksien väliset korrelaatiot viittaavat siihen, että niitä voi vapautua samoista teollisuuden ja elinkeinoelämän prosesseista. Voimakkaat korrelaatiot fosforin, magnesiumin ja rikin välillä voivat kuvastaa niiden merkitystä kasveille.

Taulukko 24. Sammalten alkuainepitoisuuksien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Melkein merkitsevä ( $p < 0,05$ ) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kahdella (\*\*), ja erittäin merkitsevä ( $p < 0,001$ ) kolmella (\*\*\*).  $n = 101$ . Kemialliset merkit: As = arseeni; Cd = kadmium; Cr = kromi; Cu = kupari; Fe = rauta; Mg = magnesium; Ni = nikkeli; P = fosfori; Pb = lyijy; S = rikki; V = vanadiini; Zn = sinkki.

n = 101	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	P	Pb	S	V
Cd	0,372 **	1,000									
Cr	0,435 ***	0,490 ***	1,000								
Cu	0,428 ***	0,564 ***	0,480 ***	1,000							
Fe	0,452 ***	0,463 ***	0,933 ***	0,460 ***	1,000						
Mg	0,376 **	0,297 *	0,461 ***	0,642 ***	0,442 ***	1,000					
Ni	0,426 ***	0,472 ***	0,824 ***	0,488 ***	0,765 ***	0,521 ***	1,000				
P	0,161	0,275 *	0,092 ***	0,507 ***	0,085	0,640 ***	0,174	1,000			
Pb	0,316 *	0,521 ***	0,742 ***	0,408 ***	0,762 ***	0,372	0,686 ***	0,109	1,000		
S	0,400 ***	0,616 ***	0,517 ***	0,757 ***	0,481 ***	0,590 ***	0,528 ***	0,682 ***	0,441 ***	1,000	
V	0,411 ***	0,532 ***	0,909 ***	0,488 ***	0,943 ***	0,415 ***	0,791 ***	0,120	0,787 ***	0,569 ***	1,000
Zn	0,407 ***	0,568 ***	0,543 ***	0,680 ***	0,552 ***	0,641 ***	0,560 ***	0,477 ***	0,402 ***	0,680 ***	0,557 ***

Seuraavassa on esitetty sammalten alkuainepitoisuuksien ja jäkälämuuttujien väliset korrelaatiokertoimet ja korrelaation merkitsevyys (Taulukko 25). Ainoastaan sormipaisukarpeen peittävyydellä ei ollut tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota minkään alkuaineen kanssa. Lajilukumäärän merkitsevät korrelaatiot alkuainepitoisuuksien kanssa olivat kaikki negatiivisia, kuten myös luppojen peittävyden ja IAP-indeksin. Tämän perusteella kuormitetuilla alueilla oli vähemmän luppvoja ja lajien lukumäärä sekä lajiston yleiskunto oli heikompi. Kaikki tilastollisesti merkitsevät korrelaatiot olivat puolestaan positiivisia levän yleisyydelle, sormipaisukarpeen vaurioasteella ja yleiselle vaurioasteelle. Nämä suureet olivat siis suurempia siellä, missä kuormitusta oli enemmän. Riippuvuudet kertovat siitä, että teollisuus ja muu ihmisen toiminta tuottaa päästöjä, jotka rasittavat runkojäkäliä ja lisäävät ravinnekuormaa.

Taulukko 25. Sammalten alkuainepitoisuuksien ja jäkälämuuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Melkein merkitsevä ( $p < 0,05$ ) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kahdella (\*\*) ja erittäin merkitsevä ( $p < 0,001$ ) kolmella (\*\*\*).  $n = 101$ . Kemialliset merkit: As = arseni; Cd = kadmium; Cr = kromi; Cu = kupari; Fe = rauta; Mg = magnesium; Ni = nikkeli; P = fosfori; Pb = lyijy; S = rikki; V = vanadiini; Zn = sinkki.

n = 101	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	P	Pb	S	V	Zn
IAP-indeksi	-0,191	-0,145	-0,255*	-0,370***	-0,259**	-0,228*	-0,358***	-0,084	-0,253*	-0,264**	-0,261**	-0,263**
levän yleisyys	0,202*	0,246*	0,432	0,385	0,441	0,346***	0,485	0,179	0,342***	0,393	0,450	0,393
lajilukumäärä	-0,226*	-0,226*	-0,265**	-0,336***	-0,254*	-0,222*	-0,350***	-0,069	-0,228*	-0,252*	-0,242*	-0,364***
luppojen peittävyys [%]	-0,119	-0,029	-0,219*	-0,342***	-0,227*	-0,319**	-0,368***	-0,212*	-0,107	-0,276**	-0,226*	-0,337***
sormipaisukarpeen peittävyys [%]	0,056	-0,042	0,061	0,110	0,034	0,098	0,147	0,103	0,012	0,054	0,005	0,026
sormipaisukarpeen vaurioaste	0,298**	0,349***	0,595	0,405	0,615	0,257**	0,544	0,130	0,407	0,429	0,602	0,430
yleinen vaurioaste	0,236*	0,129	0,332***	0,401	0,346***	0,277**	0,457	0,126	0,259**	0,334***	0,348***	0,305**

## 5.3 Regressioanalyysit

Regressioanalyysin avulla tutkittiin taustamuuttujien vaikutusta viiteen jäkälämuuttujaan, joiden oletetaan kuvaavan ilmanlaatua: IAP-indeksiin, ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärään, yleiseen vaurioasteeseen, sormipaisukarpeen vaurioasteeseen ja sormipaisukarpeen peittävyteen. Myös levän yleisyydelle ja luppojen peittävydelle tehtiin regressioanalyysi, mutta analyysistä ei saatu mielekkäitä tuloksia. Regressioanalyysissä hyödynnettiin ilmanlaatu-tietoina etäisyyttä lähimpään lupavelvolliseen laitokseen sekä tämän laitoksen rikkidioksidi-, hiukkas- ja typen oksidien päästöjä (ks. kappale 2.2.1). Lähimmän lupavelvollisen laitoksen etäisyyden ja päästö-määrien suhteen ei esim. vallitsevia tuulensuuntia tai muita päästöjen leviämisolosuhteisiin vaikuttavia tekijöitä tarkasteluissa otettu huomioon. Selittävinä havaintoalaa kuvaavina taustamuuttujina mallissa käytettiin havaintoalan puuston keskimääräistä ikää, pituutta, pohjapinta-alaa ja läpimittaa. Lisäksi mukana olivat etäisyys lähimmästä isosta järvestä ja etäisyys Maanmittauslaitoksen luokittelemasta taajaan rakennetusta alueesta.

Taulukoissa esiintyvä vakio (regressiokerroin) kertoo selitettävän muuttujan riippuvuutta selittävästä muuttujasta eli se kuvaa selitettävän muuttujan muutoksen vaikutuksen suuruutta selitettävän muuttujan arvoihin. Vakion etumerkki kertoo riippuvuuden suunnan. Standardoitu B-kerroin kertoo puolestaan kunkin selitettävän muuttujan mittayksiköstä riippumattoman vaikutuksen selitettävään muuttujaan. Näiden kertoimien avulla voidaan vertailla eri muuttujien keskinäistä tärkeyttä tarkasteltavan muuttujan selittäjinä. Testisuure  $t:n$  ja  $p$ -arvon avulla voidaan tarkastella regressiomalliin kuuluvien termien (sarake B) tilastollista merkitsevyyttä.

Regressiomallien STEPWISE-menetelmä ei aina anna tulosta, jossa kaikki jäljellä olevat muuttujat olisivat tilastollisesti merkitseviä, vaikka niiden arvioitaisiinkin muodostavan huomattavan osan selitysasteesta. Tällainen tulos voidaan tulkita siten, että käytetyt taustamuuttujat eivät kuvaa jäkälämuuttujan vaihtelua kovin hyvin. Selitysaste voi silti olla merkittävä, jolloin osa selitysasteesta voi johtua muuttujien välisistä riippuvuuksista ja satunnaisista tekijöistä. Alla on esitetty taulukoissa myös ne taustamuuttujat, jotka STEPWISE-menetelmä arvotti tilastollisesti merkityksettömiksi.

Saadut tulokset osoittavat, että jäkälämuuttujien ja päästölähteiden välillä on malliin sisältyvistä epävarmuustekijöistä ja rajoitteista huolimatta melko selvä yhteys. Regressioanalyysien selitysasteet olivat kuitenkin melko pieniä paitsi sormipaisukarpeen vaurioasteelle. Ilmeisesti tämä tarkoittaa sitä, että malleissa ei ollut käytössä kaikkia jäkäliin vaikuttavia tekijöitä. Esimerkiksi laajempien ja yksityiskohtaisempien päästö- ja ilmanlaatumuuttujien sekä säähän ja ilmastoon liittyvien muuttujien mukaan ottaminen analyyseihin 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 IAP-indeksi

Neljän selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 22,0 % IAP-indeksin vaihtelusta. Taustamuuttujien osuus selitysasteesta oli 51,0 % ja ilmanlaatumuuttujien 49,0 %. IAP-indeksi oli sitä suurempi, mitä paksumpia havaintopuut olivat ja mitä suurempi puuston pohjapinta-ala oli. IAP-indeksi oli keskimäärin pienempi siellä, missä ilmassa oli runsaasti epäpuhtauksia. (Taulukko 26)

Taulukko 26. IAP-indeksille 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 (\*\*\*).

$r^2 = 0,220$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuure t	p-arvo
vakio	3,74		9,20	0,000 ***
havaintopuiden läpimitta	-0,02	16,3 %	-2,12	0,035 *
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	-0,19	45,7 %	-5,92	0,000 ***
ilman O <sub>3</sub> -pitoisuus	-0,001	3,2 %	-2,24	0,026 *
pohjapinta-ala	0,04	34,7 %	5,52	0,000 ***

### 5.3.2 Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajien lukumäärä

Kolmen selittävän muuttujan regressiomalli selitti 15,2 % ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän vaihtelusta, mutta vain kaksi muuttujaa oli tilastollisesti merkitseviä. Taustamuuttujien osuus selitysasteesta oli 29,8 % ja ilmanlaatumuuttujien 70,2 %. Lajilukumäärä oli suurempi havaintoaloilla, joilla puuston pohjapinta-ala oli suurempi, ja se oli pienempi siellä, missä ilmassa oli runsaasti epäpuhtauksia. (Taulukko 27).

Taulukko 27. 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 (\*\*\*). Muuttujat, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, on merkitty sulkeisiin ja kursivoitu.

$r^2 = 0,152$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuure t	p-arvo
vakio	7,17		12,99	0,000 ***
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	-0,35	66,2 %	-6,09	0,000 ***
(ilman O <sub>3</sub> -pitoisuus)	-0,001	4,0 %	-1,57	0,118
pohjapinta-ala	0,05	29,8 %	4,13	0,000 ***

### 5.3.3 Sormipaisukarpeen vaurioaste

Neljän selittävän muuttujan regressiomalli selitti 41,3 % sormipaisukarpeen vaurioasteen vaihtelusta tutkimusalueella, mutta vain kolme muuttujaa oli tilastollisesti merkitseviä. Selitysasteesta taustamuuttujat



muodostivat 48,9 % ja ilmanlaatumuuttujat 51,1 %. Sormipaisukarve oli vaurioituneempaa, kun ilmassa oli runsaammin typpidioksidia ja hiukkasia. Sormipaisukarpeen vauriot olivat pienempiä, kun tutkimusala sijaitsi etäämpänä isosta järvestä tai taajaan rakennetusta alueesta (Taulukko 28). Sormipaisukarpeen vaurioaste sai regressiomalleissa suurimman selitysasteen. Ilman epäpuhtauksien pitoisuudet ovat pienempiä vähän kuormitetuilla alueilla, jossa sormipaisukarpeen voi odottaa olevan terveempää. Tällaiset alueet sijaitsevat etäämpänä taajaan rakennetuista alueista, ja teollisuus ja liikenne keskittyvät taajamiin.

Taulukko 28. 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 (\*\*\*). Muuttujat, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, on merkitty sulkeisiin ja kursivilla.

$r^2 = 0,413$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuuret	p-arvo
vakio	1,73		11,05	0,000 ***
etäisyys isosta järvestä <i>(havaintopuiden läpimitta)</i>	-0,00001	15,5 %	-2,34	0,020 *
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	0,13	51,1 %	7,90	0,000 ***
etäisyys taajamasta (MML)	-0,00001	25,6 %	-2,94	0,004 **

### 5.3.4 Yleinen vaurioaste

Seitsemän selittävän muuttujan regressiomalli selitti 27,5 % yleisen vaurioasteen vaihtelusta tutkimusalueella, mutta vain kolme muuttujaa oli tilastollisesti merkitseviä. Taustamuuttujien osuus selitysasteesta oli 64,8 % ja ilmanlaatumuuttujien 35,2 %. Jäkälän yleiset vauriot olivat suurempia, kun ilmassa oli enemmän typpidioksidia ja hiukkasia, ja ne olivat pienimmillään siellä, missä puuston pohjapinta-ala oli suurin. Myös etäämpänä taajaan rakennetuista alueista yleinen vaurioaste oli pienempi (Taulukko 29).

Taulukko 29. 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 (\*\*\*). Muuttujat, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, on merkitty sulkeisiin ja kursivilla.

$r^2 = 0,275$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuuret	p-arvo
vakio	1,26		13,06	0,000 ***
<i>(lähimmän pistelähteen hiukkaspäästö)</i>	0,00	2,0 %	-1,87	0,063
<i>(lähimmän pistelähteen SO<sub>2</sub>-päästö)</i>	0,00	2,0 %	1,78	0,076
<i>(etäisyys isosta järvestä)</i>	0,00	10,4 %	-1,45	0,149
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	0,03	31,1 %	3,95	0,000 ***
<i>(havaintopuiden pituus)</i>	0,01	5,9 %	1,84	0,067
pohjapinta-ala	-0,00865	26,4 %	-5,32	0,000 ***
etäisyys taajamasta (MML)	-0,000004	22,1 %	-2,43	0,016 *

### 5.3.5 Sormipaisukarpeen peittävyys

Neljän selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti vain 7,0 % sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelusta, mutta vain kaksi muuttujaa oli tilastollisesti merkitseviä. Selitysasteesta 40,4 % muodostui taustamuuttujista ja 59,6 % ilmanlaatumuuttujista. Sormipaisukarve oli sitä peittävämpää havaintopuiden rungoilla, mitä pienempi oli lähimmän pistelähteen hiukkaspäästö ja mitä etäämpänä havaintoala sijaitsi taajaan rakennetusta alueesta (Taulukko 30). Todennäköisesti muutkin tekijät kuin tutkitut muuttujat vaikuttavat merkittävästi sormipaisukarpeen peittävyyteen.

