



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2010

POHJOIS-KARJALAN MAAKUNNAN ILMANLAADUN BIOINDIKAATTORISEURANTA VUONNA 2010

Emmi Lehkonen, Irene Huuskonen, Toni Keskitalo, Seppo Nevalainen,
Jarmo Poikolainen ja Mika Laita

2/2011

Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne-
ja ympäristökeskuksen julkaisu

ISBN 978-952-257-322-3 (painettu)
ISBN 978-952-257-323-0 (PDF)

ISSN-L 1799-2524
ISSN 1799-2524 (painettu)
ISSN 1799-2532 (verkkajulkaisu)

Julkaisu on saatavana myös verkkajulkaisuna:
<http://www.ely-keskus.fi/pohjois-karjala/julkaisut>

Taitto: Marjo Saarinen
Valokuvat: Irene Huuskonen ja Emmi Lehtonen
Kartat: Pohjakartat © Karttakeskus Oy, lupa L9123/11
CLC2000 maankäyttö/maanpeite (yleistetty 25 ha) © SYKE, EEA
CLC2000 aineiston tuotannossa on käytetty seuraavien tiedon tuottajien aineistoja:
SYKE, MML, MMM (pelto tiedot 1999), VRK (rakennetut alueet 2001) ja satelliittikuvi-
en tulkinnassa hyödynnetty Metsähallituksen ja UPM Kymmene Oy:n aineistoja.
Paino: Kopijyvä Oy, Jyväskylä 2011

TIIVISTELMÄ

Ilmanlaatua on seurattu Pohjois-Karjalan alueen kunnissa 1980-luvulta lähtien käyttäen ilmentäjinä havupuita ja niiden rungoilla kasvavia jäkäliä. Vuonna 1998 seuranta toteutettiin ensimmäisen kerran koko maakunnan laajuisena. Vuonna 2010 ilmanlaatua arvioitiin männyn epifyyttijäkälien esiintymisen ja kunnan sekä sammalten ja neulasten alkuainepitoisuuksien perusteella koko Pohjois-Karjalan maakunnan alueella.

Tutkimusalueen päästömäärät ovat laskeneet selvästi 1980- ja 1990-luvuilta 2000-luvulle tultaessa, mutta 2000-luvulla etenkin rikkidioksidien ja hiukkasten päästökehitys on ollut aaltomaista. Myös liikenteen rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöt ovat vähentyneet selvästi tarkasteluajanjaksolla. Ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ovat pääasiassa laskeneet 2000-luvulle tultaessa verrattuna 1980- ja 1990-lukuihin. Tutkimusalueen suurimmat päästölähteet sijaitsevat Joensuussa, Lieksassa ja Kiteellä.

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. Terveintä sormipaisukarvetta tutkimusalueella kasvoi Kesälahdella, paikoin Kiteellä, Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa ja Kiihtelysvaarassa, Ilomantsissa sekä Valtimon ja Nurmeksen pohjoisosissa. Vaurioituneinta sormipaisukarve oli Joensuun keskustaajamasta Hammaslahden ulottuvalla vyöhykkeellä, Juuan kunnan keskiosassa ja Nurmeksen keskustaa- jamasta Valtimon kunnan eteläosaan ulottuvalla vyöhykkeellä. Tutkimusalueen pohjoisosissa jäkälälajisto oli laajalti luonnontilaista ja etelä- ja keskiosassa lievästi köyhtynyttä. Monipuolisin ja luonnontilaisin jäkäläyhteisö tutkimusalueella oli Kesälahden, Kontiolahden ja Valtimon kuntien alueella ja köyhtynein puolestaan Joensuun, Kiteen ja Rääkkylän alueella.

Korkeimmat sammalten alkuainepitoisuudet tutkimusalueella määritettiin päästölähteiden läheisyydestä. Tilastollisten analyysien perusteella tutkimusalueelta löydettiin merkittävimmät raskasmetallien ja muiden alkuainei- den päästölähteet, joita olivat lämpölaitokset sekä kaivokset ja kaivostuotteiden jatkojalostuslaitokset. Tulosten perusteella sammalten raskasmetallipitoisuudet Pohjois-Karjalassa edustavat suhteellisen puhtaan tausta- alueen pitoisuuksia.

Kuusen harsuuntuminen oli Pohjois-Karjalassa tilastollisesti merkitsevästi vähäisempää kuin muualla maan eteläosissa. Männyn harsuuntuminen ei poikennut muun Etelä-Suomen arvoista. Erilaiset tuhot ja puiden ikä selittävät suuren osan havupuiden harsuuntumisen vaihtelusta. Neulasten rikkipitoisuuksissa ei ollut tapahtunut merkittävää muutosta tutkimusalueen merkittävimpien päästölähteiden läheisyydessä vuoden 1998 tutkimuk- seen verrattuna, kun otetaan huomioon neulashavaintoalojen toisistaan poikkeava sijoittelu eri tutkimusvuosina.

Verrattuna vuonna 1998 toteutettuun tutkimukseen, sormipaisukarpeen vauriot olivat hieman kasvaneet, levä yleistynyt ja ilman epäpuhtauksille herkät lajit harvinaistuneet tutkimusalueella, mutta kokonaisuudessaan muu- tokset 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 2010 köyhtyneimmän lajiston vyöhykkeet olivat hieman laajempia. Päästömäärien lievä kasvu 2000-luvun loppuvuosina on todennäköisesti vaikuttanut jäkäliin ja vaikutus näkyi vielä tässä tutkimuksessa, vaikka päästömäärät ovatkin 2000-luvulla ol- leet pienempiä kuin 1990-luvulla. Hajapäästöjä aiheuttavan toiminnan (esim. kaivostoiminta, turvetuotanto ja maatalous) lisääntyminen tutkimusalueella voi myös osittain selittää tutkimusvuosien välisiä lieviä muutoksia jäkälälajistossa ja jäkälien kunnossa tausta-alueilla.



Sisältö

1. Johdanto	7
2. Tutkimusalue	9
2.1 Yleiskuvaus	9
2.2 Tutkimusalueen ilmanlaatu	11
2.2.1 Päästöt	11
2.2.2 Ilmanlaatu tausta-asevilla	20
3. Tutkimusaineisto ja –menetelmät	23
3.1 Havaintoalat	23
3.2 Tutkimusryhmä ja maastotöiden ajankohta	27
3.3 Havupuiden epifyyttijäkälien kartoittaminen	27
3.4 Jäkäläkartoituksen virhelähteet ja luotettavuus	32
3.5 Neulasnäytteiden kerääminen ja alkuainepitoisuuksien analysointi	33
3.5.1 Neulasten alkuainepitoisuuksien kartoittamiseen liittyvät virhelähteet ja luotettavuus	34
3.6 Sammalnäytteiden alkuainepitoisuudet ja niiden määrittäminen	35
3.6.1 Ympäristöntutkimuskeskuksen sammalnäytteet	36
3.6.2 Metsäntutkimuslaitoksen sammalnäytteet	37
3.7 Metsien terveydentilan seuranta	37
3.8 Paikkatietomenetelmät	37
3.9 Tilastomenetelmät	38
3.9.1 Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot	38
3.9.2 Vuosien väliset vertailut	38
3.9.3 Regressioanalyysi	38
3.9.4 Pääkomponenttianalyysi	39
4. Tulokset	41
4.1 Mäntyjen runkojäkälät	41
4.1.1 Sormipaisukarpeen vaurioaste	41
4.1.2 Yleinen vaurioaste	44
4.1.3 Jäkälälajien määrät ja yleisyys	46
4.1.4 Peittävydet	53
4.1.5 IAP-indeksi	55
4.2 Neulasten rikkipitoisuus	57
4.3 Sammalten alkuainepitoisuudet	59
4.4 Metlan valtakunnallisten seurantojen tulokset	67
4.4.1 Sammalten alkuainepitoisuudet	67
4.4.2 Metsien terveydentila	72
5. Tulosten tarkastelu	77
5.1 Taustamuuttujien vaikutus	77
5.2 Tutkittujen muuttujien välinen riippuvuus	79
5.3 Regressioanalyysit	82

5.3.1 IAP-indeksi	83
5.3.2 Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajit	83
5.3.3 Sormipaisukarpeen vaurioaste.	84
5.3.4 Yleinen vaurioaste	84
5.3.5 Sormipaisukarpeen peittävyys.	85
5.4 Pääkomponenttianalyysi	85
5.5 Yhteenveto	88
6. Vertailu	89
6.1 Vuosien välinen vertailu	89
6.1.1 Mäntyjen epifyyttijäkälät	89
6.1.2 Männyn neulasten rikkipitoisuus.	96
6.2 Vertailu muualla Suomessa tehtyihin tutkimuksiin sekä alueen kuntien välillä	96
6.2.1 Mäntyjen runkojäkälät.	96
6.2.2 Sammalten alkuainepitoisuudet	97
7. Johtopäätökset	99

1. Johdanto

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, Värsilää 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 jäkälien alkuainepitoisuuksia (Niskanen ym. 1999).

Vuonna 2009 Pohjois-Karjalan ympäristökeskus käynnisti uuden bioindikaattoriselvityksen valmistelun. Valmisteluun osallistui myös ympäristökeskuksen, vuodesta 2010 ELY-keskuksen, sidosryhmistä koostuva ympäristön seurannan yhteistyöryhmä. Ilmanlaadun bioindikaattoriselvitystä koordinoi Pohjois-Karjalan ELY-keskus vuosina 2010-2011. Työn tekijäksi valittiin kilpailutuksen perusteella Jyväskylän yliopiston Ympäristöntutkimuskeskus. Lisäksi selvitykseen saatiin mukaan Metsäntutkimuslaitoksen valtion metsien inventointiaineistoja. Ilmanlaadun bioindikaattoriselvitystä ohjasi ryhmä, jonka puheenjohtajana oli ylitarkastaja Juha Aho Pohjois-Karjalan ELY-keskuksesta ja jäsenenä olivat ympäristönsuojelupäällikkö Jari Leinonen Joensuun kaupungista, kehityspäällikkö Teppo Rovio Enocell Oy:stä, erikoistutkija Kari T. Korhonen Metsäntutkimuslaitoksen Itä-Suomen yksiköstä ja sihteerinä limnologi Riitta Niinioja Pohjois-Karjalan ELY-keskuksesta. Vuonna 2010 tutkimus toteutettiin samoilla tutkimusaloilla kuin edeltävä tutkimus, mutta seurantaverkko harvennettiin 300 tutkimusalaan.

Tutkimukseen osallistui 14 Pohjois-Karjalan kuntaa, jotka myös rahoittivat tutkimusta. Lisäksi tutkimukseen osallistuivat seuraavat yritykset ja viranomaistahot:

- Fortum Power and Heat Oy: Joensuun voimalaitos (Joensuu), Noljakan lämpökeskus (Joensuu), Utran lämpökeskus (Joensuu), Ukonmäen lämpökeskus (Joensuu), Pötkän lämpökeskus (Joensuu), Käpykankaan lämpökeskus (Joensuu), Keskussairaalan lämpökeskus (Joensuu), Hukanhaidan lämpökeskus (Joensuu), Hasanniemen lämpökeskus (Joensuu), Rantakylän lämpökeskus (Joensuu), Kontiorannan lämpökeskus (Kontiolahdi), Uimaharjun voimalaitos (Joensuu), Ylämyllyn lämpökeskus (Liperi)
- Vapo Oy, Tohmajärven lämpökeskus (Tohmajärvi), Hammaslahden aluelämpökeskus (Joensuu) Kevätniemen voimalaitos (Lieksa), Rantakylän lämpökeskus (Lieksa), Teollisuuskylän lämpökeskus (Lieksa), Rääkkylän lämpökeskus (Rääkkylä), Teollisuustien lämpökeskus (Ilomantsi)
- Stora Enso Oyj, Enocell Oy (Joensuu)
- Outokummun Energia Oy, Lämpökeskus Miilu (Outokumpu)
- Valtimon kunta, lämpökeskus (Valtimo)
- Nurmeksen Lämpö Oy: Lämpökeskus Ritonieniemi (Nurmes), Lämpökeskus Vinkerlahti (Nurmes)
- Kiteen Lämpö Oy, Arppen lämpökeskus (Kitee)
- Mondo Minerals Oy B.V. Branch Finland: Vuonoksen tehdas (Outokumpu), Karnukan kaivos (Polvijärvi, ei vielä tuotannossa), Vasarakankaan kaivos (Polvijärvi, ei vielä tuotannossa), Horsmanahon kaivos (Polvijärvi)
- Kylylahti Copper Oy, Kylylahden kaivos (Polvijärvi)
- Pankaboard Oy (Lieksa)
- Momentive Specialty Chemicals Oy, Puhoksen tehdas (Kitee)
- Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Kiteen saha (Kitee)
- Dynea Chemicals Oy, Kitee tehdas (Kitee)
- Puhos Board Oy, Puhoksen lastulevytehdas (Kitee)
- Abloy Oy, Joensuun tehdas (Joensuu)
- Valio Oy, Joensuun tehdas (Joensuu)

- Finavia Oyj, Joensuun lentoasema (Joensuu)
- UPM-Kymmene Wood Oy, Joensuun vaneritehdas (Joensuu)
- Karelia-Upofloor Oy, Tuupovaaran tehdas (Joensuu)
- PunaMusta Oy (Joensuu)
- Lemminkäinen Oyj, Asfalttiasema (Joensuu)
- NCC Roads Oy, Asfalttiasema ja kivenmurskaamo (Joensuu)
- Karjalan Tekstiilipalvelu Oy (Joensuu)
- Tulikivi Oy, Tulikivi-kaivospiirin louhokset ja jatkojalostuslaitokset (Juuka)
- Nunnanlahden Uuni Oy, louhos ja jatkojalostulaitos (Juuka)
- Juuan Dolomiittikalkki Oy, Mataran louhos ja jatkojalostuslaitos (Juuka)
- Amcor Flexibles Finlad Oy, Lieksan tehdas (Lieksa)
- Puutarha Päivänpaiste Ay, Lämpökeskus (Liperi)
- Höljäkkä Oy, Kyllästämön lämpökeskus (Nurmes)
- Endomines Oy, Pampalon kultakaivos ja rikastamo (Ilomantsi)
- Pohjois-Karjalan maakuntaliitto
- Pohjois-Savon ELY-keskus/Liikenne ja infrastruktuuri –vastuualue
- Liikennevirasto

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 2010 seurannassa ilman epäpuhtauksien vaikutuksien ilmentäjinä käytettiin männyillä kasvavia runkojäkäliä, sammalten alkuainepitoisuuksia ja neulasten rikkipitoisuuksia. Seuranta toteutettiin 300 havaintoalalla. Epifyyttijäkälälajiston esiintyminen, runsaus ja kunto havainnoitiin 5 männyltä jokaiselta havaintoalalta. Sammalten alkuainepitoisuudet määritettiin 100 havaintoalalta ja neulasten rikkipitoisuuksia määritettiin merkittävimpien päästölähteiden läheisyydessä sijaitsevilta viideltä 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.

Tutkimuksen tuloksia verrattiin vuosina 1998–1999 toteutetun tutkimuksen tuloksiin (Niskanen ym. 1999) männyin runkojäkälien ja neulasten rikkipitoisuuden osalta. Tutkimuksessa selvitettiin myös sammalten alkuainepitoisuudet tutkimusalueella vuonna 2010. 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 päästö-määrien kehitykseen. Lisäksi tuloksia vertailtiin muualla Suomessa tehtyjen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimusten tuloksiin.

Metsäntutkimuslaitos (Metla) on tutkinut Pohjois-Karjalan metsien terveydentilaa ja sammalten raskasmetalli-, typpi- ja rikkipitoisuuksia osana valtakunnallista metsien seurantaa, jota on toteutettu pysyvillä koealoilla vuodesta 1985 lähtien. Metlan seurantatulokset vuosilta 1985–2010 koskien Pohjois-Karjalan metsien terveydentilaa ja sammalten raskasmetallipitoisuuksia esitetään tämän raportin osana, ja näitä tuloksia verrataan vuoden 2010 ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksen tuloksiin. Metlasta tutkimukseen osallistuivat Jarmo Poikolainen, Jouni Karhu ja Juha Piispanen Muhoksen yksiköstä sekä Seppo Nevalainen Joensuun yksiköstä.

Tutkimuksen toteutti Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskus. Maastotyöt tehtiin keväällä ja kesällä 2010, ja niihin osallistuivat tutkijat Irene Huuskonen ja Emmi Lehkonen, laboratorioinsinööri Tony Pirkola sekä tutkimusavustaja Kaisa Lampinen. Tutkijat Emmi Lehkonen, Irene Huuskonen, Toni Keskitalo ja Mika Laita analysoivat tutkimusaineiston ja laativat tämän tutkimusraportin.

2. Tutkimusalue

2.1

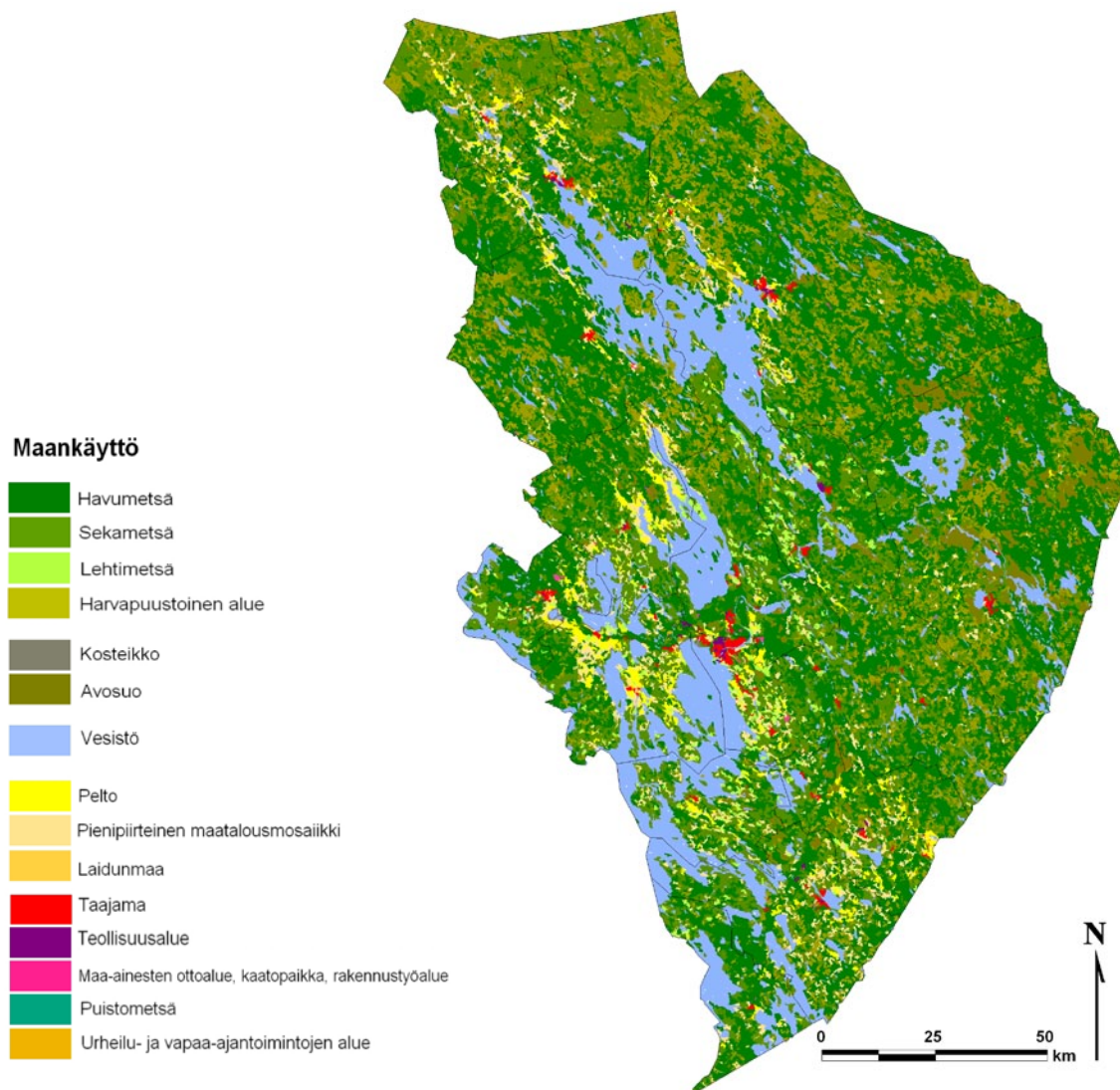
Yleiskuvaus

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 kohtausaluetta (Pohjois-Karjalan ympäristökeskus 2008).

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).

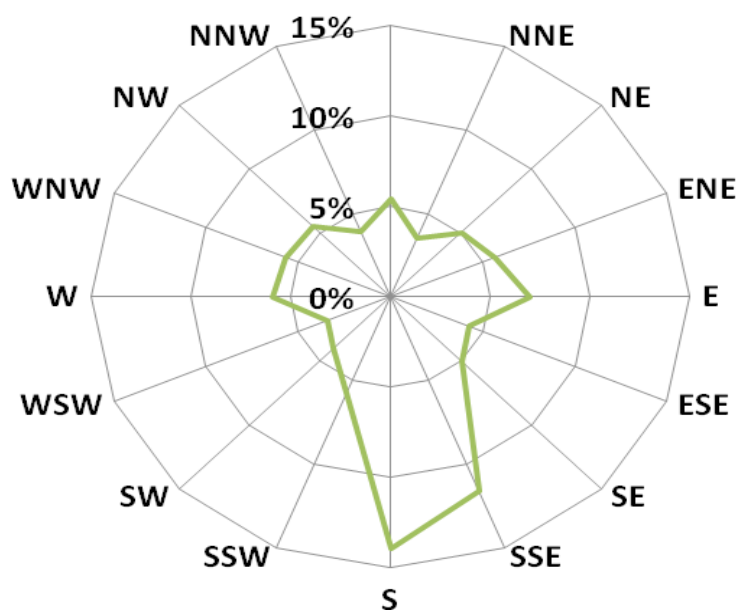


Kuva 1. Pohjois-Karjalan bioindikaattoriseurantaan vuonna 2010 osallistuneet kunnat.



Kuva 2. Maankäyttö Pohjois-Karjalan alueella (CLC2000 maankäyttö/maanpeite (yleistetty 25ha): © SYKE, EEA).

Pohjois-Karjalassa vallitsivat vuonna 2010 etelästä (13,9 %) ja eteläkaakosta (11,6 %) puhaltavat tuulet. Myös itätuulet olivat yleisiä (7,0 %). Tyyniä tunteja oli havaintoaineistosta 4,5 %. (Kuva 3.) (Gladstonefamily 2011.) Tuulitiedot on koottu METAR-tiedoista.



Kuva 3. Joensuun lentokentällä vuonna 2010 vallinneet tuulensuunnat (Gladstonefamily 2011).

2.2

Tutkimusalueen ilmanlaatu

2.2.1

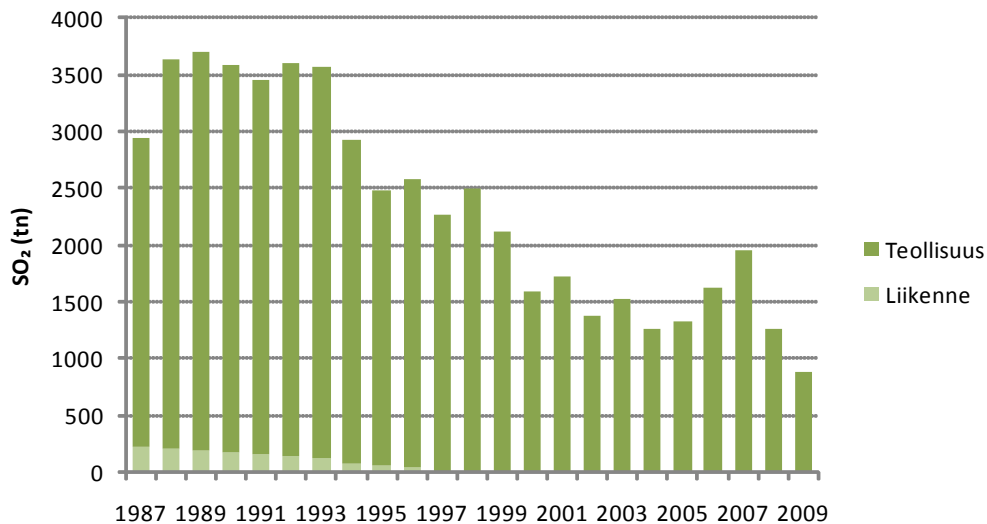
Päästöt

Tässä luvussa esitetään päästömäärien kehitys lupavelvollisten laitosten ja liikenteen osalta tutkimusalueella vuodesta 1987 alkaen (ympäristöhallinnon Vahti-tietokanta, LIISA-laskentajärjestelmä). Lisäksi esitetään kuntakohtaiset päästömäärät vuonna 2008 sekä lupavelvollisten päästölähteiden päästömäärät ja sijainnit vuonna 2009. Päästötiedot on koottu ympäristöhallinnon Vahti ja Hertta-tietojärjestelmistä. Pohjois-Karjalan ELY-keskus toimitti lupavelvollisten päästölähteiden sijaintitiedot (Aho 2010). Liikenteen päästötiedot on laskettu LIISA 2009-laskentamallin avulla, jossa on käytössä kertoimet aiempien vuosien päästöille.

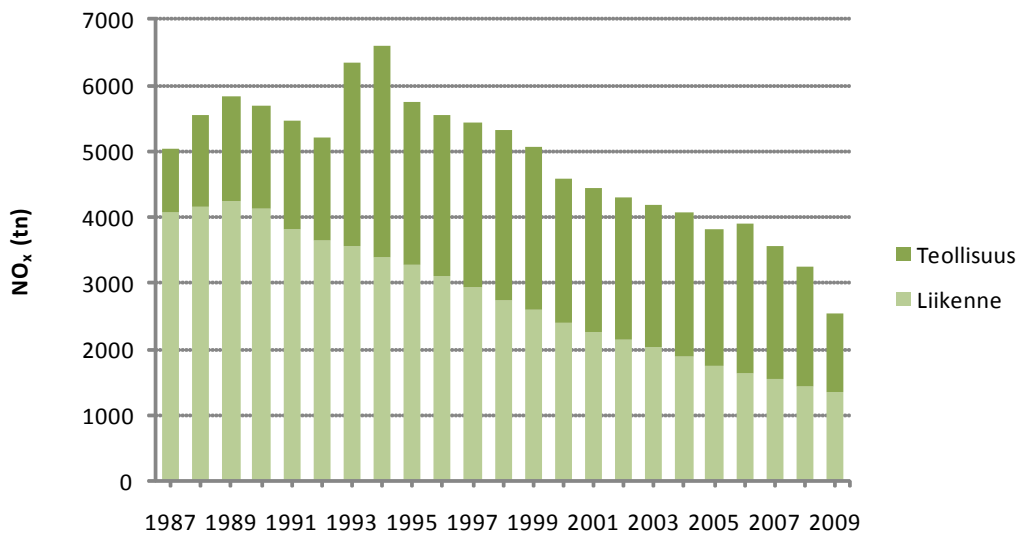
Kuvissa 4-6 on esitetty tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten sekä liikenteen päästöjen kehittyminen vuodesta 1987 vuoteen 2009 rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten osalta. Rikkidioksidin päästöt ovat laskeneet melko tasaisesti 1980-luvun lopulta 2000-luvun alkuun saakka. 2000-luvun alkupuolella 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. Liikenteen osuus rikkidioksidin päästöistä on koko tarkasteluajanjaksolla ollut hyvin pieni.

Typen oksidien päästöt ovat tarkasteluajanjakson alun kasvun jälkeen vähentyneet tasaisesti 2000-luvun loppuun saakka. Liikenteen osuus typen oksidien kokonaispäästömäärästä on 1980- ja 1990-lukujen vaihteessa ollut huomattava. Osuus on kuitenkin pienentynyt 2000-luvun loppupuolelle tultaessa puoleen kokonaispäästömäärästä.

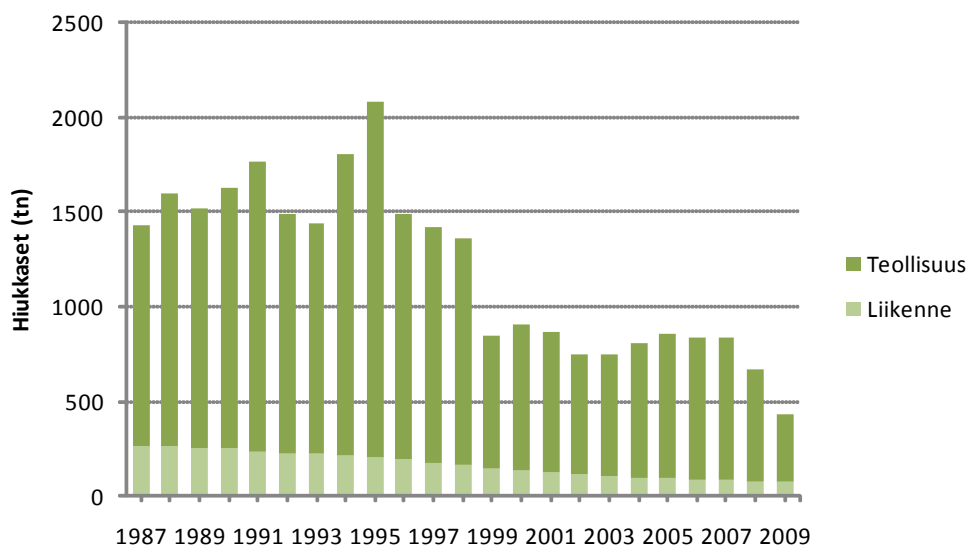
Hiukkaspäästöt ovat 2000-luvulle tultaessa pudonneet noin puoleen 1980-luvun lopun ja 1990-luvun päästömäärästä. Hiukkaspäästöt ovat 2000-luvulla pysytelleet jokseenkin samalla tasolla 600-700 tonnin tuntumassa, mutta vuonna 2009 kokonaishiukkaspäästöt putosivat alle 400 tonnin. Liikenteen osuus Pohjois-Karjalan hiukkaspäästöistä on pieni.



Kuva 4. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen rikkidioksidin päästöt (tn/v) vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, LIISA 2009).

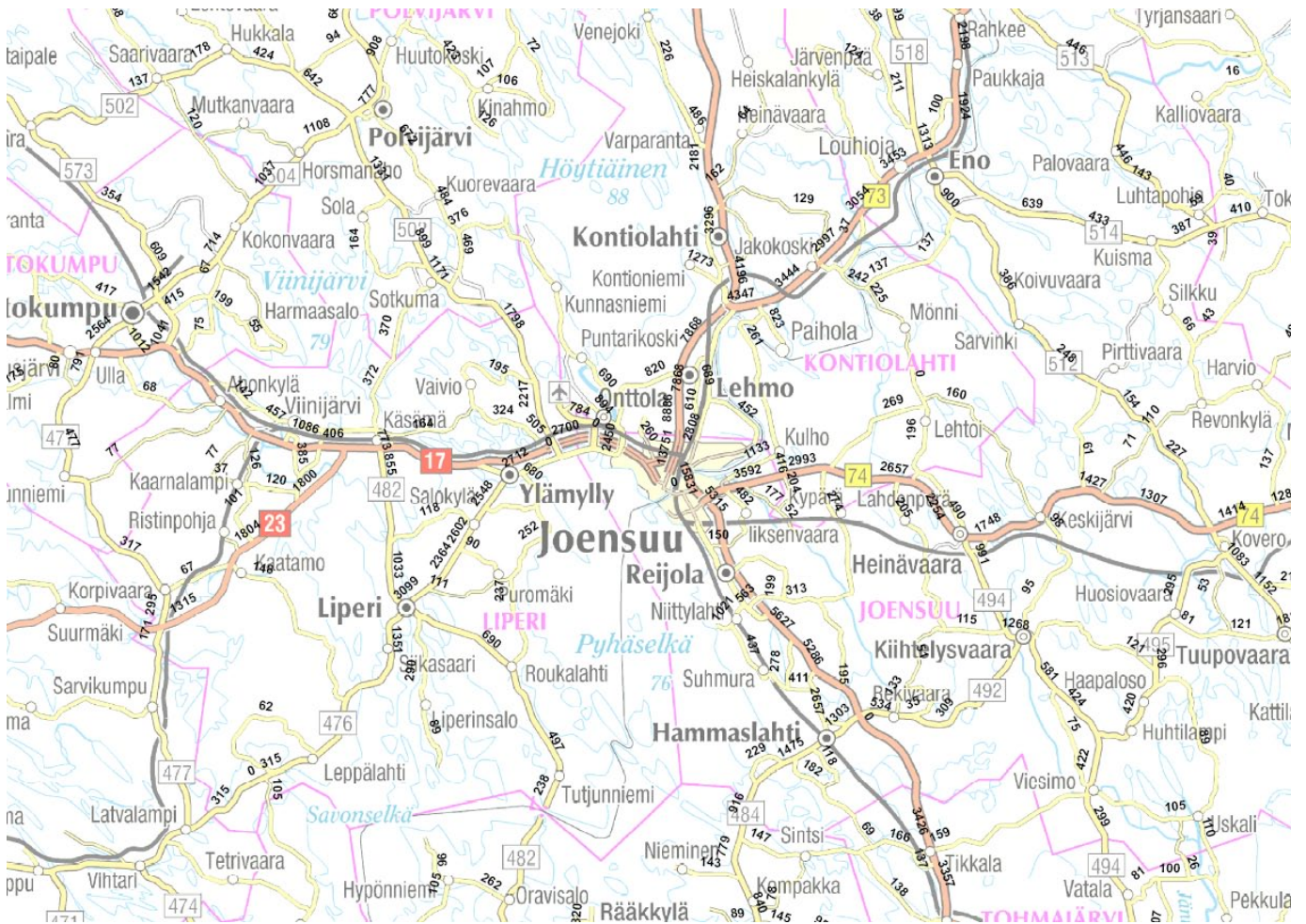


Kuva 5. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen typen oksidien päästöt (tn/v) vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, LIISA 2009).

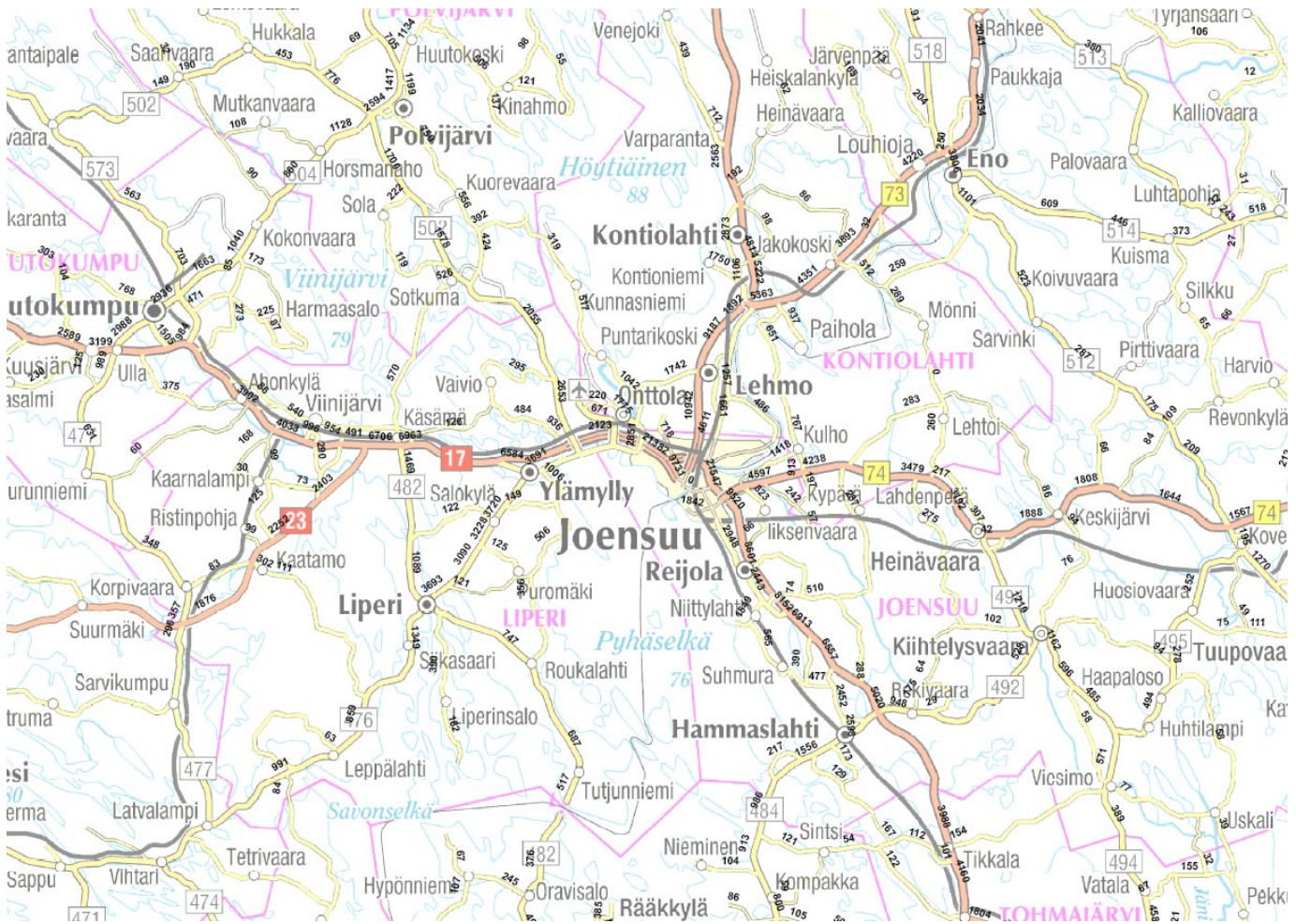


Kuva 6. Tutkimusalueen lupavelvollisten laitosten ja liikenteen hiukkaspäästöt (tn/v) vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, LIISA 2009).

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla vuosina 1998 ja 2010. Liikennemäärät ovat Joensuun seudulla kasvaneet tutkimusvuosien välillä. Esimerkiksi maakuntaa halkovalla 6-tiellä liikennemäärät ovat Joensuun eteläpuolella kasvaneet paikoin 16-24 % tutkimusvuosien välillä. Liperistä lounaaseen kulkevalla valtatie 23:lla liikennemäärät ovat paikoin kasvaneet 25-43 % vuodesta 1998 vuoteen 2010. Joensuusta länteen kulkevalla valtatie 9:lla liikennemäärät ovat kasvaneet Ylämyllyn kohdalla 36 % tutkimusvuosien välillä. (Kuvat 7 ja 8.) Liikennemäärät ovatkin Pohjois-Karjalassa kasvaneet kahden prosentin vuosivauhdilla aivan viime vuosiin asti. Liikennemäärän kasvusta huolimatta liikenteen päästöt ovat tarkastelu-ajanjaksolla tutkimusalueella pienentyneet (Kuvat 4-6).



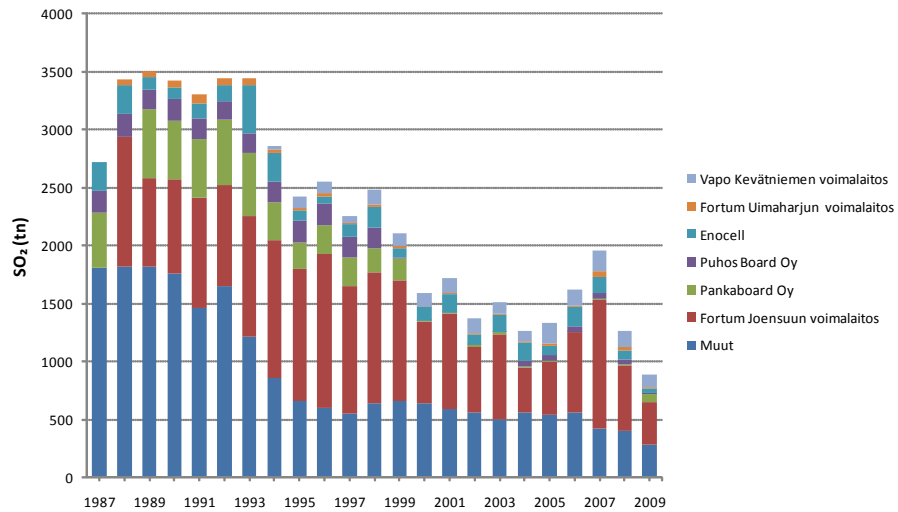
Kuva 7. Keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla vuonna 1998 (Hyttinen 2011).



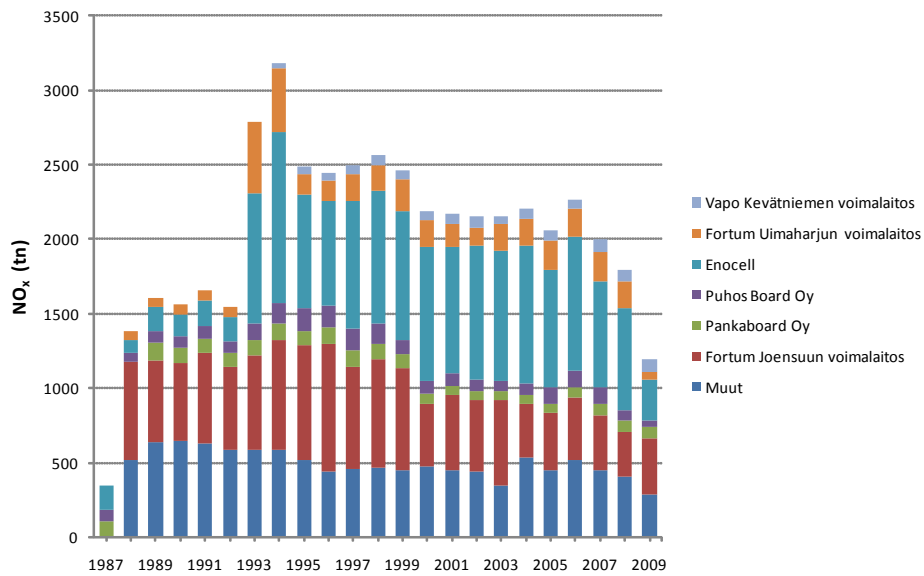
Kuva 8. Keskimääräinen vuorokausiliikenne Joensuun seudulla vuonna 2010 (Hyttinen 2011).

Rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöjen kehitys tutkimusalueella vuosina 1987–2009 päästöläheteittäin on esitetty kuvissa 9-11. Tutkimusalueen suurin rikkidioksidin päästölähde on Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun voimalaitos, jonka rikkidioksidin päästöt ovat kuitenkin tarkasteluajanajaksolla pienentyneet. Pankaboard Oy (Lieksa) on 1980-luvun lopussa ja 1990-luvulla ollut huomattava rikkidioksidin päästölähde, mutta 2000-luvulla laitoksen rikkidioksidin päästöt ovat olleet pieniä. Muita yksittäisiä rikkidioksidin päästölähteitä Pohjois-Karjalan alueella ovat Vapo Oy:n Kevätniemen voimalaitos (Lieksa), Fortum Power and Heat Oy:n Uimaharjun voimalaitos, Enocell Oy Uimaharjussa ja Puhos Board Oy (Kitee). Tutkimusalueen suurimmat typen oksidien päästölähteet ovat tarkasteluajanajaksolla olleet Enocell Oy sekä Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun ja Uimaharjun voimalaitokset, joiden typen oksidien päästöt ovat tarkasteluajanjakson loppua kohden pienentyneet. Suurimmat hiukkasten päästölähteet ovat tutkimusalueella olleet Enocell Oy ja Puhos Board Oy, joiden hiukkaspäästöt ovat vaihdelleet tarkasteluajanajaksolla paljon pienentyen kuitenkin jakson loppua kohti.

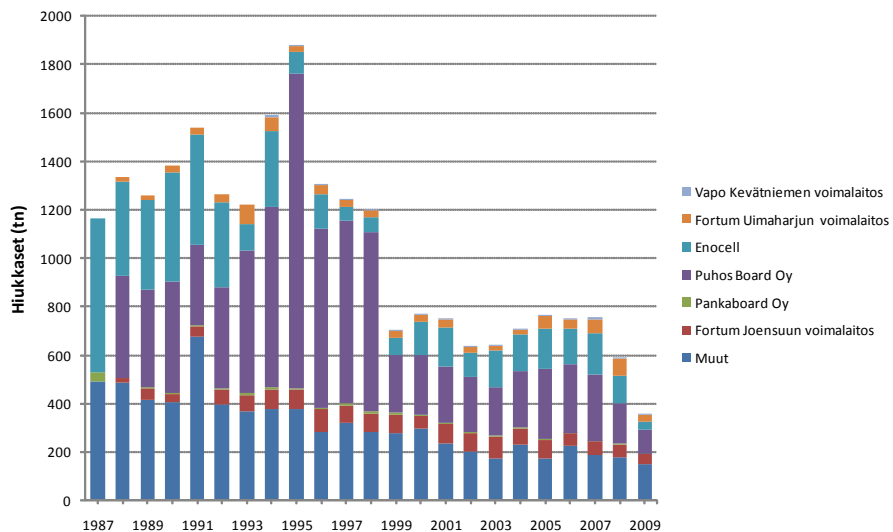
Kuvaan 12 on nimetty tutkimusalueen merkittävimmät rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästölähteet.



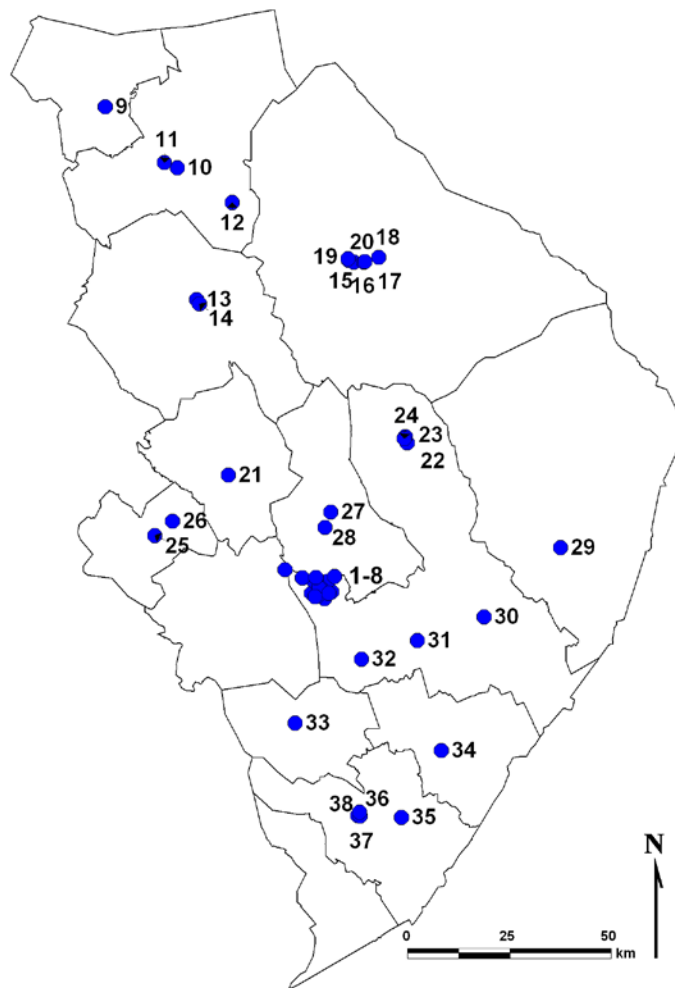
Kuva 9. Tutkimusalueen rikkidioksidin päästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011).



Kuva 10. Tutkimusalueen typen oksidien päästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011).



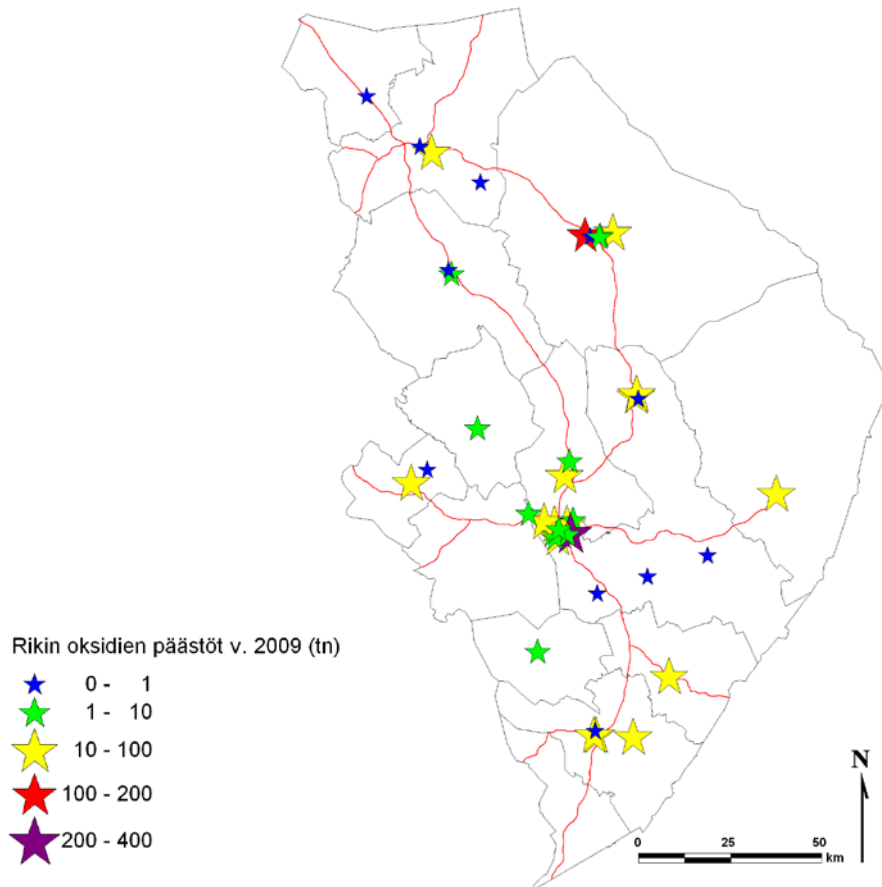
Kuva 11. Tutkimusalueen hiukkaspäästöt (tn/v) päästölähteittäin vuosina 1987–2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011).



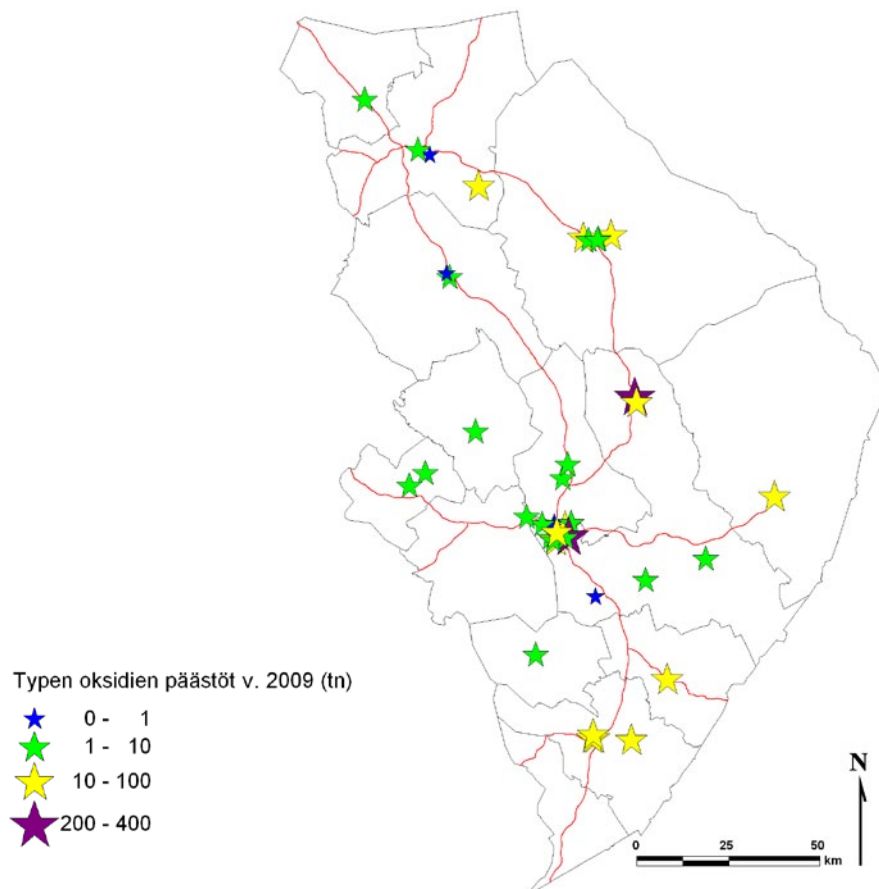
Kuva 12. Päästölähteet Pohjois-Karjalan alueella vuonna 2010.

Nro	Toimija	Nro	Toimija
1	Fortum Power and Heat Oy, Joensuun voimalaitos	20	Suomen Rengastehdas Oy
2	Fortum Power and Heat Oy, lämpökeskukset: Rantakylä, Hasanniemi, Hukanhauta, Käpykangas, Ukonmäki, Utra, Noljaikka	21	Polvijärven kunta, kaukolämpölaitos
3	Valio Oy, Joensuun tehdas	22	Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Uimaharjun saha
4	UPM-Kymmeme Wood Oy, Joensuun vaneritehdas	23	Stora Enso Oyj, Enocell Oy
5	Karjalan Tekstiilipalvelu Oy	24	Fortum Power and Heat Oy, Uimaharjun voimalaitos
6	Lemminkäinen Oyj, asfalttiasema	25	Outokummun Energia Oy, Lämpökeskus Miilu
7	Puutarha Päivänpaiste, lämpökeskus	26	Mondo Minerals B.V. Branch Finland, Vuonoksen tehdas
8	Abloy Oy	27	Kontiolahden kunta, Kirkonkylän aluelämpökeskus
9	Valtimon kunta, kaukolämpölaitos	28	Fortum Power and Heat Oy, Kontiorannan lämpökeskus
10	Nurmeksens Lämpö Oy, Ritonieman lämpökeskus	29	Vapo Oy, Ilomantsin pellettitehdas
11	Nurmeksens Lämpö Oy, Vinkerlahden lämpökeskus	30	Karelia-Upofloor Oy
12	Höljäkkä Oy	31	Anaika Components Ltd Oy, Tuupovaaran tehdas
13	Puljonki Oy	32	Vapo Oy, Hammaslahden aluelämpökeskus
14	Juuan kunta, kaukolämpölaitos	33	Vapo Oy, Rääkkylän lämpökeskus
15	Vapo Oy, Kevätniemen voimalaitos	34	Vapo Oy, Tohmajärven lämpökeskus
16	Vapo Oy, Rantakylän lämpökeskus	35	Kiteen Lämpö Oy, Lämpökeskus
17	Vapo Oy, Teollisuuskylän lämpökeskus	36	Puhos Board Oy
18	Pankaboard Oy	37	Momentive Specialty Chemicals Oy
19	Anaika Components Ltd Oy, Lieksan tehdas	38	Stora Enso Wood Products Oy Ltd, Kiteen saha

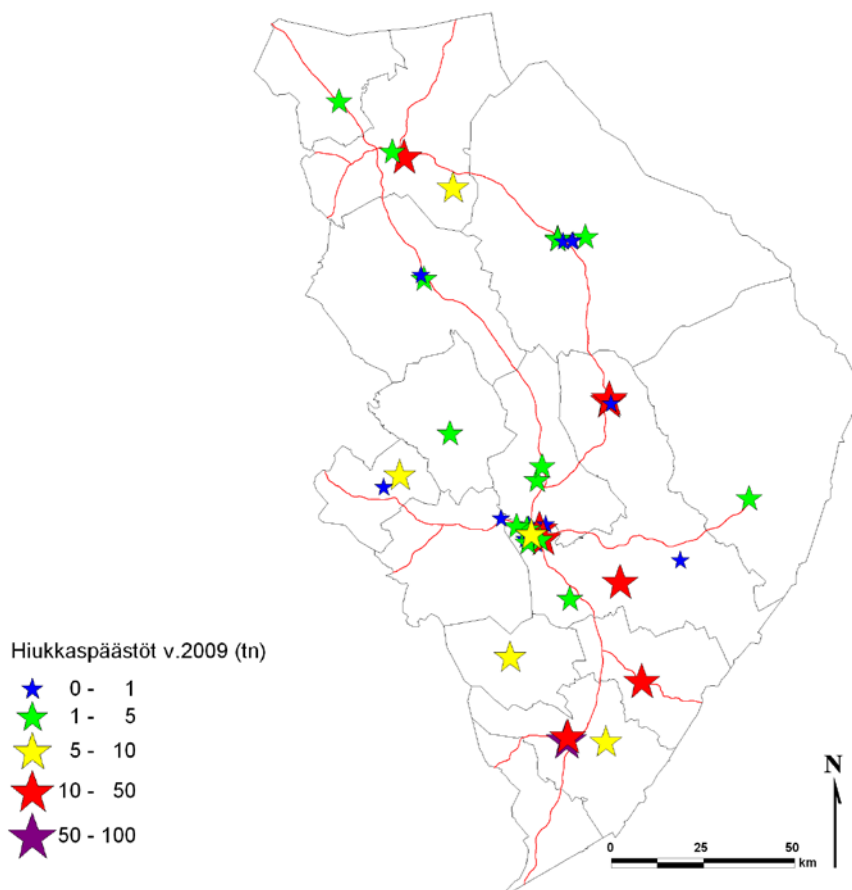
Kuvissa 13-15 on esitetty lupavelvollisten laitosten päästöt laitoksittain vuonna 2009. Suurimmat lupavelvolliset pistemäiset rikkidioksidin ja typen oksidien päästölähteet sijaitsivat Joensuussa ja Lieksassa. Suurimmat hiukasten päästölähteet sijaitsivat Kiteellä, Tohmajärvellä, Joensuussa ja Nurmeksessa. Lupavelvollisia laitoksia on tutkimusalueella paljon etenkin Joensuun ja Lieksan keskustaajamien tuntumassa, Kiteen Puhoksen teollisuusalueella ja Uimaharjussa.



Kuva 13. Lupavelvollisten laitosten rikkidioksidipäästöt (tn) Pohjois-Karjalassa vuonna 2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, Aho 2010). Tutkimusalueen suurimmat tiet on merkitty punaisella.



Kuva 14. Lupavelvollisten laitosten typen oksidien päästöt (tn) Pohjois-Karjalassa vuonna 2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, Aho 2010). Tutkimusalueen suurimmat tiet on merkitty punaisella.

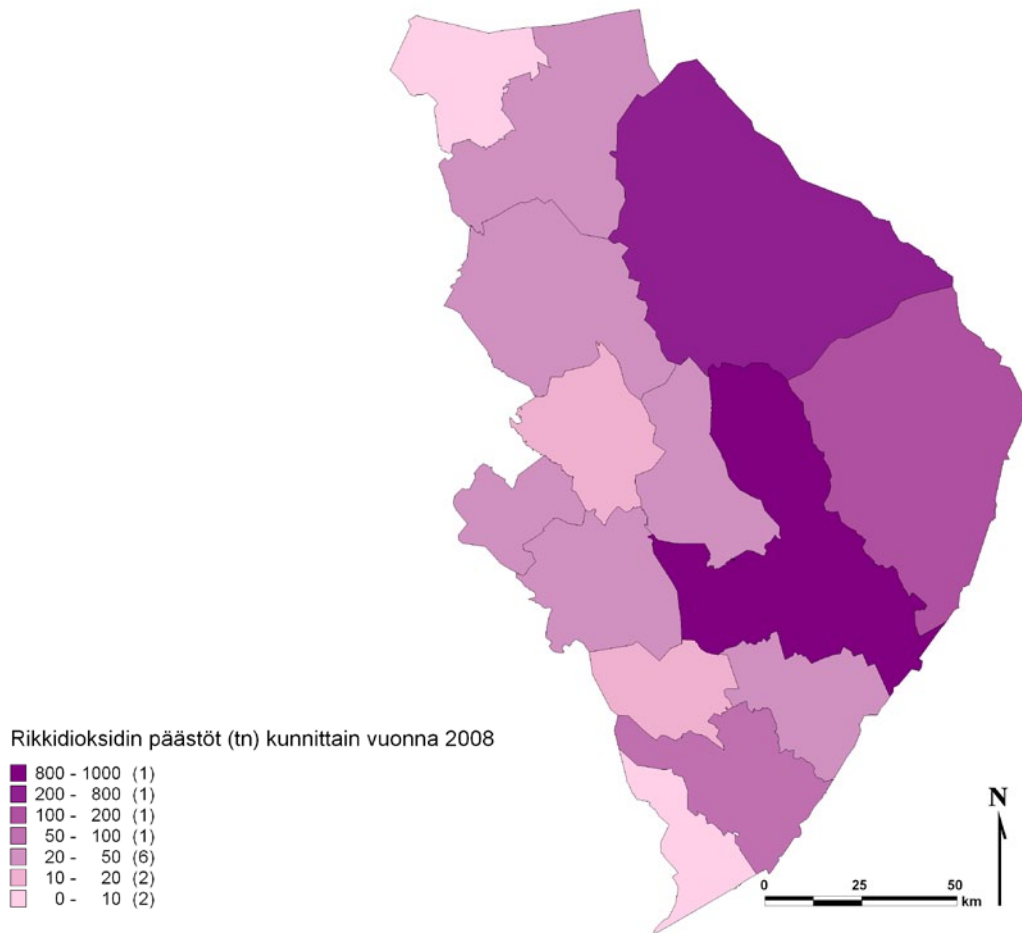


Kuva 15. Lupavelvollisten laitosten hiukkaspäästöt (tn) Pohjois-Karjalassa vuonna 2009 (Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011, Aho 2010). Tutkimusalueen suurimmat tiet on merkitty punaisella.

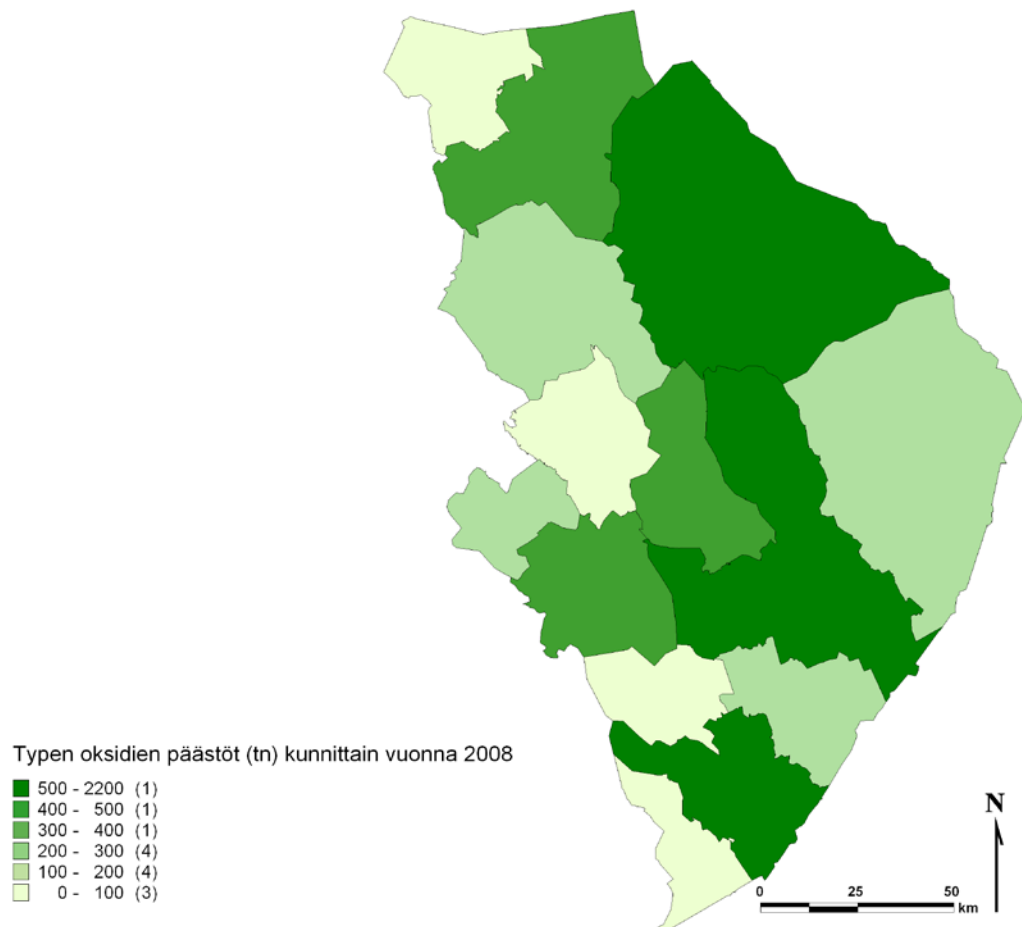
Taulukossa 1 ja kuvissa 16-18 on esitetty ilman epäpuhtauksien päästömäärät tutkimusalueella kunnittain vuonna 2008 ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmän mukaan (tiedot haettu v. 2011). Tutkimusalueen kunnista suurimmat rikkidioksidin päästömäärät vuonna 2008 olivat Joensuussa, Ilomantsissa ja Lieksassa. Typen oksideja syntyi eniten Joensuussa, Ilomantsissa ja Kiteellä. Hiukkaspäästöt olivat tutkimusalueella suurimmat Joensuussa ja Kiteellä. Vähiten rikkidioksidin ja typen oksidien päästöjä sekä hiukkaspäästöjä Pohjois-Karjalan alueella syntyi Kesälahdella, Rääkkylässä ja Valtimolla. Pohjois-Karjalan kuntakohtaisiin päästömääriin vaikuttivat eniten alueen suurimmat teollisuuslaitokset, jotka sijaitsivat Joensuussa, Lieksassa ja Kiteellä.

Taulukko 1. Tutkimusalueen päästöt rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (tn/v) kunnittain vuonna 2008. (Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011.)

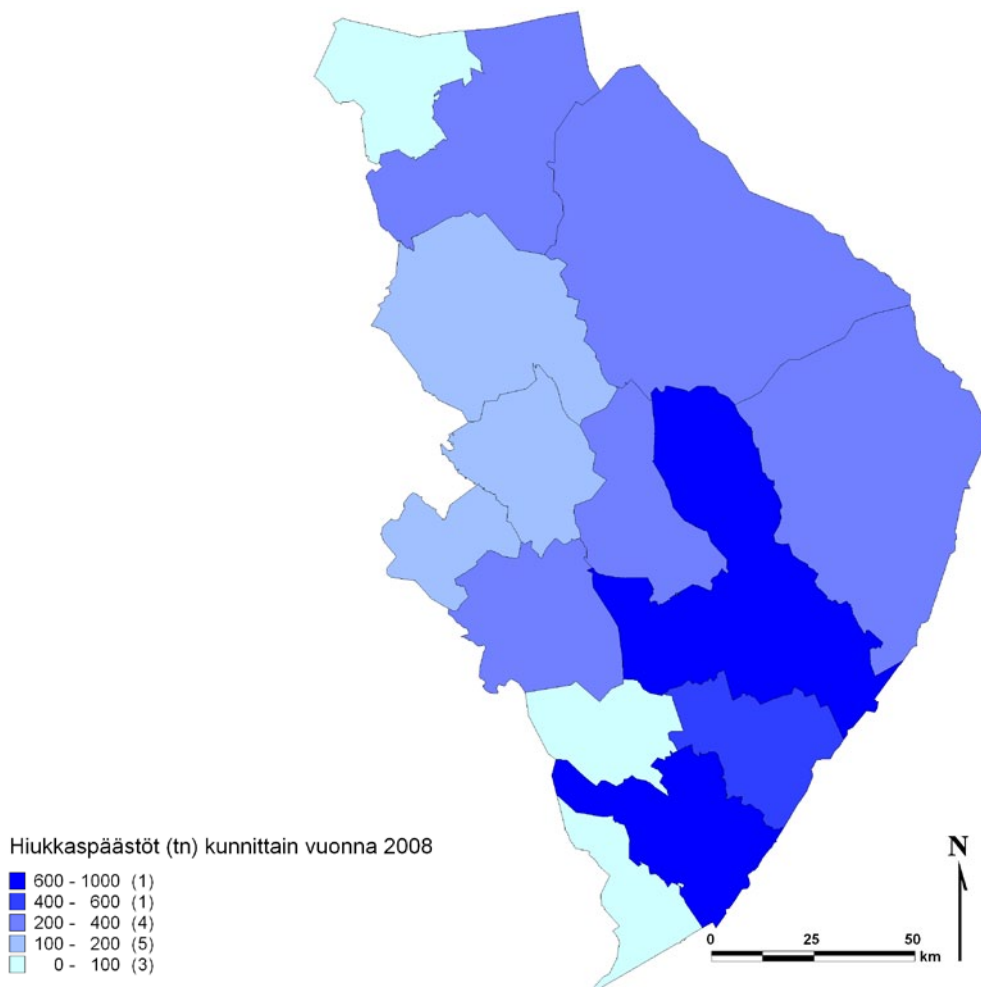
Kunta	SO ₂	NO _x	Hiukkaset
Ilomantsi	172	217	154
Joensuu	881	2168	877
Juuka	22	154	119
Kesälahti	8	97	57
Kitee	90	395	424
Kontiolahti	31	278	202
Lieksa	207	458	205
Liperi	33	292	202
Nurmes	41	263	163
Outokumpu	43	144	141
Polvijärvi	18	105	101
Rääkkylä	12	76	70
Tohmajärvi	21	148	216
Valtimo	8	57	64
Yhteensä	1587	4852	2994



Kuva 16. Rikkidioksidin päästöt (tn) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2008 (Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011).



Kuva 17. Typen oksidien päästöt (tn) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2008 (Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011).



Kuva 18. Hiukkaspäästöt (tn) Pohjois-Karjalassa kunnittain vuonna 2008 (Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011).

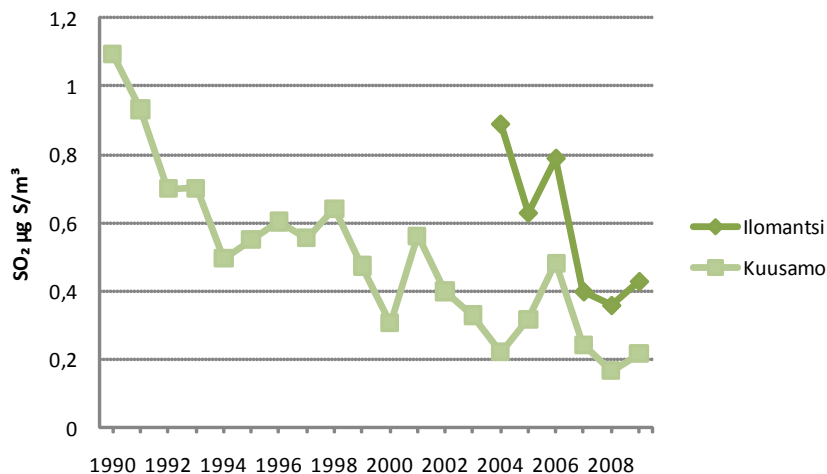
2.2.2 Ilmanlaatu tausta-aseilla

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

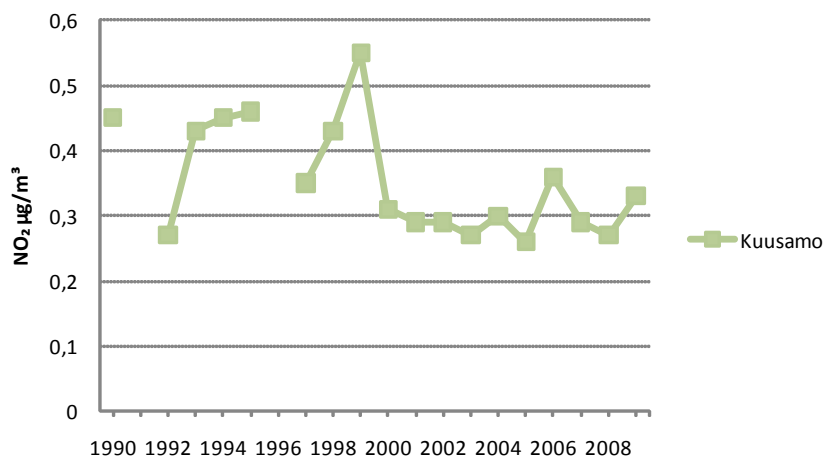
Kuvassa 19 on esitetty rikkidioksidikaasun pitoisuuksia ilmassa Ilmatieteen laitoksen ylläpitämällä Ilomantsin ja Kuusamon Oulangan valtakunnallisilla tausta-aseilla. Kuvassa 20 on esitetty lisäksi typpidioksidin pitoisuus ilmassa Kuusamon tausta-aseilla. Kuvissa 21-23 on esitetty rikin ja typen vuosilaskeumia Lieksan Hietajärven tausta-aseilla.