Taulukko 30. Sormipaisukarpeen peittävydelle 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 (\*\*\*). Muuttujat, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, on merkitty sulkeisiin ja kursivilla.

$r^2 = 0,070$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuure t	p-arvo
vakio	2,40		10,72	0,000 ***
<i>(lähimmän pistelähteen NO<sub>x</sub>-päästö)</i>	0,00	20,0 %	1,59	0,114
lähimmän pistelähteen hiukkaspäästö	-0,002	30,4 %	-2,21	0,028 *
<i>(havaintopuiden läpimitta)</i>	-0,01	16,1 %	-1,85	0,065
<i>(ilman NO<sub>2</sub>- ja hiukkaspitoisuus (PCA))</i>	-0,04	9,2 %	-1,74	0,084
etäisyys taajamasta (MML)	-0,00001	24,2 %	-2,62	0,009 **

### 5.3.6 Luppojen peittävyys

Yhdeksän selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 15,3 % sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelusta, mutta vain neljä muuttujaa oli tilastollisesti merkitseviä. Selitysasteesta 61,5 % muodostui taustamuuttujista ja 38,5 % ilmanlaatumuuttujista. Lupot peittivät suuremman osan tutkimuspuiden rungoista, kun ilmassa oli vähemmän typpidioksidiä, hiukkasia ja otsonia. Luppojen peittävyys oli suurempi myös silloin, kun havaintopuut olivat lyhyempiä ja puuston pohjapinta-ala suurempi (Taulukko 31). Regressiomallin selitysvoima jäi suhteellisen pieneksi ja merkitsemättömiä muuttujia oli useita. Selittävä tekijänä voi olla luppojen runsaan esiintymisen jakauma tutkimusalueella. Mahdollisesti taustamuuttujien vaikutus luppojen runsailla esiintymisalueilla heikentää mallin selitysvoimaa.

Taulukko 31. Luppojen peittävydelle 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 (\*\*\*). Muuttujat, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, on merkitty sulkeisiin ja kursivilla.

$r^2 = 0,153$	B	Osuus selitysasteesta	Testisuure t	p-arvo
vakio	1,01		2,81	0,005 **
<i>(lähimmän pistelähteen NO<sub>x</sub>-päästö)</i>	0,00	3,8 %	1,94	0,053
<i>(lähimmän pistelähteen SO<sub>2</sub>-päästö)</i>	-0,01	3,9 %	-1,97	0,050
<i>(etäisyys isosta järvestä)</i>	0,00	17,3 %	1,56	0,120
<i>(havaintopuiden läpimitta)</i>	0,01	2,0 %	1,42	0,156
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	-0,06	16,4 %	-2,15	0,033 *
ilman otsonipitoisuus	-0,001	14,5 %	-2,81	0,005 **
havaintopuiden pituus	-0,04	13,7 %	-2,17	0,031 *
puuston pohjapinta-ala	0,01	6,0 %	2,02	0,044 *
<i>(etäisyys taajamasta (MML))</i>	0,00001	22,5 %	1,66	0,097

### 5.3.7 Levän yleisyys

Kolmen selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 38,2 % levän yleisyyden vaihtelusta. Taustamuuttujien osuus selitysasteesta oli 9,9 % ja ilmanlaatumuuttujien 90,1 %. Levä oli yleisempää kauempana pistepäästölähteistä ja kun ilmassa oli enemmän typen oksideja ja hiukkasia. Levä oli keskimäärin yleisempää myös paksummilla puilla, mutta riippuvuus oli heikko (Taulukko 32).

Taulukko 32. Levän ja vihersukkulajäkälän yleisyydelle 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 (\*\*\*)

$r^2 = 0,382$	B	Osuus selity- asteesta	Testisuure t	p-arvo
(vakio)	0,26		1,15	0,252
havaintopuiden läpimitta	0,01	9,9 %	2,02	0,045 *
ilman NO <sub>2</sub> - ja hiukkaspitoisuus (PCA)	0,21	65,0 %	8,83	0,000 ***
etäisyys lähimpään pistelähteeseen	-0,00001	25,1 %	-2,88	0,004 **

## 5.4 Pääkomponenttialyysi

Sammalten alkuainepitoisuuksien sisältämää vaihtelua tiivistettiin pääkomponenttialyysin avulla. Pääkomponenttialyysiin otettiin mukaan 12 seinäsammalnäytteistä mitattua alkuainetta. Lähes kaikkien sammalesta mitattujen alkuainepitoisuuksien välillä havaittiin tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita (ks. Taulukko 24). Sammalnäytteistä mitatut alkuaineet yhdistyivät korrelaatiomatriisiin perustuvassa pääkomponenttialyysissä kolmeksi pääkomponentiksi, jotka selittivät yhteensä 80 % muuttujien vaihtelusta. Muuttujien kommunaliteetit, jotka kertovat kuinka suuren osan muuttujien välisestä vaihtelusta pääkomponenttiratkaisu selittää, eivät kuitenkaan nousseet erityisen suuriksi (Taulukko 33). Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka kolme komponenttia selittää kokonaisvaihtelusta suuren osan, niin yksittäisen alkuaineen pitoisuuden vaihtelusta ei voitu kuvata kolmella pääkomponentilla kuin alle puolet. Havainto heikentää jonkin verran tulosten selitysvoimaa.

Pääkomponenttialyysin suurimmat kommunaliteetit olivat fosforilla, raudalla, nikkellillä ja vanadiinilla. Tämä viittaa siihen, että suurimmat pitoisuudet olivat keskittyneet harvoille aloille ja että pitoisuudet vaihtelivat samoin kuin jollain toisella alkuaineella. Kääntäen kadmiumin kommunaliteetti oli analyysin pienin, joten sen pitoisuuksien jakauman voidaan odottaa olevan tasaisempi. Käytetty termi lataus (engl. *loading*) tarkoittaa lukuarvoa, jonka tietty alkuaine saa eri pääkomponenteilla.

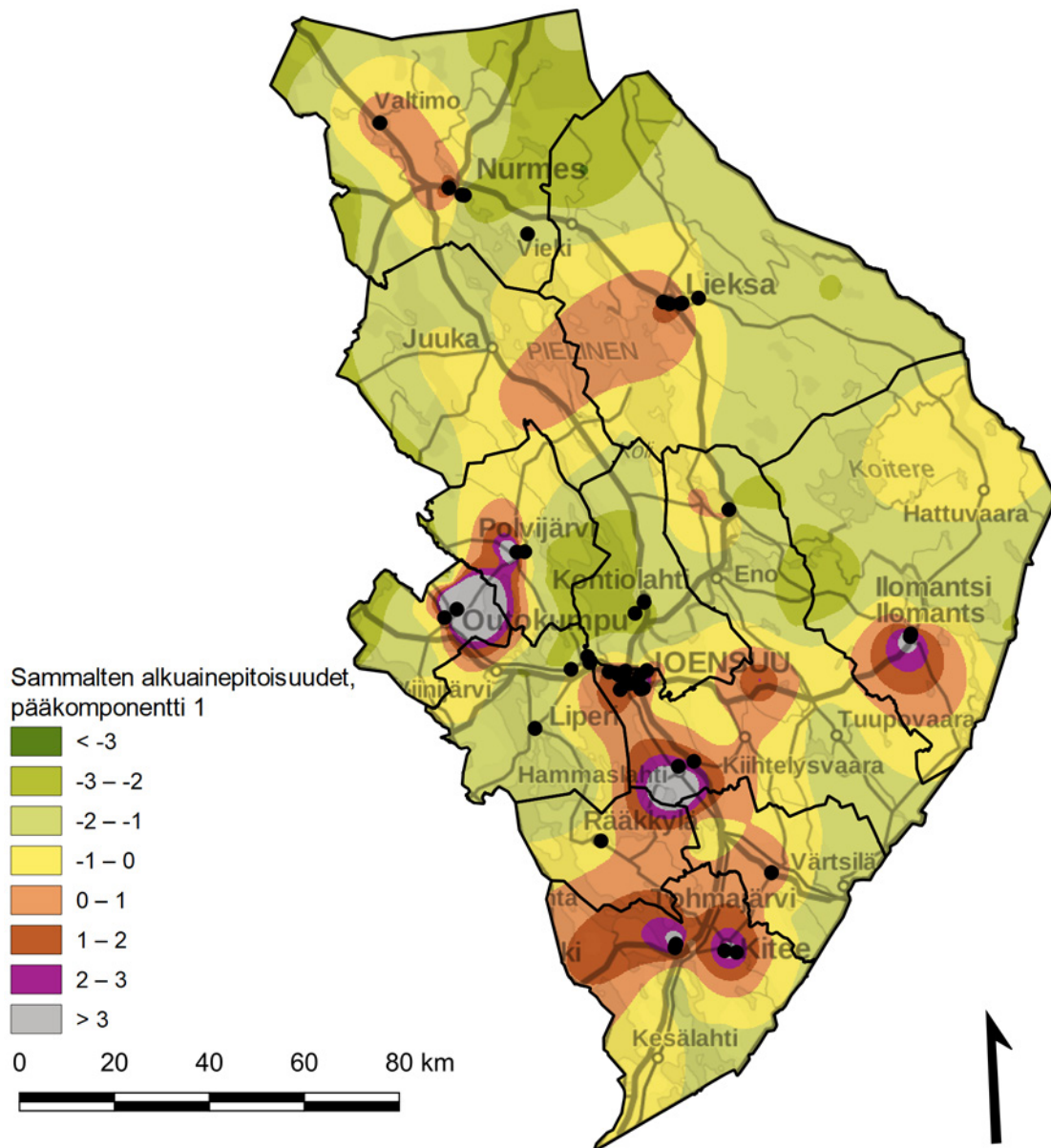
Ensimmäinen pääkomponentti selitti 49,3 % muuttujien vaihtelusta, ja suurimmat lataukset saivat kromi, rauta ja vanadiini. Suurimmat lataukset sijoittuivat Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähelle, Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähelle, Joensuusta Hammaslahden ja Rääkkylän kautta Kiteelle ulottuvalle alueelle, Nurmeksen Porokylään ja Ilomantsin Pogostan eteläpuolelle. Useissa tapauksissa näillä paikoilla on nykyisiä tai entisiä teollisuuslaitoksia tai toisaalta ne sijaitsevat yleensä lämpökeskusten ja taajamien läheisyydessä (Kuva 67).

Toinen pääkomponentti selitti 20,0 % muuttujien vaihtelusta. Sen suurimmat lataukset saivat alkuaineet arseeni, nikkeli positiivisena ja fosfori negatiivisena. Pääkomponentti sai suurimmat arvonsa Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä, Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähellä, Kontiolahdella sekä Lieksan ja Nurmeksen rajaseudulla. Koska arseenin ja nikkelin suurimmat pitoisuudet sammalissa ovat keskittyneet Outokumpuun ja Polvijärvelle, niin muualla Pohjois-Karjalassa pääkomponentti kuvaa lähinnä fosforin määrän vaihtelua siten, että pääkomponentin ollessa suuri fosforia on niukasti (ks. kappale 4.2) (Kuva 68).

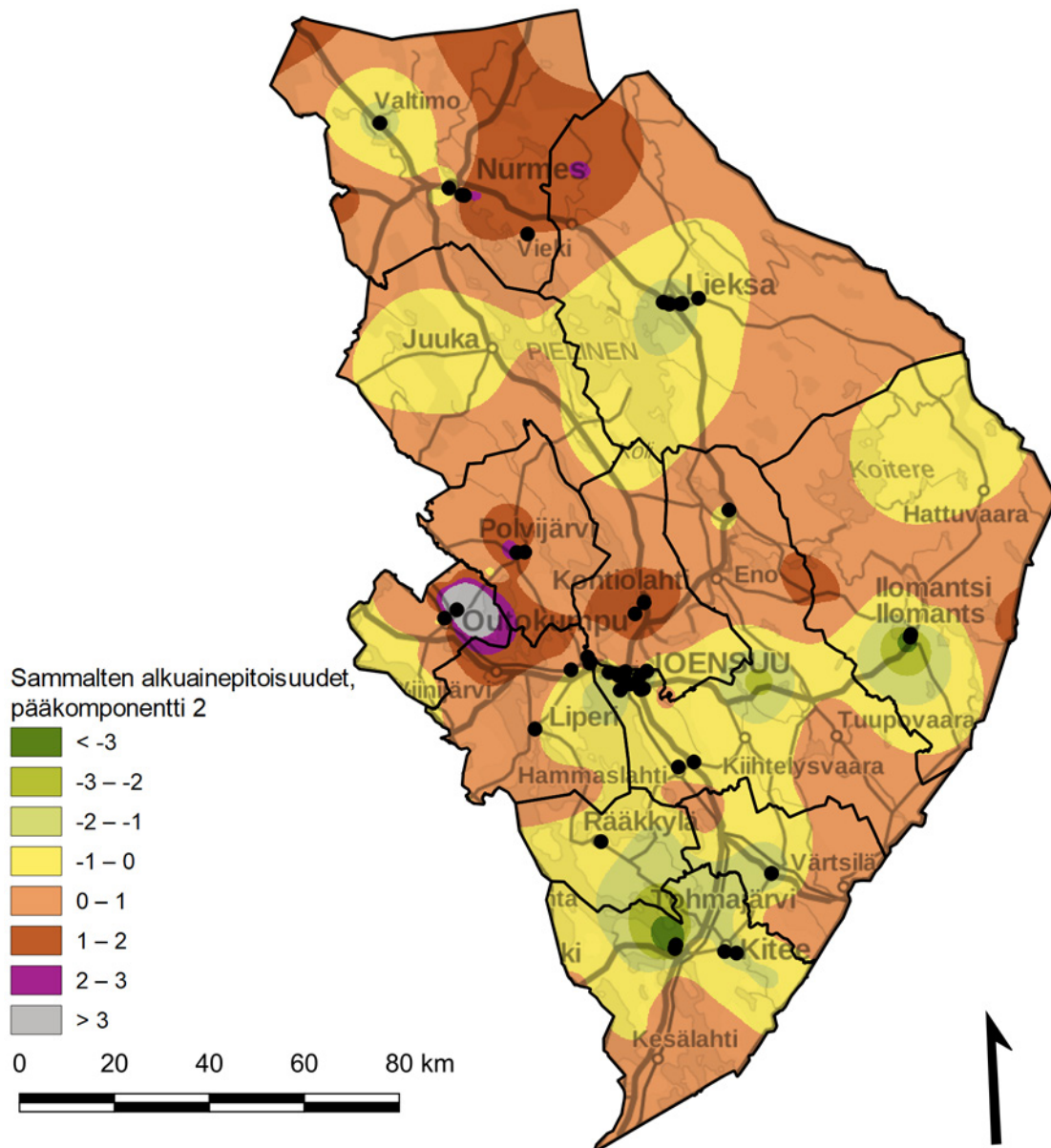
Kolmas pääkomponentti selitti 10,4 % muuttujien vaihtelusta. Siinä suurimmat lataukset, kaikki negatiivisina, olivat vanadiinilla, lyijyllä ja raudalla, eli näiden alkuaineiden pitoisuudet olivat keskimäärin suurempia siellä, missä komponentti oli pieni. Pääkomponentti 1 selitti myös vanadiinin ja raudan vaihtelua, joten pääkomponentti 3:n merkitys on pienehkö. Suurin arvo esiintyi Outokummussa Vuonoksen tehtaan läheisyydessä (Kuva 69).