Rikkidioksidin pitoisuus ilmassa on 1990- ja 2000-luvuilla vähentynyt Kuusamon valtakunnallisella tausta-aseilla ja 2000-luvulla Ilomantsin tausta-aseilla. Ilomantsin tausta-aseilla rikkidioksidipitoisuudet ovat olleet hieman korkeammalla tasolla kuin Kuusamon tausta-aseilla. Molemmilla tausta-aseilla on kuitenkin havaittavissa rikkidioksidipitoisuuden selvä nousu vuonna 2006. (Kuva 19.)

Ilmatieteen laitoksen kaasumaisen typpidioksidin pitoisuuden aikasarja Kuusamon Oulangan tausta-aseilla on katkonainen mittauksissa esiintyneiden vaikeuksien vuoksi. Typpidioksidipitoisuuden aikasarjassa ei ole havaittavissa selkeää laskusuuntausta, vaan pitoisuudet ovat vaihdelleet aaltomaisesti. 2000-luvulla typpidioksidin pitoisuudet ovat kuitenkin olleet keskimäärin alhaisemmalla tasolla kuin 1990-luvulla. Vuonna 2006 Kuusamon tausta-aseilla havaittiin hieman korkeampi typpidioksidin pitoisuus kuin 2000-luvulla keskimäärin. (Kuva 20.)

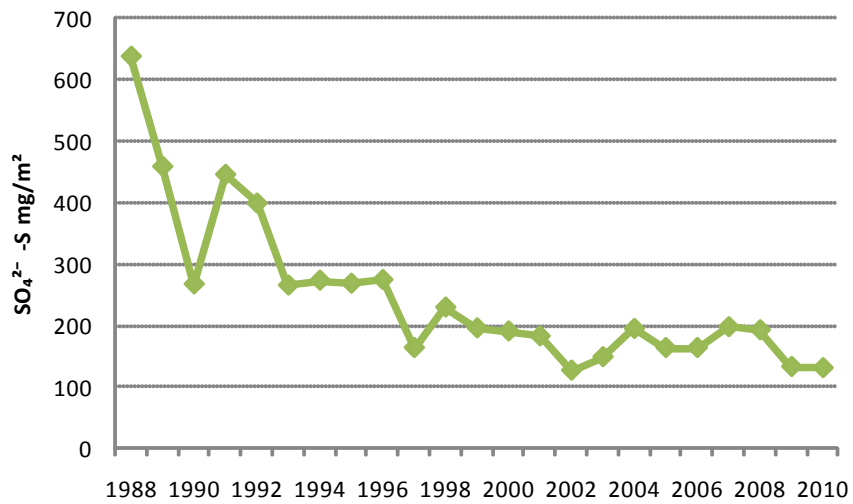


Kuva 19. Rikkidioksidin pitoisuus rikkinä ($\mu\text{g S}/\text{m}^3$) ilmassa Iiomantsin tausta-aseamalla vuosina 2004–2009 ja Kuusamon tausta-aseamalla vuosina 1990–2009, vuosikeskiarvot (Salmi 2011a).

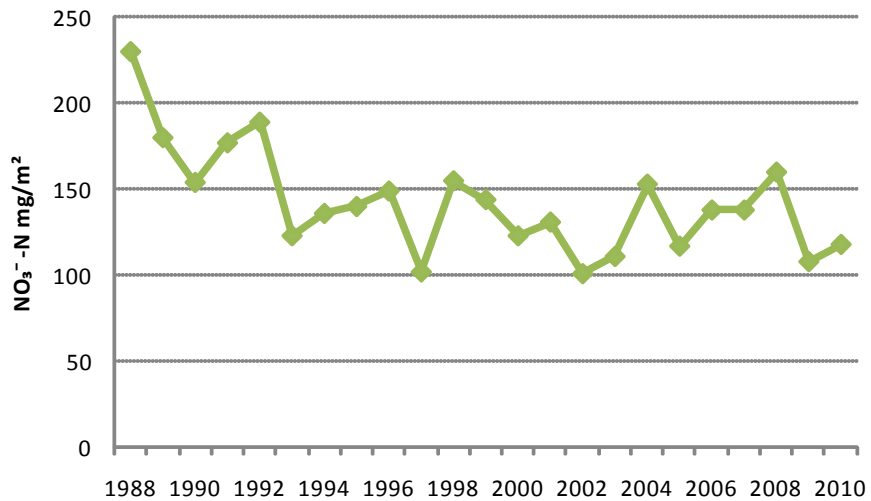


Kuva 20. Typpidioksidin pitoisuus tyypenä ($\mu\text{g N}/\text{m}^3$) ilmassa Kuusamon tausta-aseamalla vuosina 1990–2009, vuosikeskiarvot (Salmi 2011a).

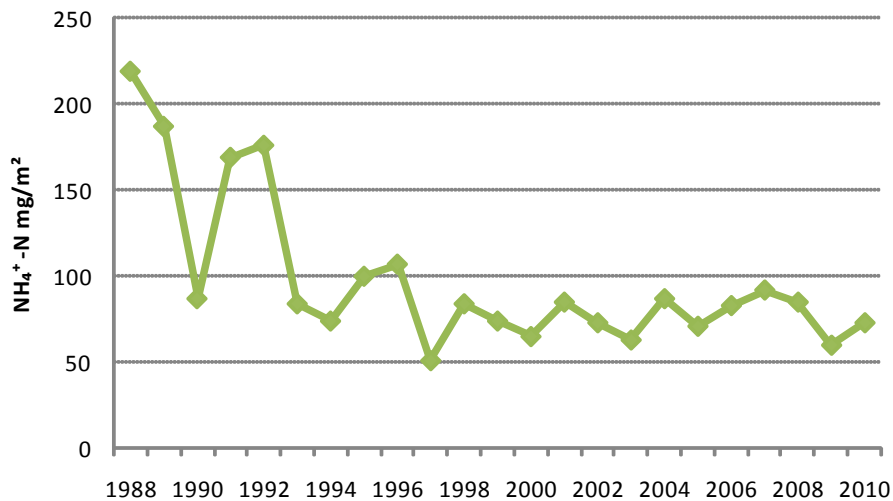
Sulfaattirikin vuosilaskeumassa on ollut melko selvä laskeva trendi 2000-luvulle saakka. 2000-luvulla sulfaattirikin vuosilaskeuman laskeva trendi on tasoittunut ja laskeuma on vaihdellut aaltomaisesti tarkastelu vuosien välillä. Myös nitraatti- ja ammoniumtyypen vuosilaskeumissa on havaittavissa laskeva trendi 1990-luvun puoliväliin saakka, vaikka laskeumissa onkin tarkastelu vuosien välillä melko suuria eroja. 1990- ja 2000-lukujen vaihteesta lähtien nitraatti- ja ammoniumtyypen vuosilaskeumat ovat pysytelleet melko samalla tasolla tarkasteluajanjakson loppuun saakka, vaikkakin vaihtelu laskeumissa on ollut aaltomaista. (Kuvat 21-23.)



Kuva 21. Sulfaattirikin vuosilaskeumat (SO₄²⁻-S mg/m²) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988-2010 (Salmi 2011b).



Kuva 22. Nitraattitypen vuosilaskeumat (NO₃⁻-N mg/m²) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988-2010 (Salmi 2011b).



Kuva 23. Ammoniumitypen vuosilaskeumat (NH₄⁺-N mg/m²) Lieksan Hietajärven mittausasemalla vuosina 1988-2010 (Salmi 2011b).

3. Tutkimusaineisto ja –menetelmät

3.1

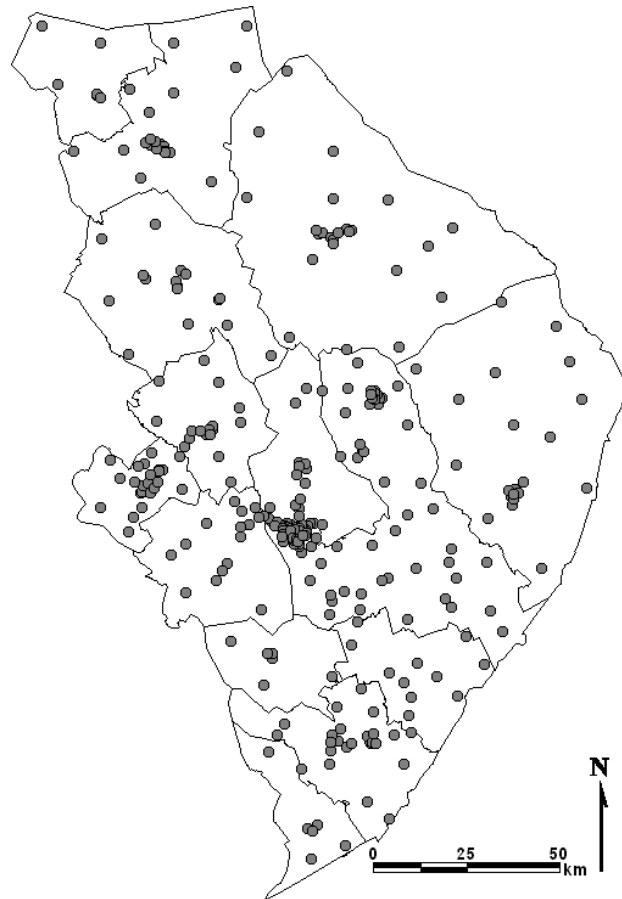
Havaintoalat

Tutkimus tehtiin 300 havaintoalalla, joista 100 alalta määritettiin sammalten alkuainepitoisuudet. Neulasten rikkipitoisuudet määritettiin viideltä havaintoalalta tutkimusalueen suurimpien päästölähteiden läheisyydestä. Jäkälälajisto arvioitiin viideltä puulta kultakin tutkimusalalta. Kartoitus pyrittiin tekemään samoilla havaintoaloilla ja –puilla kuin aiemmassa tutkimuksessa vuosina 1998–1999, mutta maankäytön muutosten vuoksi uutena perustettiin 60 alaa. Seurantaan ensimmäistä kertaa osallistuvien kuntien eli Värtsilän, Juuan ja nykyisen Joensuun alueella sijaitsevien Tuupovaaran ja Kiihtelysvaaran alueelle perustettiin 39 uutta alaa. Havaintoalaverkkoa täydennettiin yksittäisillä aloilla myös Ilomantsin, Kesälahden, Kiteen, Kontiolahden, Outokummun ja Polvijärven kuntien alueella; näiden kuntien alueelle perustettiin yhteensä 12 uutta alaa. Osalla vanhoista aloista yksi tai useampia havaintopuita vaihtui. Kaikki muutokset kirjattiin, ja ne huomioitiin vuosien välisiä tuloksia vertailtaessa. (Kuvat 24 ja 25, Taulukko 2.)

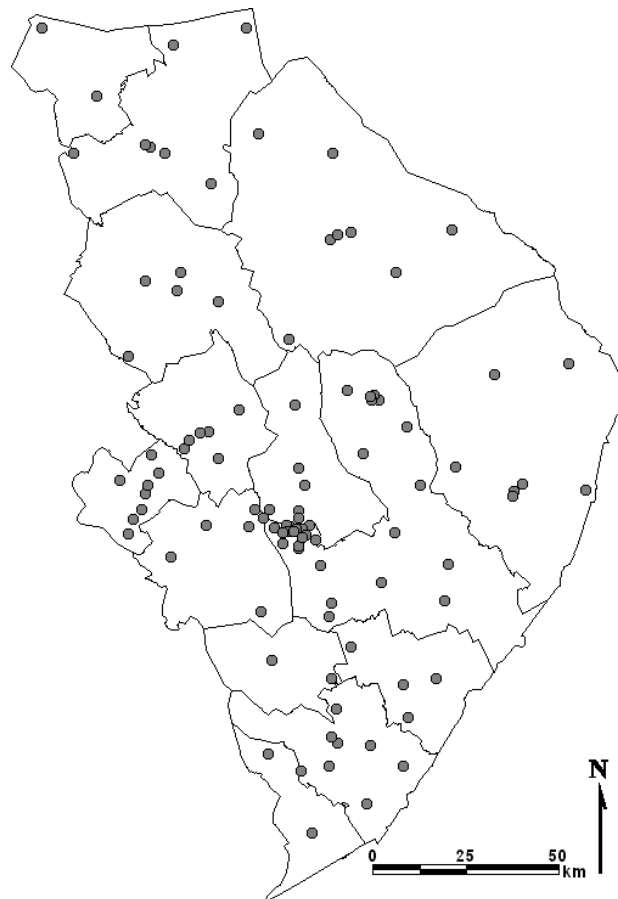
Näytealan sijainti määritettiin GPS-laitteella, ja kustakin havaintoalasta täytettiin taustatietolomake, johon merkittiin alan etsintäohje ja puiden sijainti. Havaintoalan metsätyyppi, puuston kehitysluokka sekä ikä ja pituus ja valtalajien pohjapinta-alat sekä havaintoalan topografia kirjattiin ylös. 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.

Tutkimuksessa ensimmäistä kertaa mukana olevien kuntien alueelle uudet alat perustettiin koko kunnan alueen kattavan hilaverkoston avulla. 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 käsiteltyjä, 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.

Tutkimusmetsiköistä 41 % sijaitsi tuoreilla mustikkatyyppin (MT) kankailla. 33 % aloista sijaitsi kuivahkoilla puolukkatyyppin (VT) kankailla. Lehtomaisilla kankailla (OMT) sijaitsi 13 % aloista ja kuivilla kanervatyyppin kankailla (CT) 9 % aloista. Muuksi luokitelluilla metsätyypeillä sijaitsi 4 % tutkimusaloista. Muuksi luokitellut metsiköt olivat pääasiassa turvekankaita ja muita soistumia. Valtaosa tutkimusaloista sijaitsi hyvin tutkimukseen soveltuvissa kypsissä, 80-100-vuotiaissa, männiköissä. Tutkimuspuiden keskimääräinen pituus oli 17,4 metriä. Läpimitaltaan puut olivat keskimäärin 34 cm ja puuston keskimääräinen pohjapinta-ala 20 m²/ha. Valtaosalla aloista valtalajina oli mänty ja toinen valtalaji oli useimmiten kuusi tai koivu. Näiden lisäksi tutkimusaloilla havaittiin toisina tai kolmansina valtapuulajeina yksittäisillä aloilla haapaa, harmaaleppää, pihlajaa ja vaahteraa. (Taulukko 3.)



Kuva 24. Havaintoalojen sijainti tutkimusalueella vuonna 2010.



Kuva 25. Sammalhavaintoalojen sijainti tutkimusalueella vuonna 2010.

Taulukko 2. Havaintoalojen lukumäärä kunnittain sekä uutena perustettujen havaintoalojen määrät vuonna 2010.

Kunta	Vanhat alat	Uudet alat	Yhteensä
Ilomantsi	17	4	21
Joensuu	62	30	92
Juuka	0	16	16
Kesälahti	4	2	6
Kitee	20	5	25
Kontiolahti	8	7	15
Lieksa	16	8	24
Liperi	6	9	15
Nurmes	17	4	21
Outokumpu	15	10	25
Polvijärvi	6	11	17
Rääkkylä	3	3	6
Tohmajärvi	9	2	11
Valtimo	6	0	6
14 kuntaa	189	111	300

Metlan sammalten raskasmetalli-, rikki- ja typpipitoisuuksien seurannan tulokset perustuvat valtakunnallisiin kartoituksiin, joissa tarkoituksena on tuottaa tietoa sammalten pitoisuuksien perusteella typen ja raskasmetallien laskeumista ja niissä tapahtuvista muutoksista Suomessa. Kartoitukset ovat nykyisin osa eurooppalaista tutkimusta, jota koordinoi UNECE ICP Vegetation –tutkimusohjelma (ICP Vegetation 2009). Koko maan kattavat kartoitukset aloitettiin vuonna 1985 valtakunnan metsien pysyvillä koealoilla (VMI8) ja ne on toistettu sen jälkeen samoilla koealoilla viiden vuoden välein vuosina 1990, 1995, 2000 ja 2005. VMI8:n koealaverkosto koostuu Etelä- ja Keski-Suomessa 16 km:n välein sijaitsevista neljän koealan rypäistä. Pohjois-Karjalan pitoisuustiedot perustuvat vuosilta 1985–2000 noin 70 rypään ja vuodelta 2005 noin 50 rypään keskiarvoihin. Vuonna 2010 sammalnäytteet kerättiin VMI11 pysyviltä koealoilta. VMI11:n koealaverkosto poikkeaa rakenteeltaan VMI8:n verkostosta ja koealat inventoidaan viiden vuoden jaksossa. Muun muassa tästä johtuen koealojen määrä, joilta sammalnäytteet kerättiin, jäi koko maassa aikaisempaa selvästi pienemmäksi. Vuonna 2010 sammalnäytteitä kerättiin Pohjois-Karjalasta vain noin 20 rypäältä.

Metla tekee Suomessa yleiseurooppalaiseen metsien terveydentilan seurantaan perustuvaa metsien terveydentilan laaja-alaista intensiiviseurantaa. Laaja-alaisen seurannan mänty- ja kuusikoealojen määrä koko maassa on vaihdellut, esimerkiksi vuonna 2008 näitä koealoja oli 670 kappaletta. Pohjois-Karjalassa oli vuonna 2008 62 mänty- ja kuusikoealaa, ja seurantapuita 837 kappaletta. Vuonna 2009 seurannassa siirryttiin yhteistoimintaan valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) kanssa. Tällöin koko maan havaintoalojen määrä nousi noin 2200:aan (joista Pohjois-Karjalassa n. 170 kpl). Jatkossa koealojen määrä pudotetaan noin 800:aan koko maassa vuosittain, ja samoista puista tiedot saadaan viiden vuoden välein. Intensiiviseurannan metsiköitä on nykyään 18 (jatkossa 14) eri puolilla Suomea.

Taulukko 3. Mäntyhavaintoaloja kuvaavia tunnuksia vuonna 2010.

Tunnus		Kpl	%
Metsätyyppi	OMT	39	13 %
	MT	122	40,7 %
	VT	100	33,3 %
	CT	28	9,3 %
	MUU	11	3,7 %
Soveltuvuus	hyvä	224	74,7 %
	kohtalainen	71	23,7 %
	huono	5	1,7 %
Kehitysluokka	kypsä	258	86 %
	varttunut	40	13,3 %
	nuori	2	0,7 %
1.valtalaji	mänty	297	99 %
	koivu	1	0,3 %
	kuusi	1	0,3 %
2.valtalaji	haapa	5	1,7 %
	harmaaleppä	2	0,7 %
	koivu	91	30,3 %
	kuusi	105	35 %
	leppä	1	0,3 %
	mänty	2	0,7 %
	pihlaja	9	3,0 %
	vaahtera	1	0,3 %
Valtapuiden pituus (m)	10-15	57	19 %
	15-20	218	72,7 %
	20-25	21	7,0 %
Puuston pohjapinta-ala (m ² /ha)	<10	26	8,7 %
	10-15	60	20 %
	15-20	61	20,3 %
	20-25	66	22 %
	25-30	54	18 %
	>30	32	10,7 %
Havaintopuiden halkaisija (cm)	<25	3	1,0 %
	25-30	65	21,7 %
	30-35	134	44,7 %
	35-40	68	22,7 %
	>40	30	10 %
Puuston ikä (v)	60-80	73	24,3 %
	80-100	169	56,3 %
	100-120	44	14,7 %
	>120	13	4,3 %

3.2

Tutkimusryhmä ja maastotöiden ajankohta

Jäkäläkartoitukset tehtiin ja sammalnäytteet kerättiin 10.5.2010–30.6.2010 välisenä aikana. Neulasnäytteet kerättiin 13.4.2010. Maastotöihin osallistuivat Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskuksen tutkijat Irene Huuskonen (YTM) ja Emmi Lehkonen (FM) sekä tutkimusavustaja Kaisa Lampinen (ympäristöinsinööri) ja laboratorioinsinööri Tony Pirkola. Maastotyöt aloitettiin eteläisestä Pohjois-Karjalasta, josta edettiin kohti pohjoista.

3.3

Havupuiden epifyyttijäkälien kartoittaminen

Tässä tutkimuksessa indikaattorilajeina käytettiin standardin SFS 5670 mukaisesti 12 männyllä yleisesti kasvavaa jäkälälajia (taulukot 4 ja 5). Jäkälät koostuvat symbioosissa elävistä lehtivihreättömästä sieniosakkaasta ja yhteyttävästä leväosakkaasta. Ne menestyvät hyvin niukkaravinteisessa ja kuivassa elinympäristössä, missä korkeammat kasvit eivät selviä. Jäkälät kasvavat löyhärakenteisina sekovarsina ilman suojaavia pintasolukeroksia 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 soluseinämiin proteiineihin. Talviaikaankaan, jolloin ilmassa on yleensä enemmän epäpuhtauksia, runkojäkälät eivät ole lumikerroksen suojaamia, ja leudommilla säillä niiden solutoiminta voi aktivoitua.

Jäkälät ilmentävät ilman epäpuhtauksien vaikutuksia yksilökohtaisesti silmin havaittavina morfologisina tai kemiallisina muutoksina, peittävyksien muutoksina ja jäkäläyhteisöjen lajikoostumuksen muutoksina (Lodenius ym. 2002). Jäkälälajit reagoivat ilman epäpuhtauksiin eri tavoin. Ensimmäisenä ne vaikuttavat 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 4 on luokiteltu indikaattorilajit herkkyytensä mukaan neljään luokkaan. Tietyn lajin esiintymiseen vaikuttavat lajin saasteherkkyyden lisäksi myös luontaiset ympäristöolosuhteet, jonka vuoksi eri lajien indikaattoriarvot ovat erilaisia, toiset lajit esim. suosivat merenrantoja, toiset valoisia ja kuivia metsiköitä, toiset sulkeutuneempia metsiköitä, toiset nuorempia puita ja toiset vanhempia. Lajien erityispiirteitä sekä niiden indikaattoriarvot on kuvattu taulukossa 5.

Sormipaisukarve on erityisen hyvä ilman epäpuhtauksien indikaattori, sillä se kestää hyvin suuriakin saasteepitoisuuksia, mutta 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 peittävyden kasvamisena lievässä kuormitustasossa. Kuitenkin sormipaisukarvekin kestää kuormitusta vain tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen sen vauriot pahenevat ja peittävyys pienenee (vrt. esim. Niskanen ym. 2003a ja Niskanen ym. 1996).

Ilman epäpuhtauksien aiheuttamat muutokset jäkälissä ja jäkälälajistossa voivat ilmetä nopeasti etenkin suurissa pitoisuuksissa. Usein vaikutukset näkyvät vielä vuosienkin päästä kuormituksen vähennyttyä, 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 tyyppiyhdisteillä on vaikutusta, samoin alkalisilla päästöillä, jotka muuttavat erityisesti havupuulla kasvavien jäkäliden normaalisti hapanta kasvualustaa emäksisemmäksi.

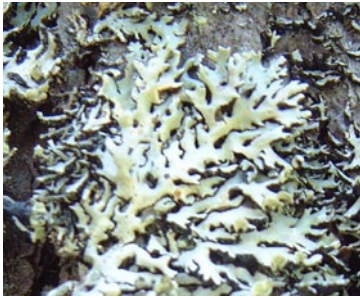
Morfologisena muutoksena tässä tutkimuksessa arvioitiin sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioastetta sekä yleistä vaurioastetta. Jäkäläyhteisöjen lajikoostumuksen muutoksia arvioitiin lajilukumäärän ja IAP-indeksin avulla. Peittävyksiä arvioitiin kahden lajin osalta pistefrekvenssimenetelmällä.

Taulukko 4. Tutkitut jäkälälajit ja niiden herkkyudet rikkidioksidille (Kuusinen ym. 1990).

Herkkyys	Laji (tiet.)	Laji (suom.)
kestävä, hyötyvä	<i>Algae + Scoliciosporum</i>	leväpeite
	<i>Hypocenomyce scalaris</i>	seinäsuomujäkälä
melko kestävä	<i>Hypogymnia physodes</i>	sormipaisukarve
	<i>Parmeliopsis ambigua</i>	keltatyvikarve
	<i>Cetraria chlorophylla</i>	ruskoröyhelö
	<i>Vulpicida pinastri</i>	keltaröyhelö
melko herkkä	<i>Parmeliopsis hyperopta</i>	harmaa tyvikarve
	<i>Parmeliopsis aleurites</i>	kalpea tyvikarve
	<i>Platismatia glauca</i>	harmaaröyhelö
	<i>Pseudevernia furfuracea</i>	hankakarve
	<i>Parmelia sulcata</i>	raidanisokarve
herkkä	<i>Bryoria</i> sp.	lupot
	<i>Usnea</i> sp.	naavat

Taulukko 5. Standardin SFS 5670 mukaiset jäkälälajit ilmanlaadun indikaattoreina. Indikaattoriarvon luokitus: +++ hyvä, ++ kohtalainen, + pieni, - huono. Seuralaislajien lukumäärät on laskettu Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan vuoden 2000 bioindikaattoritutkimuksen aineistosta (Niskanen ym. 2001).

Sormipaisukarve (*Hypogymnia physodes*) +++



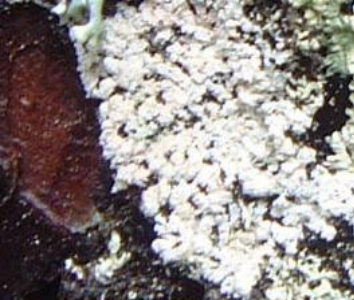
Sormipaisukarve on käytetyistä indikaattorilajeista kestävin ja yleisin laji, joka sietää eniten ilman epäpuhtauksia. Sormipaisukarpeen esiintymisfrekvenssit eli peittävyys pienentyvät vasta voimakkaasti kuormitetuilla alueilla. Sormipaisukarve on hyvä ilmanlaadun indikaattori, sillä myös sekovarren näkyvät vauriot kuvastavat ilman epäpuhtauksien kuormitusta. Seuralaislajien lukumäärä 3,93.

Keltatyvikarve (*Parmeliopsis ambigua*) +++



Keltatyvikarve sietää myös hyvin ilman epäpuhtauksia ja sen esiintymisfrekvenssit noudattavat ilman epäpuhtauksien kuormitusvyöhykkeitä. Keltatyvikarve viihtyy parhaiten sulkeutuneissa kosteissa metsissä (Pihlström & Myllyvirta 1995). Keltatyvikarvetta esiintyy hyvin yleisesti, ja se on ilman epäpuhtauksia kestävä, hyvä indikaattorilaji. Seuralaislajien lukumäärä 4,02.

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



Tuhkakarve ja harmaatyyvikarve sijoittuvat kestävyydeltään kolmanneksi. Tämä sijoitus sopii yleensä hyvin näiden lajien esiintymisfrekvenssin alueelliseen jakaantumiseen, sillä kahta edellistä lajia herkempänä näiden lajien pienentyneet esiintymisfrekvenssit ulottuvat vähemmän kuormitetuille alueille kuin sormipaisu- ja keltatyvikarpeella. Tuhka- ja harmaatyyvikarve ovat ilmansaasteita sietäviä, hyviä indikaattorilajeja, jotka tosin suosivat kuivia ja valoisia kalliomänniköitä. Seuralaislajien lukumäärä 4,49.

Seinäsuomujäkälä (*Hypocenomyce scalaris*) ++



Seinäsuomujäkälää kasvaa luontaisesti vanhojen mäntyjen rungoilla. Se pystyy myös käyttämään hyväkseen ilmassa olevia epäpuhtauksia ja sen esiintyminen lisääntyy ilman saasteiden kuormituksen lisääntyessä. Seinäsuomujäkälä on kohtalaisen hyvä ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori eli sen esiintyminen kuvastaa lähinnä typpilaskeuman rehevöittävää vaikutusta. Seuralaislajien lukumäärä 4,84.

Lupot (*Bryoria* sp.) +++



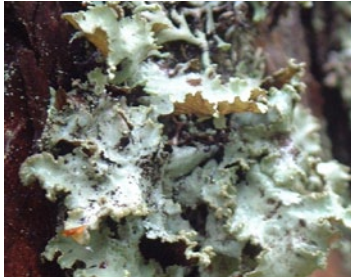
Lupoilla on keskimäärin eniten seurannaislajeja rungoilla, mikä osoittaa sen herkkyyttä ilman epäpuhtauksille. Luppojen esiintymisfrekvenssit noudattavat yleensä ilmansaasteiden kuormitusta ja luppojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Lupot ovat hyviä ilman laadun indikaattoreita. Seuralaislajien lukumäärä 5,12.

Naavat (*Usnea* sp.) +++



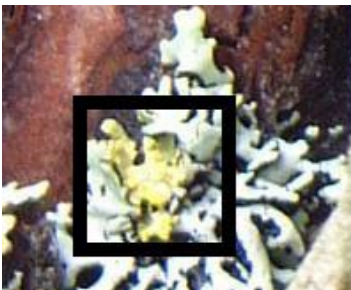
Naavojen esiintymisfrekvenssit vaihtelevat ilmansaastekuormituksen mukaan yleensä samalla tavalla kuin lupoilakin. Naavojen seuralaislajien määrä on yleensä melko suuri kuten lupoilakin, mikä osoittaa näiden jäkälälajien herkkyyttä ilman epäpuhtauksille. Naavojen pituuksia voidaan myös käyttää kuormitusta kuvaavana tunnuksena. Rannikon läheisyys suosii naavojen esiintymistä. Seuralaislajien lukumäärä 5,12.

Harmaaröyhelö (*Platismatia glauca*) ++



Harmaaröyhelö on seuralaislajien määrän perusteella suhteellisen herkkä indikaattorilaji ja myös sen esiintymisfrekvenssit ovat yleensä loogisia: laji puuttuu kuormitetuilta alueilta ja eniten sitä todetaan puhtailla alueilla. Harmaaröyhelö on herkkä ilman epäpuhtauksille, mutta sen luontainen esiintyminen voi kuitenkin vaihdella suuresti, minkä vuoksi sen indikaattoriarvo jää kohtalaiseksi. Seuralaislajien lukumäärä 4,51.

Keltaröyhelö (*Vulpicida pinastr*) +



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 ilman laadun indikaattorina jää kuitenkin pieneksi. Seuralaislajien lukumäärä 4,39.

Ruskoröyhelö (*Cetraria chlorophylla*) –



Ruskoröyhelö on yleensä 12 indikaattorilajin joukossa yksi harvinaisimmista lajeista. Sen esiintyminen vaihtelee usein hyvin satunnaisesti ja sitä voidaan löytää voimakkaasti kuormitetuilta alueilta. Ilmanlaadun indikaattorina ruskoröyhelö on huono. Seuralaislajien lukumäärä 5,10.

Hankakarve (*Pseudevernia furfuracea*) ++



Hankakarve on hyvin yleinen jäkälälaji männyn rungolla. Keskimääräisen seuralaislajien määrän perusteella hankakarpeen voidaan katsoa olevan herkkä ilman epäpuhtauksille, ja myös sen esiintymisfrekvenssien alueellinen jakauma vastaa yleensä ilman epäpuhtauksien kuormituksen jakaumaa. Ilmansaasteet aiheuttavat selvästi havaittavia muutoksia hankakarpeen sekovarressa. Rannikon läheisyys suosii hankakarpeen esiintymistä, sillä se viihtyy valoisissa, kuivissa kalliomänniköissä. Indikaattorina se on kohtalainen. Seuralaislajien lukumäärä 4,41.

Raidanisokarve (*Parmelia sulcata*) +



Raidanisokarve on harvinainen männyn rungolla esiintyvä jäkälälaji. Raidanisokarve on ravinteisuudesta hyötyvä jäkälälaji, jota esiintyy yleensä mm. kalkkipölyalueiden liepeillä. Raidanisokarve soveltuu kalkkipölyn indikaattoriksi. Yleensä raidanisokarve on niin harvinainen, että sen indikaattoriarvo jää pieneksi. Seuralaislajien lukumäärä 4,27.

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



Viherväpeite lisääntyy lähinnä kasvaneen typpilaskeuman vaikutuksesta eli se on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori. Viherväpeite ja vihersukkulajäkälä ovat hyviä typpikuormituksen indikaattoreita. Seuralaislajien lukumäärä 3,98.

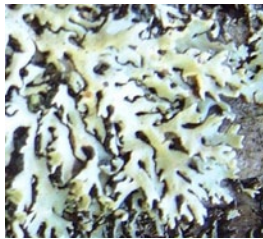
Mäntyjen rungoilta tutkittiin 12 jäkälälajin esiintyminen standardin SFS 5670 mukaan kuitenkin laajentaen standardinmukaista menetelmää siten, että kunkin lajin runsaus arvioitiin kolmiasteisella luokituksella (taulukko 6). Kullakin havaintoalalla oli 5 tutkimuspuuta, joiden jäkälälajisto arvioitiin 50–200 cm:n korkeudelta. Sormipaisukarpeen vaurioaste ja yleinen vaurioaste arvioitiin viisiasteisella luokituksella puolen vaurioluokan tarkkuudella (taulukot 7 ja 8, kuva 26). Yleisessä vaurioasteessa eritellään kasvutavaltaan pensasmaisiksi lupot, naavat ja hankakarve, loput lajit ovat lehtimäisiä. Sormipaisukarpeen ja luppojen (*Bryoria* sp.) esiintymisfrekvenssit laskettiin sapluunaruudukolta 1,2 m:n korkeudelta itä-koillisesta ja länsi-lounaasta. Esiintymisfrekvensseistä laskettiin kullekin puulle näiden lajien suhteellinen peittävyys.

Taulukko 6. Jäkäläien runsauden luokittelu. Leväpeite (*Algae & Scoliciosporum*) ja seinäsuomujäkälä (*Hypocenomyce scalaris*) on luokiteltu peittävytenä (%), muut lajit sekovarsien lukumäärän perusteella.

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

Taulukko 7. Sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioluokitus (SFS 5670).

Vaurio	Näkyvät muutokset
I terve	jäkälät terveitä tai lähes terveitä
II lievä vaurio	lievästi kitukasvuisia, lieviä värimuutoksia
III selvä vaurio	jäkälät kitukasvuisia, vihertyneitä tai tummuneita tai kumpiakin
IV paha vaurio	jäkälät pieniä, ryppyisiä, vihertyneitä tai tummuneita tai kumpiakin
V kuollut tai puuttuu	



I = terve



II = lievä vaurio



III = selvä vaurio



IV = paha vaurio



V = kuollut tai puuttuu

Kuva 26. Sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioluokitus.

Taulukko 8. Yleinen vaurioluokitus (SFS 5670).