Taulukko 33. Pääkomponenttien lataukset (PCA 1, PCA 2, PCA 3) ja kommunaliteettiarvot metsäsammalnäytteistä analysoiduille alkuainepitoisuuksille Pohjois-Karjalassa vuonna 2020 (n = 101).

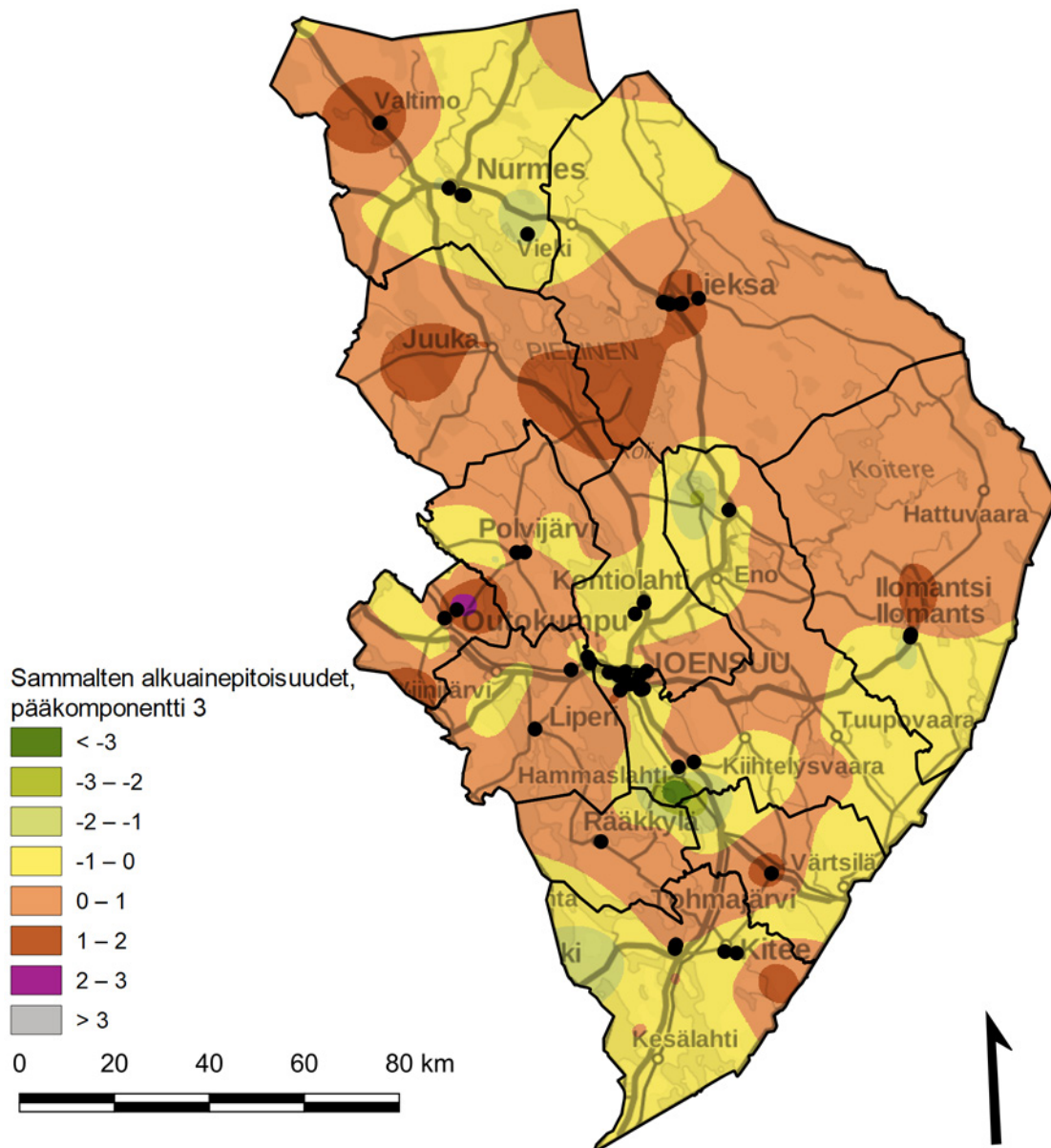
	PCA 1	PCA 2	PCA 3	kommunaliteetti
selittävä osuus	49,3 %	20,0 %	10,4 %	79,6 %
arseeni	0,28	<b>0,40</b>	0,22	0,286
fosfori	0,12	<b>-0,52</b>	0,36	0,407
kadmium	0,29	-0,14	-0,12	0,121
kromi	<b>0,35</b>	0,29	-0,02	0,209
kupari	0,29	0,13	0,26	0,168
lyijy	0,25	-0,24	<b>-0,41</b>	0,286
magnesium	0,30	-0,09	0,33	0,204
nikkeli	0,30	<b>0,39</b>	0,23	0,294
rauta	<b>0,33</b>	0,05	<b>-0,39</b>	0,267
riikki	0,28	-0,38	0,17	0,248
sinkki	0,28	-0,30	0,12	0,184
vanadiini	<b>0,33</b>	-0,03	<b>-0,47</b>	0,328



Kuva 67. Sammalten alkuainepitoisuuksien Pääkomponentti 1:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2020. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä.



Kuva 68. Sammalten alkuainepitoisuuksien Pääkomponentti 2:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2020. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä.



Kuva 69. Sammalten alkuainepitoisuuksien Pääkomponentti 3:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2020. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä.

## 5.5 Yhteenveto

Tulosten tilastollinen tarkastelu osoittaa, että tutkitut muuttujat kuvasivat ilmanlaatua, osa paremmin kuin toiset. Luontaiset tekijät vaikuttavat jäkälälajeihin, ja tätä vaikutusta voidaan vakioda sijoittamalla havaintoalat indikaattorilajien kannalta soveltuvimpiin metsiköihin. Havaintoalojen sijoittelussa on tehtävä kuitenkin myös kompromisseja kattavuuden ja pysyvyyden varmistamiseksi vuosien välillä.

Tilastomenetelmillä on mahdollista erotella luontaisten tekijöiden ja ilmanlaatuun liittyvien tekijöiden vaikutuksia. Tulosten perusteella jäkälämuuttujien ja sammalten alkuainepitoisuuksien yhteys ilmanlaatuun on melko selvä.

Parhaiten ilmanlaatua kuvasi sormipaisukarpeen vaurioaste. Levän yleisyys havaintopuiden rungoilla oli myös melko suuri selittävä tekijä.

Yleinen vaurioaste kuvasi myös suhteellisen hyvin ilmanlaatua, mutta sen luotettava arviointi on haastavaa, sillä yleisen vaurioasteen arviointiasteikkoon sisältyy oletuksia jäkälälajiston reagoimisesta kuormitukseen sekä lajiston koostumuksen että sen ulkomuodon osalta, ja nämä oletukset eivät etenkään kuormitetuilla alueilla aina toteudu.

Sormipaisukarpeen peittävyys oli tarkastelluista muuttujista huonoin ilmanlaadun indikaattori, sillä sen vaihtelua selittivät tarkastelluilla tilastomenetelmillä miltei pelkästään luonnolliset tekijät.



# 6. Vertailu

## 6.1 Vuosien välinen vertailu

Tässä luvussa vertaillaan vuoden 2020 tuloksia vuoden 2010 bioindikaattoritutkimuksen tuloksiin (Lehkonen ym. 2011). Vertailussa ovat mukana männyn epifyyttijäkälät ja sammalten alkuainepitoisuudet. Vertailuvuosina käytetyt menetelmät ja havaintoalat olivat mahdollisuuksien mukaan samoja. Vuosien 2010 ja 2020 välillä samana pysyi kaikkiaan 214 havaintoalaa.

Vertailun havainnollistamiseksi alla esitetään vyöhykekartat sormipaisukarpeen vaurioasteesta, lajilukumääristä ja IAP-indeksistä vuosilta 2010 ja 2020. Vyöhykekarttoja laadittaessa muuttuneita ja uusia aloja ei ole jätetty pois, vaan tarkoituksena on saada yleiskuva jäkälien indikoimasta ilmanlaadun vaihtelusta alueella eri vuosina. Myöhemmin aloja ja puita sekä niiden keskiarvoja eri vuosina jäkälämuuttujien osalta vertailtaessa on vertailusta jätetty vaihtuneet alat ja tutkimusrungot pois. Näin meneteltiin siksi, koska alojen ja rungon vaihtuessa myös niiden sijainti muuttuu ja samalla muuttuvat myös mm. elinympäristö, kasvualusta ja historia.

### 6.1.1 Runkojäkälät

Vuosien 2010 ja 2020 välillä esiintyi useita tilastollisesti merkitseviä eroja samoina pysyneillä havaintoaloilla. IAP-indeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärä olivat vuonna 2020 erittäin merkitsevästi pienempiä kuin vuonna 2010. Yleinen vaurioaste ja sormipaisukarpeen peittävyys olivat puolestaan vuonna 2020 erittäin merkitsevästi suurempia kuin vuonna 2010. Luppojen peittävyys oli merkitsevästi suurempi vuonna 2020. Merkitsevää eroa ei ollut sormipaisukarpeen vaurioasteen ja levän yleisyyden välillä (Taulukko 34).

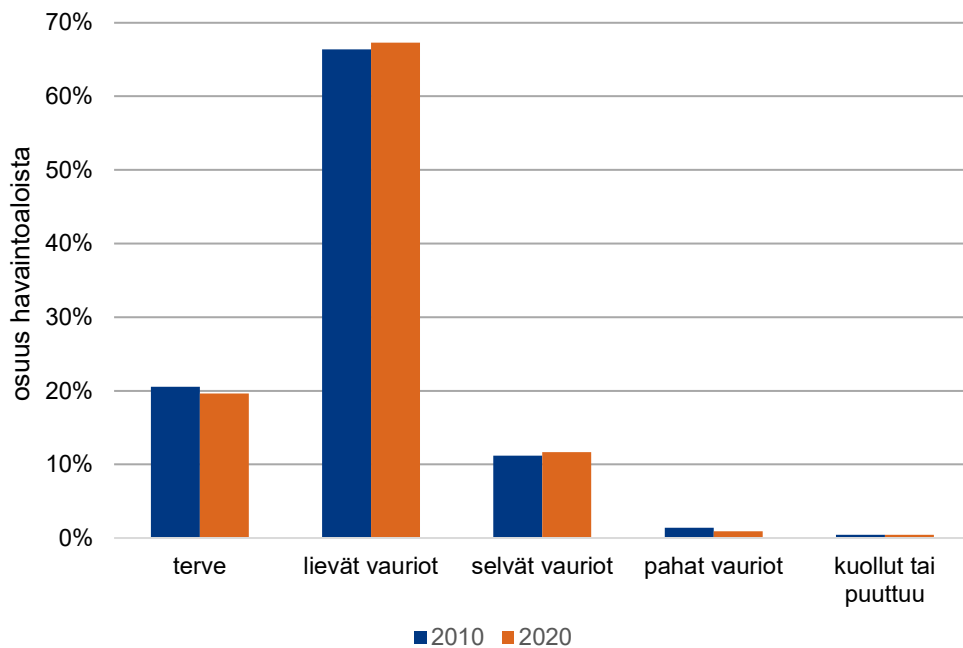
IAP-indeksin, lajilukumäärän ja yleisen vaurioasteen muutokset kuvaavat jäkälälajiston köyhtymistä ja ilmanlaadun heikkenemistä vuodesta 2010 vuoteen 2020. Sormipaisukarpeen ja luppojen peittävyyden kasvu voi kuvata sitä, että näiden jäkälien elinolosuhteet ovat muuttuneet otollisemmiksi kymmenen vuoden aikana. Harvennukset ja alojen vaihtuminen nuorempiin voivat vaikuttaa peittävyyteen merkittävästi.

Taulukko 34. Männyn runkojäkäliä kuvaavia tunnuslukuja Pohjois-Karjalan samoina pysyneillä havaintoaloilla vuosina 2010 ja 2020. Vuosien väliset parittaiset vertailut on tehty merkkitestillä. Melkein merkitsevä ( $p < 0,05$ ) testitulos on merkitty yhdellä tähdellä (\*), merkitsevä ( $p < 0,01$ ) kahdella (\*\*) ja erittäin merkitsevä ( $p < 0,001$ ) kolmella (\*\*\*).  $n = 214$ .

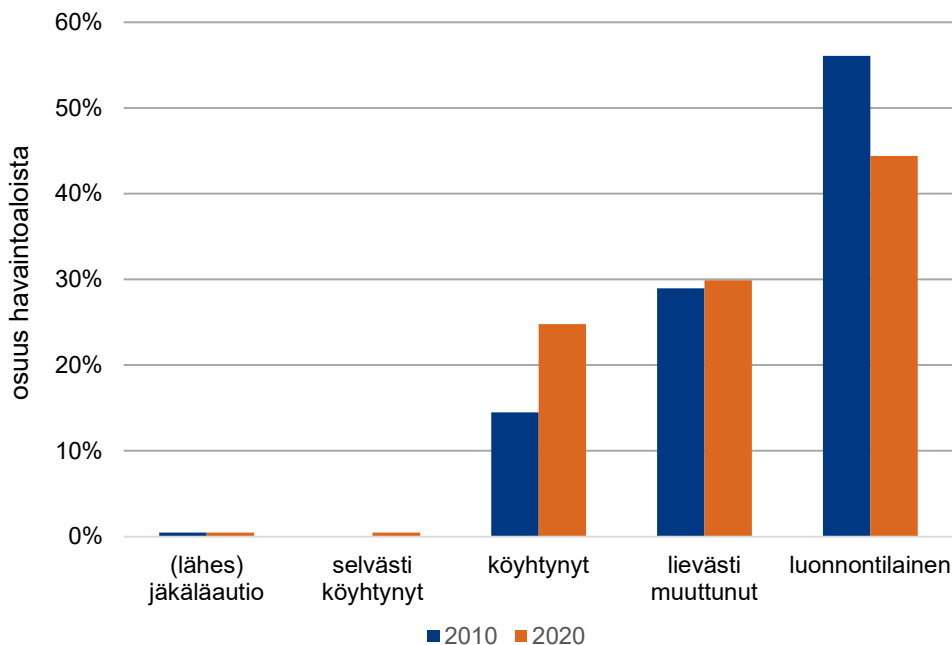
n = 214	Keskiarvo 2010	Keskiarvo 2020	Testisuure B	p-arvo	Suurempi
IAP-indeksi	3,59	2,75	208	0,000 ***	2010
lajilukumäärä (alalla keskimäärin)	7,30	6,88	85	0,000 ***	2010
sormipaisukarpeen vaurioaste	1,98	1,99	63	0,238	
yleinen vaurioaste	2,59	2,73	49	0,000 ***	2020
sormipaisukarpeen peittävyys [%]	2,45	6,50	2	0,000 ***	2020
luppojen peittävyys [%]	0,10	0,26	29	0,002 **	2020
levän yleisyys	1,78	1,72	49	0,920	

Seuraavassa (Kuva 70, Kuva 71) on esitetty havaintoalojen jakaantuminen luokkiin sormipaisukarpeen vaurioasteen ja IAP-indeksin mukaan vuosina 2010 ja 2020 samoina pysyneillä aloilla. Sormipaisukarpeen vaurioasteen luokkien muutokset olivat pieniä. Terveen luokituksen aloja oli kaksi vähemmän vuonna 2020 ja lievien vaurioiden luokitusta kaksi enemmän. Selvien vaurioiden luokassa oli vuonna 2020 yksi ala enemmän kuin 2010 ja pahojen vaurioiden luokassa yksi enemmän, ja sormipaisukarpe oli kuollutta tai puuttui kumpanakin vuonna yhdeltä samalta alalta 215 (Juuassa). IAP-indeksin perusteella köyhtyneen

jäkälälajiston luokan yleisyys kasvoi 71 % vuodesta 2010 vuoteen 2020 samana pysyneillä aloilla. Lievästi muuttuneen lajiston luokan yleisyys kasvoi 3 %, ja luonnontilaisen luokan yleisyys väheni 20 %. Luonnontilainen luokka oli kuitenkin edelleen yleisin, 44 % samana pysyneistä aloista vuonna 2020.