Yleinen vaurioluokitus	Näkyvät muutokset
I normaali	kaikkien lajien ulkonäkö ja kasvu muuttumattomia
II lievä vaurio	pensasmaiset kitukasvuisia, lehtimäiset normaaleja
III selvä vaurio	pensasmaiset pieniä, lehtimäiset vaurioituneita
IV paha vaurio	pensasmaiset puuttuvat, lehtimäiset pahoin vaurioituneita
V kuolleet tai puuttuvat	myös lehtimäiset puuttuvat, leväpeitettä voi esiintyä

Kullekin 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 9). Indeksini laskettiin kullekin havaintoalalle seuraavasti:

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

Q = kunkin jäkälälajin keskimääräinen seuralaislajien lukumäärä (ks. taulukko 5)

f = lajin suhteellinen esiintymisfrekvenssi näytealalla (0-1)

n = jäkälälajien lukumäärä (10)

IAP-indeksi on laskettu käyttäen kymmentä standardin SFS 5670 mukaista indikaattorilajia. Laskennasta on jätetty pois seinäsuomujäkälä (*Hypocenomyce scalaris*) ja levät sekä vihersukkulajäkälä (*Algae* ja *Scoliciosporum* sp.), jotka hyötyvät kuormituksesta.

Laskennassa käytetyt seuralaislajien lukumäärät poikkeavat toisistaan eri tutkimuksissa, jolloin niiden vertailu IAP-indeksin osalta on usein mahdotonta. Tässä selvityksessä käytetyt seuralaislajien lukumäärät (taulukko 9) on laskettu Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan vuoden 2000 bioindikaattoritutkimuksen 6230 mäntyä käsittävistä aineistosta (Niskanen ym. 2001). Kunkin lajin seuralaislajien määrissä seinäsuomujäkälä, levä sekä vihersukkulajäkälä on huomioitu.

Taulukko 9. Jäkälälajiston luokitus IAP-indeksin perusteella.

IAP-indeksi	Kuvaus jäkäläkasvillisuudesta
> 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 ilmansaas-teista hyötyviä lajeja
< 0,5	jäkäläautio tai lähes jäkäläautio

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

Taulukko 10. Jäkälälajiston luokitus lajilukumäärän perusteella.

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

3.4

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 jäkäläien 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 mm:n kokoisina suomuina. Tämä suomu peite 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 jäkäläien näkyvien vaurioiden arviointi ja luokittelu aiheuttaa myös tutkija-kohtaisia 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 epifyyttijäkäläien ja sormipaisukarpeen vaurioiden havainnoinnin virhelähteistä todettiin, että arviot sormipaisukarpeen vaurioista eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi havainnoijien omien eivätkä 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 mittauksen 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 11.)

Taulukko 11. Jäkälähavaintojen mittaustarkkuus 95 %:n luottamusvälillä.

	Arviointitarkkuus	Ero tuloksissa
Sormipaisukarpeen vauriot		
Yhden havainnoijan arvioiden välinen vaihtelu	3 - 12 %	0,1 - 0,2 vaurioluokkaa
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
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.
Usean havainnoijan välinen vaihtelu yhdellä havaintoalalla	11 - 22 %	0,7 - 4,9 %-yks.

3.5

Neulasnäytteiden kerääminen ja alkuainepitoisuuksien analysointi

Neulasten alkuainepitoisuuksien määrittämisellä pyritään selvittämään ilman kautta leviävien epäpuhtauksien kuormituksen alueellisia eroja. Neulasiin kertyy epäpuhtauksia sekä juuristojen kautta että suoraan ilmasta neulasten pintasolukoista, ja osa laskeumasta jää neulasten pinnoille kulkeutumatta eteenpäin (Jussila ym. 1999). Voimakkaat sateet laskevat neulasten alkuainepitoisuuksia; kuormitetuilla alueilla rikkipitoisuudet saattavat laskea jopa 30–50 % (Huttunen 1982). Latvustosta huuhtoutuvat ravinteet taas ovat peräisin neulasten pinnalle laskeutuneesta kuivalaskeumasta ja lehtisolukoista (Helmisaari 1993). Myös neulasten iällä voi olla vaikutusta mitattuihin pitoisuuksiin, sillä neulasten vanhetessa helposti liikkuvien (N, P, K, Mg) tai keskinkertaisesti liikkuvien ravinteiden (S, Zn, Cu, Fe, B) pitoisuudet pienenevät, ja heikosti liikkuvien (Ca, Mn) pitoisuudet kasvavat (Helmisaari 1998). Liikkuvia ravinteita siirtyy vanhemmista neulasista nuorempiin etenkin silloin, kun puu kärsii ravinteiden niukkuudesta (Merilä ym. 1996). Kuormitetuilla alueilla tilanne on kuitenkin erilainen rikin osalta, sillä rikkipitoisuudet usein päinvastoin kasvavat neulasten vanhetessa. (Nieminen ym. 1993, Helmisaari 1993.) Tässä tutkimuksessa selvitettiin neulasten alkuainepitoisuudet männyn neulasista rikin (S) osalta viideltä tutkimusalalta. Neulasten alkuainepitoisuudet analysoitiin neulasten toisesta vuosikerrasta.

Neulasten alkuainepitoisuudet kuvaavat kuormitusta suhteellisesti, sillä osa alkuaineista on aina peräisin maaperän luontaisista ravinnevaroista (Jussila ym. 1999). Alkuainepitoisuudet kuvaavat myös ravinteiden suhteita, mahdollisia puutoksia tai myrkyllisen korkeita pitoisuuksia. Alkuaineista erityisesti rikki ja typpi kuvastavat ilman epäpuhtauksien aiheuttamaa kuormitusta. Neulasten ravinnepitoisuuksien luontainen vaihtelu on suurta, sillä pitoisuuksiin vaikuttavat lukuisat tekijät. (Jussila ym. 1999.) Yksiselitteisiä ohjearvoja neulasten alkuainepitoisuuksille on vaikea antaa, sillä ohjearvot vaihtelevat eri lähteissä (vrt. Reinikainen ym. 1998). Taulukoissa 12–13 on esitetty eri lähteistä peräisin olevia ohjearvoja, jotka kuvaavat neulasten alkuainepitoisuuksia puiden normaalin ravinnetasapainon kannalta. Arvot vaihtelevat lähteestä riippuen eivätkä kuvaa suoranaisesti puille haitallisia pitoisuuksia. Tämän vuoksi ravinnetasapainoa arvioitaessa on otettava huomioon mm. metsätyyppi ja muut ravinteisuuteen vaikuttavat tekijät. Taulukossa 12 on esitetty ravinnepitoisuuksien ohjearvoja sekä eri lähteistä laskettuja ravinnepitoisuusaineistojen tunnuslukuja kangasmaan männiköille sekä taulukossa 13 on YK:n Euroopan talouskomission alkuainepitoisuuksien ohjearvoja Keski-Euroopan metsiin. Verrattuna suomalaisiin ohjearvoihin eurooppalaiset ohjearvot ovat korkeampia, eivätkä ole erilaisten olosuhteiden vuoksi suoraan Suomeen sovellettavissa.

Havupuiden normaalina kokonaisrikkipitoisuutena tausta-alueilla pidetään 900 mg/kg kuiva-ainetta, kun kuormitetuilla alueilla Etelä-Suomessa pitoisuus voi olla 1500 mg/kg (Jussila 1999). Puiden kasvun kannalta sopivana rikkipitoisuutena pidetään 900–1200 mg/kg (Reinikainen ym. 1998).

Taulukko 12. Neulasanalyysin tulkinnassa tarvittavia arvoja kangasmaan metsille (Reinikainen ym. 1998 Brække 1995, Mälkönen 1991 ja Raitio 1994 mukaan).

Mänty	Ankara puutos	Sopiva (optimi)	Keskiarvo	Minimi	Maksimi
N %	1,1 - 1,3	1,5 - 2,1	1,23	0,74	2,25
P g/kg	0,8 - 1,2	1,4 - 1,8	1,46 - 1,52	0,98	3
K g/kg	3,0 - 4,1	5,0 - 7,0	4,82 - 4,87	3,1	8
Ca g/kg	1,0 - 2,1	yli 3,0	1,85 - 2,28	1,14	4,24
Mg g/kg	0,3 - 0,7	0,5 - 1,0	0,99 - 1,07	0,52	1,48
S g/kg	0,5 - 0,9	yli 0,9	0,94	0,66	1,42
B mg/kg	alle 4	yli 8,0	12,1	3,6	27,6
Cu mg/kg	1,9 - 3,0	Ei optimiarvoa	2,6 - 3,2	0,8	5,9
Zn mg/kg	alle 5,0	Ei optimiarvoa	40 - 46	25,5	61
Mn mg/kg	alle 7,0	Ei optimiarvoa	409 - 555	157	767
Fe mg/kg	27 - 30	Ei optimiarvoa	46,4	24,3	148

Taulukko 13. Männyn neulasten alkuainepitoisuuksien luokitteluarvot YK/ECE:n mukaan (Jussila 1999).

Luokkaraja	N g/kg	P mg/kg	K mg/kg	Ca mg/kg	Mg g/kg	S mg/kg
Alin arvo	12	1000	3500	1500	600	1100
Ylin arvo	17	2000	10 000	4000	1500	1800

Neulasnäytteet kerättiin standardin SFS 5669 mukaisesti huhtikuussa 2010 viideltä havaintoalalta tutkimusalueen suurimpien päästölähteiden läheisyydestä. Neulasnäytteet tulee kerätä puiden lepoaikana, sillä kasvukaudella alkuainepitoisuuksissa on huomattavia vaihteluita (esim. Raitio ja Merilä 1998). Kustakin näytepuusta katkaistiin 3–4 oksaa eri puolilta latvustoa 8–12 metrin korkeudelta. Näytteet pakattiin muovipusseihin, joita säilytettiin pakastimessa näytteiden esikäsittelyyn asti. Näytteistä erotettiin toisen vuosikasvaimen neulas (vuoden 2008 vuosikerta), jotka kuivattiin paperipusseissa noin 40 °C lämpötilassa viikon ajan. Kuivatut neulaset jauhettiin homogeeniseksi massaksi ja hajotettiin väkevän typpihapon avulla märkäpoltolla mikroaalto-polttolaitteistossa. Jäähtyneet näytteet laimennettiin vedellä ja sentrifugoitiin. Neulasnäytteiden rikkipitoisuudet määritettiin ICP-OES -laitteistolla standardin SFS-EN ISO 11885:98 mukaisesti (taulukko 15). Rinnakkaismääritysten lisäksi alkuainemääritysten laadunvarmistukseen käytetään sekä laboratorion sisäisiä kontrollinäytteitä että sertifioituja referenssimateriaaleja (NIST SRM 1575, männyn neulaset).

3.5.1

Neulasten alkuainepitoisuuksien kartoittamiseen liittyvät virhelähteet ja luotettavuus

Jyväskylän yliopiston ympäristöntutkimuskeskus tutki vuonna 2004 neulasnäytteiden keräämiseen ja analysointiin liittyviä virheitä. Menetelmän mittaustarkkuus, joka käsittää sekä näytteenottoon että analyysiin liittyvät virheet oli rikkipitoisuudelle keskimäärin $\pm 5\%$ ja typpipitoisuudelle $\pm 7\%$. Heikoimmillaan mittaustarkkuus oli suuren pistepäästölähteen vaikutusalueella rikille $\pm 14\%$ ja typelle $\pm 12\%$ (taulukko 14). Näytteenoton mitta-
usepävarmuuden vähentämiseksi näytteet otetaan eri puolilta näytepuuta, jolloin kokoomanäytteeseen tulee neulasia sekä päästökohteiden puolelta että suojapuolelta. Menetelmän toistettavuutta tutkittaessa ei tilastollisesti merkitseviä eroja juuri havaittu (ks. Polojärvi ym. 2005b). Vuoden 1995 tutkimuksessa neulasten rikkipitoisuuksien kartoittamisen mittaustarkkuudeksi arvioitiin $\pm 7\%$ (Niskanen 1995) ja toistettavuuden osalta $\pm 14\%$ (taulukko 14) (Niskanen ym. 1996).

Neulasten rikki- ja typpipitoisuuden kartoituksessa käytetyn menetelmän tarkkuus heikkenee etenkin tilanteessa, jossa pitoisuuksien vaihteluväli on pieni ja sääolosuhteet vaikuttavat pitoisuuksiin. Ottamalla näytteet eri vuosina samoilta puilta saadaan parempi kuva pitoisuuksien muutoksesta näytealalla. Neulasnäytteistä määritettyjen alkuaineiden laboratorioanalyysiin liittyvät mitta-
usepävarmuudet ja määritysrajat on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 14. Rikin ja typen keskimääräiset mittaustarkkuudet eri vuosina tehdyissä mittaustarkkuuksien arvioinneissa 95 %:n luottamustas- välillä. Vuonna 1995 näytepuita oli alalla viisi vuonna 2004 käytettyjen kymmenen sijasta.

		Keskim. mittaus- tarkkuus	Huonoin mittaus- tarkkuus
Rikki	2004	± 5 %	± 14 %
	1995	± 7 %	
Typpi	2004	± 7 %	± 12 %

Taulukko 15. Neulasten ja sammalten alkuainepitoisuuksien analysoinnissa käytetyt menetelmät, määritysrajat sekä mittausepävarmuudet.

Alkuaine	Menetelmä	Määritysraja mg/kg	Mittausepävarmuus
Al	ICP-OES	5	5-15 mg/kg ± 3 mg/kg; > 15 mg/kg ± 20 %
As	ICP-MS	0,05	0,05-0,15 mg/kg ± 0,03 mg/kg; > 0,15 mg/kg ± 20 %
B	ICP-OES	1	1-3 mg/kg ± 0,6 mg/kg; > 3 mg/kg ± 20 %
Ca	ICP-OES	10	10-40 mg/kg ± 6 mg/kg; > 40 mg/kg ± 15 %
Cd	ICP-MS	0,05	0,05-0,15 mg/kg ± 0,03 mg/kg; > 0,15 mg/kg ± 20 %
Co	ICP-MS	0,1	0,1-0,3 mg/kg ± 0,06 mg/kg; > 0,3 mg/kg ± 20 %
Cr	ICP-MS	0,1	0,1-0,3 mg/kg ± 0,06 mg/kg; > 0,3 mg/kg ± 20 %
Cu	ICP-OES	1	1-4 mg/kg ± 0,6 mg/kg; > 4 mg/kg ± 15 %
Fe	ICP-OES	3	3-20 mg/kg ± 2 mg/kg; > 20 mg/kg ± 10 %
Hg	CVAAS	0,01	0,01-0,05 mg/kg ± 0,01 mg/kg; > 0,1 mg/kg ± 15 %
K	ICP-OES	30	30-150 mg/kg ± 15 mg/kg; > 150 mg/kg ± 10 %
Mg	ICP-OES	10	10-50 mg/kg ± 5 mg/kg; > 50 mg/kg ± 10 %
Mn	ICP-OES	0,2	0,2-0,7 mg/kg ± 0,1 mg/kg; > 0,7 mg/kg ± 5 %
Na	ICP-OES	30	30-100 mg/kg ± 15 mg/kg; > 100 mg/kg ± 15 %
Ni	ICP-MS	0,1	0,1-0,3 mg/kg ± 0,06 mg/kg; > 0,3 mg/kg ± 20 %
P	ICP-OES	10	10-50 mg/kg ± 5 mg/kg; > 50 mg/kg ± 10 %
Pb	ICP-MS	0,05	0,05-0,15 mg/kg ± 0,03 mg/kg; > 0,15 mg/kg ± 20 %
S	ICP-OES	15	15-80 mg/kg ± 8 mg/kg; > 80 mg/kg ± 10 %
V	ICP-MS	0,1	0,1-0,3 mg/kg ± 0,06 mg/kg; > 0,3 mg/kg ± 20 %
Zn	ICP-OES	1	1-2,5 mg/kg ± 0,5 mg/kg; > 2,5 mg/kg ± 20 %

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 muuttaman 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 liuenneina, kaasumaisina tai partikkeleina. Ne sitoutuvat soluihin lähinnä kationinvaihdon kautta. Ilman epäpuhtauksien ottotehokkuus sammalilla vaihtelee ja se on suurempaa märkälasseumasta kuin kuivalasseumasta. Esimerkiksi raskasmetalleista sammat keräävät herkästi lyijyä, kohtalaisen hyvin kromia ja kuparia, mutta suhteellisen huonosti sinkkiä. Muun muassa tästä johtuen 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 pidätyskyky 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

Ympäristöntutkimuskeskuksen sammalnäytteet

Ympäristöntutkimuskeskuksen 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 sammalnäytteet puhdistettiin ja kuivattiin lämpökaapissa noin 40 °C:n lämpötilassa. Sammalten alkuainepitoisuudet määritettiin ICP-OES- ja ICP-MS-laitteistoilla (vrt. s. 27 ja taulukko 15).

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 (Nuuksio 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±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. Taulukossa 16 on verrattu 5 ja 10 osanäytteestä muodostetun kokoomanäytteen mittaustarkkuutta. Tulosten perusteella analysoitaessa useampia osanäytteitä saavutetaan pienempi vaihteluväli. Sammalten osalta paras mittaustarkkuus oli sinkillä, heikoin nikkellillä.

Sammalen alkuainepitoisuuksien analysointiin liittyvät mittausepävarmuudet sekä menetelmien määrittämisrajat ovat samoja kuin neulasillakin ja ne on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 16. Sammalten metallipitoisuuksien 95 %:n luottamusväli, kun kokoomanäyte koostuu 5 tai 10 osanäytteestä (keskiarvo standardoitu 100:ksi).

	5 osanäytettä		10 osanäytettä	
	Nuukcio	Puolarmetsä	Nuukcio	Puolametsä
Cd	100 ± 19	100 ± 19	100 ± 11	100 ± 11
Pb	100 ± 13	100 ± 23	100 ± 8	100 ± 13
V	100 ± 29	100 ± 28	100 ± 17	100 ± 16
Ni	100 ± 74	100 ± 48	100 ± 43	100 ± 28
Fe	100 ± 39	100 ± 29	100 ± 23	100 ± 17
Zn	100 ± 17	100 ± 10	100 ± 10	100 ± 6
Hg	100 ± 33	100 ± 40	100 ± 19	100 ± 23

3.6.2

Metsäntutkimuslaitoksen sammalnäytteet

Metlassa sammalnäytteiksi on kerätty puiden välisistä aukkopaikoista kerrossammalta tai seinäsammalta. Sammalista on erotettu kemiallisia analyyseja varten kolme keräysvuotta edeltävää täyttä vuosikasvua. Niistä on analysoitu vuodesta 1985 lähtien kadmium-, kromi-, kupari-, rauta-, nikkeli-, lyijy-, vanadiini-, sinkki- ja rikki-pitoisuus (ICP-AES), vuodesta 1990 lähtien typpipitoisuus (Micro-Kjeldahl -menetelmä) sekä vuodesta 1995 lähtien arseeni- (GF-AAS) ja elohopeapitoisuus (CV-AFS). Arseenia ei lueta raskasmetalleihin, mutta se on otettu myrkyllisyytensä vuoksi mukaan kartoituksiin. Raskasmetalleina pidetään yleensä metalleja, joiden tiheys ylittää raja-arvon 5 g/cm³. Metlan sammalnäytteenottoaikojen on täytettävä valtakunnallisissa kartoituksissa tietyt vaatimukset lähiläskeuman lähteisiin nähden. Keräyspaikan pitää sijaita esimerkiksi vähintään 300 metrin päässä teollisuuslaitoksista, taajamista, valtateistä ja kaatopaikoista (Poikolainen 2004).

3.7

Metsien terveydentilan seuranta

Metlan Suomessa vuodesta 1985 lähtien koordinoima metsien terveydentilan seuranta on osa yleiseurooppalaista metsien terveydentilan seurantaohjelmaa, joka perustuu kansainväliseen ilman epäpuhtauksien kaukokulkeutumista koskevaan sopimukseen (CLRTAP). Euroopan Unionin jäsenmaissa metsien terveydentilan seuranta toteutetaan vielä vuonna 2011 EU:n Life + -ohjelman tukemana FutMon- hankkeessa. Seurannan tavoitteena on tuottaa säännöllinen yleiskatsaus metsien tilan alueellisista ja ajallisista vaihteluista suhteessa ilmaasaasteisiin ja muihin stressitekijöihin laaja-alaisen, systemaattisen seurantaverkon avulla. Seuranta myös tukee metsäpoliittista päätöksentekoa kansallisella eurooppalaisella ja globaalilla tasolla suhteessa kestävään kehitykseen ja esim. Euroopan metsäministerikonferenssien (MCPFE) päätöksiin, ja tuottaa ajantasaista tietoa suurelle yleisölle. (Nevalainen 2011.)

Seurannassa käytetään kansainvälisesti sovittuja menetelmiä. Toiminta jakaantuu kahteen osaan. Laaja- alaisessa seurannassa on mukana latvuksen harsuuntumisaste (neulas- tai lehtikato), värioireiden määrä sekä sienten, eläinten ja elottomien tekijöiden aiheuttamat tuhot. Intensiiviseurannassa tutkitaan puolestaan metsien kunnon, ilman epäpuhtauksien sekä muiden stressitekijöiden välisiä vuorosuhteita. Intensiiviseurannassa seurattavia asioita ovat puiden kunnon lisäksi puiden ravinnetila, laskeuma, maaveden koostumus, karikesato, puuston kasvu, puiden fenologia, aluskasvillisuuden muutokset sekä sääolot. (Nevalainen 2011.)

3.8

Paikkatietomenetelmät

Paikkatietoaineistojen käsittelyssä, tuottamisessa ja visualisoinnissa hyödynnettiin MapInfo 8.0, Map-Viewer 5 sekä Surfer 8 –ohjelmistoja. Vyöhykekartat interpoloitiin kriging-menetelmällä. Kriging-menetelmä laskee tuntemattomalle pisteelle 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 ovat keskenään keskimäärin samanlaisempia kuin toisistaan kaukana olevissa paikoissa.

Vyöhykekarttoja tarkasteltaessa tulee huomioida, että interpolointitulokset on aina yleistys, jonka tarkkuuteen vaikuttaa ennen kaikkea tunnettujen pisteiden määrä ja tiheys. Näin ollen interpoloinnin tulosta voidaan pitää luotettavana niillä alueilla, joilla tunnettuja pisteitä (tutkimusaloja) on tiheässä, 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.

3.9

Tilastomenetelmät

Tilastomenetelmien avulla pyrittiin saamaan tietoa ilmanlaatu- ja taustamuuttujien vaikutuksesta tutkittuihin jäkälämuuttujiin, ilmanlaatua kuvaavien muuttujien välisestä yhteisvaihtelusta sekä vuosien välisistä eroista (Partanen ja Veijola 1996). Taustamuuttujiksi otettiin havaintoaloilla tehdyt havainnot sekä eräitä ilmanlaatua ja päästöjä kuvaavia muuttujia. Ilmanlaatu- ja päästömuuttujiksi valittiin havaintoalojen etäisyys lähimpään lupa-velvolliseen teollisuus- tai energialaitokseen sekä tämän lähimmän laitoksen päästömäärät rikkidioksidin, typen oksidien sekä hiukkasten osalta (Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011, Aho 2010).

Mikäli tarkastellut muuttujat eivät noudattaneet parametristen testien oletuksia, tehtiin niille logaritmi- ($\lg(X+1)$), potenssi- tai neliöjuurimuunnos. Jos muuttujat eivät muunnoksista huolimatta noudattaneet parametristen testien oletuksia, käytettiin parametrittomia testejä. Tilastollisten testien tekemiseen käytettiin PASW Statistics 18.0 – ohjelmaa.

3.9.1

Taustamuuttujien vaikutus ja ilmanlaatua kuvaavien muuttujien keskinäiset korrelaatiot

Luokittelevien taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin jäkälämuuttujiin testattiin parametrittomalla Kruskal-Wallis testillä ja Mann-Whitney U-testillä. Luokittelevina muuttujina käytettiin metsätyyppejä, 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 nollihypoteesi sen ollessa tosi, kasvaa (Ranta ym. 1989).

3.9.2

Vuosien väliset vertailut

Vuosien 1998 ja 2009 välisiä eroja jäkälämuuttujissa testattiin parametrittomalla parittaisten otosten merkkitestillä.

3.9.3

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 selittävälle muuttujalle logaritmimuunnos ($\lg(X+1)$). 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 Durbin-Watsonin -testillä (d): käytännössä jäännökset ovat riippumattomia jos $1,6 < d < 2,4$.

3.9.4

Pääkomponenttianalyysi

Pääkomponenttianalyysissä 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. Analyysissä 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. Analyysistä saatuja pääkomponenttikohtaisia piste-arvoja 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

Mäntyjen runkojäkälät

Mäntyjen jäkälälajistoa kuvaavien muuttujien keskiarvot, suurin ja pienin arvo sekä keskihajonta on esitetty taulukossa 17. Kutakin jäkälälajistoa kuvaavaa muuttujaa on tarkasteltu tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Taulukko 17. Männyn runkojäkälien ilmanpuhtausindeksin, alakohtaisen ja puukohtaisen lajimäärän, sormipaisukarpeen vaurioasteen, yleisen vaurioasteen, sormipaisukarpeen peittävyuden, luppojen peittävyuden ja levän yleisyyden keskiarvo, keskihajonta ja pienin ja suurin arvo. Lajimääriä laskettaessa ei ole huomioitu levää ja seinäsuomujäkälää.

n= 300	Keskiarvo	Pienin	Suurin	Keskihajonta
IAP	2,7	0,5	3,9	0,70
Lajimäärä/näyteala	7,4	1	10	1,42
Lajimäärä/puu	6,0	0	10	1,75
Yleinen vaurioaste	2,5	1,0	4,9	0,77
Sormipaisukarpeen vaurioaste	1,9	1,0	5,0	0,54
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	2,6	0	10,1	1,59
Luppojen peittävyys (%)	0,10	0	2,0	0,26
Levän yleisyys	1,6	0	5	1,88

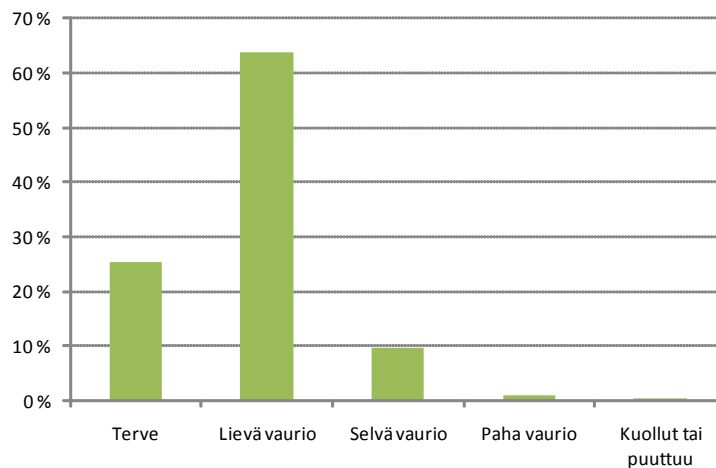
4.1.1

Sormipaisukarpeen vaurioaste

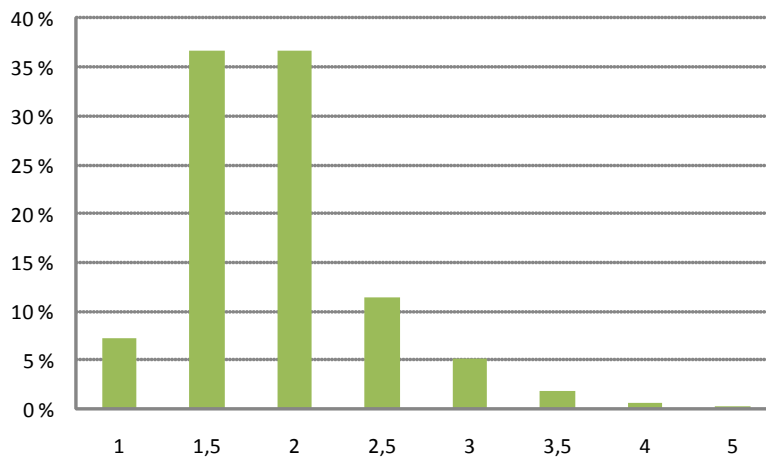
Sormipaisukarpeen vaurioasteita arvioitiin puolen vaurioluokan välein viisiportaisella asteikolla (ks. taulukko 7 ja kuva 26), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Vaurioita arvioitiin puittain, minkä perusteella arvioitiin havaintoalan keskimääräinen vaurioaste.

Sormipaisukarpeen vauriot olivat tutkimusalueella keskimäärin lieviä (keskimääräinen vaurioaste 1,9). Vaurioasteet vaihtelivat tutkimusalueella terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (taulukko 17). Vaurioiden jakaantumista koko aineistossa tutkittiin luokittelemalla vaurioasteet sekä havaintoaloittain että havaintopuittain (kuvat 27 ja 28). Suurimmalla osalla (64 %) havaintoaloista sormipaisukarve oli lievästi vaurioitunutta. Sormipaisukarve oli tervettä 25 %:lla havaintoaloista, selvästi vaurioitunutta 9,7 %:lla havaintoaloista ja pahasti vaurioitunutta 1 %:lla havaintoaloista. Sormipaisukarve oli kuollutta yhdellä Juuassa sijaitsevalla havaintoalalla (ala 125).

Tutkimuspuittain tarkasteltuna sormipaisukarve oli tervettä tai melkein tervettä (vaurioaste 1 tai 1,5) 44 %:lla havaintoaloista. Suurella osalla (37 %) tutkimuspuista sormipaisukarve oli lievästi vaurioitunutta, ja 12 %:lla vauriot olivat lievän ja selvän välillä (vaurioaste 2,5). Selviä ja tätä suurempia vaurioita havaittiin 8 %:lla puista. Rungoista 0,3 %:lla (5 runkoa) sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui.



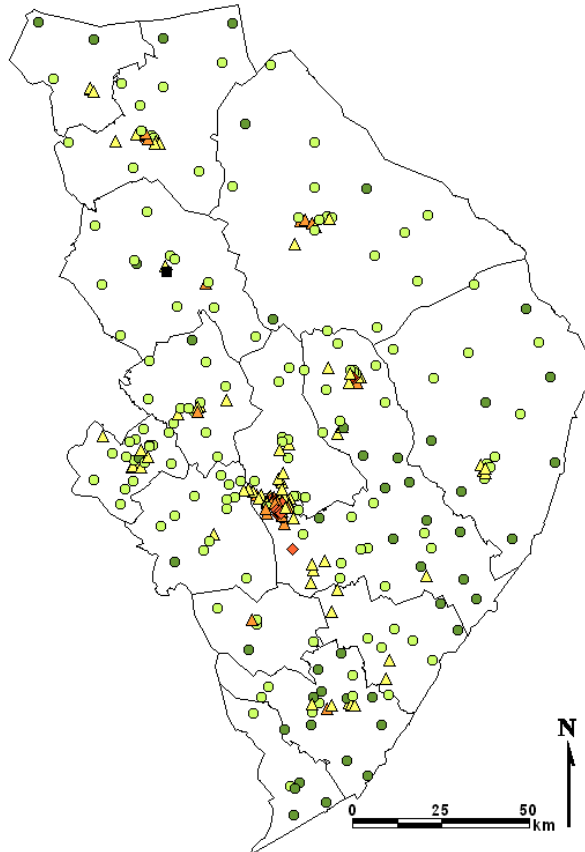
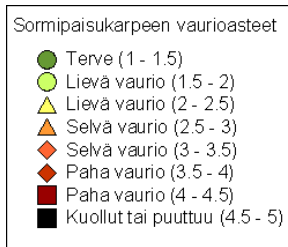
Kuva 27. Sormipaisukarpeen vaurioasteet havaintoaloilla luokittain vuonna 2010. N = 300.



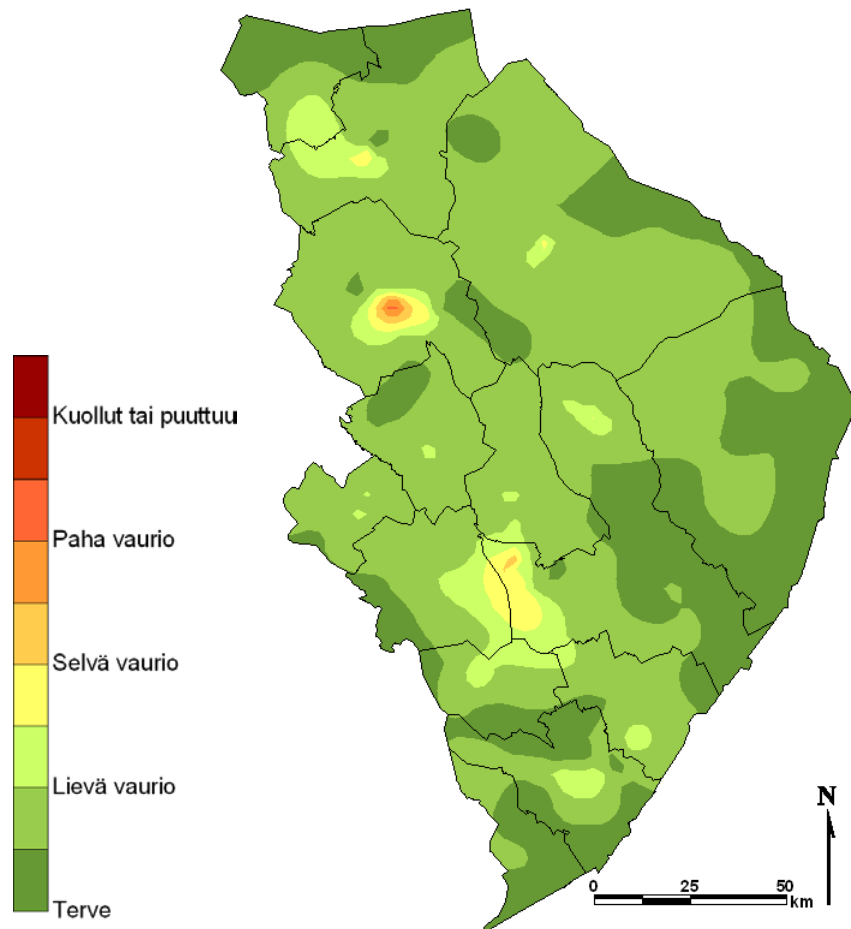
Kuva 28. Sormipaisukarpeen vaurioasteet luokiteltuna rungoittain vuonna 2010. N = 1500.

Sormipaisukarve oli kuollutta tai puuttui yhdeltä havaintoalalta, joka sijaitsi Juuassa, noin 4,5 km Juuan keskustasta lounaaseen, jo toiminnan lopettaneen turkistarhan läheisyydessä. Pahoja vaurioita havaittiin 3 havaintoalalla Joensuun keskusta-alueella. Selviä vaurioita havaittiin 29:lla havaintoalalla, jotka sijaitsivat pääasiassa Joensuun, Lieksan ja Nurmeksen keskusta-alueella sekä Uimaharjussa. Lieviä vaurioita havaittiin 191:lla havaintoalalla, jotka sijoituivat ympäri tutkimusalueetta. Sormipaisukarve oli tervettä 76 havaintoalalla, jotka sijaitsivat pääasiassa Kesälahdella, Kiteellä, Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa ja Kiihtelysvaarassa, Ilomantsissa ja Valtimon ja Nurmeksen pohjoisosissa. (Kuva 29.)

Terveen (vaurioaste 1-1,5) sormipaisukarpeen vyöhykkeet sijoituivat Nurmeksen ja Valtimon pohjoisosiin, Lieksan ja Ilomantsin itärajalle, Tuupovaaraan ja Kiihtelysvaaraan ja Kesälahden ja Kiteen kuntien rajan tuntumaan. Lievästi vaurioituneen (vaurioaste 1,5–2,5) sormipaisukarpeen vyöhykkeet kattoivat valtaosan tutkimusalueesta. Selvästi vaurioituneen sormipaisukarpeen vyöhykkeitä muodostui Joensuun keskusta-alueelle ja siitä etelään, sekä Juuan kunnan alueella sijaitsevan entisen turkistarhan ympäristöön. Tutkimusalueen ainoa pahojen sormipaisukarpeen vaurioiden vyöhyke sijoittui myös tämän entisen turkistarhan ympäristöön. (Kuva 30.)