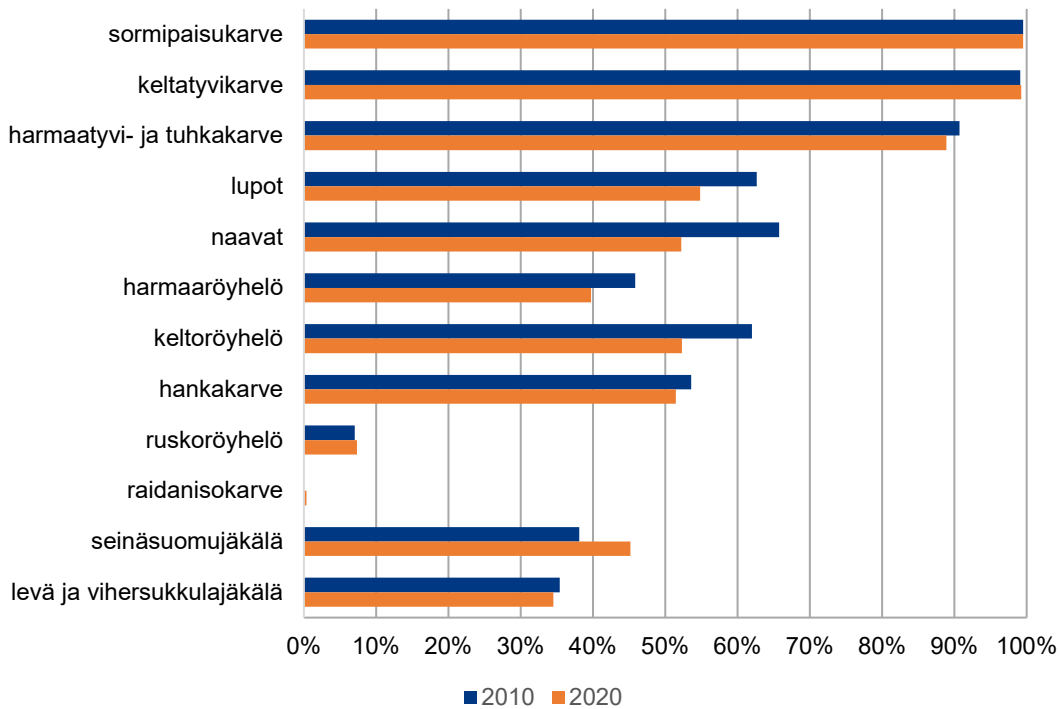


Kuva 70. Samana pysyneet havaintoalat Pohjois-Karjalassa luokiteltuna sormipaisukarpeen vaurioasteen mukaan vuosina 2010 ja 2020. n = 214.



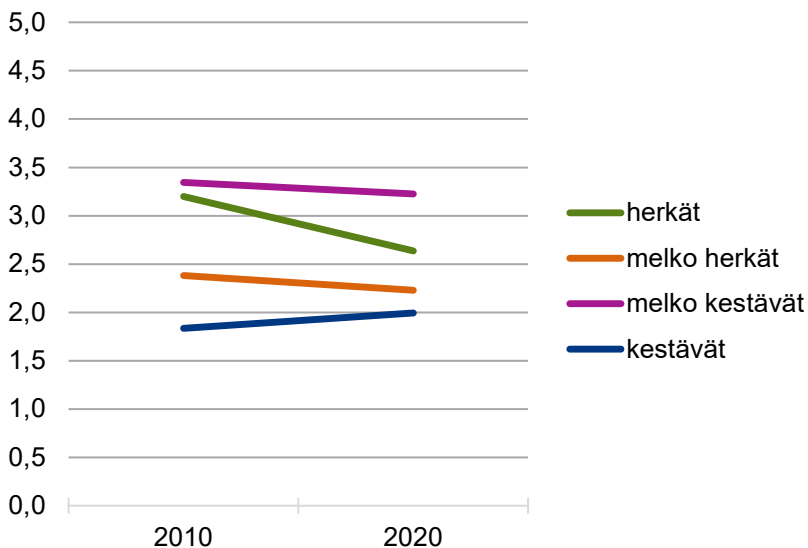
Kuva 71. Samana pysyneet havaintoalat Pohjois-Karjalassa luokiteltuna IAP-indeksin mukaan vuosina 2010 ja 2020. n = 214.

Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit samana pysyneillä rungoilla vuosina 2010 ja 2020 on esitetty kuvassa 72. Ainoastaan seinäsuomujäkälä oli selvästi yleisempi vuonna 2020. Pieni lisäys havaittiin myös keltatyvikarpeen, ruskoröyhelön ja raidanisokarpeen frekvensseissä. Lupot, naavat, harmaaröyhelö, keltaröyhelö, hankakarve ja leväpeite harvinaistuivat tutkimusvuosien välillä. Sormipaisukarve oli käytännössä yhtä yleistä kumpanakin vuonna.

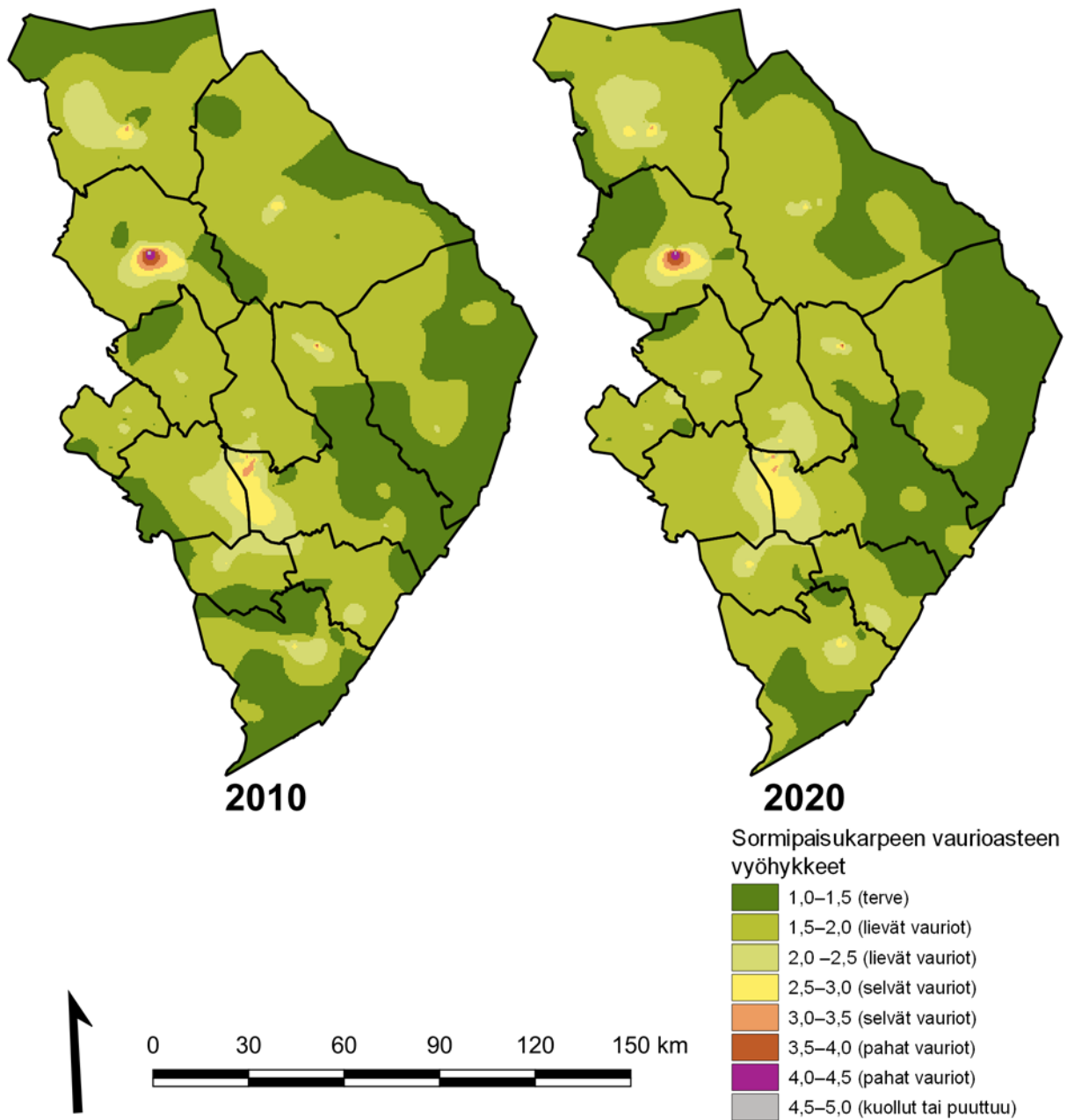


Kuva 72. Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit tutkimusalueella samoina pysyneillä rungoilla vuosina 2010 ja 2020. n = 1034.

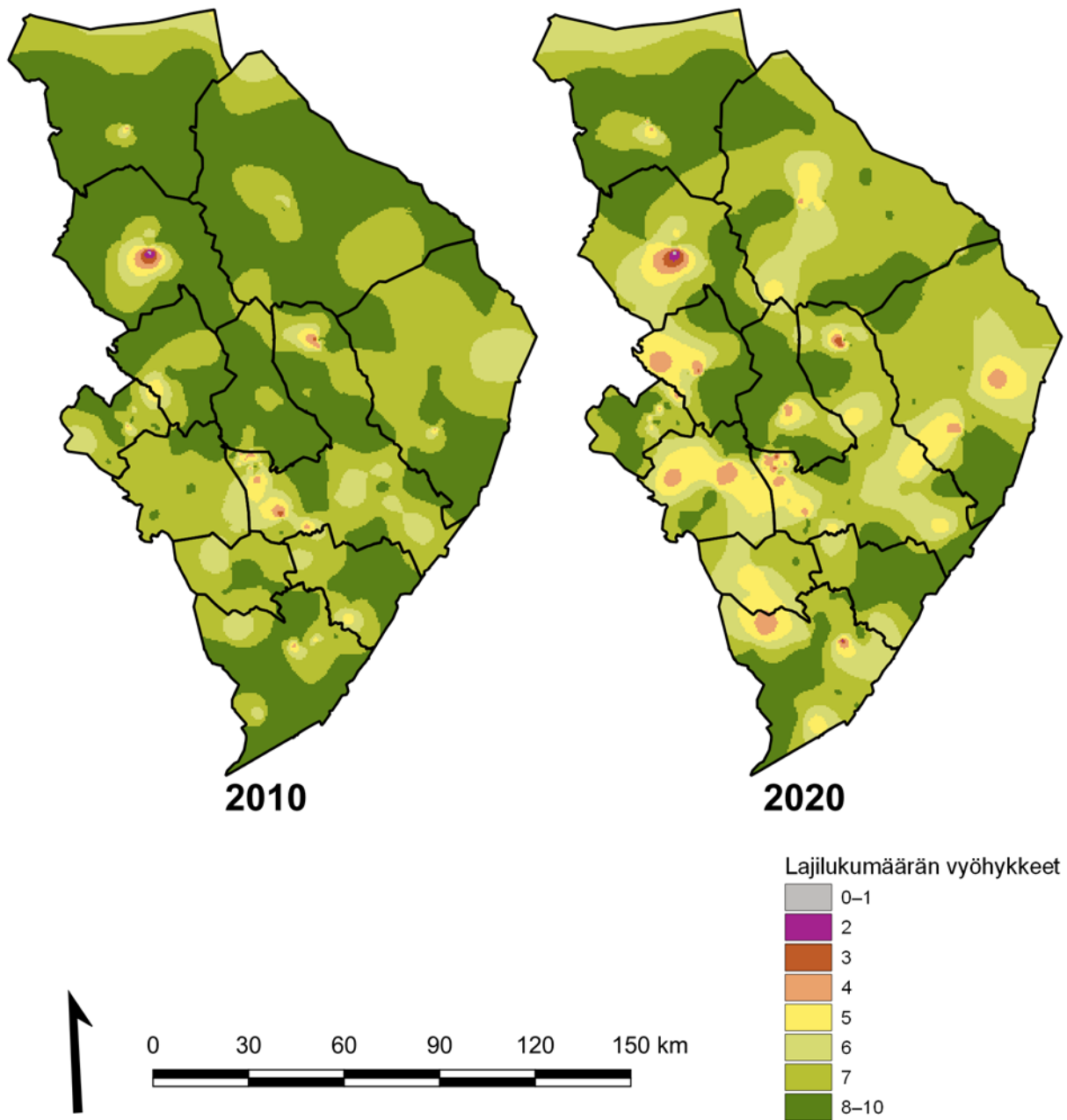
Kaikki muutokset eri kestävyys ryhmien yleisyydessä vuodesta 2010 vuoteen 2020 olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä, vaikka muutos sinänsä olisikin ollut pieni. Kestävien jäkälälajien, levän ja seinäsuomujäkälän, keskimääräinen yleisyys kasvoi vuodesta 2010 vuoteen 2020, koska seinäsuomujäkälä yleistyi. Kaikkien muiden kestävyysryhmien yleisyys väheni tutkimusvuosien välillä. Kaikkein suurinta väheneminen oli herkkien lajien ryhmässä (lupot, naavat) (Kuva 73).