Kuva 29. Sormipaisukarpeen vaurioasteet havaintoaloilla vuonna 2010.



Kuva 30. Sormipaisukarpeen vaurioasteita kuvaavat vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.

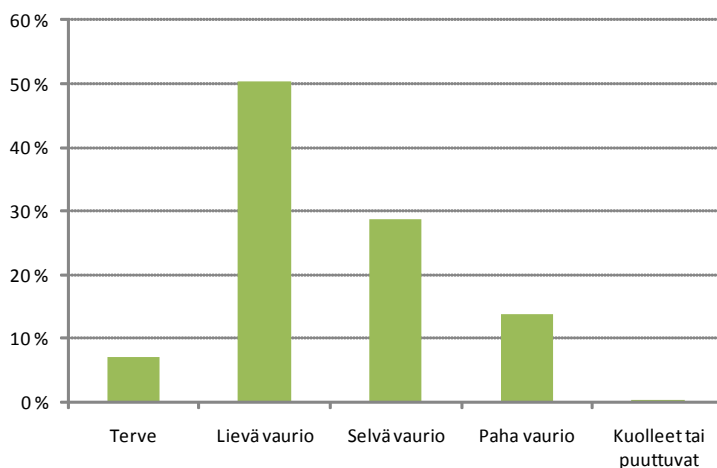
4.1.2

Yleinen vaurioaste

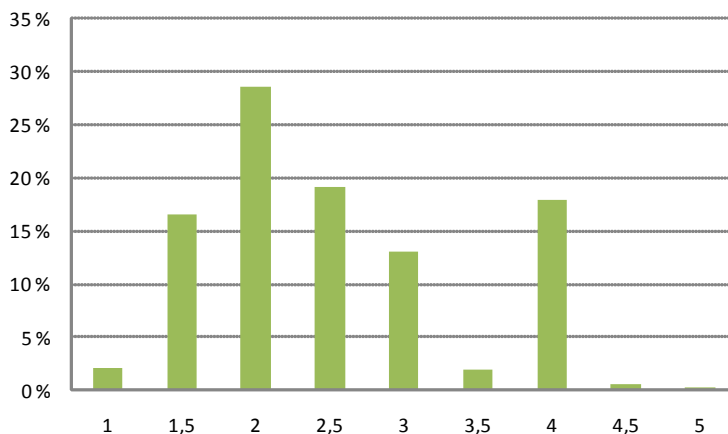
Yleistä vaurioastetta arvioitiin jäkälälajiston kunnon ja koostumuksen perusteella viisiportaisella asteikolla puolen vaurioluokan välein (ks. taulukko 8), jossa vaurioluokka 1 = terve, 2 = lievästi vaurioitunut, 3 = selvästi vaurioitunut, 4 = pahasti vaurioitunut ja 5 = kuollut tai puuttuva. Vaurioita arvioitiin puittain, jonka perusteella arvioitiin havaintoalan keskimääräinen vaurioaste.

Yleinen vaurioaste oli keskimäärin 2,5, eli jäkälälajisto oli tutkimusalueella keskimäärin selvästi vaurioitunutta. Vaurioasteet vaihtelivat terveestä kuolleeseen tai puuttuvaan (taulukko 17). Vaurioiden jakaantumista koko aineistosta tutkittiin luokittelemalla vaurioasteet sekä havaintoaloittain että havaintopuittain (kuvat 31 ja 32). Suurimmalla osalla (51 %) havaintoaloista jäkälät olivat lievästi vaurioituneita. Havaintoaloista 7 %:lla jäkälälajisto oli tervettä. Jäkälälajisto oli selvästi vaurioitunutta 29 %:lla havaintoaloista, pahasti vaurioitunutta 14 %:lla ja kuollutta tai puuttuvaa 0,3 %:lla.

Tutkimuspuittain tarkasteltuna lajisto oli täysin tervettä 32 puulla, ja 17 %:lla melkein tervettä (vaurioaste 1,5). Suurimmalla osalla (29 %) tutkimuspuista lajisto oli lievästi vaurioitunutta tai lajiston vaurio oli lievän ja selvän välillä (19 %). Yleinen vaurioaste arvioitiin selväksi 13 %:lla ja pahaksi 18 %:lla rungoista. Normaali-jakaumasta poikkeava jakauma selittyy yleisen vaurioasteen arviointiperusteella: puun jäkälälajisto luokitellaan pahasti vaurioituneeksi, jos puulla ei kasva pensasmaisia lajeja (luppoja, naavoja tai harmaahankakarvetta), vaikka lehtimäiset lajit olisivatkin vain lievästi tai selvästi vaurioituneita.

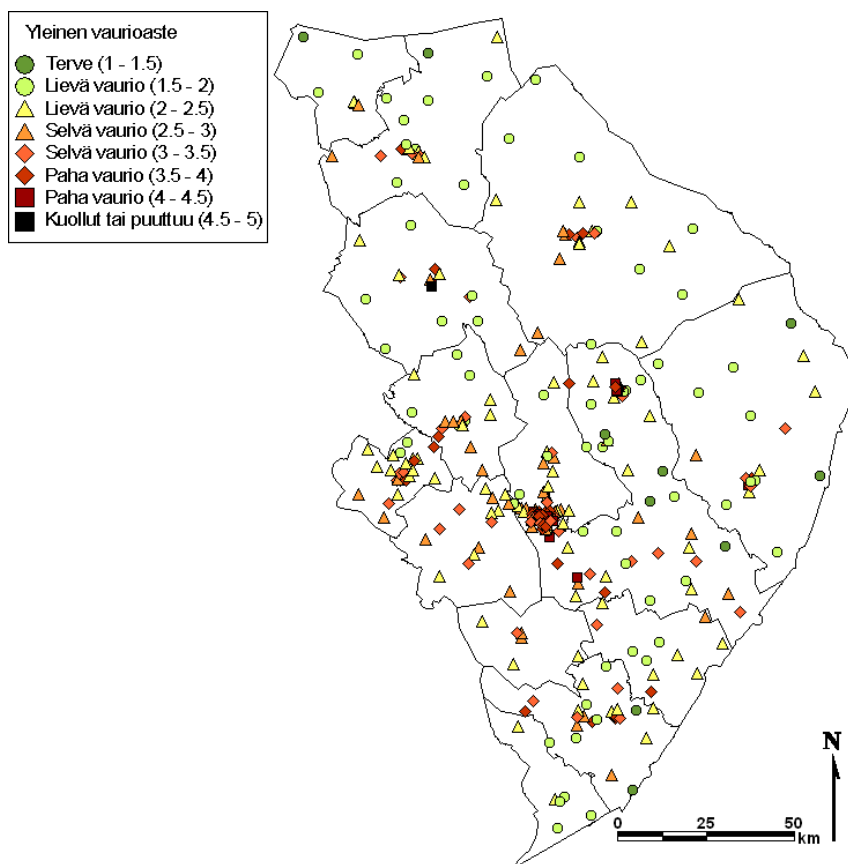


Kuva 31. Yleiset vaurioasteet luokiteltuna aloittain vuonna 2010. N = 300.

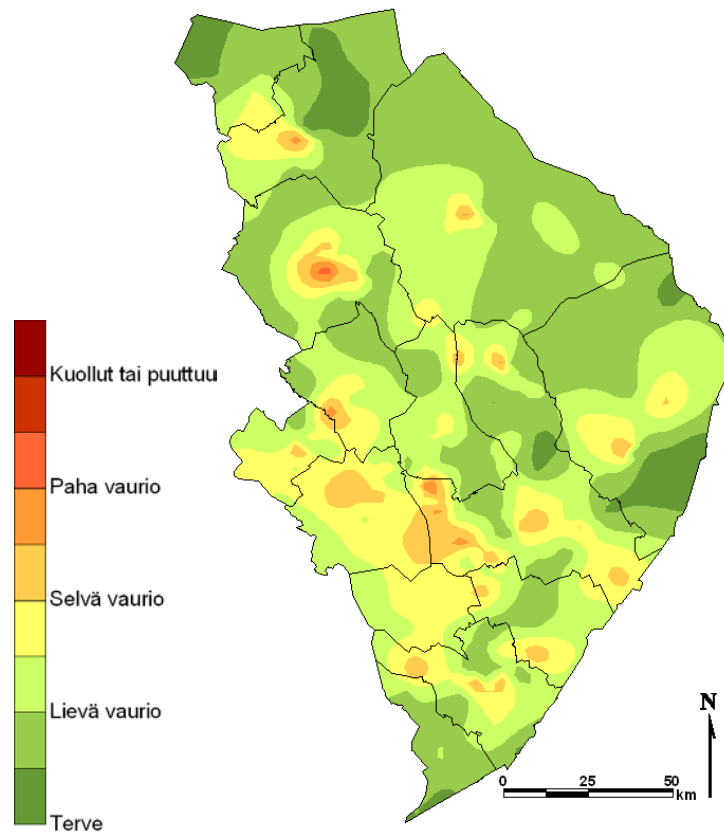


Kuva 32. Yleiset vaurioasteet luokiteltuna rungoittain vuonna 2010. N = 1500.

Jäkälälajiston suurimmat vauriot painottuivat pääasiassa samoille alueille kuin sormipaisukarpeen vauriot, mutta jäkälälajiston yleiset vaurioasteet olivat keskimäärin 0,5-1 vaurioluokkaa sormipaisukarpeen vaurioastetta suurempia. Jäkälälajiston selvien vaurioiden vyöhykkeitä muodostui myös sellaisille alueille, joilla sormipaisukarpeen vauriot olivat lieviä, kuten Nurmeksen, Lieksan ja Kiteen keskusta-alueille, Rääkkylästä Polvijärvelle ja Outokumpuun ulottuvalle vyöhykkeelle, Ilomantsiin sekä Kiihtelysvaaran ja Tuupovaaran alueelle. Suurin osa tutkimusalueesta oli yleisen vaurioasteen perusteella kuitenkin lievästi vaurioitunutta. Terveintä lajisto oli Nurmeksen ja Valtimon pohjoisosissa sekä Ilomantsin eteläosassa. (Kuvat 33 ja 34.)



Kuva 33. Yleinen vaurioaste havaintoaloilla vuonna 2010.

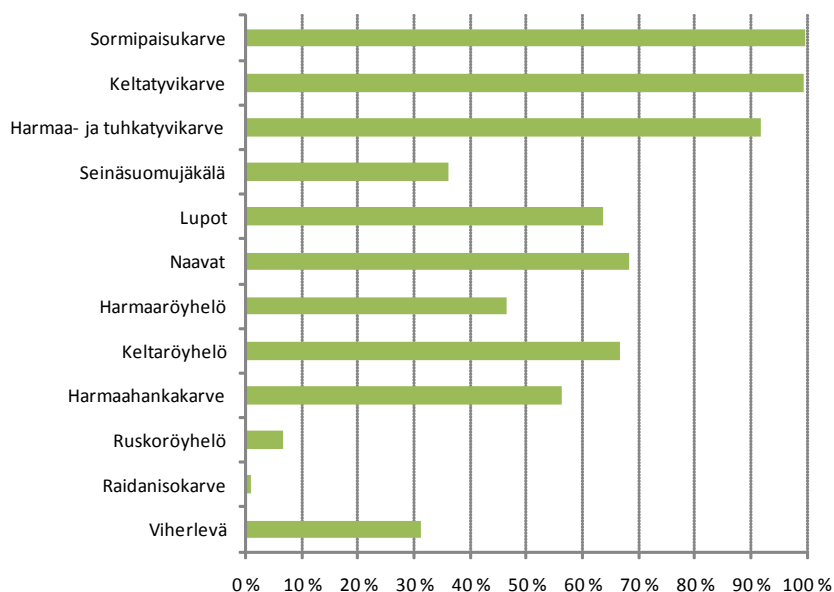


Kuva 34. Yleisen vaurioasteen vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.

4.1.3

Jäkälälajien määrät ja yleisyys

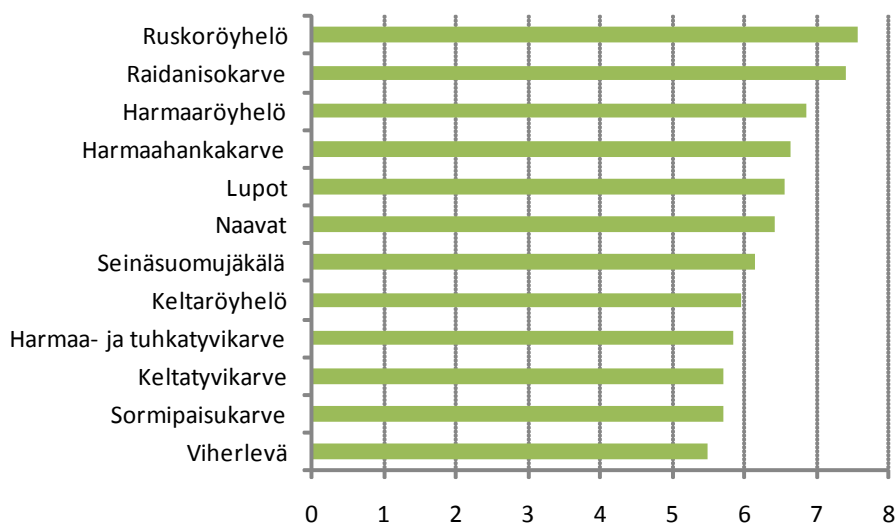
Yleisimmät lajit tutkimusalueella olivat sormipaisukarve ja keltatyvikarve, joita esiintyi lähes jokaisella tutkimuspuulla. Myös harmaa- ja tuhkatyvikarvetta kasvoi suurella osalla (92 %) tutkimuspuista. Yli puolella tutkimuspuista esiintyi luppoja (64 %), naavoja (68 %), keltaröyhelöä (67 %) ja harmaahankakarvetta (56 %). Viherlevää esiintyi 30 %:lla puista, seinäsuomujäkälää 36 %:lla ja harmaaröyhelöä 47 %:lla puista. Harvinaisimmat lajit olivat ruskoröyhelö (7 % puista) ja raidanisokarve (1 %). (Kuva 35.)



Kuva 35. Männyn runkojäkälien esiintymistiheys tutkimusalueella vuonna 2010.

Runkojäkälien seuralaislajien, eli kyseisen lajin kanssa samalla rungolla esiintyvien muiden lajien määrät, on esitetty kuvassa 36. Eniten seuralaislajeja oli kahdella tutkimusalueen harvinaisimmalla lajilla (seuralaislajimäärät suluissa) ruskoröyhelöllä (7,6) ja raidanisokarpeella (7,4). Yli kuusi seuralaislajia oli harmaaröyhelöllä (6,8), harmaahankakarpeella (6,6), lupoilla (6,6), naavoilla (6,4) ja seinäsuomujäkälällä (6,1). Keltaröyhelöllä, harmaa- ja tuhkatyvikarpeella, keltatyvikarpeella, sormipaisukarpeella ja viherlevällä oli yli viisi seuralaislajia kullakin. Vähiten seuralaislajeja oli viherlevällä (5,5).

Tutkimuksessa havaitut seuralaislajimäärät noudattavat melko hyvin oletuksia jäkälien herkkyydestä 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 männyllä, mikä voi vaikuttaa sen seuralaislajien lukumäärään.

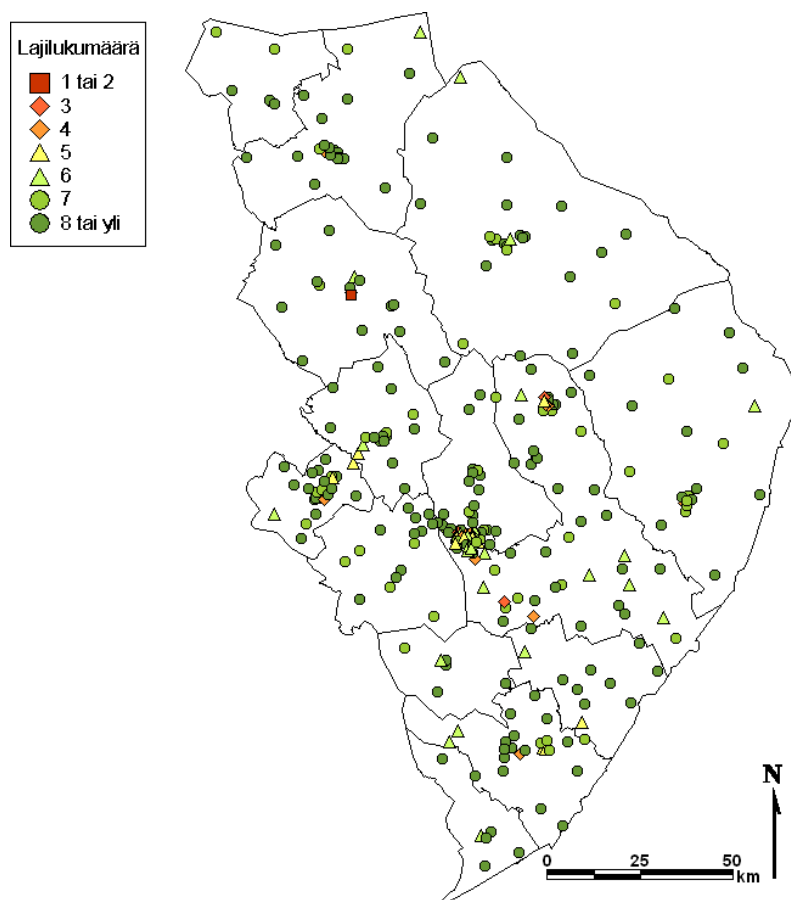


Kuva 36. Männyn runkojäkälien seuralaislajien lukumäärät tutkimusalueella vuonna 2010.

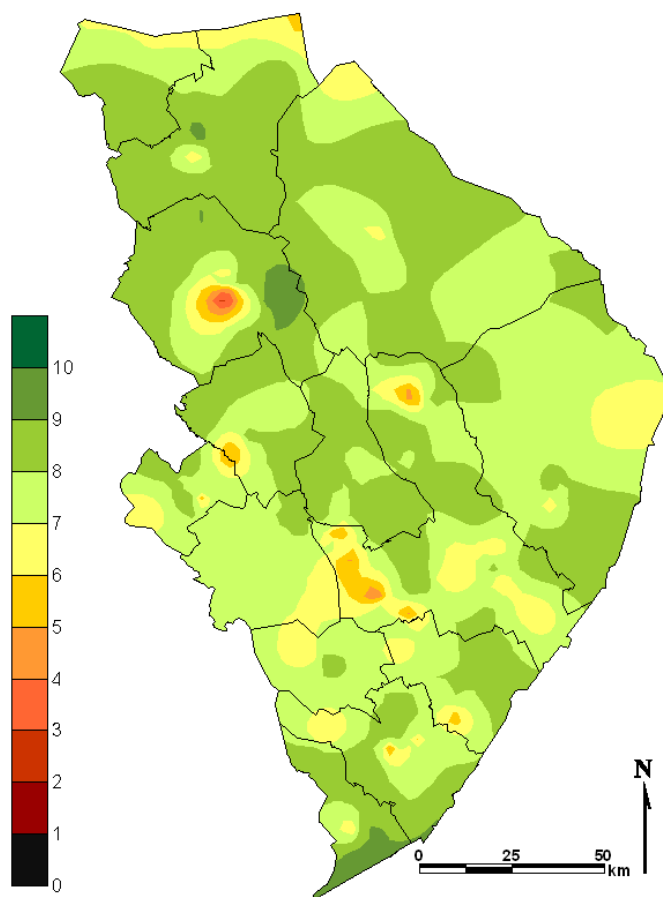
Tutkimusalueella havaittiin keskimäärin 7,4 lajia havaintoalaa kohti ja 6,0 lajia havaintopuuta kohti. Keskimäärin tutkimusalueen jäkälälajisto oli siis sekä havaintoala- että havaintopuukohtaista lajimäärää tarkasteltaessa lievästi köyhtynyt. Vaihteluväli havaintoaloilla oli 1-10 ja havaintopuilla 0-10. (Taulukko 17.) Kokonaan jäkäläautoita havaintopuita tutkimusalueella oli 4. Vastaavasti puita, joilla havaittiin 9 ilman epäpuhtauksista kärsivää jäkälälajia, oli 42. Yhdellä tutkimusrungolla havaittiin kaikki ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajit.

Juuassa, entisen turkistarhan lähellä sijaitsevalla alalla, havaittiin vain yksi ilman epäpuhtauksista kärsivä jäkälälaji. Tämän alan lajisto oli erittäin selvästi köyhtynyt. Vain kolme ilman epäpuhtauksista kärsivää lajia havaittiin kolmella alalla, jotka sijaitsivat Uimaharjun Enocell Oy:n tehtaan lähellä, Joensuun keskustassa ja Pyhäselässä. 4-5 lajia eli köyhtynyt jäkälälajisto oli 28 alalla, jotka sijaitsivat eri puolilla tutkimusaluetta. 6-7 lajia eli lievästi köyhtynyt lajisto oli 84 alalla. Suurin osa havaintoaloista (184) oli jäkälälajistoltaan luonnontilaisia eli niillä esiintyi vähintään 8 ilman epäpuhtauksista kärsivää lajia. (Kuva 37.)

Jäkälälajistoltaan tutkimusalueen runsaslajisinta aluetta olivat tutkimusalueen pohjois- ja eteläosat eli Valtimon, Lieksan, Nurmeksen, Juuan ja Kesälahden kunnat. Luonnontilaisen jäkälälajiston vyöhykkeitä sijoittui myös Kontiolahden, Kiteen ja Ilomantsin alueelle. Lajistoltaan köyhtyneintä aluetta olivat Joensuun keskustan seutu, Hammaslahden ja Joensuun välinen alue, entisen turkistarhan seutu Juuassa, Uimaharjun Enocell Oy:n ympäristö ja Mondo Minerals B.V. Branch Finland:n Horsmanahon ja Pehmytkiven kaivoksen ympäristö Polvijärvellä. Pieniä köyhtyneen lajiston vyöhykkeitä muodostui myös Kiteen keskustan tuntumaan, Kiteen ja Tohmajärvien rajan tuntumaan ja maakunnan pohjoisnurkkaan. (Kuva 38.)



Kuva 37. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärät havaintoaloilla vuonna 2010.



Kuva 38. Vyöhykkeittäinen kuvaus ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lukumäärästä tutkimusalueella vuonna 2010.

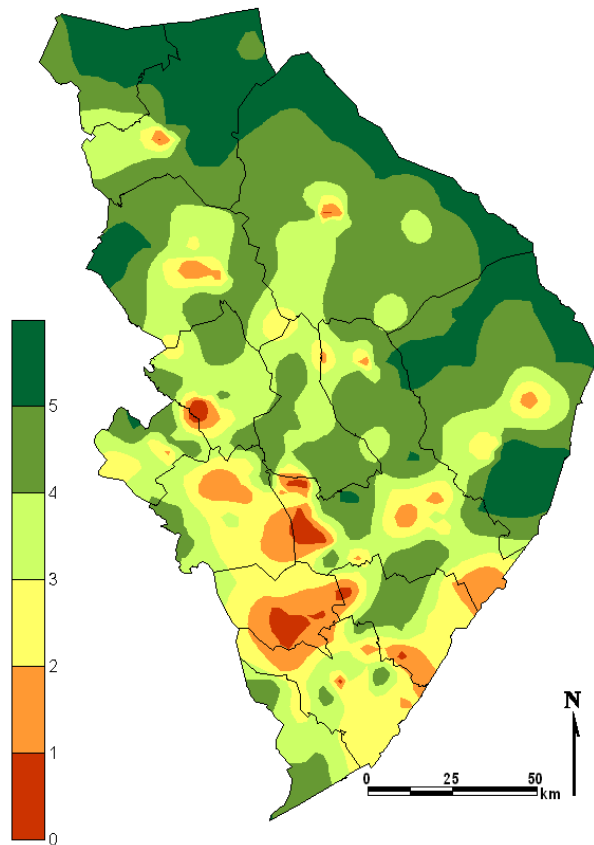
Ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien yleisyydet

Kuvissa 39-42 on esitetty ilman epäpuhtauksista kärsivien loppojen, naavojen, harmaaröyhelön, harmaahankakarpeen sekä harmaa- ja tuhkatyvikarpeiden yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0-5 (0 = lajia ei havaittu tutkimus-alueella lainkaan, 5 = lajia havaittiin jokaisella tutkimuspuulla).

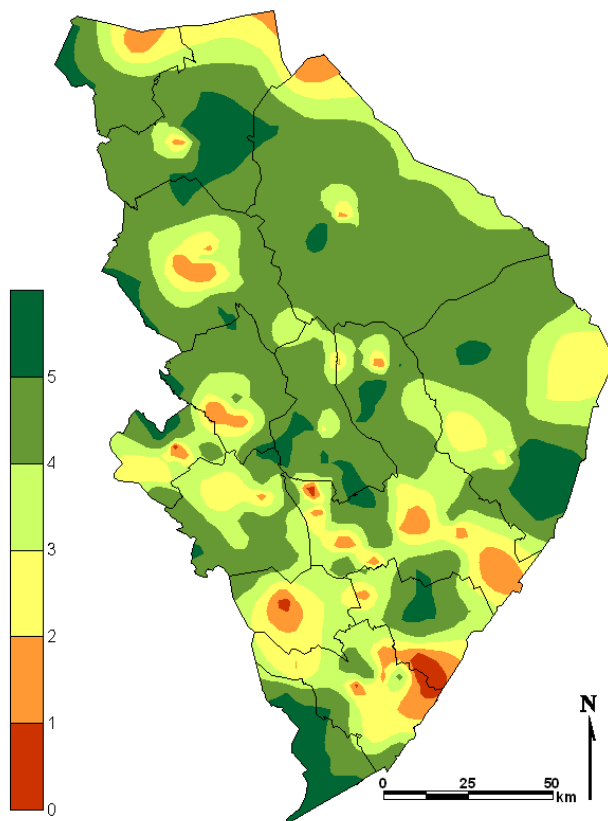
Luppoja havaittiin tutkimusalueella 64 %:lla puista ja 89 %:lla aloista. Kolmasosalla havaintoaloista luppoja kasvoi jokaisella tutkimusrungolla. Keskimäärin luppoja havaittiin havaintoalalla 3,2 puulla. Vyöhykkeet, joilla lopot esiintyivät runsaina, painottuivat tutkimusalueen pohjois- ja keskiosaan. Alue, jolla luppoja esiintyi vain yhdellä tutkimusrungolla tai ei lainkaan, sijoittui nauhamaisesti linjalle Polvijärvi-Liperi-Joensuu-Rääkkylä. (Kuva 39.)

Naavoja havaittiin tutkimusalueella 68 %:lla puista ja 90 %:lla aloista. Naavoja kasvoi jokaisella tutkimusrungolla 41 %:lla havaintoaloista. Keskimäärin naavoja havaittiin 3,4 puulla. Kuten lopot, myös naavat olivat yleisimpiä tutkimusalueen pohjois- ja keskiosassa. Alueet, joilla naavat olivat harvinaisempia, painottuivat tutkimusalueen eteläosaan, mutta naavat olivat harvinaisia myös pienialaisilla alueilla Juuassa ja tutkimusalueen pohjoisosassa. (Kuva 40.)

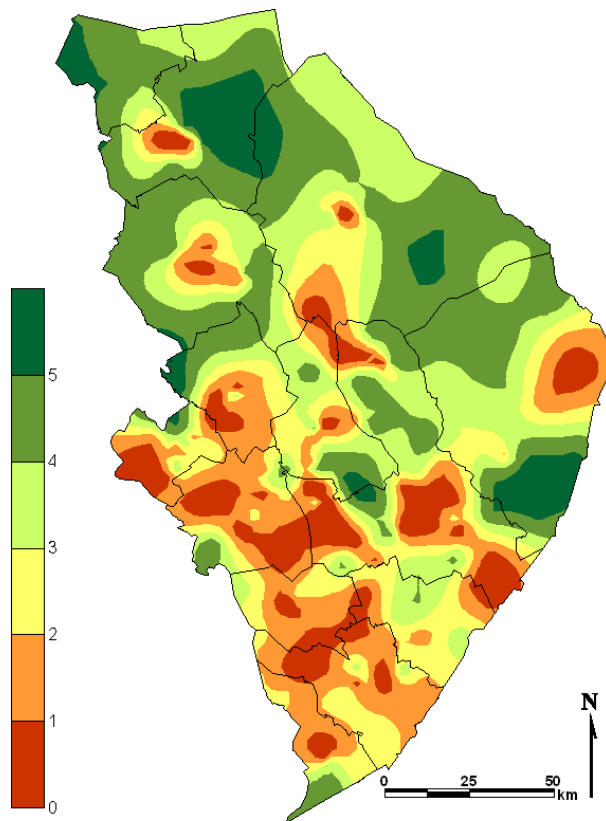
Harmaaröyhelö ja harmaahankakarve olivat luppoja ja naavoja harvinaisempia, mutta esiintyivät tutkimusalueella paikoitellen runsaana. Harmaaröyhelöä tavattiin 47 %:lla tutkimuspuista ja harmaahankakarvetta 56 %:lla. Vastaavasti harmaaröyhelöä tavattiin 69 %:lla ja harmaahankakarvetta 80 %:lla tutkimusaloista. Lajien keskimääräiset yleisyydet olivat harmaaröyhelöllä 2,3 ja harmaahankakarpeella 2,8. Harmaaröyhelön yleisyyden vyöhykkeet olivat samankaltaisia kuin loppojen: harmaaröyhelö oli yleisintä tutkimusalueen pohjoisosissa ja esiintyi harvemmin tai puuttui alueen eteläosan havaintoaloilta. Harmaahankakarve oli yleisintä tutkimusalueen keskiosissa ja puuttui tai esiintyi harvalukuisempaan tutkimusalueen pohjoisrajalla sekä pienialaisilla alueilla muun muassa Juuassa, Lieksassa, Ilomantsissa, Joensuussa ja Outokummussa. (Kuvat 41 ja 42.)



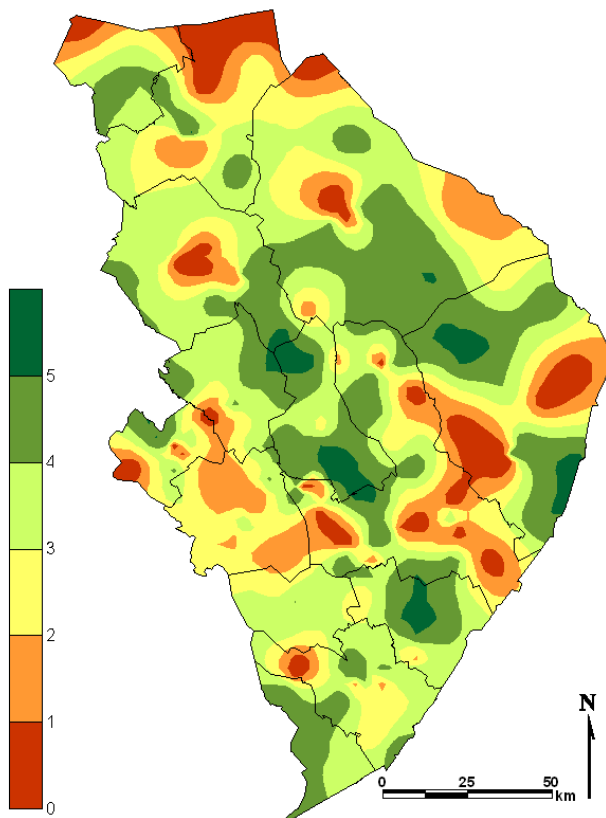
Kuva 39. Luppojen yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.



Kuva 40. Naavojen yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.



Kuva 41. Harmaaröyhelön yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.

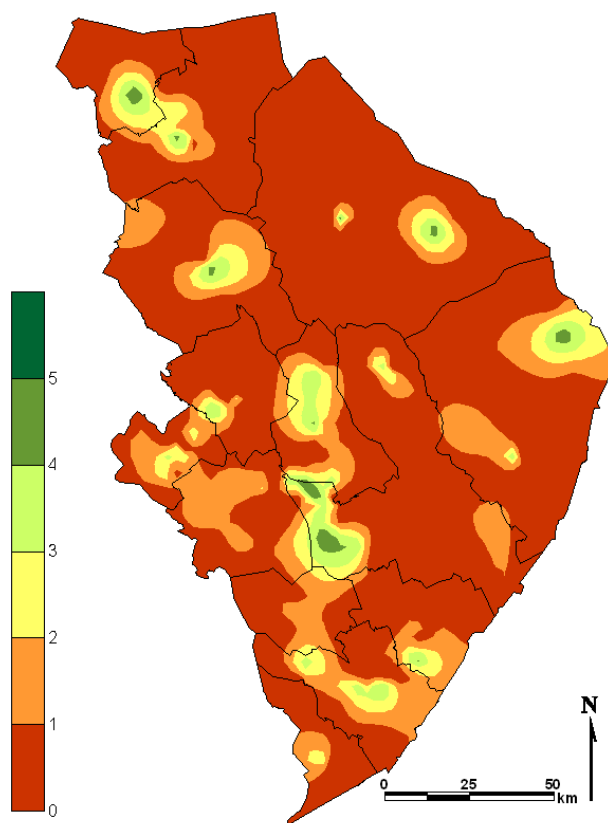


Kuva 42. Harmaahankakarpeen yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.

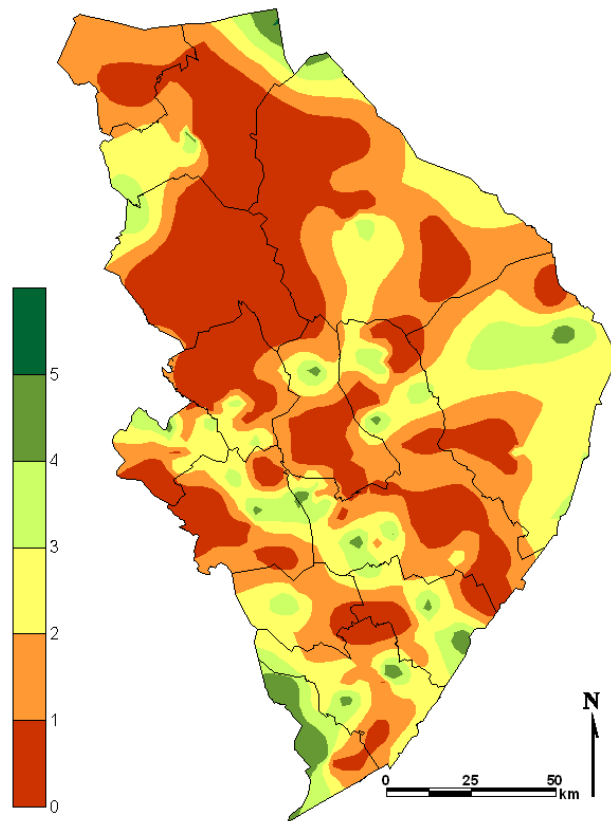
Ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien yleisyydet

Kuvissa 43 ja 44 on esitetty ilman epäpuhtauksista hyötyvien lajien viherlevän ja seinäsuomujäkälän yleisyydet vyöhykkeinä asteikolla 0-5. Keskimäärin levää havaittiin 1,6 havaintopuulla havaintoalaa kohti ja seinäsuomujäkälää 1,8 havaintopuulla. Levää havaittiin 53 %:lla havaintoaloista ja seinäsuomujäkälää 72 %:lla havaintoaloista.

Levien ja seinäsuomujäkälän levinneisyys oli vastakkaista herkkiin lajeihin verrattuna. Niillä alueilla, joilla herkät lajit olivat harvalukuisia tai puuttuivat, erityisesti levä esiintyi runsaana. Näitä alueita olivat Uimaharjusta Joensuuun kautta Kiteelle ulottuva vyöhyke sekä pienialaisemmat vyöhykkeet Nurmeksessa, Juuassa, Ilomantsissa, Lieksassa, Polvijärvellä ja Outokummussa. Seinäsuomujäkälän esiintyminen oli painottunut tutkimusalueen etelä- ja itäosaan, mutta sen yleisyys ei vastannut yhtä hyvin alueiden kuormittuneisuudesta kuin levän. (Kuvat 43 ja 44.)



Kuva 43. Viherlevän yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.



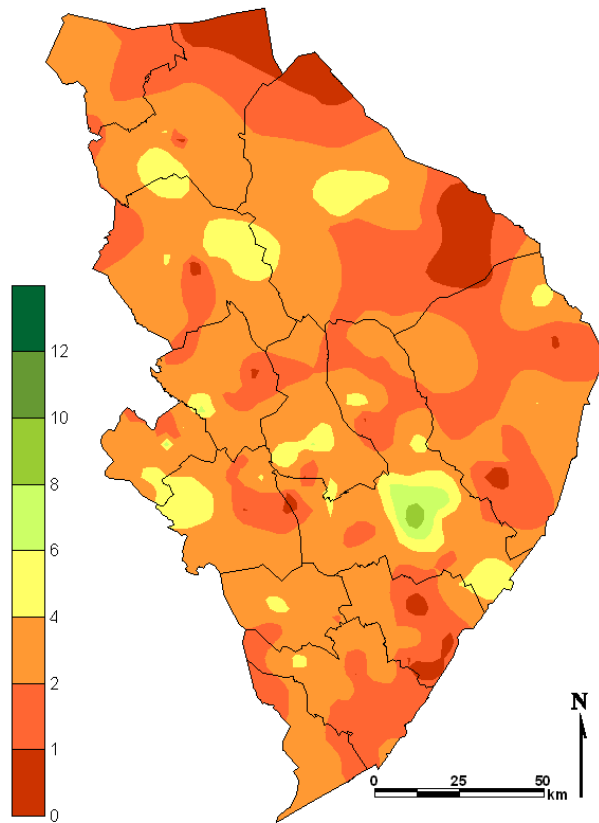
Kuva 44. Seinäsuomujäkälän yleisyys vyöhykkeittäin asteikolla 0-5, jossa 0 = laji ei esiinny havaintoalalla, 5 = laji esiintyy havaintoalan jokaisella puulla.

4.1.4 Peittävydet

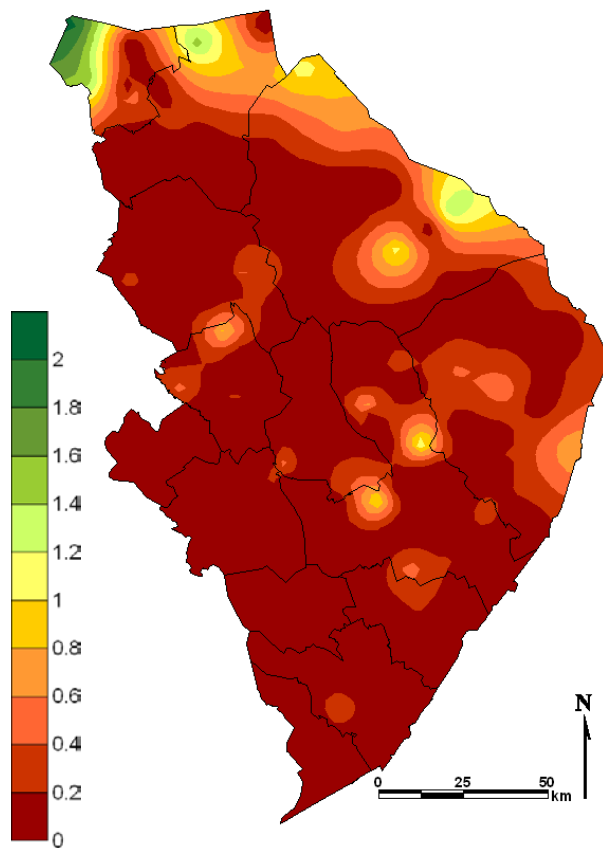
Kuvissa 45 ja 46 on esitetty sormipaisukarpeen sekä luppojen pistefrekvenssimenetelmällä lasketut peittävydet mäntyjen rungoilla havaintoalakohtaisista keskiarvoista yleistettyinä vyöhykkeinä. Karttoja tarkasteltaessa on huomioitava, että erityisesti sormipaisukarpeen peittävyys reagoi ilman epäpuhtauksiin 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 nuorissa kuin vanhoissa männiköissä.

Sormipaisukarpeen keskimääräinen peittävyys oli 2,6% (taulukko 17). Suurimpia sormipaisukarpeen peittävyksiä havaittiin Kiihtelysvaaran ja Tuupovaaran alueella, Liperin ja Outokummun kuntien rajalla, Nurmeksen eteläosassa ja Lieksan keskiosassa. Pienimmän sormipaisukarpeen peittävyden vyöhykkeet muodostuivat Keski-Karjalaan Kiteelle ja Tohmajärvelle, Lieksan, Ilomantsin ja Enon alueille sekä tutkimusalueen pohjoisosaan.

Lupot esiintyivät runsaina vain yksittäisillä aloilla. Luppojen keskimääräinen peittävyys oli 0,10 % (taulukko 17). Lupot olivat runsaimpia tutkimusalueen pohjoisosassa ja ne puuttuivat kuormitetuilta alueilta, mutta luppojen runsaudesta on niiden vähäisen esiintymisen vuoksi vaikea tehdä tarkempia päätelmiä.



Kuva 45. Sormipaisukarpeen keskimääräinen peittävyys (%) vyöhykkeinä tutkimusalueella vuonna 2010.

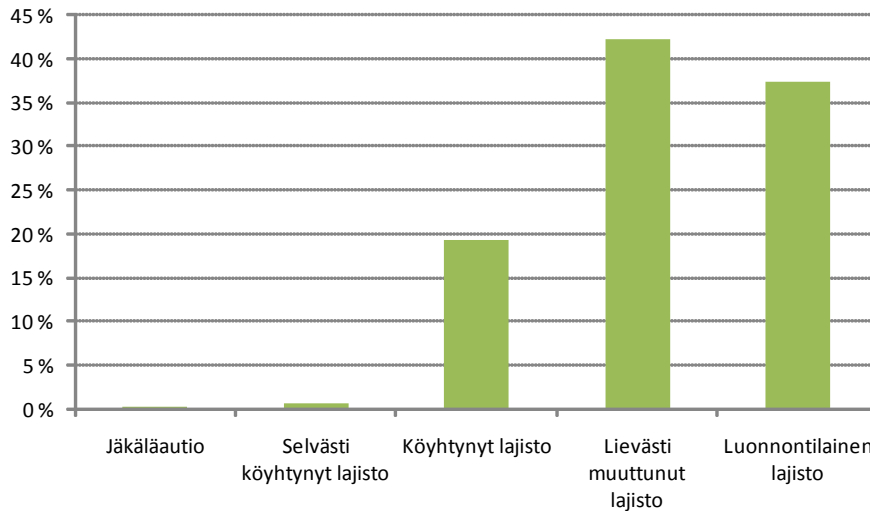


Kuva 46. Luppojen keskimääräinen peittävyys (%) vyöhykkeinä tutkimusalueella vuonna 2010.

4.1.5

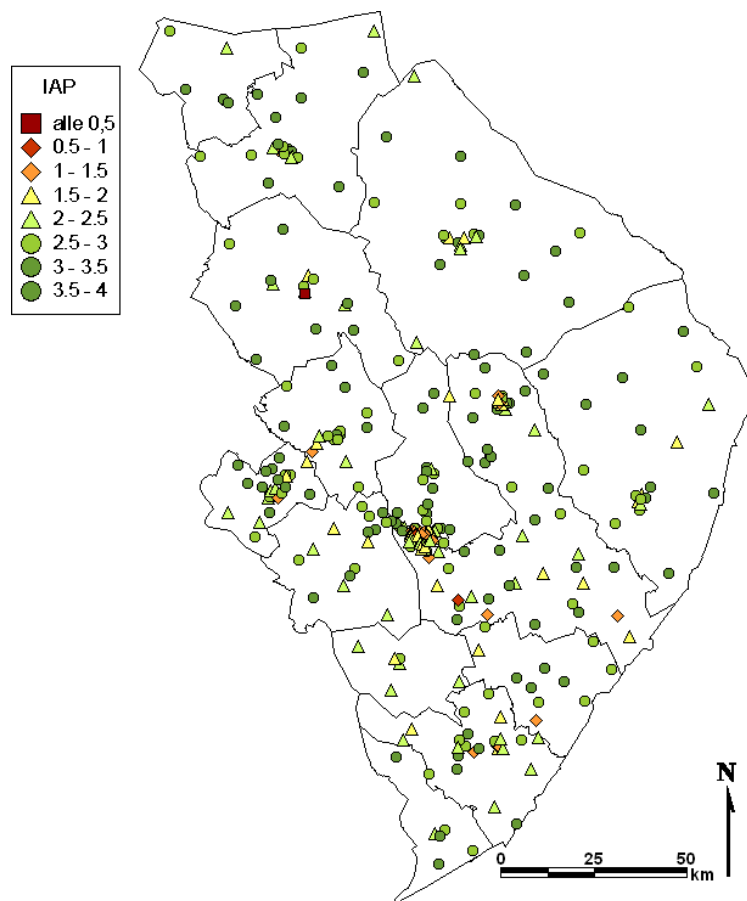
IAP-indeksi

IAP-indeksi oli tutkimusalueella keskimäärin 2,7, minkä perusteella lajistoa voi kuvailla lievästi muuttuneeksi. Pienin IAP-indeksin arvo oli 0,48 (jäkäläautio tai lähes jäkäläautio) ja suurin 3,9 (luonnontilainen lajisto) (taulukko 17). Suurimmalla osalla (42 %) tutkimusaloista oli IAP-indeksin arvon perusteella lievästi muuttunut lajisto. Toiseksi suurimpaan luokkaan, jossa lajisto oli luonnontilaista, aloista sijoittui 37 %. Lajisto oli köyhtynyttä 19 %:lla tutkimusaloista ja selvästi köyhtynyttä 0,7 %:lla. Jäkäläautioiksi tai melkein jäkäläautioiksi luokiteltiin 0,3 % aloista. (Kuva 47.)



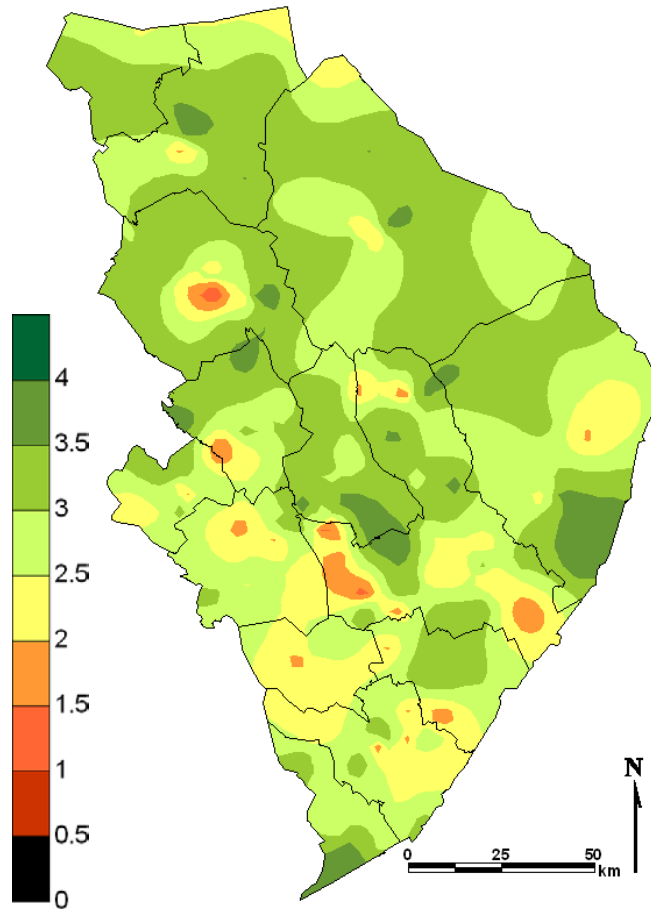
Kuva 47. IAP-indeksin jakauma havaintoaloittain vuonna 2010.

Täysin muuttumaton jäkälälajisto (IAP-indeksin arvo > 3) oli 112 havaintoalalla, jotka sijaitsivat eri puolilla tutkimusaluetta. Aloja, joiden jäkälälajisto oli lievästi muuttunut, oli tutkimusalueella 127 ja nämä sijaitsivat myös eri puolilla tutkimusaluetta. Kaksi alaa, joiden jäkälälajisto oli erittäin selvästi köyhtynyt, sijaitsivat Joensuun keskustassa ja Pyhäselässä. Jäkäläautio ala sijaitsi Juuassa. (Kuva 48.)



Kuva 48. IAP-indeksi tutkimusaloilla vuonna 2010.

Köyhtynein lajisto tutkimusalueella sijaitsi Joensuun keskustan tuntumassa, Pyhäselässä, Juuan entisen turkis-
 tarhan läheisyydessä, Tuupovaaran Öllölan alueella ja Polvijärven lounaisrajalla. Tutkimusalueen etelä- ja keski-
 osaan muodostui laaja lievästi muuttuneen lajiston vyöhyke. Lievästi muuttuneen lajiston vyöhykkeitä muodos-
 tui myös Ilomantsiin, Lieksaan ja maakunnan pohjoisosaan. Maakunnan pohjois- ja keskiosassa jäkälälajisto oli
 laajalti luonnontilaista. Myös Ilomantsin eteläosaan sijoittui luonnontilaisen lajiston vyöhyke. (Kuva 49.)



Kuva 49. IAP-indeksi vyöhykkeittäin tutkimusalueella vuonna 2010.

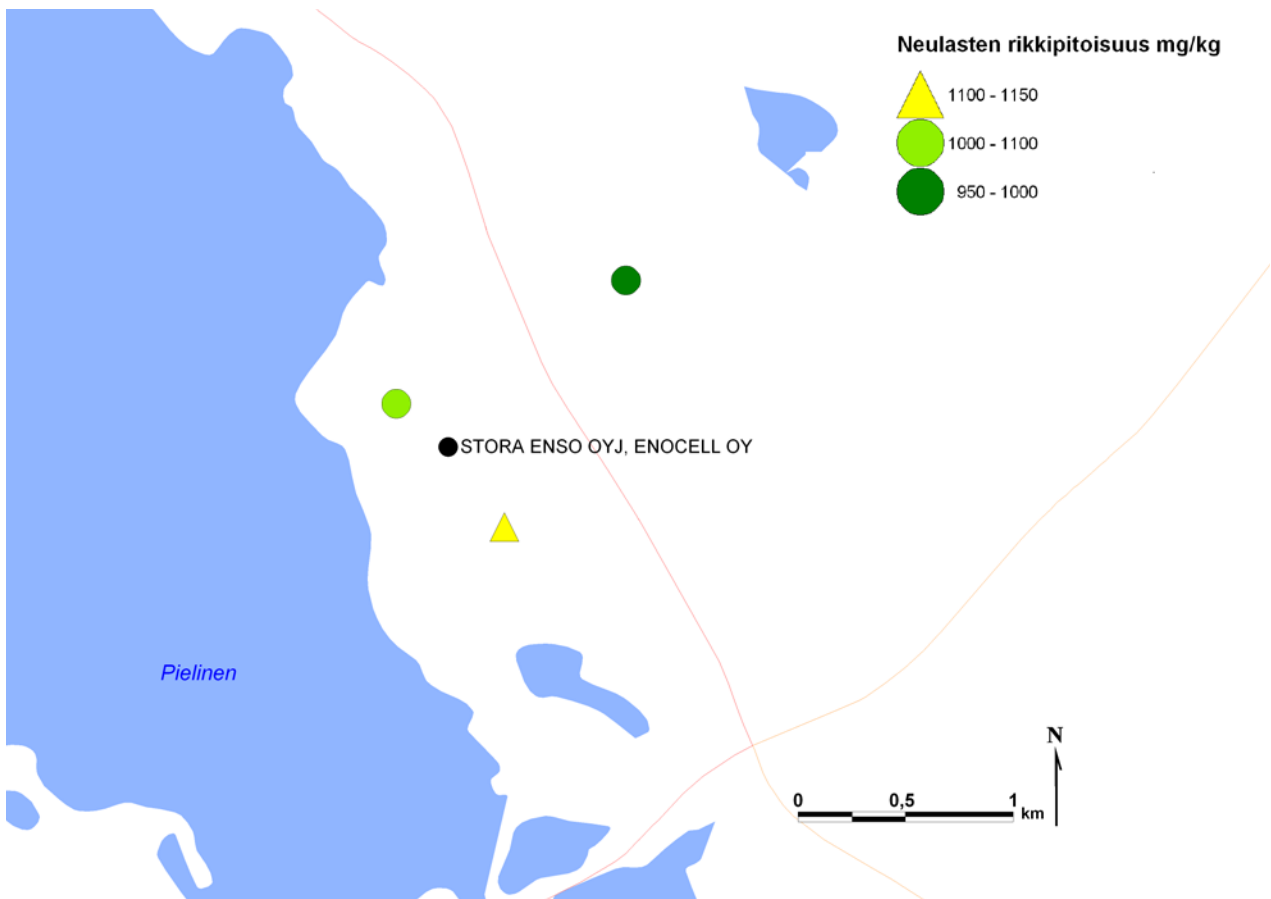
4.2

Neulasten rikkipitoisuus

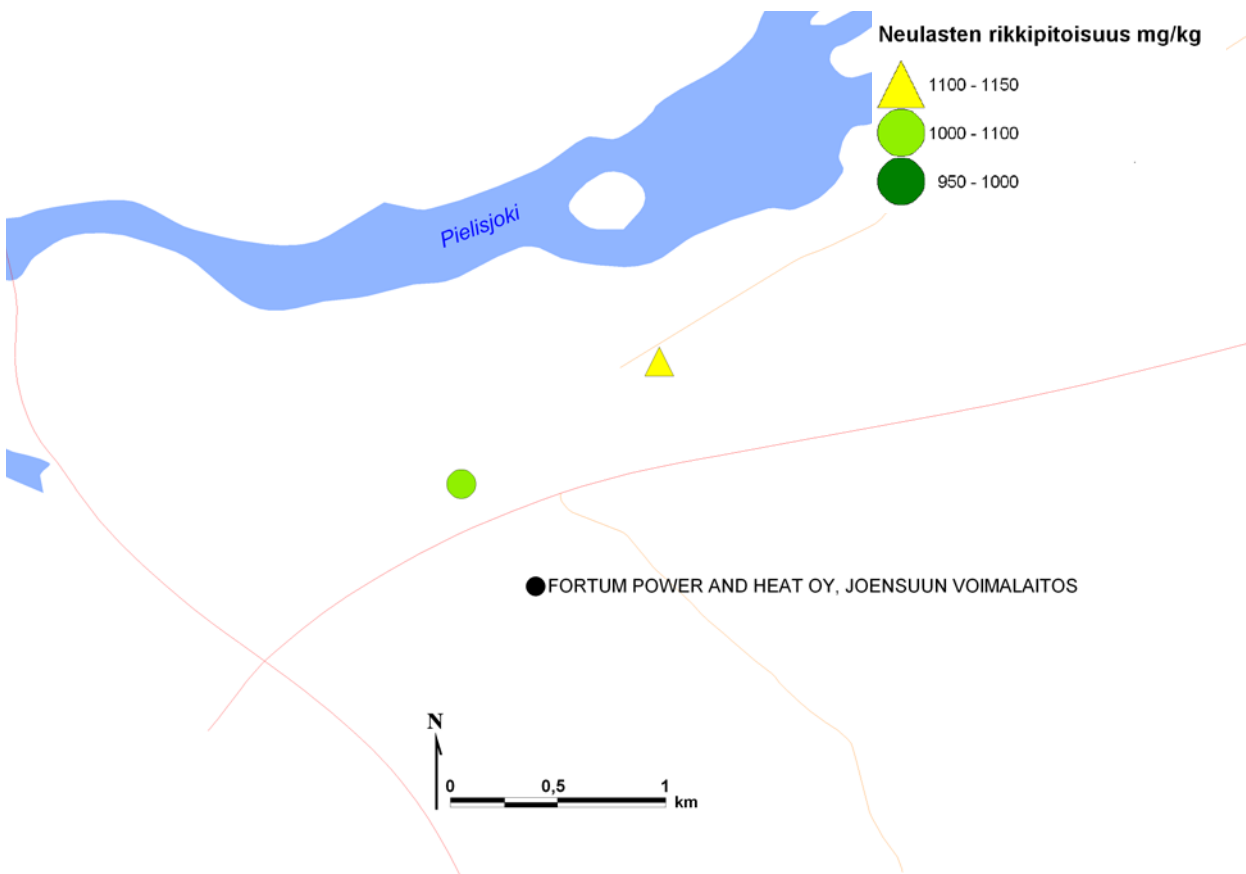
Kuvissa 50 ja 51 on esitetty neulasten rikkipitoisuudet Uimaharjun Enocell Oy:n ja Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun voimalaitoksen läheisyydessä.

Enocell Oy:n tehtaan ympäristössä (alat 37, 40 ja 43) neulasten rikkipitoisuudet olivat keskimäärin noin 19 % normaalia tasoa (900 mg/kg) korkeampia. Korkeimmat (1137 mg/kg) rikkipitoisuudet havaittiin laitoksen kaakkoispuolella alalla 40, joka sijaitsi noin 500 metrin päässä laitoksesta. Reilun kilometrin päässä laitoksen koillispuolella sijaitsevalla havaintoalalla rikkipitoisuudet olivat lähellä normaalina pidettävää tasoa. (Kuva 50.)

Joensuun voimalaitoksen läheisyydessä (alat 44 ja 96) neulasten rikkipitoisuudet olivat keskimäärin noin 23 % normaalia tausta-alueiden pitoisuutta korkeampia. Neulasten rikkipitoisuus oli korkeampi (1132 mg/kg) laitoksen koillispuolella, 1,2 km päässä laitoksesta sijaitsevalla alalla (44), kuin laitoksen pohjoispuolella 600 metrin päässä sijaitsevalla alalla (96). (Kuva 51.)



Kuva 50. Männyneulasten rikkipitoisuudet (mg/kg) Stora Enso Oyj:n Enocell Oy:n tehtaan ympäristössä Uimaharjussa vuonna 2010.



Kuva 51. Männyneulasten rikkipitoisuudet (mg/kg) Fortum Power and Heat Oy:n Joensuu voimalaitoksen ympäristössä vuonna 2010.

4.3

Sammalten alkuainepitoisuudet

Sammalten alkuainepitoisuuksien keskiarvot, pienimmät ja suurimmat arvot sekä keskihajonta on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Sammalten alkuainepitoisuuksien keskiarvot, pienimmät ja suurimmat arvot sekä keskihajonta.

N = 300	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Mg mg/kg	Ni mg/kg	Fe mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg
Keskiarvo	0,16	1345	0,16	1,7	5,2	1,9	1171	2,5	431	922	38	1,6
Pienin	0,04	942	0,10	0,49	3,4	0,97	708	0,86	124	695	27	0,67
Suurin	2,8	1971	0,34	17	14	3,7	2666	39	2213	1229	69	5,0
Keskihajonta	0,28	231	0,04	2,1	1,6	0,43	361	4,4	322	101	7,5	0,84

Suurin sammalen arseenipitoisuus (2,8 mg/kg) määritettiin Mondo Minerals B.V. Branch Finland:n Vuonoksen rikastamon (Outokumpu) läheiseltä alalta, jonka ympäristöön muodostui selkeä korkeamman arseenipitoisuuden vyöhyke. Muualla tutkimusalueella sammalen arseenipitoisuudet olivat melko alhaisia. (Kuva 52.)

Korkeimmat sammalen fosforipitoisuudet (1971 mg/kg) havaittiin Nurmeksen keskusta-alueella, Nurmeksen lämpölaitosten lähellä sijaitsevilla aloilla (alat 221 ja 222). Suuren fosforipitoisuuden vyöhykkeitä muodostui myös Rääkkylän, Kiteen ja Ilomantsin kuntien alueelle keskustaajamien lämpölaitosten läheisyyteen, Mondo Minerals B.V. Branch Finland:n Horsmanahon ja Pehmytkiven laitoksen läheisyyteen Polvijärvellä, Uimaharjun Enocell Oy:n läheisyyteen sekä Valtimon pohjoisrajalle. Sammalen fosforipitoisuudet olivat pieniä Juuan eteläosassa, Nurmeksen pohjoisosasta Lieksaan ulottuvalla vyöhykkeellä sekä Värtsilässä ja Kesälahdella. (Kuva 53.)

Kiteen Lämpö Oy:n lämpövoimalaitoksen lähellä sijaitsevalta alalta määritettiin tutkimusalueen suurin kadmiumipitoisuus (0,34 mg/kg). Myös Nurmeksen Höljäkkä Oy:n kyllästämön läheisyyteen muodostui selvä suuren kadmiumipitoisuuden vyöhyke. Sammalen kadmiumipitoisuudet olivat koholla Valtimon, Hammaslahden ja Rääkkylän lämpölaitosten ja lämpökeskusten läheisyydessä ja Joensuun keskustan ympäristössä. (Kuva 54.)

Korkein kromipitoisuus (16,6 mg/kg) määritettiin Juuan Tulikiven ja Nunnanlahden louhosten lähellä sijaitsevalta havaintoalalta. Myös Mondo Minerals B.V. Branch Finland:n Vuonoksen tehtaan ja Horsmanahon ja Pehmytkiven louhosten ympärille muodostui suuren kromipitoisuuden vyöhykkeitä. Muualla tutkimusalueella sammalen kromipitoisuudet olivat alhaisia. (Kuva 55.)

Selvät koholla olevan kuparipitoisuuden vyöhykkeet muodostuivat lämpökeskusten läheisyyteen Hammaslahteen, Ilomantsiin, Rääkkylään, Kiteelle, Nurmekseen, Joensuuhun ja Outokumpuun sekä Uimaharjun Enocell Oy:n tehtaan, Outokummun Vuonoksen tehtaan ja Nunnanlahden ja Tulikiven louhosten läheisyyteen. Suurin kuparipitoisuus (13,6 mg/kg) määritettiin Joensuusta Abloy Oy:n tehtaan lähistöltä sijaitsevalta alalta. (Kuva 56.)

Tutkimusalueen korkein lyijypitoisuus (3,8 mg/kg) määritettiin Kiteen lämpökeskuksen lähellä sijaitsevalta alalta, jonka ympäristöön muodostuvalla vyöhykkeellä lyijypitoisuudet olivat korkeita. Sammalen lyijypitoisuudet olivat koholla myös Hammaslahdesta Kiihtelysvaaran ja Tuupovaaran kautta Ilomantsin eteläosaan ulottuvalla vyöhykkeellä. Sammalen lyijypitoisuudet olivat tutkimusalueen keskiarvoa alhaisemmalla tasolla tutkimusalueen pohjois- ja keskiosissa. (Kuva 57.)

Korkein sammalesta määritetty magnesiumipitoisuus (2666 mg/kg) sijoittui Tulikiven ja Nunnanlahden louhosten läheisyydessä sijaitsevalta havaintoalalle. Tämän havaintoalan magnesiumipitoisuuden perusteella Juuan kunnan itäosaan muodostui selvä korkeamman magnesiumipitoisuuden vyöhyke. Koholla olevan magnesiumipitoisuuden vyöhykkeitä muodostui myös Polvijärven ja Outokummun kuntien alueella sijaitsevien Mondo Minerals B.V. Branch Finland:n Vuonoksen tehtaan ja Horsmanahon ja Pehmytkiven kaivosten läheisyyteen sekä Hammaslahteen, Nurmekseen ja Kiteelle. (Kuva 58.)

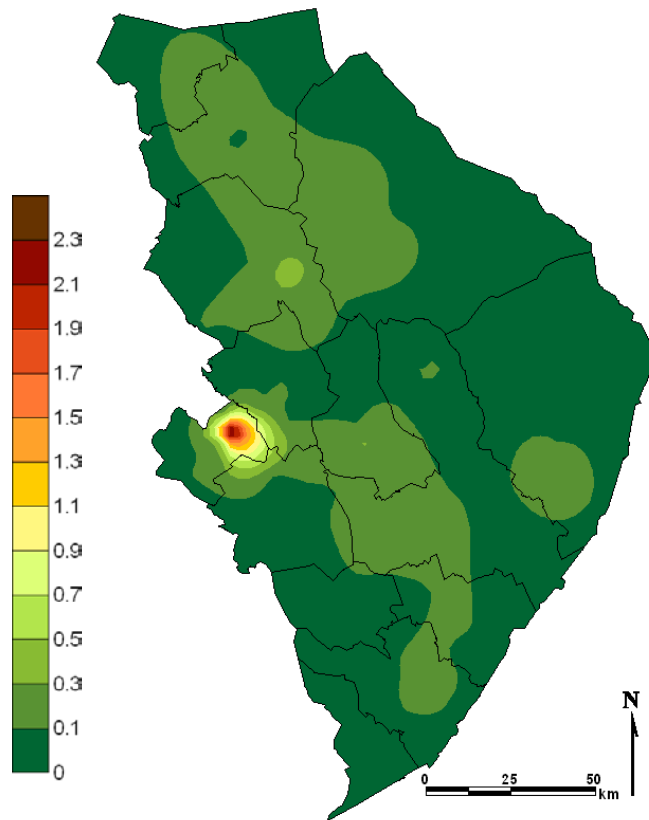
Tutkimusalueen korkein nikkelpitoisuus (39 mg/kg) määritettiin Outokummun Vuonoksen rikastamon viereiseltä alalta. Outokummun ja Polvijärven rajan tuntumaan muodostui myös laajempi kohonneen nikkelpitoisuuden vyöhyke, samoin myös Juukaan Nunnanlahden ja Tulikiven laitosten ympäristöön. Muualla tutkimusalueella sammalen nikkelpitoisuudet olivat alhaisia. (Kuva 59.)

Sammalen korkein rautapitoisuus (2213 mg/kg) määritettiin Nurmeksen keskusta-alueella sijaitsevalta alalta. Nurmeksen keskustasta Valtimon kunnan rajan tuntumaan ulottuvalle alueelle sekä Hammaslahden ja Juuan itäosiin muodostuivat kohonneen rautapitoisuuden vyöhykkeet. Sammalen rautapitoisuudet olivat alhaisia etenkin tutkimusalueen itäosassa Venäjän rajan tuntumassa sekä Liperin kunnan alueella. (Kuva 60.)

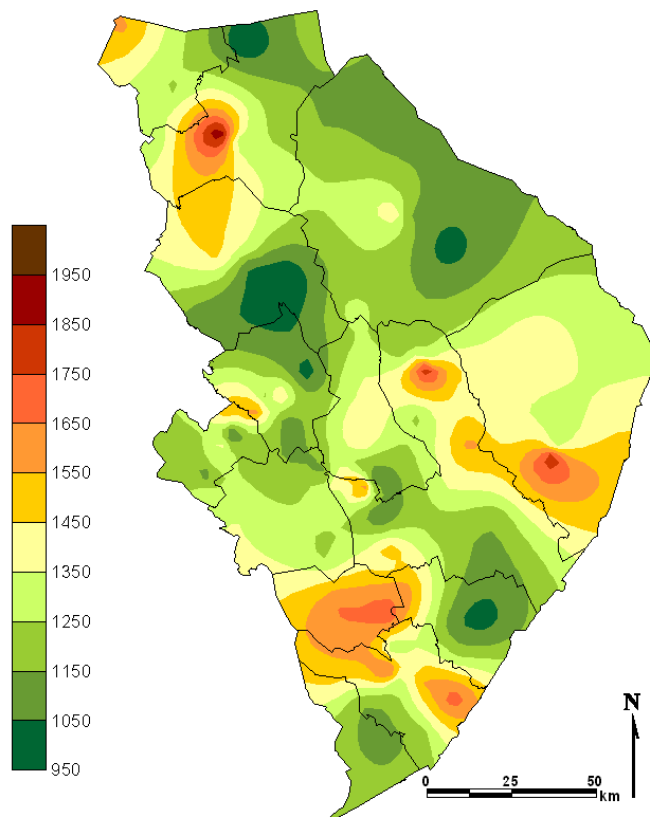
Tutkimusalueen korkein rikki- ja kupripitoisuus (1229 mg/kg) määritettiin Ilomantsin keskustaajamassa sijaitsevalta havaintoalalta. Vyöhykkeitä, joilla sammalen rikki- ja kupripitoisuudet olivat suuria, muodostui Kiteen, Hammaslahden, Nurmeksen ja Joensuun keskustojen ympäristöön, Uimaharjuun, Vuonoksen rikastamon ja Horsmanahon ja Pehmytkiven kaivoksen läheisyyteen Polvijärven ja Outokummun rajalle sekä Ilomantsin itäosiin. Sammalen rikki- ja kupripitoisuudet olivat alhaisimpia tutkimusalueen pohjoisosassa. (Kuva 61.)

Korkein sinkkipitoisuus (69 mg/kg) määritettiin Kiteen lämpölaitoksen lähellä sijainneelta alalta, jonka ympäristöön muodostui selkeä suuremman sinkkipitoisuuden vyöhyke. Sammalen sinkkipitoisuudet olivat kohonneita myös Nurmeksen, Ilomantsin ja Hammaslahden keskusta-alueiden ympäristöön muodostuvilla vyöhykkeillä. Sammalten sinkkipitoisuudet olivat pieniä Liperin kunnan alueella ja Polvijärven eteläosassa, Värtsilässä ja tutkimusalueen koillisosassa Venäjän rajan tuntumassa. (Kuva 62.)

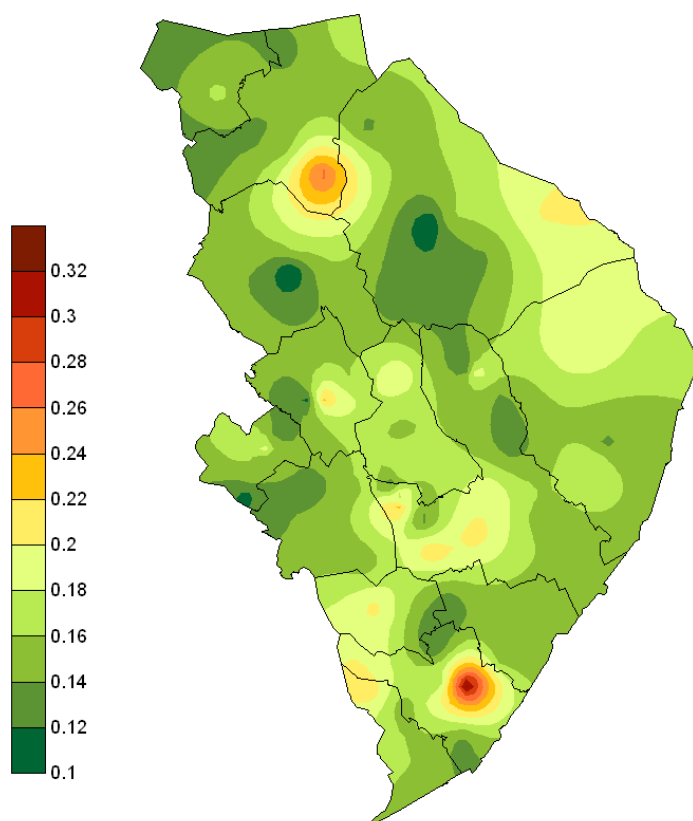
Nurmeksen keskusta-alueen havaintoalalta määritettiin tutkimusalueen korkein vanadiinipitoisuus (5,0 mg/kg). Sammalen vanadiinipitoisuudet olivat koholla myös Joensuun, Nurmeksen, Ilomantsin, Hammaslahden, Kiteen ja Kontiorannan varuskunnan lämpökeskusten läheisyydessä. Sammalen vanadiinipitoisuudet olivat pieniä tutkimusalueen pohjoisosasta itärajaa pitkin tutkimusalueen keskiosaan ulottuvalla vyöhykkeellä. (Kuva 63.)