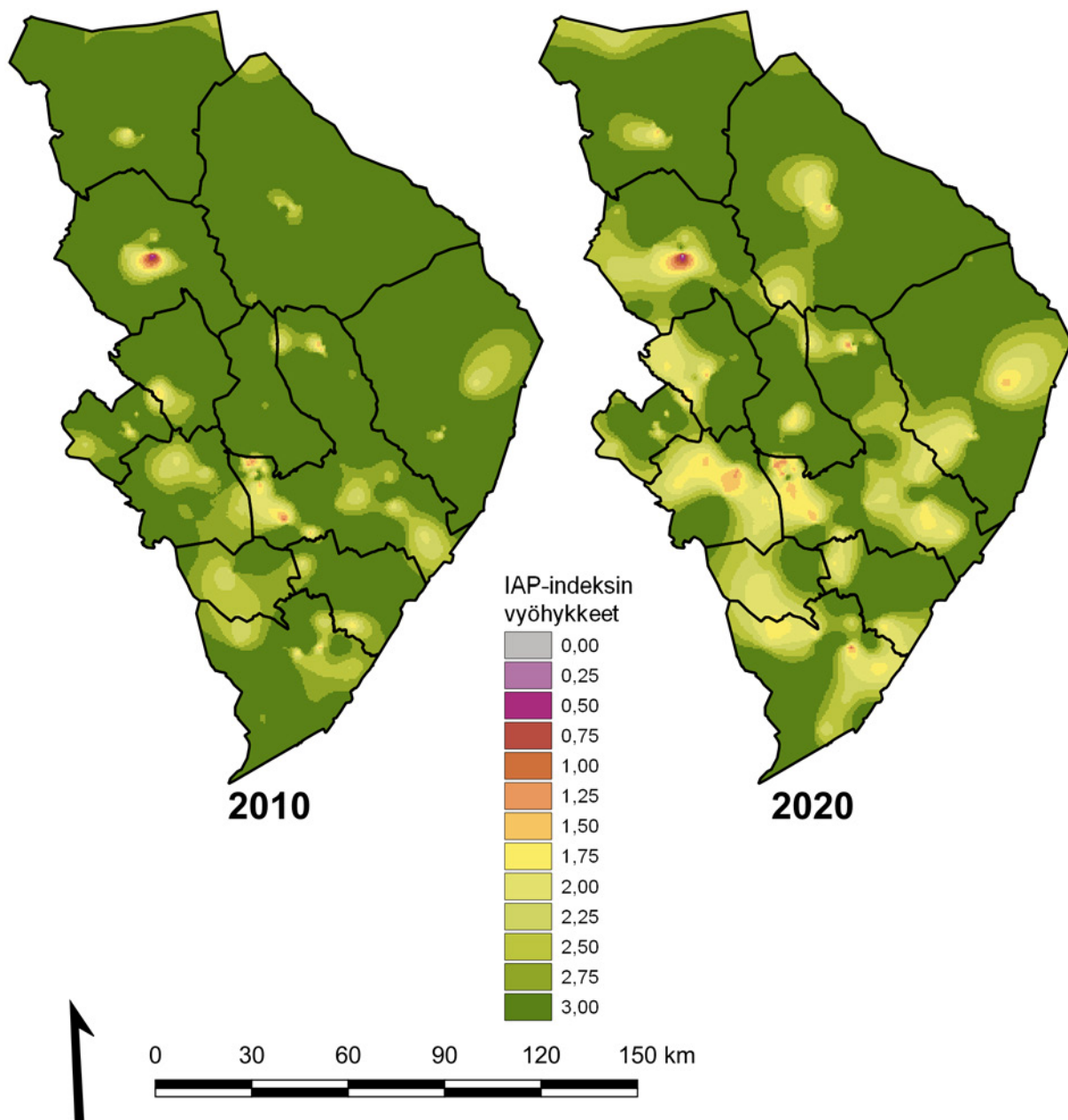
Kuva 73. Herkkien, melko herkkien, melko kestävien ja kestävien jäkälälajien keskimääräinen esiintyminen aloilla (esiintymisrunkojen lukumäärä) Pohjois-Karjalan samoina pysyneillä havaintoaloilla vuosina 2010 ja 2020. Kaikki muutokset vuosien välillä olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä (testattu merkkitestillä).



Kuva 74. Sormipaisukarpeen vaurioasteen vyöhykkeet tutkimusalueella vuosina 2010 ja 2020.



Kuva 75. Lajilukumäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuosina 2010 ja 2020.



Kuva 76. IAP-indeksin vyöhykkeet tutkimusalueella vuosina 2010 ja 2020. IAP-indeksin on laskettu vuosien 2010 ja 2020 tutkimuksien yhdistetystä aineistosta, ks. kappale 3.4.

## 6.1.2 Sammalten alkuainepitoisuudet

Taulukossa (Taulukko 35) verrataan sammalten alkuainepitoisuuksia vuonna 2010 tämän tutkimuksen tuloksiin. Tulosten vertailukelpoisuutta heikentää se, että havaintoalat eivät ole täysin samat eri tutkimusvuosina: 73 sammalalaa 101:stä pysyi samana tutkimusvuosien välillä.

Useimpien alkuaineiden pitoisuudet sammalissa olivat vuonna 2020 keskimäärin pienempiä kuin vuonna 2010, mutta fosforin ja magnesiumin pitoisuudet olivat suurempia ja kuparin pitoisuus oli hieman suurempi. Suurimmat pitoisuudet pienenivät selvästi arseenin, kadmiumin, kromin, lyijyn, raudan, rikin ja vanadiinin kohdalla. Pohjois-Karjalan teollisuus ja energiantuotanto näkyivät useiden alkuaineiden vyöhykekartoissa suuremman pitoisuuden täplänä.

Arseenin pitoisuudet vähenivät etenkin Joensuun keskustassa ja Hammaslahdessa ja Juuan Nunnanlahdessa. Muualla pitoisuudet olivat myös vuonna 2010 samalla alhaisella tasolla kuin 2020. Kadmiumin pitoisuudet vähenivät vuodesta 2010 kaikkialla. Erityisen selvää vähenemistä oli Nurmeksessa

Höljäkässä, Kiteellä keskustassa ja Hummovaaran lähellä sekä Hammaslahdessa. Pitoisuus nousi Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähellä. Kromin määrä sammalissa väheni erittäin selvästi Juuan Nunnanlahden ympäristössä, Nurmeksen Porokylässä, ja Polvijärvellä ja Outokummussa. Vähennystä tapahtui myös kaikkialla muualla maakunnassa. Kuparin suurimmat pitoisuudet kasvoivat (Polvijärvellä Kylylahden kaivoksen lähellä ja Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä), mutta muuten pitoisuuksissa ei havaittu suuria muutoksia.

Lyijyä oli koko Pohjois-Karjalassa selvästi vähemmän kuin vuonna 2010 lukuun ottamatta Ilomantsin keskustaa ja lakkautetun sahan lähistöä Kiteen Puhoksella, joissa pitoisuus oli likimain samalla tasolla kuin vuonna 2010. Nikkelin pitoisuudet olivat vuonna 2010 myös laajalti vuoden 2020 taustatasolla. Eniten pitoisuudet olivat pienentyneet Juuan Nunnanlahdessa ja Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä ja edelleen Polvijärven suuntaan.

Rautapitoisuudet olivat pienentyneet lähes kaikkialla. Vähennykset olivat suurimpia useissa taajamissa sekä teollisuuslaitosten lähellä, kuten Nurmeksen Porokylässä, Juuan Nunnanlahdessa, Polvijärvellä Horsmanahon kaivoksen lähellä, Outokummussa Vuonoksen lähellä, Outokummun Pohjoiskylässä sekä Joensuun Hammaslahdessa. Raudan määrä oli kasvanut selvästi Hammaslahden eteläpuolella. Rikkipitoisuudet pienenevät tutkimusvuosien välillä laajoilla alueilla, eniten Nurmeksen keskustassa, Joensuun keskustassa, Uimaharjussa sekä Outokummun ja Polvijärven teollisuuden ympäristössä.

Sinkin keskimääräinen pitoisuus sammalissa ei vähentynyt kovin paljon. Pitoisuus väheni selvästi Kiihtelysvaaran kirkonkylän ympäristössä, Ilomantsissa ja Kiteen keskustassa. Sinkin määrä kasvoi selvästi Rääkkylän Kompakan lähellä sekä Kiteen Puhoksella lakkautetun sahan lähellä. Vanadiinin pitoisuudet laskivat hyvin selvästi lähes kaikkialla. Laskua oli eniten Nurmeksen Porokylässä, Outokummun keskustassa, Kiteen keskustassa, Juuan Nunnanlahdessa, Lieksan keskustassa, Kontiolahdella, Joensuun kaupunkialueella, Outokummussa Vuonoksen tehtaan lähellä ja Joensuun Hammaslahdessa. Pitoisuus kasvoi paljon Hammaslahden eteläpuolella.

Fosforin ja magnesiumin keskimääräiset ja suurimmat pitoisuudet kasvoivat vuosien 2010 ja 2020 välillä. Fosforissa kasvua oli eniten Kiteen Puhoksella lakkautetun sahan lähellä, Kiteen Salossa, Tohmajärvellä Kemiessä, Joensuussa Löytöjärvellä, Ilomantsin keskustassa, Lieksan keskustassa ja Kolilla sekä Nurmeksen keskustassa. Vuonna 2020 magnesiumia oli sammalissa vähemmän kuin vuonna 2010 Juuan Nunnanlahdessa ja Nurmeksen Porokylässä. Sen määrä oli kasvanut Kiteen keskustassa. Magnesiumin pienimmät pitoisuudet kasvoivat jonkin verran vuodesta 2010.

Taulukko 35. Sammalta keskimääräiset alkuainepitoisuudet koko Pohjois-Karjalassa vuosina 2010 ja 2020. Kemialliset merkit: As = arseeni; P = fosfori, Cd = kadmium; Cr = kromi; Cu = kupari; Pb = lyijy; Mg = magnesium; Ni = nikkeli; Fe = rauta S = rikki; Zn=sinkki ja V = vanadiini.

n	Tutkimusvuosi	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg
101	2020	0,070	1600	0,11	0,56	5,3	0,57
101	2010	0,16	1345	0,16	1,7	5,2	1,9
n	Tutkimusvuosi	Mg mg/kg	Ni mg/kg	Fe mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg
101	2020	1300	1,2	190	750	34	0,56
101	2010	1171	2,5	431	922	38	1,6

## 6.2 Vertailu muualla Suomessa tehtyihin tutkimuksiin sekä alueen kuntien välillä

Tässä luvussa vertaillaan muualla Suomessa tehtyjen tutkimusten tuloksia Pohjois-Karjalan bioindikaattoritutkimuksen tuloksiin sekä tutkimusalueen kuntien tuloksia keskenään.

### 6.2.1 Runkojäkälät

Seuraavassa on verrattu Pohjois-Karjalan maakunnan alueen bioindikaattoritutkimuksen tuloksia eri puolilla Suomea tehtyjen tutkimusten tuloksiin jäkälämuuttujien osalta. Keskimääräinen sormipaisukarpeen vaurioaste oli Pohjois-Karjalan maakunnassa pienempi kuin vertailualueilla. Keski-Suomessa (vuonna 2005) keskimääräinen sormipaisukarpeen vaurioaste oli lähimpänä Pohjois-Karjalan tasoa. Keskimääräinen ilmanpuhtausindeksi oli Pohjois-Karjalassa selvästi vertailualueita korkeampi; Pohjois-Karjalan jäkälälajisto oli selvästi lähempänä luonnontilaista kuin esimerkiksi Länsi-Suomessa, Turussa ja Helsingissä. Pohjois-Karjalassa havaittiin myös selvästi enemmän ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja runkoa kohti kuin muilla tutkimusalueilla (Taulukko 36.)

Taulukko 36. Runkojäkälää kuvaavia muuttujia Pohjois-Karjalan maakunnan alueen bioindikaattoritutkimuksessa 2010 ja 2020 sekä eri puolilla Suomea toteutetuissa tutkimuksissa. Tulokset lähteistä Ruuth ja Keskitalo 2021, Ruuth ym. 2016, Huuskonen ym. 2010, Huuskonen ym. 2009, Laita ym. 2008a, Laita ym. 2008b, Laita ym. 2007, Haahla ym. 2006a, Haahla ym. 2006b.

Alue	n	tutkimusvuosi	Sormipaisukarpeen vaurioaste	IAP	Lajilukumäärä / puu
Pohjois-Karjala	315	2020	1,9	2,9 *	5,5
Uusimaa	501	2020	2,5	1,5	3,9
Uusimaa	734	2014	2,5	1,7	5,6
Pori–Harjavalta	107	2014	2,4	1,9	3,6
Pohjois-Karjala	300	2010	1,9	3,1 *	6,0
Uusimaa	776	2009	2,1	2,0	4,7
Pyhäjärviseuutu	98	2007	2,1	2,3	5,3
Vakka-Suomi	103	2006	2,1	2,2	5,1
Länsi-Suomi	398	2006	2,1	1,7	4,1
Turku	145	2005	2,2	1,5	3,6
Keski-Suomi	492	2005	2,0	2,4	
Etelä-Karjala	240	2005	2,3	2,0	

\* Laskettu vuosien 2010 ja 2020 yhdistetyn aineiston lajilukumäärän perusteella.

Taulukossa 37 on vertailtu tutkimusalueen kuntia keskenään sormipaisukarpeen vaurioasteen, lajilukumäärän sekä IAP-indeksin osalta. Tutkimusalueen jäkälälajistoltaan luonnontilaisimmat kunnat olivat Kontiolahti, Nurmes, Outokumpu ja Tohmajärvi. Jäkälälajisto oli köyhtyneintä Joensuussa ja Rääkkylässä, mutta näissäkin kunnissa jäkälälajisto oli vain lievästi köyhtynyttä. Juuan kunnan alueella sijaitti vähiten ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja sisältänyt ala, ja Kontiolahdella ja Outokummussa oli kummasakin ala, jolla lajilukumäärä oli kymmenen. Sormipaisukarve oli vaurioituneinta Joensuun, Kontiolahden ja Nurmeksen alueella, mutta näissäkin kunnissa sormipaisukarpeen vauriot olivat keskimäärin vain lieviä. Sormipaisukarve oli terveintä Iloimantsissa ja Tohmajärvellä (Taulukko 37.)



Taulukko 37. Sormipaisukarpeen vaurioasteen, lajilukumäärän ja ilmanpuhtausindeksin keskiarvot sekä pienimmät ja suurimmat arvot Pohjois-Karjalan tutkimuskunnissa sekä koko tutkimusalueella vuonna 2020.

	IAP keskiarvo	IAP pienin	IAP suurin	Lajilukumäärä keskiarvo	Lajilukumäärä pienin	Lajilukumäärä suurin	Spk:n vaurioaste keskiarvo	Spk:n vaurioaste pienin	Spk:n vaurioaste suurin
Ilomantsi	3,0	1,6	4,5	7,1	4	9	1,6	1,1	2,2
Joensuu	2,6	1,2	4,6	6,3	3	9	2,2	1,0	4,0
Juuka	2,8	0,1	4,2	6,9	1	9	1,8	1,2	5,0
Kitee	2,8	0,9	4,3	6,9	2	9	1,7	1,1	3,0
Kontiolahti	3,3	1,8	4,7	8,0	4	10	2,0	1,6	2,8
Lieksa	2,9	1,3	4,1	6,9	4	9	1,8	1,3	2,9
Liperi	2,9	1,4	4,0	6,9	4	9	1,7	1,5	2,0
Nurmes	3,2	1,3	4,3	7,5	4	9	2,0	1,3	3,3
Outokumpu	3,2	1,5	5,2	7,5	4	10	1,8	1,3	2,4
Polvijärvi	2,8	1,6	4,2	6,9	4	9	1,8	1,4	2,5
Rääkkylä	2,6	2,0	4,0	6,7	5	8	1,9	1,5	2,8
Tohmajärvi	3,2	1,7	4,2	8,0	6	9	1,6	1,2	2,2
koko tutkimusalue	2,9	0,1	5,2	6,9	1	10	1,9	1,0	5,0

## 6.2.2 Sammalten alkuainepitoisuudet

Taulukossa (Taulukko 38) on verrattu tutkimuksessa mitattuja Pohjois-Karjalan sammalen alkuainepitoisuuksia muualla Suomessa tehtyjen tutkimusten tuloksiin. Valtakunnallista tasoa vertailussa kuvaavat Luken koko Suomea koskevat tulokset, jotka on saatu valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koealaverkostolta. Luken aineisto päättyy vuodelle 2010.

Sammalen alkuainepitoisuudet Pohjois-Karjalassa olivat valtakunnallista tasoa korkeammat fosforin osalta. Sammalen kadmium-, kupari- ja sinkkipitoisuudet olivat pysyneet samana tai laskeneet hieman edelliseen tutkimuskertaan verrattuna. Pitoisuudet olivat alhaisemmalla tasolla tai laskeneet hieman kuin koko Suomessa keskimäärin. Sammalten , lyijy-, rikki-, nikkeli-, rauta,- ja vanadiinipitoisuudet olivat Pohjois-Karjalassa pääasiassa pienempiä kuin vertailualueilla (Taulukko 38).

Taulukko 38 Sammalten alkuainepitoisuuksia eri puolilla Suomea tehdyissä tutkimuksissa. Tulokset lähteistä Laita ym. 2014, Lehkonen 2010, Poikolainen ym. 2011, Keskitalo ym. 2011, Huuskonen ym. 2009, Laita ym. 2008c, Laita ym. 2008d, Laita ym. 2008e, Laita ym. 2007, Poikolainen ym. 2004 ja Jussila 1997. Kemialliset merkit: As = arseeni; Cd = kadmium; Cr = kromi; Cu = kupari; Fe = rauta; Mg = magnesium; Ni = nikkeli; P = fosfori; Pb = lyijy; S = rikki; Zn=sinkki, V = vanadiini.

Alue	n	Tutkimusvuosi	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg
<b>Pohjois-Karjala</b>	<b>101</b>	<b>2020</b>	<b>0,070</b>	<b>1600</b>	<b>0,11</b>	<b>0,56</b>	<b>5,3</b>	<b>0,57</b>
Pohjois-Karjala	100	2010	0,16	1345	0,16	1,7	5,2	1,9
Metla Pohjois-Karjala	20	2010	0,17		0,10	1,42	2,2	2,16
Riihimäki	6	2010	0,14		0,19			3,6
Pyhäjärviseu	28	2007			0,20	0,74	8,6	2,1
Kokkola	95	2006	0,28	1537	0,37	0,8	9,2	4,7
Pietarsaari	104	2006	0,48	1521	0,16	0,88	5,7	2,2
Seinäjoki	40	2006	0,48	1559	0,13	1,18	6,1	1,8
Turku	60	2005			0,27	1,8	7,0	3,4
Pori-Harjavalta (kuormitettu)	95	1996	3,81		0,45	9,2	224	16,9
Metla (Koko Suomi)		2005	0,12		0,15	1,13	4,11	2,96
Alue	n	Tutkimusvuosi	Mg mg/kg	Ni mg/kg	Fe mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg
<b>Pohjois-Karjala</b>	<b>101</b>	<b>2020</b>	<b>1300</b>	<b>1,2</b>	<b>190</b>	<b>750</b>	<b>34</b>	<b>0,56</b>
Pohjois-Karjala	100	2010	1171	2,5	431	922	38	1,6
Metla Pohjois-Karjala	20	2010		1,74	272	840	31,9	0,94
Riihimäki	6	2010						
Pyhäjärviseu	28	2007		2,4	282		43	1,6
Kokkola	95	2006	1156	1,8	404	1052	91	1,5
Pietarsaari	104	2006	1108	1,84	295	1103	45	2,2
Seinäjoki	40	2006	1271	2,3	537	1101	38	3,7
Turku	60	2005		2,8	393		47	3,5
Pori-Harjavalta (kuormitettu)	95	1996			1048		74	2,6
Metla (Koko Suomi)		2005		1,87	236		33,0	1,43

## 6.3 Metsätuhoalan muutokset

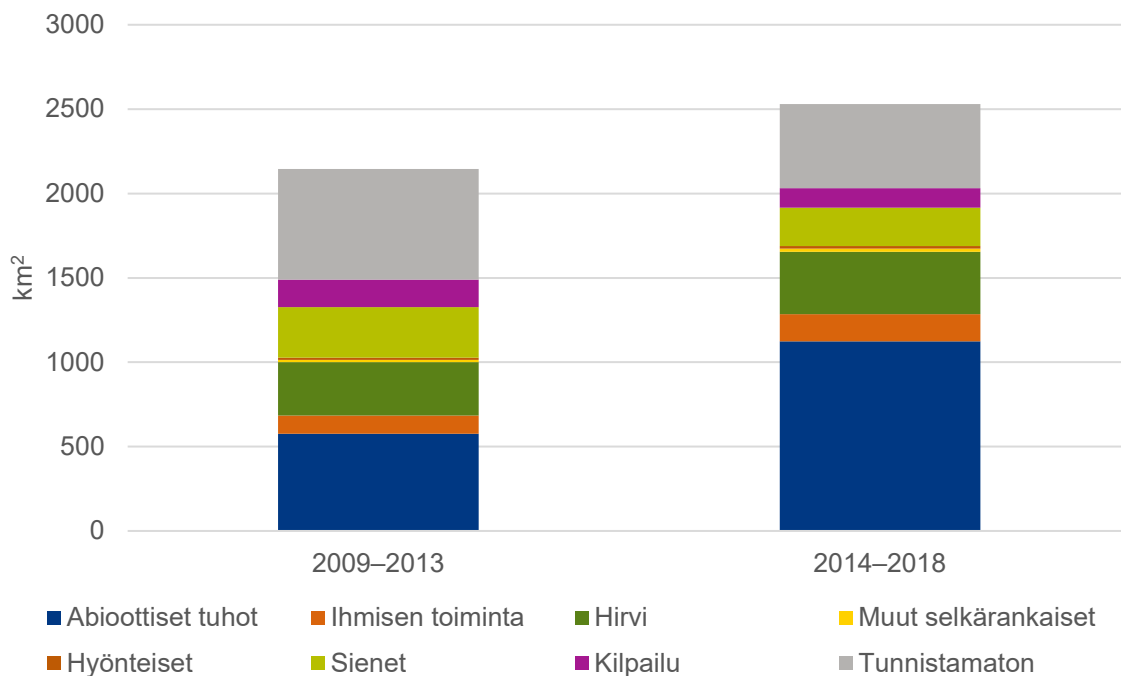
Kari T. Korhonen, Luonnonvarakeskus 31.3.2021

Tässä luvussa tarkastellaan metsätuhojen pinta-alan kehitystä 2010-luvulla Pohjois-Karjalassa. Aineistona on Luonnonvarakeskuksen valtakunnan metsien inventoinnin koalat Pohjois-Karjalassa (VMI11 2009–2013 ja VMI12 2014–2018, osittain myös VMI13 2019–2020). Tarkastelu rajattiin puuntuotannon metsämaalle, jonka pinta-ala VMI12:n mukaan on 1,4181 miljoonaa hehtaaria. Tuhoista mukaan laskettiin vain metsikön laatuun vaikuttavat tuhot eli lievimmät tuhomerkinnät jätettiin tarkastelusta pois.

VMI:ssä havaituista tuhoista kirjataan tuhoniheuttaja, jos se pystytään tunnistamaan.

Tuhoniheuttajaryhmiä ovat abioottiset tekijät, eläimet, sienet ja muut tekijät. Näiden ryhmien sisällä aiheuttajat jaetaan edelleen yksittäisiin tekijöihin, kuten sellaisiin sieni- ja eläinlajeihin, joiden tuhot pystytään maastossa kohtuullisella varmuudella tunnistamaan. Abioottisina tuhoina erotellaan tuuli, lumi, pakkas (mukaan lukien halla), muut sää- ja ilmastotekijät, metsäpalo, maaperätekijät, kuivuus, ravinteiden epätasapaino, vetisyys/tulva, puunkorjuu, ilman epäpuhtaudet, muu abioottinen tai ihmisen toimita, tunnistamaton abioottinen tekijä. Ilman epäpuhtauden kirjaaminen tuhoniheuttajaksi edellyttää tuho-oireiden tunnistamisen lisäksi päästölähteen tunnistamista (esim. teollisuus, liikenne, maatalous). Ilman epäpuhtauden aiheuttamia tuhoja ei ollut kirjattu yhdellekään koalalle vuosina 2014–2020 Pohjois-Karjalassa.

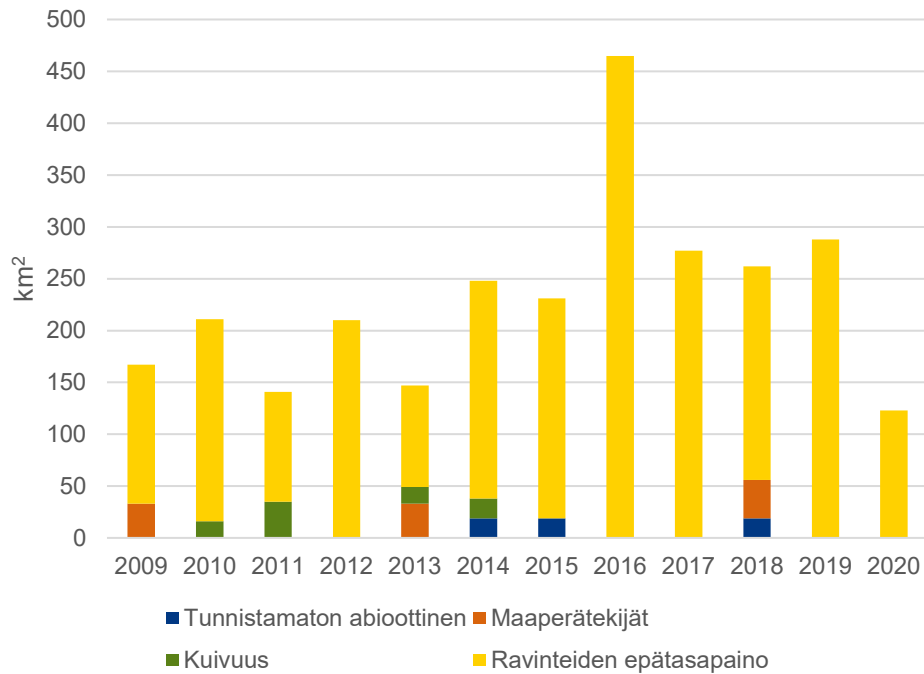
Vuosina 2014–2018 tuhoja havaittiin 253 000 hehtaarin alalla, mikä on 18 % puuntuotannon metsämaan alasta (Kuva 77). Tuhoalasta 50 000 hehtaaria tuhon aiheuttajaa ei pystytty tunnistamaan. Tunnistetuista tuhoista yli puolet (113 000 hehtaaria) oli abioottisia tuhoja (merkittävimmin tässä ryhmässä lumi, ravinteiden epätasapaino ja tuuli). Hirvituhoja oli tunnistettu 37 000 hehtaarin alalla, sienituhoja 23 000 hehtaaria, ihmisen toiminnasta (esim. korjuuvauriot) aiheutuneita tuhoja 16 000 hehtaaria ja puiden välisen kilpailun (tyypillisesti lehtipuuston piiskausvaikutus kuusitaimikoissa) aiheuttamia 12 000 hehtaarin alalla. Metsätuhojen osuus puuntuotannon metsien alasta on Pohjois-Karjalassa samansuuruinen kuin Etelä-Suomessa keskimäärin. Vuosiin 2009–2013 verrattuna tuhopinta-ala on kasvanut lähes 40 000 hehtaaria. Eniten on kasvanut abioottisten tuhojen ala, 58 000 hehtaaria 113 000 hehtaariin. Muiden tuhoaiheuttajaryhmien kohdalla lisäys on tilastollisesti merkityksetön tai muutos on ollut lievää vähenemistä.



Kuva 77. Metsikön laatuun vaikuttavien tuhojen pinta-ala puuntuotannon metsämaalla Pohjois- Karjalassa VMI11 (2009–2013) ja VMI12 (2014–2018) mukaan.

Toisessa tarkastelussa poimittiin vuosittaisista VMI-mittausaineistoista maaperätekijöiden, kuivuuden, ravinteiden epätasapainon ja tunnistamattomien abioottisten tekijöiden aiheuttamat tuhot (Kuva 78). Nämä tuhot valittiin tarkasteluun, sillä perusteella, että ne voivat olla myös päästölähteiden aiheuttamia (tunnistusvirhe) tai päästöjen myötävaikuttamia tuhoja. Tarkasteluihin otettiin mukaan myös VMI13-aineistoa vuosilta 2019 ja 2020. Näistä tuhoaiheuttajista selvästi yleisin on ravinteiden epätasapaino, muiden aiheuttamia tuhoja on vain yksittäisillä koealoilla. Mainittujen tekijöiden aiheuttamia tuhoja on viime vuosina esiintynyt jonkin verran enemmän kuin tarkastelujakson alkuvuosina. Vuonna 2020 näitä tuhoja havaittiin kuitenkin vähemmän kuin koskaan aiemmin tarkastelujaksolla. Vuonna 2016 havaittiin ravinteiden epätasapainoa 45 000 hehtaarin alalla – noin kaksinkertaisesti aiempiin vuosiin verrattuna. Otosvirhe vaikuttaa erityisesti yksittäisten vuosien havaintomääriin, mutta näin suureen poikkeamaan on voinut vaikuttaa myös tunnistusvirhe. On huomattava, että käsitellyt tuhoalat (Kuva 78) eivät ole yhtenä vuonna ilmestyneitä uusia tuhoja vaan kyseisen vuoden koealoilla havaittuja tuhoja tuhon alkuhetkestä riippumatta.