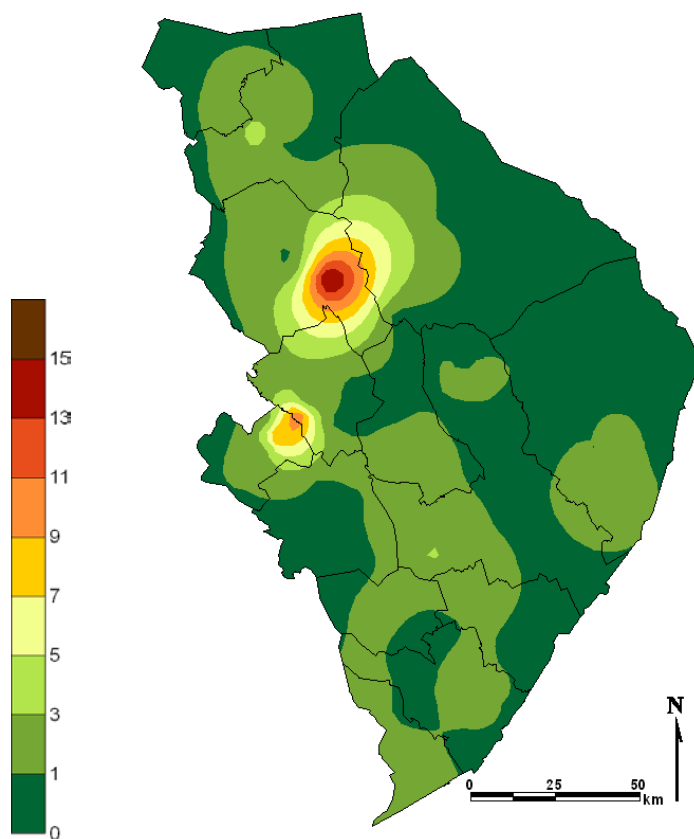
Kuva 52. Sammalten arseenipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



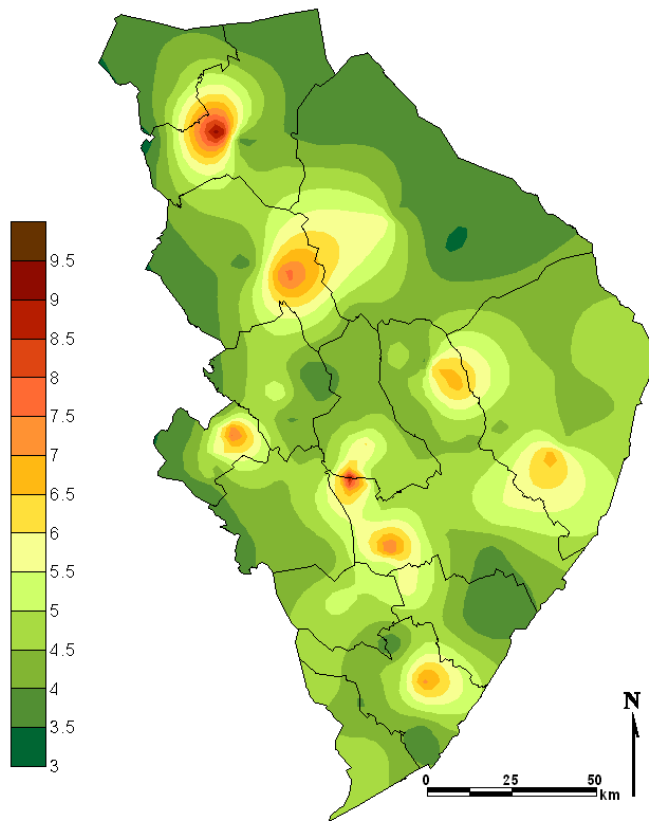
Kuva 53. Sammalten fosforipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



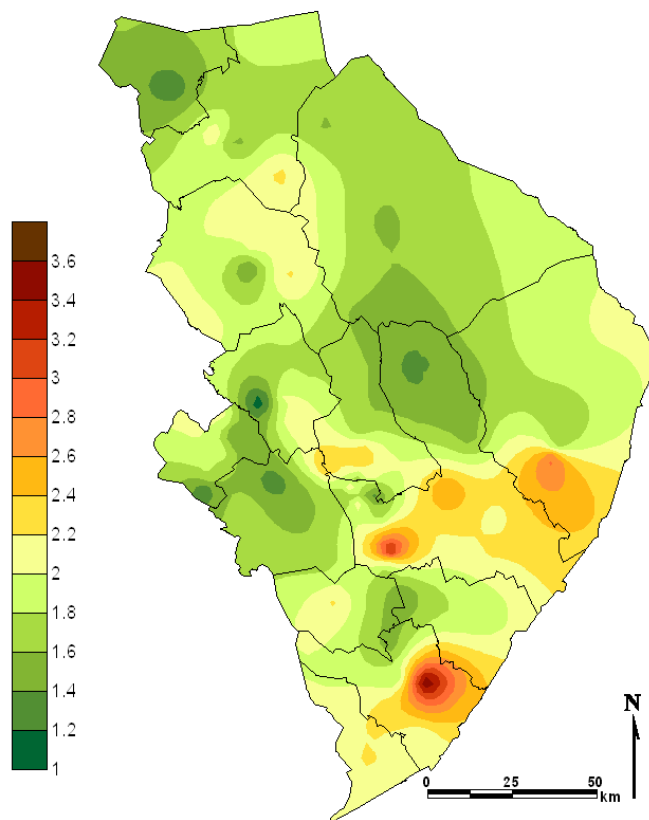
Kuva 54. Sammalten kadmiumpitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



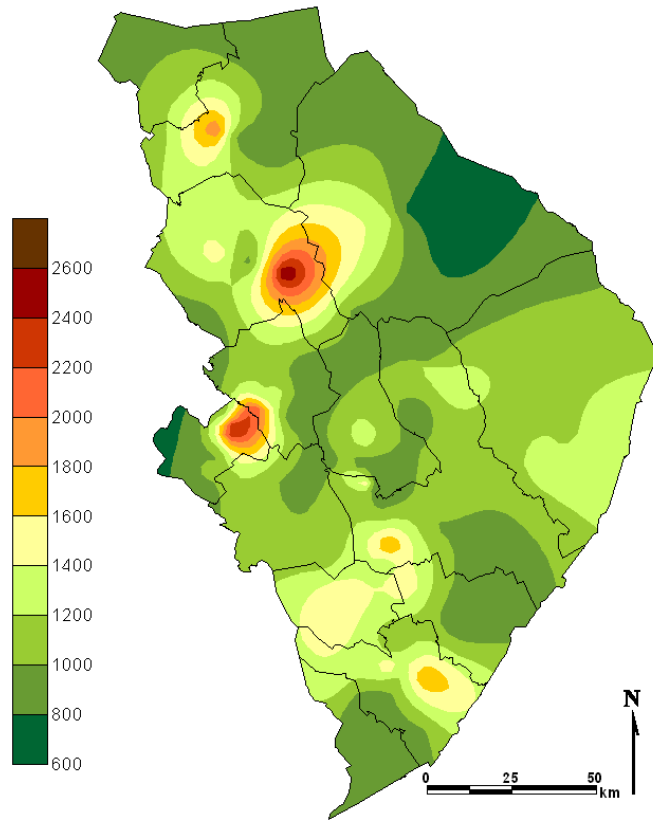
Kuva 55. Sammalten kromipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



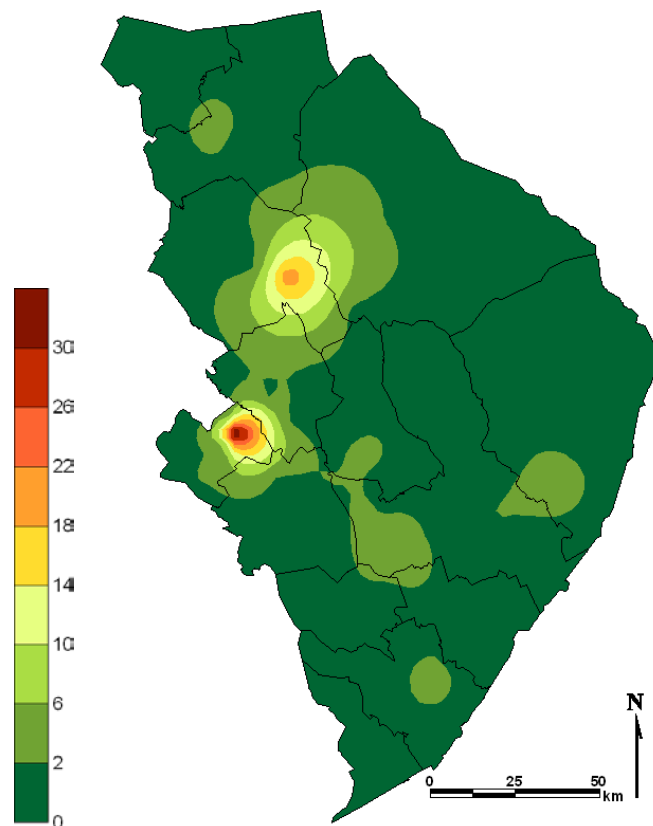
Kuva 56. Sammalten kuparipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



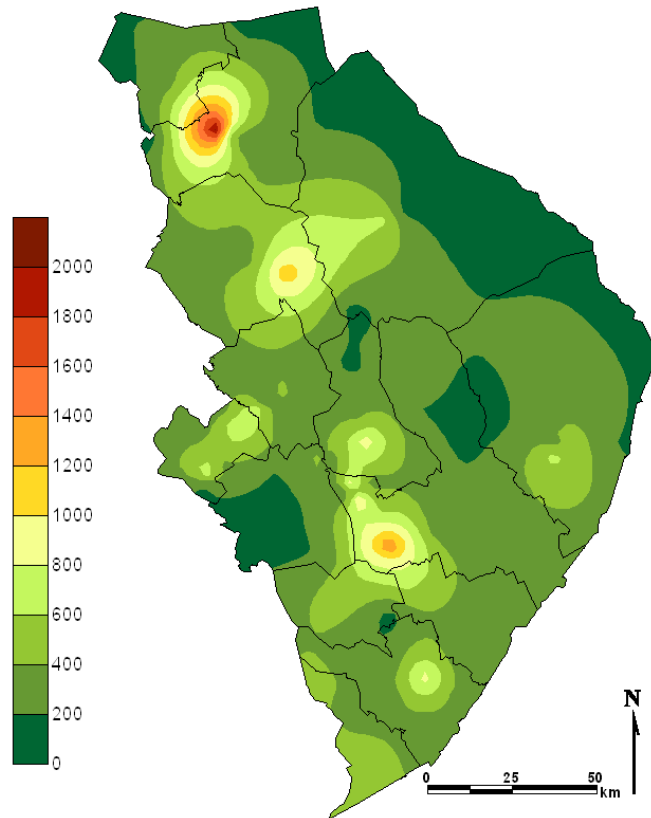
Kuva 57. Sammalten lyijypitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



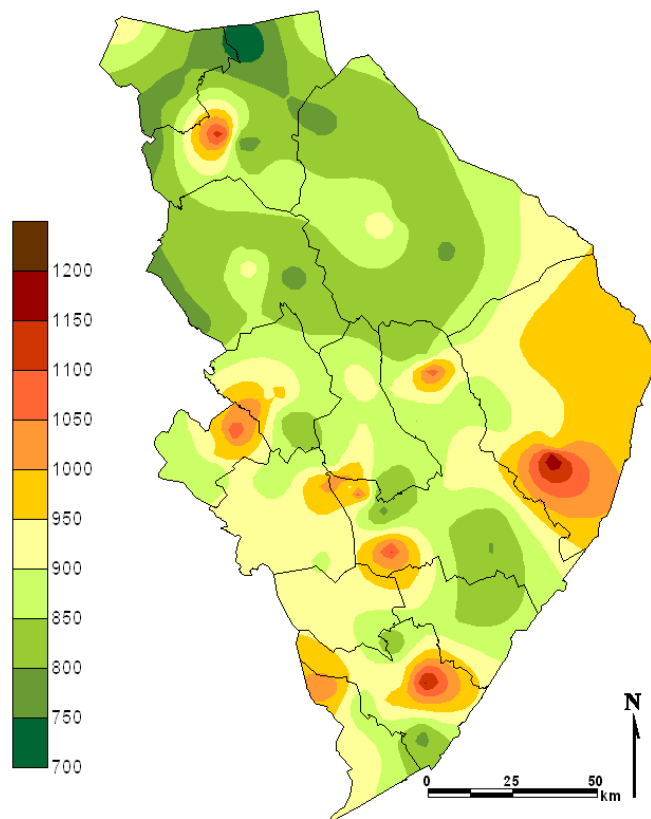
Kuva 58. Sammalten magnesiumipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



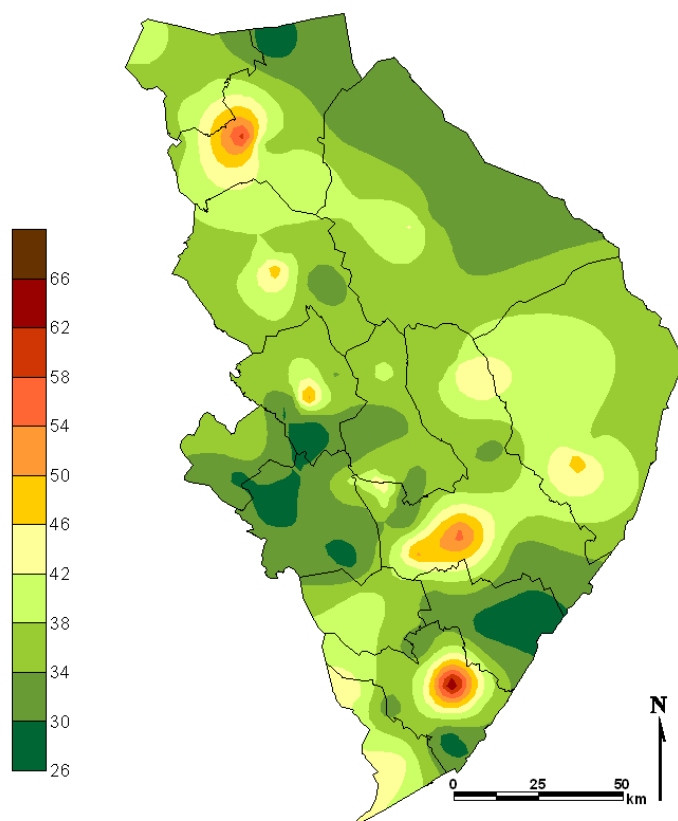
Kuva 59. Sammalten nikkelpitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



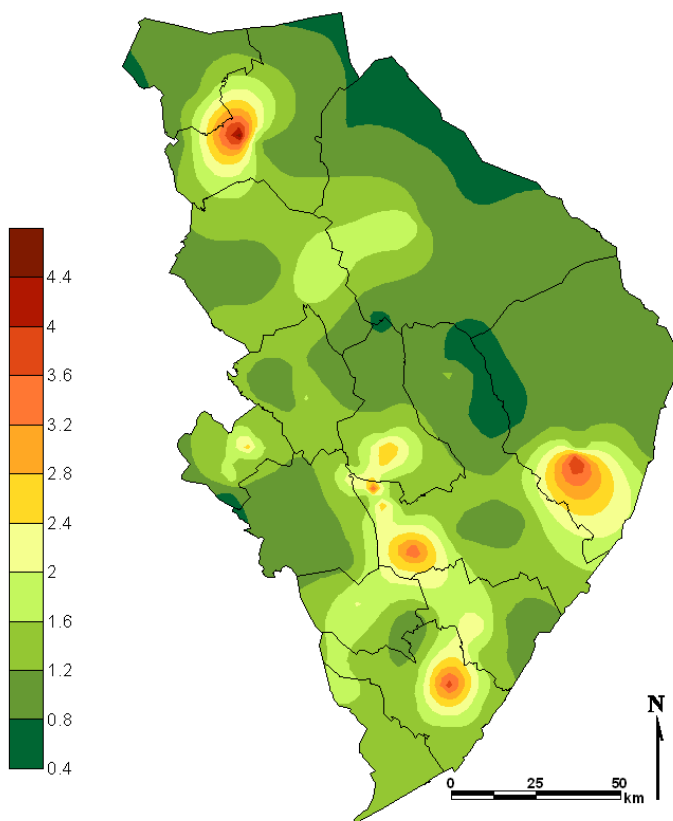
Kuva 60. Sammalten rautapitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



Kuva 61. Sammalten rikkipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



Kuva 62. Sammalten sinkkipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.



Kuva 63. Sammalten vanadiinipitoisuuden (mg/kg) vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010.

4.4

Metlan valtakunnallisten seurantojen tulokset

4.4.1

Sammalten alkuainepitoisuudet

Kappale perustuu Metlan Muhoksen yksikön Jarmo Poikolaisen, Jouni Karhun ja Juha Piispasen tekemään raporttiin (Poikolainen ym. 2011).

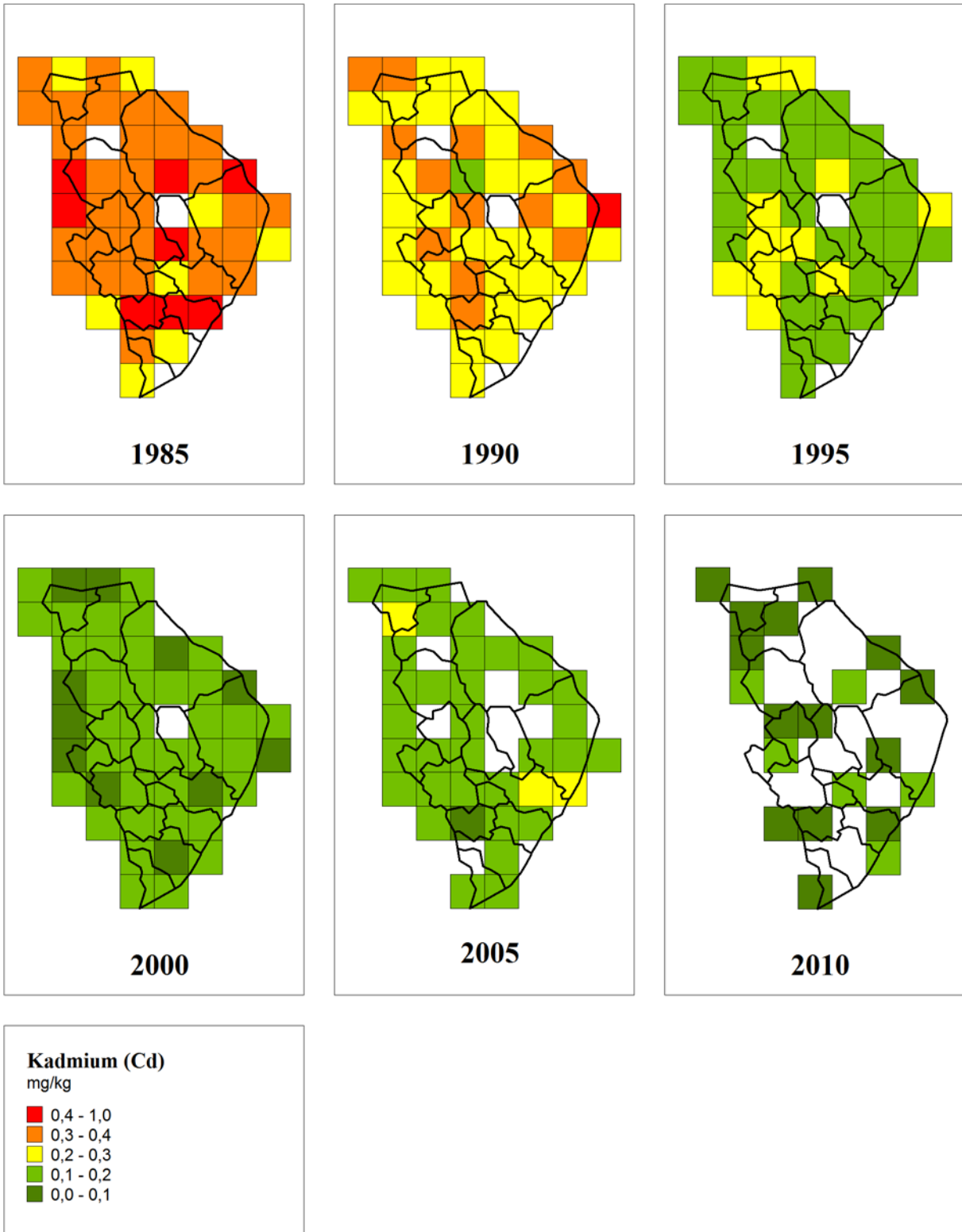
Lähes kaikkien tutkittujen raskasmetallien pitoisuudet sammalissa ovat vähentyneet Pohjois-Karjalassa vuosien 1985 – 2010 aikana, mutta vähentymisessä on raskasmetallien välillä suuria eroja. Selvimmin ovat alentuneet kadmiumin, vanadiinin ja lyijyn pitoisuudet, jotka laskivat vuosien 1985 – 2000 välillä voimakkaasti, mutta sen jälkeen suhteellisen vähän (taulukko 19, kuvat 64-67). Myös kuparin pitoisuudet ovat alentuneet merkittävästi vuoden 2005 pientä nousua lukuun ottamatta (taulukko 19, kuva 67). Samoin arseenin ja elohopean pitoisuuksissa on tapahtunut pientä laskua. Kromin ja raudan pitoisuudet laskivat vähitellen 1990-luvulla, mutta ovat nousseet jonkin verran sen jälkeen. Sen sijaan nikkelin ja sinkin pitoisuuksissa ei ole tapahtunut mitään merkittävää alenemista. Muutokset pitoisuuksissa ovat olleet Pohjois-Karjalassa hyvin samanlaisia kuin muualla Suomessa. Pohjois-Karjalassa pitoisuudet ovat kuitenkin olleet koko seurantajakson ajan jonkin verran alempia kuin keskimäärin koko Suomessa. Vuoden 2010 kartoituksen perusteella sammalten raskasmetallipitoisuudet Pohjois-Karjalassa edustavat yleisesti suhteellisen puhtaan tausta-alueen pitoisuuksia. Keskimääräistä korkeampia raskasmetallipitoisuuksia (Cr, Fe, Ni, V) todettiin vain muutamissa paikoissa teollisuuslaitosten, avolouhosten ja asutuksen läheisyydessä.

Sammalten keskimääräinen typpipitoisuus laski vuosina 1990–2000 Pohjois-Karjalassa 0,89 %:sta 0,73 %:iin ja vastaavasti koko Suomessa 1,00 %:sta 0,78 %:iin. Sen jälkeen pitoisuudet ovat nousseet vuoden 1990 tasolle. Keskimääräinen rikkipitoisuus on alentunut Pohjois-Karjalassa ja koko Suomessa vuodesta 1985 vuoteen 2000 vajaasta 1000 mg:sta noin 750 - 800 mg:aan kilogrammassa sammalta. Vuoden 2000 tasosta sammalten rikkipitoisuus on noussut jonkin verran sekä Pohjois-Karjalassa että koko Suomessa. (Taulukko 19.)

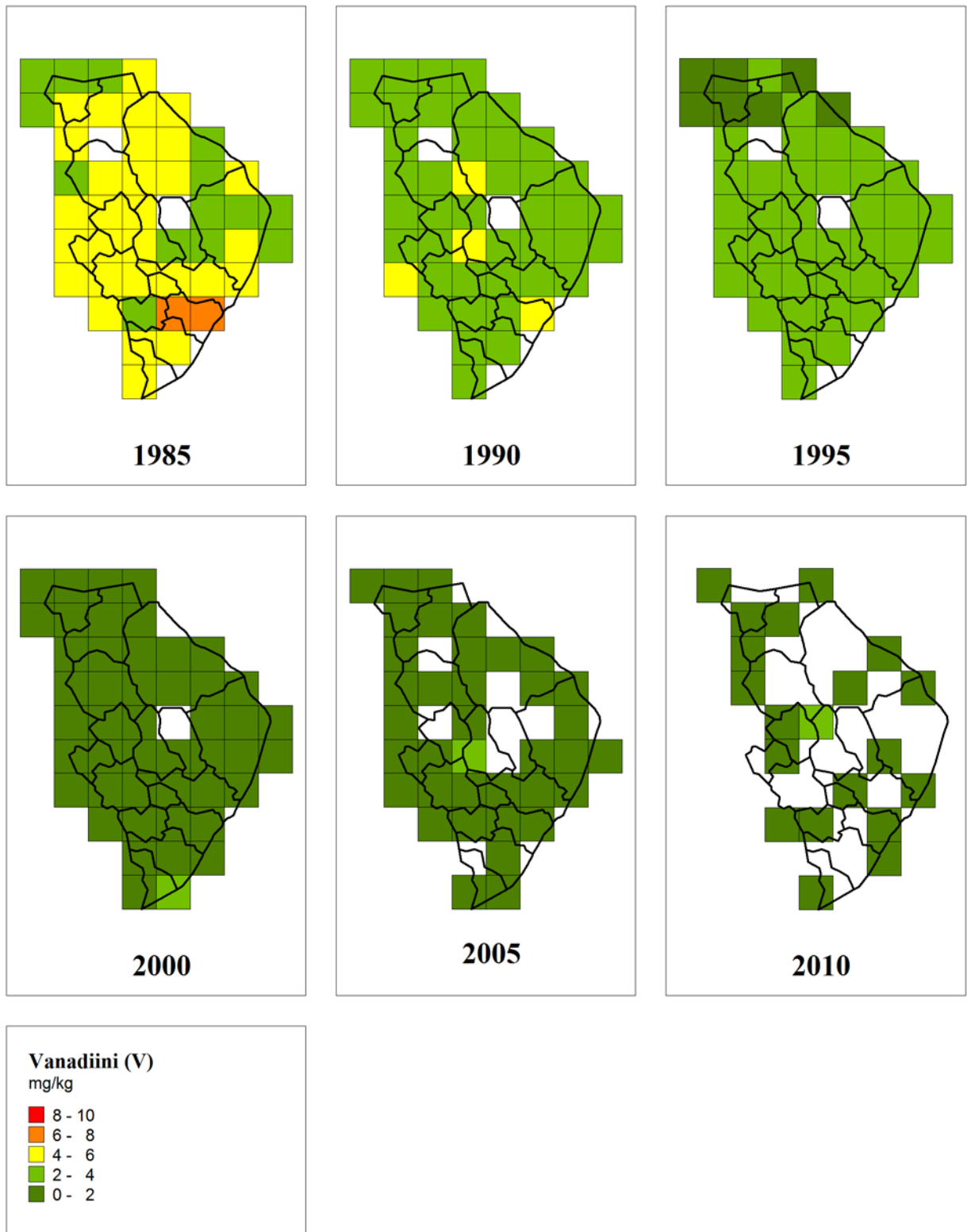
Taulukko 19. Sammalten typpi- ja raskasmetallipitoisuuksia Pohjois-Karjalan alueella vuosina 1985, 1990, 1995, 2000, 2005 ja 2010 (typpi %, raskasmetallit ja rikki mg/kg).

Vuosi		As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb	V	Zn	N	S
1985	Ka	-	0,37	1,29	5,46	347	-	1,83	14,42	4,42	38,0	-	980
	Max	-	0,60	2,08	24,36	655	-	4,17	25,98	7,49	62,3	-	1550
	Min		0,22	0,83	2,85	183		1,08	7,78	2,52	25,3		700
1990	Ka	-	0,31	1,39	4,41	276	-	1,42	8,30	3,24	33,9	0,89	910
	Max	-	2,10	2,40	8,41	531	-	2,43	15,62	5,44	54,4	1,19	1350
	Min	-	0,20	0,79	2,70	147	-	0,89	4,26	1,80	23,6	0,59	690
1995	Ka	0,188	0,18	1,33	3,73	259	0,052	1,65	5,27	2,32	36,4	0,82	860
	Max	0,420	0,31	3,00	7,96	972	0,133	3,52	9,41	4,07	54,1	1,69	1350
	Min	<0,100	0,08	0,59	2,27	153	0,026	0,80	3,14	1,30	21,3	0,47	670
2000	Ka	0,136	0,12	0,94	2,59	197	0,037	1,38	3,06	1,28	26,7	0,73	800
	Max	0,227	0,17	3,17	7,39	632	0,085	3,72	6,14	2,64	43,8	1,89	1490
	Min	<0,100	0,06	0,53	1,32	100	0,020	0,69	1,86	0,70	13,7	0,41	520
2005	Ka	0,104	0,15	0,92	3,70	220	0,040	1,58	3,10	1,41	34,6	0,90	890
	Max	0,229	0,25	2,28	6,11	656	0,068	3,01	4,87	2,94	67,9	1,61	1690
	Min	<0,100	0,09	0,47	2,43	103	0,025	0,59	1,69	0,58	19,8	0,51	610
2010	Ka	0,166	0,10	1,42	2,20	272	0,038	1,74	2,16	0,94	31,9	0,89	840
	Max	1,208	0,15	11,61	3,77	931	0,080	12,89	3,68	2,65	47,5	2,01	1640
	Min	<0,100	0,07	0,54	0,74	103	0,018	0,59	1,12	<1,00	18,2	0,51	600

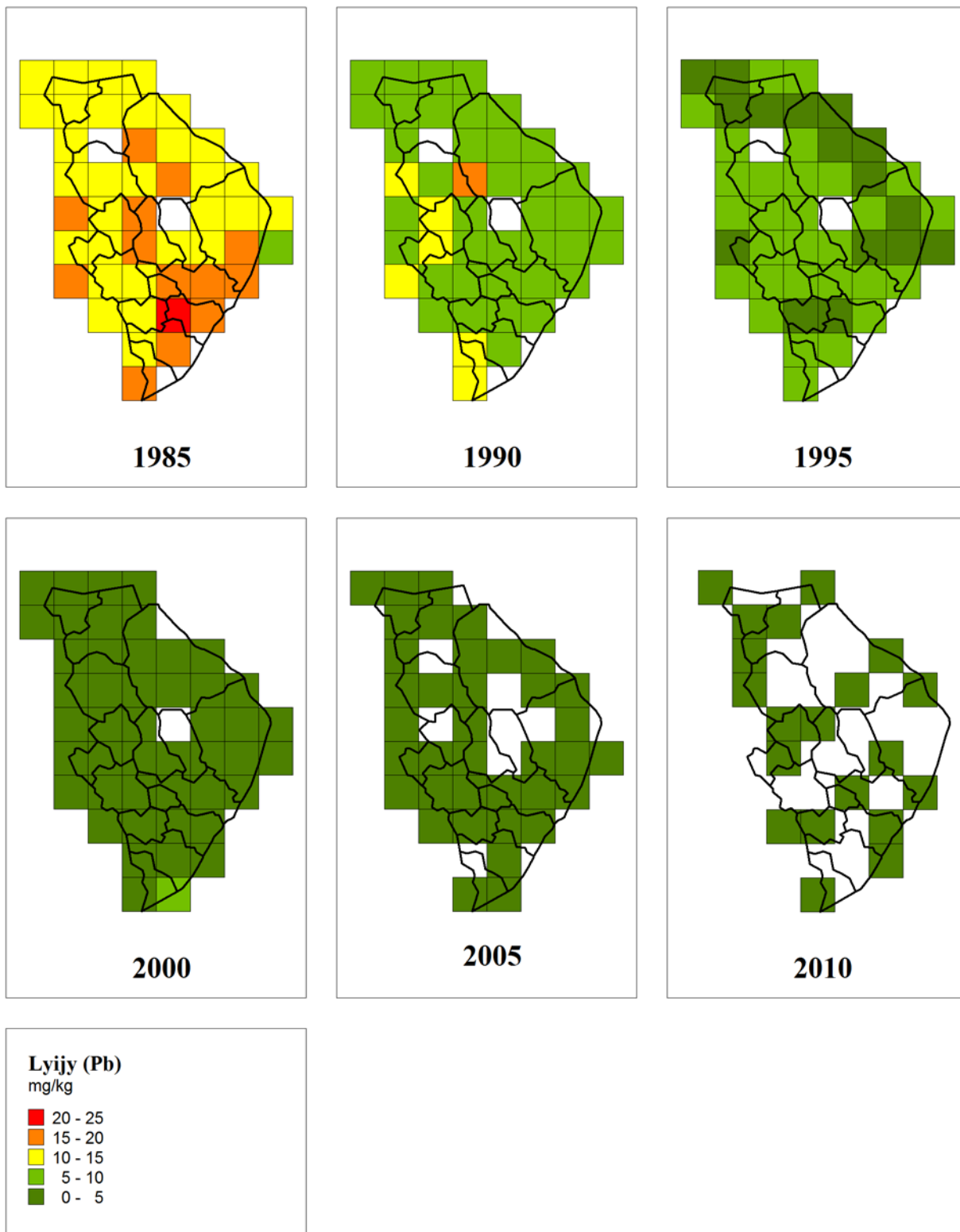
As = Arseni, Cd = Kadmium, Cr = Kromi, Cu = Kupari, Fe = Rauta, Hg = Elohopea, Ni = Nikkeli, Pb = Lyijy, V = Vanadiini, Zn = Sinkki, N = Typpi, S = Rikki



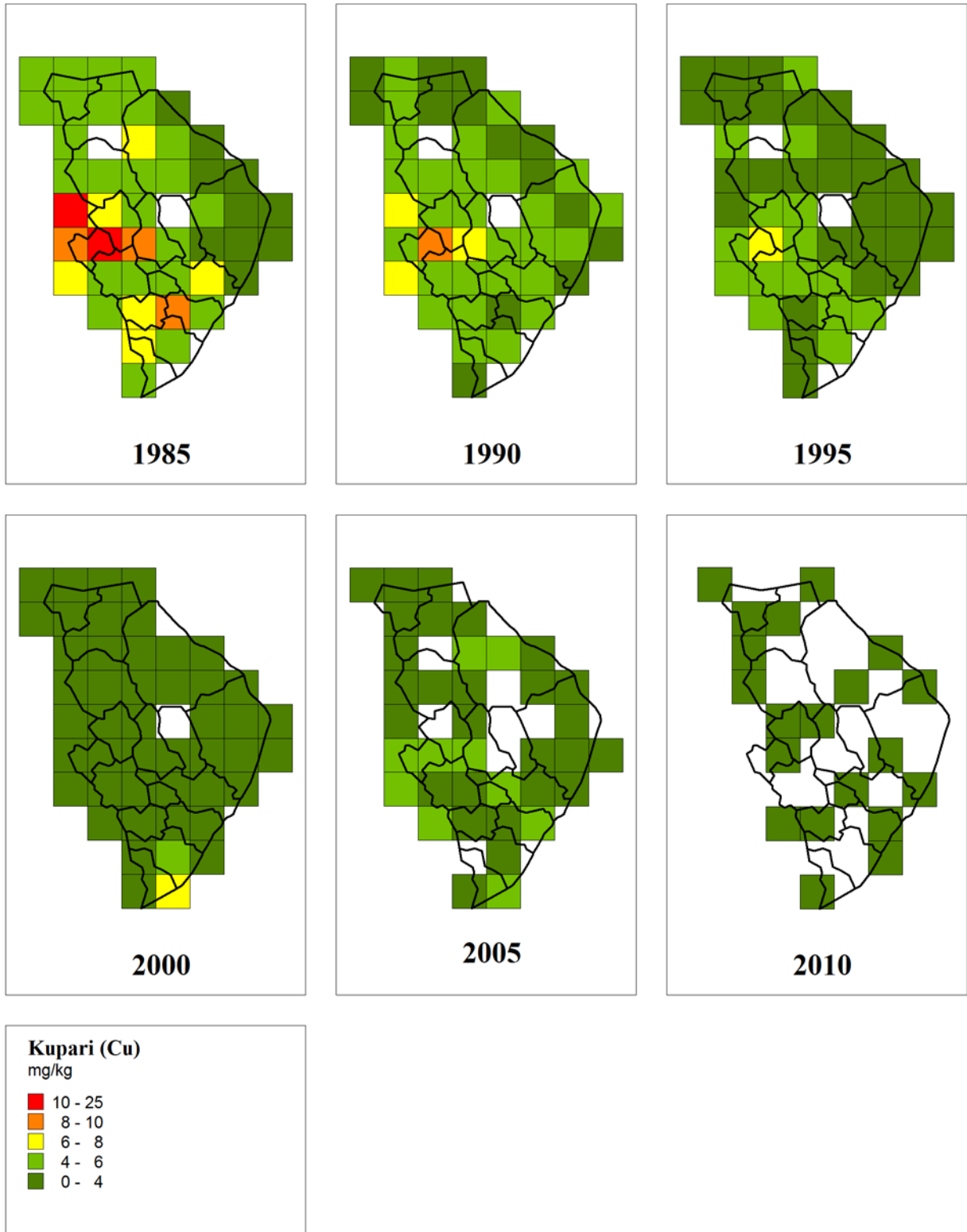
Kuva 64. Sammalten kadmiumpitoisuus Pohjois-Karjalassa vuosina 1985–2010.