VMI-aineiston tarkastelujen perusteella Pohjois-Karjalassa ei ole selvästi ilman epäpuhtauksista aiheutuneita tuhoja. Kuitenkin näiden kaltaisten tuhojen määrä on viimeisen 10 vuoden aikana lisääntynyt, lukuun ottamatta vuotta 2020. Tästä syystä tuhojen kehitystä on syytä jatkaa säännöllisesti ja tarvittaessa selvittää tarkemmin yksittäisten tuhoalojen syitä.



Kuva 78. Valikoidut abiottiset tuhot vuosittain Pohjois-Karjalassa 2009–2020.

# 7. Johtopäätökset

Pohjois-Karjalan ilmanlaatua on selvitetty 1980-, 1990-, ja 2010 luvuilla useissa ilmanlaadun bioindikaattori-tutkimuksissa. Vuosina 1998 ja 2010 seuranta toteutettiin koko maakunnan laajuuisena. Vuonna 2020 ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus on jatkoa näille aikaisemmille tutkimuksille. Tutkimuksessa ilman epäpuhtauksien ilmentäjinä käytettiin mäntyjen epifyyttijäkälää ja sammalten alkuainepitoisuuksia. Pohjois-Karjalan alueen ilman epäpuhtauksien päästöt syntyvät pääosin energiantuotannosta, teollisuudesta ja liikenteestä, mutta päästöt ovat paikallisia ja koko Suomen mittakaavassa vähäisiä. Maaseutualueilla myös maataloustoiminnoilla voi olla paikallisia ilmanlaatuvaikutuksia.

Tutkimusalueen päästö määrät ovat laskeneet selvästi 1980- ja 1990-luvuilta 2000-luvulle tultaessa, mutta 2000-luvulla etenkin rikkidioksidien ja hiukkasten päästökehitys on ollut aaltomaista, ja päästö määriin ovat vaikuttaneet lähinnä tuotannon intensiteetti sekä energiankulutus. 2020-luvulle tultaessa etenkin rikkidioksidipäästöjen laskeminen on tasaantunut. Liikenteen osalta etenkin typen oksidit ovat tarkasteluajanjaksolla vähentyneet selvästi. Ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ovat vaihdelleet ja pääasiassa pysyneet saman suuntaisina 2020-luvulle tultaessa verrattuna 2010-lukuun. Tutkimusalueen päästö määrittäen suurimmat lupavelvolliset rikkidioksidin ja typen oksidien pistemäiset päästölähteet sijaitsivat Joensuussa, Uimaharjussa ja Lieksassa. Suurimmat hiukkasten päästölähteet sijaitsivat Uimaharjun, Joensuun, Kiteen ja Nurmeksen kunnissa. Lupavelvollisia laitoksia tutkimusalueella on paljon etenkin Joensuun ja Lieksan keskustaajamien tuntumassa, Kiteen Puhoksen teollisuusalueella ja Uimaharjussa. Vähiten päästöjä tutkimusalueella syntyi Juuassa, Ilomantsissa ja Polvijärvellä. Alueen vilkkaimmin liikennöidyt tiet ovat valtatie 6, 9 ja 23. Ilman epäpuhtauksien vaikutukset ilmanlaatua kuvaaviin jäkälämuuttujiin olivat koko Pohjois-Karjalan maakunnan mittakaavassa lieviä ja erityisesti tausta-alueilla vaikutukset olivat hyvin vähäisiä. Päästölähteiden ympäristössä vaikutukset olivat selvempiä, mutta laajuudeltaan melko pieniä. Verrattaessa tuloksia muiden alueellisten ilmanlaadun bioindikaattoritutkimusten tuloksiin, keskeisimmät ilmanlaatua kuvaavat jäkälämuuttujat osoittavat ilmanlaadun olevan Pohjois-Karjalan alueella parempi kuin muilla alueilla Suomessa. Jäkäläkasvillisuudessa ja sammalten alkuainepitoisuuksissa ei havaittu muutoksia, jotka viittaisivat kauempaa kulkeutuviin epäpuhtauksiin.

Vuonna 2020 sormipaisukarpeen vauriot olivat tutkimusalueella keskimäärin lieviä. Terveintä sormipaisukarvetta kasvoi Kesälahdella, Hattuvaarassa ja Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa. Vaurioituneinta sormipaisukarve oli Joensuun keskustaajamasta Hammaslahteen ulottuvalla vyöhykkeellä ja Juuan kunnan keskiosassa sekä Nurmeksen keskustaajamassa ja Uimaharjun keskustaajamassa.

Sekä ilmanpuhtausindeksin että ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkäläien lajilukumäärän suhteen jäkälälajisto oli tutkimusalueella keskimäärin lievästi vaurioitunutta, mutta suurimmalla osalla havaintoaloista jäkälälajisto oli luonnontilaista. Tutkimusalueen lounais- ja keskiosassa köyhtynyttä, kun taas alueen pohjois- ja kaakkoisosissa jäkälälajisto oli osittain luonnontilaista. Monipuolisoin ja luonnontilaisin jäkäläyhteisö tutkimusalueella oli Ilomantsissa, Kontiolahdella, Nurmeksessa ja Outokummussa ja köyhtynein puolestaan Joensuun ja Rääkkylän alueella. Eteläisessä Pohjois-Karjalassa on melko paljon viljelysmaata, ja maanviljelyn päästöt ovat voineet paikallisesti vaikuttaa Rääkkylän jäkälälajistoon. Paikallisesti köyhtyneimmän jäkälälajiston alat tutkimusalueella sijaitsivat Joensuun keskustan tuntumassa, Uimaharjussa, Juuassa entisen turkistarhan läheisyydessä ja Nurmeksen keskustassa. Ilman epäpuhtauksille herkäät lajit, kuten naavat ja lupot sekä harmaaröyhelö, olivat yleisimpiä tutkimusalueen pohjoisosassa ja esiintyivät harvemmin tutkimusalueen eteläosassa. Levä oli tutkimusalueella yleisintä päästölähteiden läheisyydessä.

Korkeimmat sammalten alkuainepitoisuudet tutkimusalueella määritettiin useimmiten selvien pistemäisten päästölähteiden läheisyydestä. Suurimmat pitoisuudet esiintyivät Outokummussa ja Polvijärvellä kaivosten läheisyydessä. Myös Joensuun keskusta erottui joidenkin alkuaineiden pitoisuuksissa, samoin kuin pienemmät taajamat, joissa sijaitsee voimalaitoksia ja lämpökeskuksia. Alkuainepitoisuuksien voimakkaiden keskinäisten korrelaatioiden vuoksi käytettiin

pääkomponenttianalyysejä, jonka tarkoituksena oli vähentää käytettäviä muuttujia tarkasteltaessa pitoisuuksien vaihtelua tutkimusalueella. Analyysin tuloksena erottuu paikkoja, joissa on metallipäästöjen lähteitä, toimivia tai toimintansa lopettaneita laitoksia. Korrelaatioiden ja pääkomponenttianalyysin perusteella tutkimusalueelta löydettiin merkittävimmät raskasmetallien ja muiden alkuaineiden päästölähteet, joita olivat lämpölaitokset sekä kaivokset ja kaivostuotteiden jatkojalostuslaitokset, ja näiden lähteiden päästöjen alkuainekoostumukset (lämpölaitokset: kupari, magnesium, rauta, rikki, sinkki ja vanadiini, kaivokset: arseeni, kromi, nikkeli). Sammalten alkuainepitoisuudet olivat Pohjois-Karjalan maakunnan alueella kuitenkin pääosin pienempiä kuin muualla Suomessa tehdyissä alueellisissa ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa. Tulosten perusteella sammalten raskasmetallipitoisuudet Pohjois-Karjalassa edustavat suhteellisen puhtaan tausta-alueen pitoisuuksia

Tulosten tilastollinen tarkastelu osoitti, että tarkasteltuihin jäkälämuuttujiin oli mallissa selvää vaikutusta, muuttujan mukaan, seuraavilla seikoilla: ilman epäpuhtauksien pitoisuudet, etäisyys taajaan rakennetusta alueesta ja etäisyys lähimpään pistepäästölähteeseen. Ilman epäpuhtauksien pitoisuuksilla oli tilastollinen yhteys useimpiin muuttujiin lukuun ottamatta sormipaisukarpeen vaurioastetta. Parhaiten tilastolliset mallit selittivät sormipaisukarpeen vaurioasteen vaihtelun ja toiseksi parhaiten levän yleisyyden vaihtelun.

Tutkittujen jäkälämuuttujien välillä havaittiin merkittäviä korrelaatioita, mikä kertoo siitä, että muuttujien vasteen vaihtelut ilman epäpuhtauksiin ovat usein samankaltaisia. Liikenteen päästöjen vaikutusta jäkälämuuttujiin ei tutkittu tilastollisilla menetelmillä, mutta niillä voidaan odottaa olevan paikallista vaikutusta jäkälämuuttujiin.

Taustamuuttujista etenkin metsikön soveltuvuudella tutkimukseen ja metsätyypillä sekä havaintopuiden läpimitalla havaittiin olevan vaikutusta jäkälämuuttujiin. Myös luonnolliset tekijät siis vaikuttavat männyn rungoilla kasvaviin jäkälälajeihin, mutta tätä vaikutusta voidaan vakioida sijoittamalla havaintoalat indikaattorilajien kannalta soveltuvimpiin metsiköihin.

Jäkäläkartoituksen tuloksia vertailtiin vuosien 2010 ja 2020 välillä. Jäkälälajiston runsaus ja monipuolisuus oli laskenut keskimäärin hieman molempina tutkimusvuosina, mutta keskimääräiset sormipaisukarpeen vauriot eivät olleet muuttuneet tilastollisesti merkittävästi vuodesta 2010 vuoteen 2020. Levä oli hieman vähentynyt ja sormipaisukarpeen peittävyys olivat kasvaneet selvästi tutkimusalueella tutkimusvuosien välillä. Muutosta lajimäärässä voi selittää myös samana pysyneiden alojen ikä, koska jäkälälajimäärä männyn rungolla vähenee metsän ja sitä kautta varjostuksen kasvaessa. Tämä voi näkyä ilmiönä, jossa jäkälä lajiston esiintymispaikat siirtyvät rungolla ylöspäin tutkittavan alueen ulkopuolelle. Myös lämpimillä talvilla ja sitä seuraavalla korkeammalla ilmankosteudella voi olla merkitystä jäkälien esiintymiselle. Ilman kosteuden on todettu olevan huomattavalle osalle jäkäliä merkittävämpi ympäristötekijä kuin lämpötila (Gauslaa 2014), koska kuivuus saattaa johtaa jäkälien biomassan vähenemiseen (Smith ym. 2018). On olemassa viitteitä siitä, että jäkälät pystyvät sopeutumaan kuivempiin oloihin mm. paksuntamalla sekovartta (Johansson 2008). Sääolojen äärevöityminen voi aiheuttaa epäedullisen kuivan ilmaston kasvukaudella ja edelleen liian kostean ilmaston kasvukauden ulkopuolella. Tutkimustulokset jäkälien herkkyydestä kohonneen lämpötilan ja kuivuuden suhteen ovat kuitenkin monilta osin ristiriitaisia. Niiden perusteella ei ole mahdollista arvioida, kuinka suurelle osalle lajistosta ja mille lajeille ilmastonmuutoksen suorat vaikutukset ovat uhka.

Tässä tutkimuksessa sormipaisukarpeen lievät vauriot lisääntyivät ja terveet sormipaisukarpeet vähentyivät hieman tutkimusvuosien välillä. Köyhtyneiden ja lievästi köyhtyneiden alojen lukumäärä kasvoi, ja luonnontilaisen jäkälälajiston omaavien alojen määrä laski IAP-indeksin mukaan vuodesta 2010 vuoteen 2020. Kestävät lajit, levää lukuun ottamatta yleistyivät ja lupot harvinaistuivat tutkimusalueella tutkimusvuosien välillä. Muutokset jäkälämuuttujissa vuosien välillä olivat kuitenkin kokonaisuudessaan pieniä. Enemmän tietoa muutosten suunnasta saadaan, kun tarkastellaan muutoksia vuosien 2010 ja 2020 välillä alueellisesti. Tutkimusalueen itäistä osaa kattaa yhtenäinen terveen sormipaisukarpeen vyöhyke. Sormipaisukarpeen suurimmat vauriot sijoittuvat molempina tutkimusvuosina Hammaslahden–Joensuun väliselle vyöhykkeelle, Uimaharjuun ja Nurmeksen ja Lieksan keskusta-alueille. Molempina tutkimusvuosina valtaosa tutkimusalueesta oli lajistoltaan lievästi köyhtynyttä. Vuoden 2020 tutkimuksessa luonnontilaisen sormipaisukarpeen osuus väheni. Myös jäkälälajistoltaan köyhtyneimmät alueet sijoittuivat molempina tutkimusvuosina pääosin samoille seuduille, eli tutkimusalueen pohjoisrajalle, Uimaharjuun, Lieksan ja

Joensuun keskusta-alueille ja Kiteen kaupungin alueelle, mutta myös uusia köyhtyneitä alueita ilmaantui mm. Liperiin, Kiteelle, Kontiolahdelle, Polvijärvelle ja Ilomantsiin. Lisäksi vuoden 2020 tutkimuksessa köyhtyneimmän lajiston alueet olivat hieman laajempia kuin edellisessä tutkimuksessa vuonna 2010. Köyhtyneimmän lajiston alueen laajenemista oli havaittavissa erityisesti Kuopion tiellä Joensuusta Kuopioon päin.

Kaiken kaikkiaan jäkälämuuttujissa havaittiin muutoksia huonompaan suuntaan tutkimusvuosien välillä, mutta muutokset olivat lieviä. Rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöt ovat kuitenkin vähentyneet Pohjois-Karjalan maakunnan alueella tutkimusvuosien 2010 ja 2020 välillä. Vähentyminen on ollut kuitenkin vähäisempää kuin aiempien tutkimusvuosien välillä. Jäkälät reagoivat herkästi juuri ympäristön tilan muutokseen.

Lisäksi talvilämpötilojen nousu niin, että lämpötila vaihtelee nollan asteen molemmin puolin, vaikeuttaa myös epifyyttijäkälien talvehtimista, ja nollan lähellä tapahtuva jäätyminen voi tappaa jäkäliä (Bjerke 2011). Muutokset talviolosuhteissa saattavat olla osalle lajeista merkittävämpiä kuin muutokset kesäolosuhteissa. Jäkälät ovat kuitenkin ääreisiin olosuhteisiin sopeutuneita (Werth 2011), joten ne kestävät hyvin ääriämpötiloja ja kuivuutta (Beckett ym. 2008). Esimerkiksi talvi 2019-2020 oli Pohjois-Karjalassa poikkeuksellisen leuto (Vuoden 2020 sää, FMI 2021).

Hajapäästöjä aiheuttavan toiminnan (esim. liikenne ja maatalouden) lisääntyminen ja metsätaloustoiminta tutkimusalueella voi myös osittain selittää tutkimusvuosien välisiä lieviä muutoksia jäkälälajistossa ja jäkälien kunnossa tausta-alueilla. Juuan kunnan alueella jo toimintansa lopettaneen turkistarhan päästöt ovat vaikuttaneet selvästi läheisen havaintoalan jäkäliin, ja vaikutus näkyi vielä tässä tutkimuksessakin, myös puuston ikä (varjostus) vaikuttaa osaltaan jäkälälajiston palautumiseen.

Bioindikaattoriseurantaa olisi jatkossa hyvä toteuttaa koko maakunnan laajuisena vähintään 10 vuoden välein. Alueen merkittävien pistemäisten päästölähteiden ja kaivosten läheisyydessä seurantaväli voisi olla lyhyempikin. Tällöin päästäisiin hyvin käsiksi paikallisen ilmanlaadun muutoksiin ja muutosten vaikutuksiin lyhyellä aikavälillä.

# Lähdeluettelo

- Alan T. Arnholt and Ben Evans (2017). BSDA: Basic Statistics and Data Analysis. R package version 1.2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=BSDA>
- Beckett, R.P., Kranner, I., Minibayeva, F.V., 2008. Stress physiology and the symbiosis. In: Nash, T.H. (Ed), Lichen Biology, 2nd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 134e151.
- Berg, T., Royset, O. & Steinnes, E. 1995b. Moss (*Hylocomium splendens*) uses as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies. *Atmospheric Environment* 29 (3): 353-360.
- Bjerke, J. W. (2011) Winter climate change: Ice encapsulation at mild subfreezing temperatures kills freeze-tolerant lichens. *Environmental and Experimental Botany* 72: 404–408.
- Carslaw ja Ropkins 2012: Carslaw, D. C. and K. Ropkins, (2012) openair --- an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*. Volume 27-28, 52-61.
- Corine 2018: Lupatekstitt: Lähde: SYKE (osittain LUKE, MAVI, LIVI, DVV, EU, MML Maastotietokanta 01/2017) Vektoriaineisto Lähde: SYKE, EEA, EU/Copernicus. Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen [http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin\\_tieto/Kayttolupa\\_ja\\_vastuut](http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Kayttolupa_ja_vastuut)
- EEA 2020: Interpolated air quality data, vuodelle 2017. Viimeksi muutettu 10.11.2020. Saatavilla osoitteesta <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/interpolated-air-quality-data-2>
- Fox ja Bouchet-Valat 2020: Fox, J., and Bouchet-Valat, M. (2020). Rcmdr: R Commander. R package version 2.7-1. Fox, J. (2017). Using the R Commander: A Point-and-Click Interface to R. Boca Raton FL: Chapman and Hall/CRC Press. Fox, J. (2005). The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software*, 14(9): 1–42.
- Grömping, U. (2006). Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaimpo. *Journal of Statistical Software*, 17(1), 1--27.
- Haahla, A. Polojärvi, K., Niskanen, I., Laita, M. & Ellonen, T. 2006a. Keski-Suomen maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2005-2006. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 162. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. ISBN 951-39-2546-3.
- Haahla, A., Niskanen, I., Polojärvi, K., & Ellonen, T. 2006b. Etelä-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2005-2006. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 161. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. ISBN 951-401270-4.
- Huuskonen, I., Lehtonen, E. & Ellonen, E. 2009. Pyhäjärvisuudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2007-2008. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 175. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Huuskonen, I., Lehtonen, E., Keskitalo, T. & Laita, M. 2010. Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan ilmanlaadun bioindikaattorisuranta vuonna 2009. Uudenmaan elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskuksen julkaisuja 4/2010. Helsinki, 184 s.
- Johansson, P. (2008) Consequences of disturbance on epiphytic lichens in boreal and near boreal forests. *Biological Conservation* 141: 1933–1944.
- Jussila, I., Joensuu, E. & Laiho, P. 1999. Ilman laadun bioindikaattorisuranta metsäympäristössä. Ympäristöopas 59. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto. Edita, Helsinki.
- Kulmala, A., Leinonen, L., Ruoho-Airola, T., Salmi, T. & Waldén, J. 1998. Air quality trends in Finland. Ilmanlaatumittauksia, Air quality measurements. Ilmatieteen laitos, Helsinki. ISBN 951-697-488-0.
- Laita, M., Huuskonen, I., Haahla, A., Polojärvi, K. ja Ellonen, T. 2007. Turun seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 163. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.



- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Lehtonen, E., & Ellonen, T. 2008a. Vakka-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristötutkimuskeskuksen tiedonantoja 164. Jyväskylän yliopisto, ympäristötutkimuskeskus.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Lehtonen, E., & Ellonen, T. 2008b. Länsi-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Jyväskylän yliopisto, ympäristötutkimuskeskus.
- LeBlanc, F. & DeSloover, J. 1970. Relation between industrialisation and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.* 48: 1485-1496. ISSN 0008-4026.
- Lehtonen ym. 2011: Lehtonen, E., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Nevalainen, S. ja Laita, M., 2011. Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2010. Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 2/2011.
- Lodenius ym. 2002. 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.
- Niskanen ym. 1996. Niskanen, I., Veijola, H. & Ellonen, T. 1996. Pääkaupunkiseudun ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 1996. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996: 17.
- Niskanen ym. 2003a. Niskanen, I., Polojärvi, K., Witick, A., Haahla, A. & Laitakari, V. 2003a. Kokkolan seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuonna 2002. Ympäristötutkimuskeskuksen tiedonantoja 156. Jyväskylän yliopisto. ISBN 951-39-1583-2.
- Polojärvi, K., Niskanen, I., Haahla, A. & Ellonen, T. 2005a. Mittaustarkkuus mäntyjen runkojäkälistön ja sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioiden havainnoinnissa. Jyväskylän yliopisto, ympäristötutkimuskeskus. Tutkimusraportti 89/2005.
- Pohjois-Karjalan ympäristökeskus 2009. Pohjois-Karjalan ympäristön tila 2008.
- R Core Team (2020): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ranta, E., Rita, H. ja Kouki, J. 1989. *Biometria*. Helsinki, Yliopistopaino, 569 s. ISBN 951-570-032-9.
- Ruuth ym. 2016: Ruuth, J., Toivanen, H., Kuhmonen, I. & Kiljunen, A., Porin–Harjavallan alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2014–2015. Nab Labs Oy, Tutkimusraportti 31/2016.
- Ruuth ja Keskitalo 2021: Ruuth, J. & Keskitalo, T., Uudenmaan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2020. Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2021 (julkaisussa).
- Väylävirasto 2021: Liikennemääräkarta, avoin data, lisenssi CC-BY. Saatavilla osoitteesta <https://julkinen.vayla.fi/webgis-sovel-lukset/webgis/template.html?config=liikenne>
- Werth, S. (2011) Biogeography and phylogeography of lichen fungi and their photobionts. Ss. 191–208 teoksessa: Fontaneto, F. (toim.): Biogeography of microscopic organisms. Is everything small every-where? Cambridge University Press, Cambridge.

Julkaisusarjan nimi ja numero <b>Raportteja 15/2021</b>				
Vastuualue <b>Ympäristö ja luonnonvarat</b>				
Tekijät <b>Janne Ruuth, Toni Keskitalo, Tuomas Talvitie, Kari T. Korhonen</b>		Julkaisu-aika <b>Toukokuu 2021</b>		
		Kustantaja   Julkaisija <b>Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus</b>		
		Hankkeen rahoittaja   toimeksiantaja <b>Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus</b>		
Julkaisun nimi <b>Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattorisuranta vuonna 2020</b>				
Tiivistelmä <p>Ilmanlaatua on seurattu Pohjois-Karjalan alueen kunnissa 1980-luvulta lähtien käyttäen ilmentäjinä havupuita ja niiden rungoilla kasvavia jäkäläitä. Vuonna 1998 seuranta toteutettiin ensimmäisen kerran koko maakunnan laajuisena. Vuonna 2020 ilmanlaatua arvioitiin männyn epifyyttijäkälien esiintymisen ja kunnan sekä sammalten alkuainepitoisuuksien perusteella koko Pohjois-Karjalan maakunnan alueella.</p> <p>Tutkimusalueen päästömäärät ovat laskeneet selvästi 1980- ja 1990-luvulta 2000-luvulle tultaessa, mutta 2000-luvulla etenkin rikkidioksidien ja hiukkasten päästökehitys on ollut aaltomaista. Myös liikenteen rikkidioksidien, typen oksidien ja hiukkasten päästöt ovat vähentyneet selvästi tarkasteluajanjaksolla. Ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ovat pääasiassa laskeneet 2000-luvulla, mutta laskeva kehitys on tasaantunut 2010- ja 2020-lukuihin tultaessa. Tässä tutkimuksessa tutkimusalueen suurimmat päästölähteet sijaitsivat Joensuussa, Liperissä ja Kontiolahdella.</p> <p>Ilman epäpuhtauksien vaikutukset ilmanlaatua kuvaaviin jäkälämuuttujiin olivat koko Pohjois-Karjalan maakunnan mittakaavassa lieviä ja erityisesti tausta-alueilla vaikutukset olivat vähäisiä. Päästölähteiden ympäristössä vaikutukset olivat selvempiä, mutta laajuudeltaan melko pieniä. Vuonna 2020 sormipaisukarpeen vauriot olivat tutkimusalueella keskimäärin lieviä. Terveintä sormipaisukarvetta kasvoi Kesälähdellä, Hattuvaarassa ja Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa. Vaurioituneinta sormipaisukarve oli Joensuun keskustaajamasta Hammaslahteen ulottuvalla vyöhykkeellä ja Juuan kunnan keskiosassa sekä Nurmeksen keskustaajamassa ja Uimaharjun keskustaajamassa. Tutkimusalueen pohjois- ja itäosissa jäkälälajisto oli laajalti luonnontilaista ja lounais- ja keskiosassa köyhtynyttä. Monipuolisista ja luonnontilaisista jäkäläyhteisöistä tutkimusalueella oli Ilomantsissa, Kontiolahdella, Nurmeksessa ja Outokummussa ja köyhtynein puolestaan Joensuun ja Rääkkylän alueella.</p> <p>Korkeimmat sammalten alkuainepitoisuudet tutkimusalueella määritettiin päästölähteiden läheisyydestä. Tilastollisten analyysien perusteella tutkimusalueelta löydettiin merkittävimmät raskasmetallien ja muiden alkuaineiden päästölähteet, joita olivat lämpölaitokset sekä kaivokset ja kaivostuotteiden jatkojalostuslaitokset. Tulosten perusteella sammalten raskasmetallipitoisuudet Pohjois-Karjalassa edustavat suhteellisen puhtaan tausta-alueen pitoisuuksia.</p> <p>Verrattuna vuonna 2010 toteutettuun tutkimukseen, sormipaisukarpeen vauriot olivat hieman kasvaneet, levä yleistynyt ja ilman epäpuhtauksille herkät lajit harvinaistuneet tutkimusalueella, mutta kokonaisuudessaan muutokset vuosien välillä olivat lieviä. Vaurioituneimman sormipaisukarpeen ja köyhtyneimmän lajiston vyöhykkeet sijoittuivat pääosin samoille alueille molempina tutkimusvuosina eli Joensuun-Hammaslahden väliselle alueelle, Uimaharjuun, Kiteelle ja Nurmeksen ja Lieksan keskusta-alueille, mutta vuonna 2020 köyhtyneimmän lajiston vyöhykkeet olivat selkeästi laajempia. Päästömäärien lievä kasvu 2000-luvun loppuvuosina ja lisääntynyt liikenne on voinut vaikuttaa jäkäläin. Päästömäärät ovat olleet 2010-luvulla olleet vain hieman pienempiä kuin 2000-luvulla. Hajapäästöjä aiheuttavan toiminnan (esim. kaivostoiminta, turvetuotanto ja maatalous) lisääntyminen tutkimusalueella voi myös osittain selittää tutkimusvuosien välisiä lieviä muutoksia jäkälälajistossa ja jäkäläin kunnossa tausta-alueilla. Lisäksi 2000-luvulla lisääntyneiden sääolojen äärevöitymisellä voi olla merkitystä jäkäläin kuntoon ja esiintymiseen.</p>				
Asiasanat (YSA:n mukaan) <b>bioindikaattorit, jäkälät, ilmanlaatu, ympäristön tila, seuranta, Pohjois-Karjala</b>				
ISBN (painettu) <b>978-952-314-917-5</b>	ISBN (PDF) <b>78-952-314-918-2</b>	ISSN-L <b>2242-2846</b>	ISSN (painettu) <b>2242-2846</b>	ISSN (verkkojulkaisu) <b>2242-2854</b>
www <b>www.doria.fi/ely-keskus</b>		URN <b>URN:ISBN: 978-952-314-918-2</b>	Kieli <b>Suomi</b>	Sivumäärä <b>106</b>
Julkaisun myynti/jakaja <b>Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, PL 69, 80101 Joensuu, puhelinvaihe: +358 295 026 000, sähköposti: kirjaamo.pohjois-karjala@ely-keskus.fi</b> <b>Julkaisu on Kansalliskirjaston ylläpitämässä julkaisuarkistossa Doria: <a href="http://doria.fi/ely-keskus">doria.fi/ely-keskus</a></b>				
Kustannuspaikka ja aika <b>Joensuu 2021</b>			Painotalo <b>Scanseri Oy</b>	

**RAPORTEJA 15 | 2021**

**POHJOIS-KARJALAN MAAKUNNAN ILMANLAADUN BIOINDIKAATTORISEURANTA VUONNA 2020**

**POHJOIS-KARJALAN ELINKEINO-, LIIKENNE- JA YMPÄRISTÖKESKUS**

**PAINOTALO: SCANSERI OY**

**ISBN 978-952-314-917-5 (PAINETTU)**

**ISBN 978-952-314-918-2 (PDF)**

**ISSN 2242-2846**

**ISSN 2242-2846 (PAINETTU)**

**ISSN 2242-2854 (VERKKOJULKAISU)**

**URN:ISBN: 978-952-314-918-2**

**WWW.DORIA.FI/ELY-KESKUS**