Kuva 65. Sammalten vanadiinipitoisuus Pohjois-Karjalassa vuosina 1985–2010.



Kuva 66. Sammalten lyijypitoisuus Pohjois-Karjalassa vuosina 1985–2010.



Kuva 67. Sammalten kuparipitoisuus Pohjois-Karjalassa vuosina 1985–2010.

Valtakunnalliset sammalkartoitukset antavat ennen kaikkea tietoa laajoilla alueilla tapahtuneesta ilman epäpuhtauksien laskeumasta. Koealajärjestelyistä johtuen yksittäisten pienten päästölähteiden aiheuttamat laskeumat näkyvät kartoituksissa yleensä vain, jos koealat ovat sattuneet riittävän lähelle päästölähdettä. Sammalten pitoisuuksien perusteella Pohjois-Karjalassa samoin kuin muuallakin Suomessa helposti kaukokulkeutuneena leviävien raskasmetallien, kadmiumin, vanadiinin ja lyijyn laskeuma on alentunut merkittävästi vuosien 1985 - 2010 kuluessa. Suurin muutos on tapahtunut lyijylaskeumassa, mikä johtuu pääasiassa lyijyttömään bensiiniin siirtymisestä. Näiden metallien samoin kuin nikkelin, arseenin ja sinkin päästöt Suomessa ovat vähentyneet vuosina 1990 - 2008 suhteellisesti huomattavasti enemmän kuin mitä sammalten pitoisuudet näiden metallien laskeumasta osoittavat. Etenkin kuparin, nikkelin ja sinkin päästöjen vähennykset ovat tapahtuneet suurelta osin sulattojen ja metallien jatkojalostukseen liittyvien tehtaiden ympäristössä. Tausta-alueilla viimeksi mainittujen metallien laskeumassa ei ole tapahtunut kovin suuria muutoksia. Pohjois-Karjalan omat päästölähteet (energiantuotanto, teollisuus, liikenne) ovat sen verran pieniä, että niiden päästöillä on lähinnä paikallista vaikutusta alueen raskasmetallilaskeumaan, Pohjois-Karjala on raskasmetallilaskeuman suhteen puhtaimpia alueita Euroopassa.

Sammalten typpipitoisuudessa tapahtuneet muutokset kuvastavat melko hyvin typpilaskeuman ja typpipäästöjen kehitystä Pohjois-Karjalassa. Sammalten typpipitoisuuden onkin todettu useissa tutkimuksissa korreloivan hyvin typpilaskeuman kanssa (Poikolainen ym. 2009). Sen sijaan rikki- ja typpipitoisuuksien väheneminen sammalissa ei ole ollut seurantajakson kuluessa Pohjois-Karjalassa eikä koko Suomessa niin voimakasta kuin rikkipäästöissä ja -laskeumassa viimeisten 25 vuoden kuluessa tapahtuneen vähenemisen perusteella voisi olettaa. Sammalia ei pidetä erityisen hyvinä ilman rikkipitoisuuksien biomonitoreina. Syyinä huonoon bioindikaatioarvoon saattaa olla se, että rikin ollessa sammalille välttämätön ravinne fysiologiset toiminnot ohjaavat sen ottoa. Tosin myös typpi on sammalille tärkeä ravinne.

Ilman epäpuhtauksien vähenemistä Suomessa on edesauttanut tiukentunut lainsäädäntö ja sen myötä päästöjen vähentämiseen sovellettu uusi teknologia. Samansuuntainen kehitys on ollut nähtävissä myös muualla Euroopassa, mikä on vähentänyt epäpuhtauksien kaukokulkeutusta Suomeen. Itäisessä Euroopassa myös teollisuustuotannon lasku on vähentänyt kaukokulkeutusta. Karjalan tasavallan ja Pietarin alueen päästöillä ei näyttäisi olevan sammalten pitoisuuksien perusteella kovin merkittävää vaikutusta rikin, typen ja raskasmetallien laskeumaan Pohjois-Karjalassa.

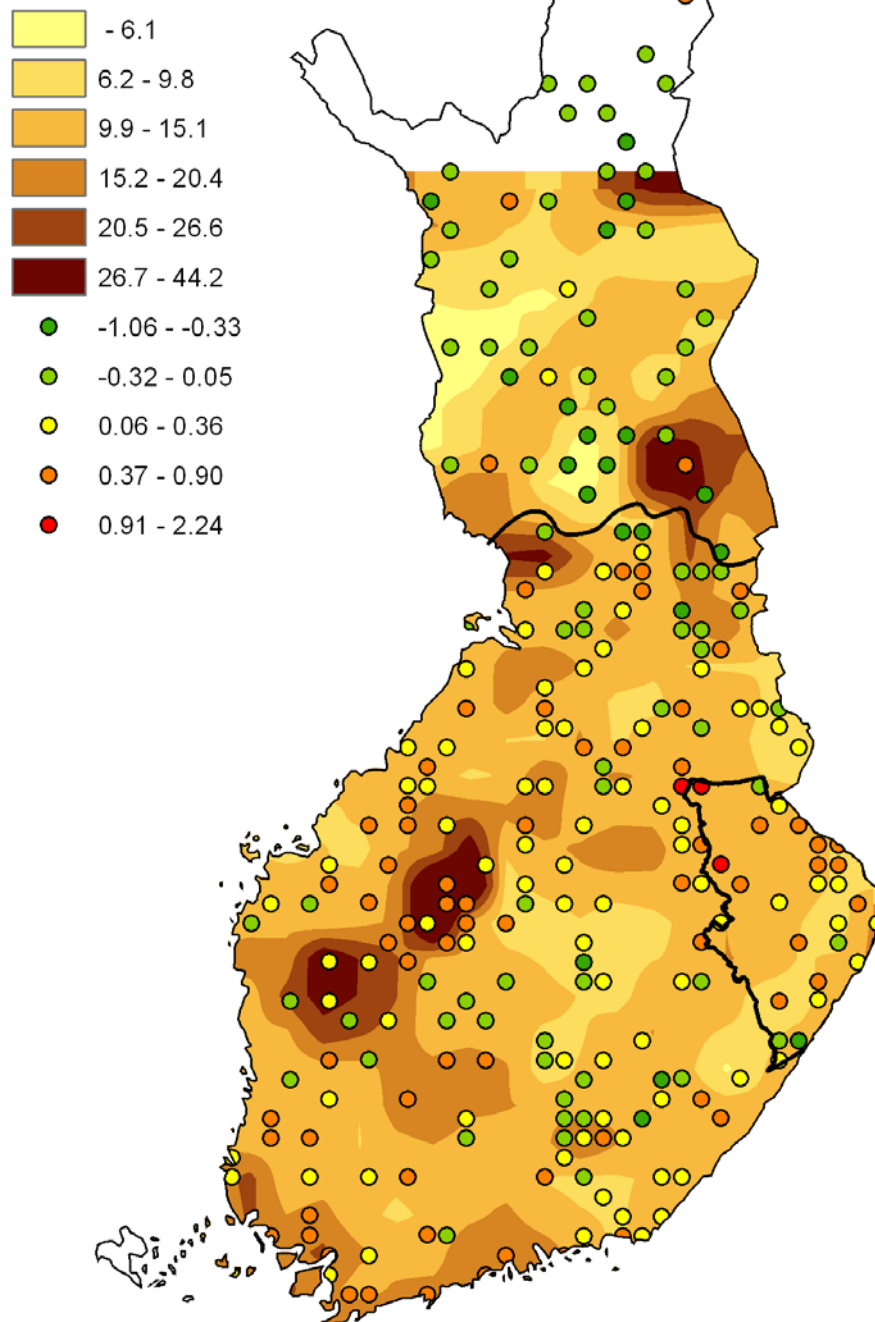
4.4.2

Metsien terveydentila

Kappale perustuu Metsäntutkimuslaitoksen Muhoksen yksikön Seppo Nevalaisen kirjoittamaan raporttiin (Nevalainen 2011).

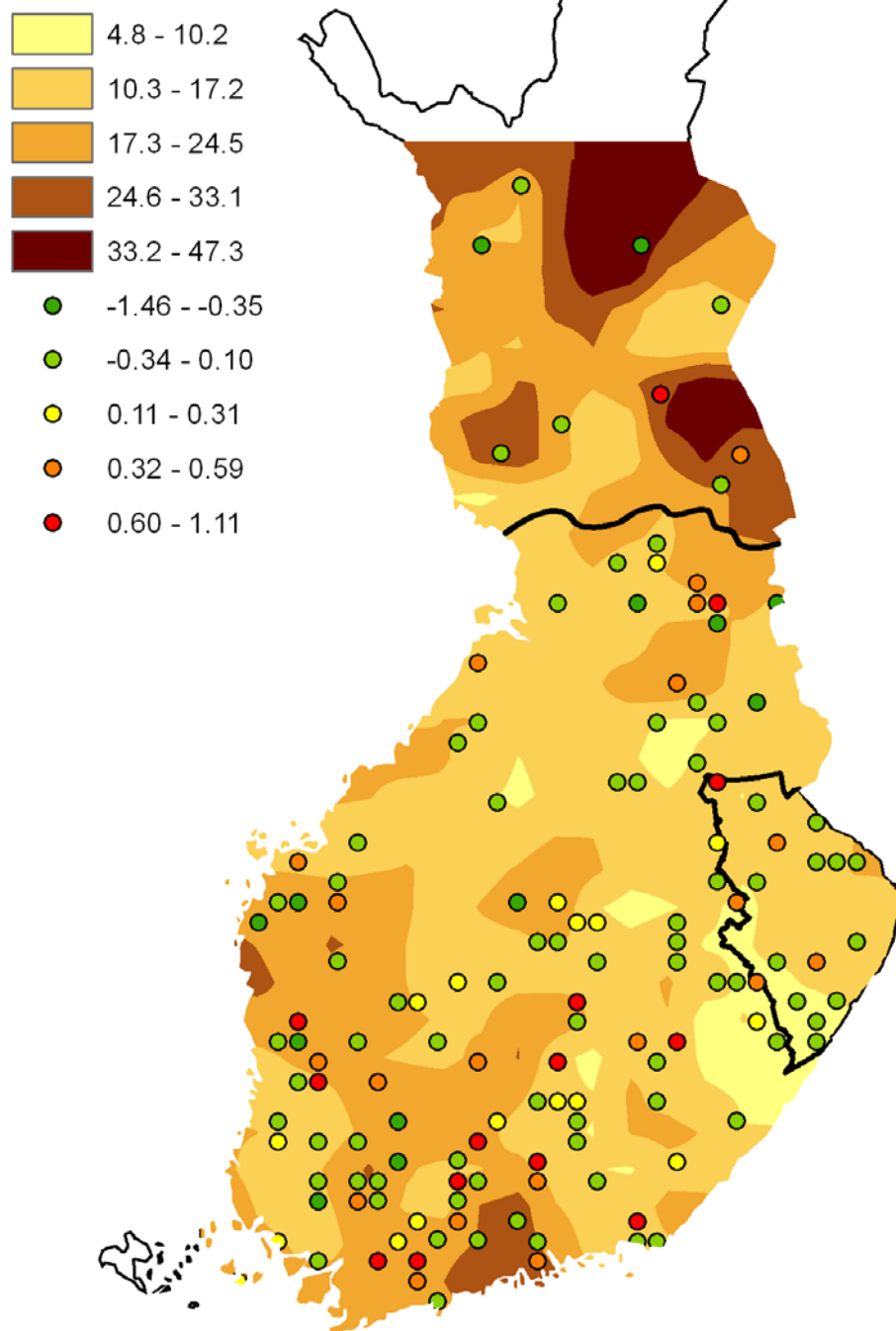
Puiden harsuuntumisen eli suhteellisen neulaskadon muutokset olivat koko maan tasolla pieniä vuosien välillä eli vaihtelu koealojen välillä on huomattavasti suurempaa kuin vuosien välillä. Puiden ikä selittää puolet harsuuntumisen tason vaihtelusta. Alueellisesti tarkastellen männyn harsuuntuminen on samalla tasolla Etelä- ja Pohjois-Suomessa, suurimmat harsuuntumisarvot löytyivät Pohjanmaalta ja Kainuusta. Etelä-Suomessa sellaisia mäntykoealoja, joiden harsuuntuminen lisääntyi trendinomaisesti, oli enemmän kuin pohjoisessa, joskin vaihtelu lähekkäistenkin koealojen välillä oli suurta (kuva 68). Kuusen harsuuntuminen oli vuonna 2010 suurinta maan pohjoisosissa ja etelärannikolla, mutta trendien ero Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä on pienempi kuin männynllä (kuva 69).

Männyn harsuuntuminen 2010 ja mediaanitrendi 1995-2008



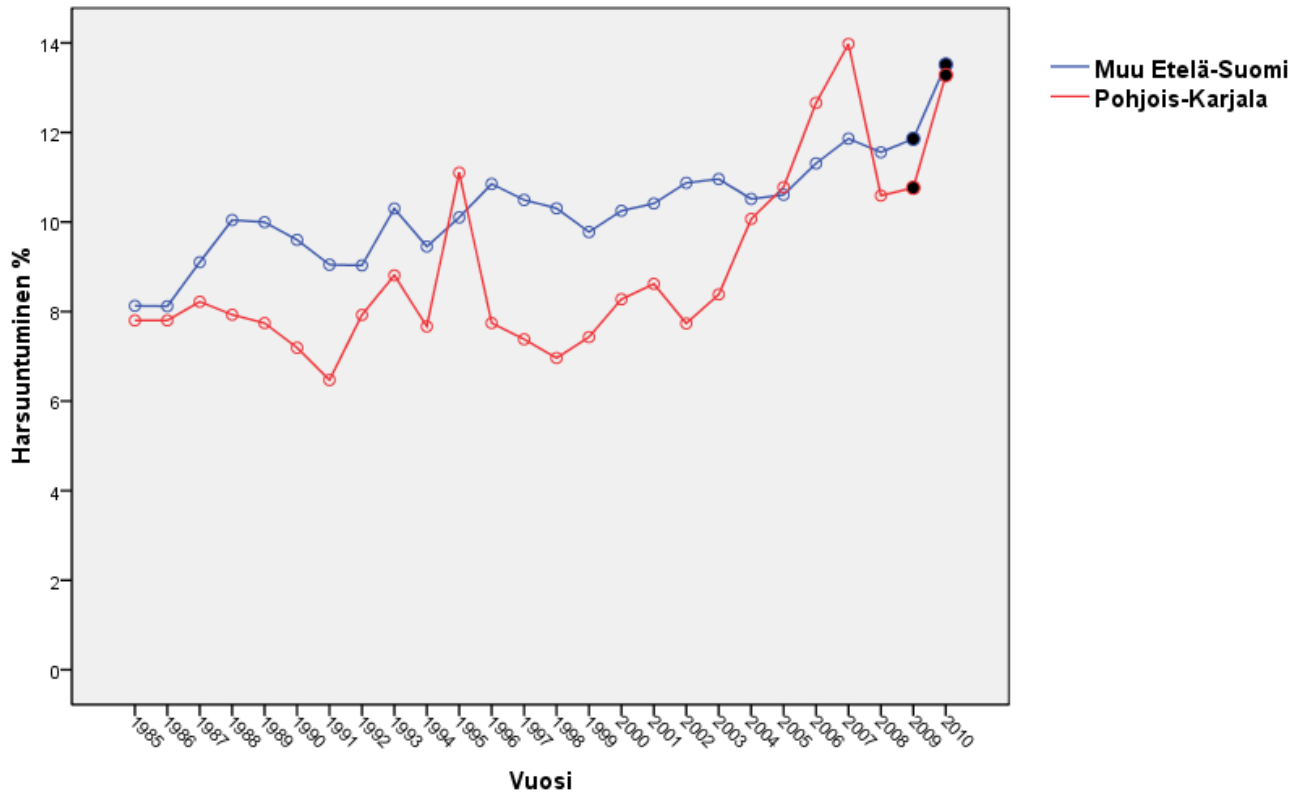
Kuva 68. Männyn harsuuntuminen vuonna 2010 (kriging-tasoitus) ja harsuuntumisen mediaanitrendi (Theil-Sen) vuosina 1995–2008. Mitä suurempi trendin positiivinen arvo, sitä enemmän harsuuntuminen on lisääntynyt. Negatiiviset arvot osoittavat harsuuntumisen vähentyneen. Kuvaan on merkitty myös laskennassa käytetty maan etelä- ja pohjoisosan raja sekä Pohjois-Karjalan maakunnan rajat.

Kuusen harsuuntuminen 2010 ja mediaanitrendi 1995-2008

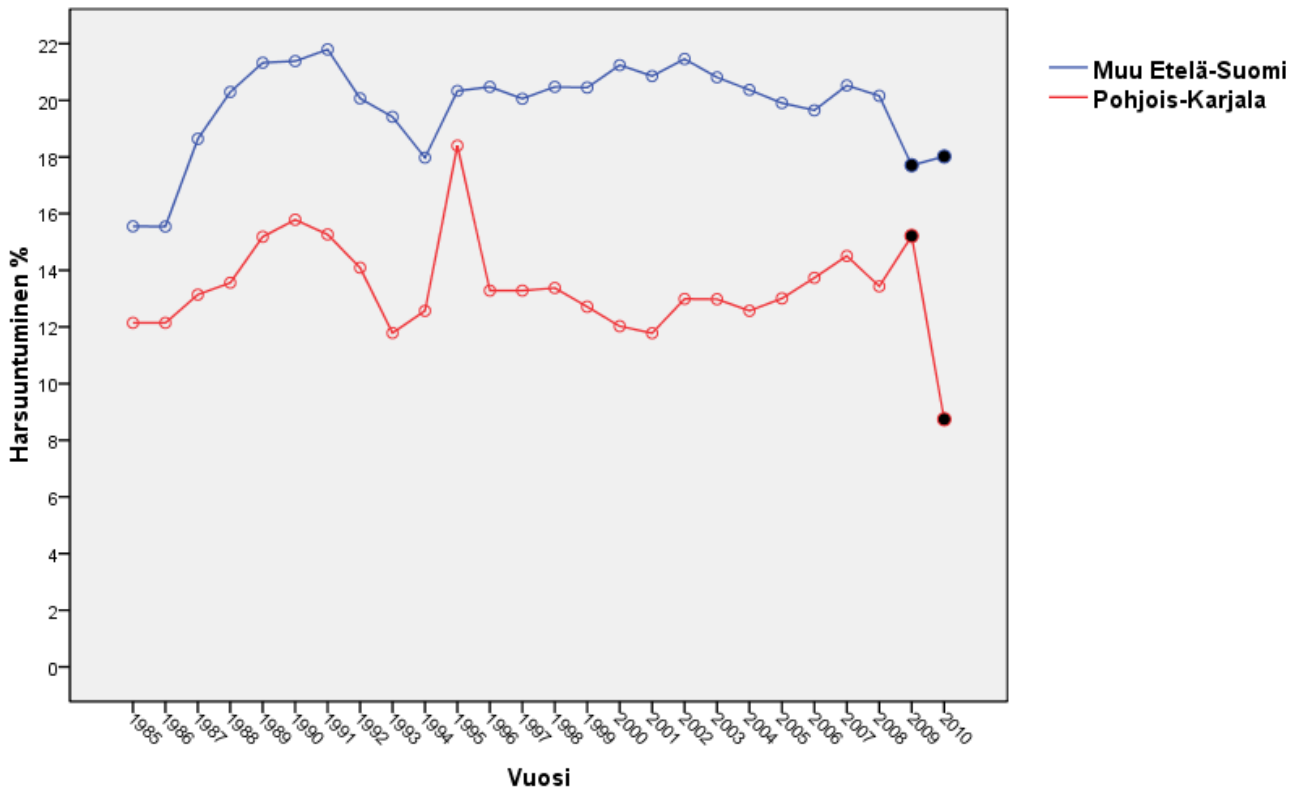


Kuva 69. Kuusen harsuuntuminen vuonna 2010 (kriging-tasointu) ja harsuuntumisen mediaanitrendi (Theil-Sen) vuosina 1995–2008. Mitä suurempi trendin positiivinen arvo, sitä enemmän harsuuntuminen on lisääntynyt. Negatiiviset arvot osoittavat harsuuntumisen vähentyneen. Kuvaan on merkitty myös laskennassa käytetty maan etelä- ja pohjoisosan raja sekä Pohjois-Karjalan maakunnan rajat.

Männyn keskimääräinen harsuuntuminen vuosina 1985–2010 oli maan eteläosassa 10,6 %, ja kuusen 20,0 %, Pohjois-Karjalassa vastaavat luvut ovat 9,4 % (mänty) ja 13,4 % (kuusi). Kuusen harsuuntuminen oli Pohjois-Karjalassa tilastollisesti merkittävästi vähäisempää kuin muualla maan eteläosissa. Männyn harsuuntuminen ei poikennut muun Etelä-Suomen arvoista (kuvat 70 ja 71).



Kuva 70. Männyn harsuuntumisen aikasarja Pohjois- Karjalassa ja muualla maan eteläosassa 1985-2010. Huomaa, että erilaisista otoksista johtuen vuosien 2009 ja 2010 arvot eivät ole vertailukelpoisia keskenään, eivätkä aikaisempien vuosien arvojen kanssa.



Kuva 71. Kuusen harsuuntumisen aikasarja Pohjois- Karjalassa ja muualla maan eteläosassa 1985-2010. Huomaa, että erilaisista otoksista johtuen vuosien 2009 ja 2010 arvot eivät ole vertailukelpoisia keskenään, eivätkä aikaisempien vuosien arvojen kanssa.

Eräs keskeinen laaja-alaisen seurannan tulos on, että tärkeimmät laaja-alaiset tuhoepidemiat paljastuvat myös tässä suhteellisen harvassa verkostossa. Äkilliset alueelliset muutokset metsien kunnossa johtuvatkin useimmiten erilaisista tuhoista. Pohjois- Karjalan seurantamänniköissä tuhoja esiintyi eniten vuosina 1993-1995, jolloin versosurma- niminen sienitauti ja erilaiset neulasten karistetaudit vaivasivat puita. Vuonna 2000 esiintyi paljon mäntypistiäistuhon, ja kuivuuden aiheuttamat väriviat olivat yleisiä vuonna 2006.

Kuusella eniten tuhoja esiintyi vuonna 2004. Yleisiä tuhoja ovat olleet mm. suopursuruoste-epidemiat vuosina 1988, 2001 ja 2004 sekä hallan ja pakkasen aiheuttamat tuhot vuosina 1993-94.

5. Tulosten tarkastelu

Saatuja tuloksia ja niihin vaikuttaneita tekijöitä tarkasteltiin muuttujakohtaisesti tilastollisten menetelmien avulla. Taustamuuttujina käytettiin paitsi havaintoalalta kirjattuja puusto- ja metsikkötunnuksia, myös päästötietoja. 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

5.1

Taustamuuttujien vaikutus

Taustamuuttajat 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 muuttajat havainnoidaan kaikilta näytealoilta. Eräissä ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa (esim. Haahla ym. 2006b ja Niskanen 2003b) taustamuuttujien vaikutusta ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin on tutkittu Kruskall-Wallisn varianssianalyysin avulla ja havaittu taustamuuttujilla olevan vaikutusta varsinaisiin muuttujiin. Myös tässä tutkimuksessa taustamuuttujilla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus useisiin indikaattorimuuttujiin (Taulukko 20).

Tutkimusmetsän kehitysluokalla oli tilastollisesti merkitsevää vaikutusta sormipaisukarpeen vaurioasteeseen ja sormipaisukarpeen peittävytyteen. Sormipaisukarpeen vaurioaste oli suurempi kypsissä metsiköissä verrattuna varttuneisiin metsiköihin, kun taas sormipaisukarpeen peittävyys oli suurempi varttuneissa metsiköissä verrattuna kypsiin metsiköihin. Sormipaisukarve kasvaa usein runsaana nuorehkojen mäntyjen rungoilla, mutta sen peittävyys pienenee puun iän ja ympärysmittan kasvaessa. Etenkin kilpikaarnoittuvien vanhojen mäntyjen rungot ovat sormipaisukarpeelle melko huono kasvualusta nuorempiin mäntyihin verrattuna. Kypsempien metsiköiden suurempaa sormipaisukarpeen vaurioastetta voi osaltaan selittää se, että taajamien puistomaisilla alueilla esiintyy pääasiassa vanhoja männiköitä, kun taas nuoremmat männiköt sijoittuivat yleensä tausta-alueille. Vanhoja mäntyjä esiintyy myös harvapuustoisilla kallioaloilla, joissa paahteisuus voi huonontaa jäkälän elinolosuhteita ja sormipaisukarpeen kuntoa.

Metsikön soveltuvuus vaikutti kaikkiin muihin ilmanlaatua kuvaaviin muuttujiin paitsi sormipaisukarpeen peittävytyteen. Metsikön soveltuvuutta jäkäläkartoitukseen arvioidaan sen perusteella, kuinka hyvät kasvuolosuhteet metsikössä on päällysjäkälän kannalta. Jäkälän kasvuolosuhteita huonontavat liika varjoisuus, paahteisuus tai epäsuotuisat mikroilmastolliset tekijät. Kasvuolosuhteita voidaan arvioida puuston iän, puulajisuhteiden, metsätyyppin, puuston pohjapinta-alan ja pituuden perusteella. Havaintoalan soveltuvuus on havainnoijan subjektiivinen arvio siitä, kuinka paljon nämä tekijät vaikuttavat jäkälän 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 jäkälän 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 verrattu-

na 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.

Metsätyyppillä oli vaikutusta jokaiseen ilmanlaatuva kuvaavaan muuttajaan. Ilmanpuhtausindeksin arvot ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lukumäärät olivat pääsääntöisesti suurempia parittaisten vertailujen karumissa metsätyypeissä, esimerkiksi puolukkatyyppin (VT) metsiköissä verrattuna mustikkatyyppin (MT) metsiköihin tai kanervatyyppin (CT) metsiköissä verrattuna mustikkatyyppin (MT) metsiköihin. Sormipaisukarpeen vaurioaste ja yleinen vaurioaste olivat puolestaan pääsääntöisesti suurempia ja levä yleisempää parittaisten vertailujen rehevämmissä metsätyypeissä (esimerkiksi OMT-tyyppin metsiköissä verrattuna VT-tyyppin metsiköihin). Bioindikaattorialojen metsätyyppit painottuvat usein alueellisesti siten, että MT- ja VT-metsätyyppit painottuvat taajama-aloille ja tausta-aloille painottuvat taas karummat CT- ja CIT-metsätyyppit. Tämä voi osaltaan selittää IAP-indeksin ja jäkälien lajilukumäärän suuremmat arvot, levän harvemman esiintymisen ja vaurioasteiden pienemmät arvot karuimmissa metsätyypeissä. Rehevämmissä metsätyypeissä, kuten käenkaali-mustikkatyyppin (OMT) ja MT-tyyppin metsätyypeissä on myös sulkeutuneempi latvuskerros ja enemmän kasvillisuutta pensaskerrossa, jolloin näiden aiheuttama varjostus voi heikentää jäkälien elinmahdollisuuksia ja pienentää IAP-indeksin arvoa ja lajilukumäärää ja vastaavasti lisätä jäkälien vaurioita.

Luppojen peittävyys oli suurempi parittaisten vertailujen karumissa metsätyypeissä. Lupot ovat herkkiä ilman epäpuhtauksille, joten niiden suurempi peittävyys karuimmissa metsätyypeissä selittynee edellä mainitulla bioindikaattorialojen alueellisella jakautumisella. Samoin rehevämpien metsätyyppien kasvillisuuden aiheuttama varjostus voi vaikuttaa myös luppoihin. Sormipaisukarpeen peittävyys oli parittaisissa vertailuissa suurempi pääsääntöisesti rehevämmissä metsätyypeissä. Sormipaisukarve on vahva kilpailija ja se on voinut vallata rehevämmissä metsätyypeissä tilaa muilta näissä metsätyypeissä heikommin menestyviltä jäkälälajeilta (ks. edellä).

IAP-indeksin arvot ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lajimäärä olivat pääsääntöisesti pienempiä ja yleinen vaurioaste oli suurempi ja levä yleisempää muu-luokan metsätyypeissä verrattuna muihin tarkemmin määriteltyihin metsätyypeihin. Nämä voivat selittyä sillä, että luokka sisältää mm. taajamien puistometsiköt, joihin kohdistuu enemmän ilman epäpuhtauksien vaikutuksia. Lisäksi muu-luokkaan voi kuulua bioindikaattoritutkimukseen ylipäättänsä huonosti soveltuvia kasvillisuustyyppisiä, kuten soistuneita metsätyyppisiä.

Taulukko 20. Taustamuuttujien suhteen tarkasteltujen ilmanlaatuva 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 muuttuja	Soveltuvuus		Metsätyyppi		Kehitysluokka	
	testisuure	p	testisuure	p	testisuure	p
Sormipaisukarpeen vaurioaste	26,195	0,000***	35,836	0,000***	3855,000	0,010**
Yleinen vaurioaste	49,272	0,000***	78,552	0,000***	5404,500	0,629
Lajimäärä	26,212	0,000***	47,875	0,000***	5766,000	0,209
Ilmanpuhtausindeksi	43,275	0,000***	69,397	0,000***	5229,000	0,892
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	1,801	0,406	28,840	0,000***	6413,000	0,013*
Luppojen peittävyys %	29,433	0,000***	38,499	0,000***	5349,000	0,666
Levän yleisyys	37,614	0,000***	49,355	0,000***	4879,500	0,557

Jatkuvien taustamuuttujien ja tutkittujen jäkälämuuttujien välisiä korrelaatioita on tarkasteltu taulukossa 21. Puiden iän ja sormipaisukarpeen peittävyyden välillä oli erittäin merkitsevä korrelaatio: mitä vanhempia tutkimuspuut olivat sitä pienempi oli sormipaisukarpeen peittävyys. Sormipaisukarpeen peittävyyden ja puuston iän osalta havaittu korrelaatio vahvistaa luokiteltujen taustamuuttujien Kruskal-Wallis ja Mann-Whitneyn testien antamaa tulosta, jonka mukaan sormipaisukarpeen peittävyys oli suurempi varttuneissa kuin kypsissä metsissä. Sormipaisukarpeen peittävyyden osalta puuston iän merkitys on suuri, mikä heikentää peittävyyden arvoa

ilmanlaadun indikaattorina. Myös sormipaisukarpeen vaurioasteen ja puiden iän välillä havaittiin tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio: sormipaisukarpeen vaurioaste kasvoi puun iän kasvaessa. Tätä korrelaatiota voivat selittää samat tekijät, jotka selittävät sormipaisukarpeen keskimääräisen vaurioasteen eroja kehitysluokan suhteen.

Puiden halkaisija korreloi erittäin merkitsevästi useiden ilmanlaatua kuvaavien muuttujien kanssa. Ilmanpuh-
tausindeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärä pienenevät ja yleinen ja sormipaisukar-
peen vaurioaste kasvoivat sekä levä yleistyivät havaintopuiden halkaisijan kasvaessa. Tähän voi vaikuttaa erit-
tään iäkkäiden puiden sijoittuminen taajamien puistomaisiin metsiin ja paahteisille kallioidelle, joissa myös lajisto
voi olla köyhtyneempää ja vauriot suurempia kuin muilla aloilla. Samoin paksujen ja kilpikaarnoittuvien mäntyjen
rungot ovat huono kasvualusta etenkin sormipaisukarpeelle.

Taulukko 21. 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 (***)

n = 300	Puiden ikä	Puiden pituus	Pohjapinta-ala	Puiden halkaisija
Puiden pituus	0,145*	1		
Pohjapinta-ala	0,183**	0,285***	1	
Puiden halkaisija	0,586***	0,274***	-0,092	1
IAP	-0,081	-0,117*	0,027	-0,320**
Lajilukumäärä	-0,092	-0,068	0,032	-0,249***
Sormipaisukarpeen peittävyys %	-0,291***	0,007	-0,028	-0,140*
Luppojen peittävyys %	0,026	-0,120*	0,028	-0,112
Sormipaisukarpeen vaurioaste	0,270***	0,078	-0,008	0,259***
Yleinen vaurioaste	0,019	0,133*	-0,021	0,240***
Levä	0,112	0,053	0,019	0,207***

5.2

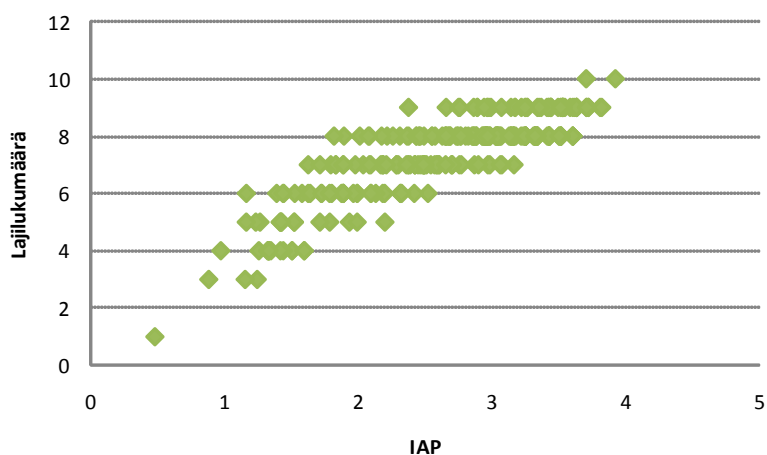
Tutkittujen muuttujien välinen riippuvuus

Tilastollisesti merkitseviä riippuvuuksia havaittiin useiden ilmanlaatua kuvaavien jäkälämuuttujien kesken (tau-
lukko 22). Voimakkaimpia korrelaatioita ilmanlaatua kuvaavien muuttujien välillä havaittiin IAP-indeksiin ja la-
jilukumäärän välillä (kuva 72). IAP-indeksi lasketaan lajilukumäärän pohjalta, joten näiden muuttujien välinen
positiivinen korrelaatio oli odotettavissa. Ilmanpuhkausindeksi ja lajilukumäärä korreloivat puolestaan negatiivi-
sesti yleisen vaurioasteen kanssa (kuva 73). Sen sijaan ilmanpuhkausindeksiin ja lajilukumäärän korrelaatiot sormi-
paisukarpeen vaurioasteen kanssa olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä, mutta korrelaatiokerroin oli melko
pieni. Sormipaisukarpeen vaurioaste puolestaan korreloi yleisen vaurioasteen kanssa (kuva 74). Korrelaatiot
kertovat tarkasteltujen muuttujien välisestä lineaarisesta riippuvuudesta. Muuttujien väliset korrelaatiot viittaavat
siihen, että niiden vasteet muuttujien vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin ovat samankaltaisia. Lajilukumäärä ja IAP-
indeksi korreloivat yleisen vaurioasteen kanssa voimallisemmin kuin sormipaisukarpeen vaurioasteen kanssa
sen vuoksi, että yleinen vaurioaste huomioi erikseen lehti- ja pensasmaisten lajien esiintymisen, joten havain-
topuulla havaittujen jäkälän lajimäärä vaikuttaa sen vaurioluokitukseen. Toisaalta vaurioluokitukseen vaikuttaa
myös sormipaisukarpeen vaurioaste.

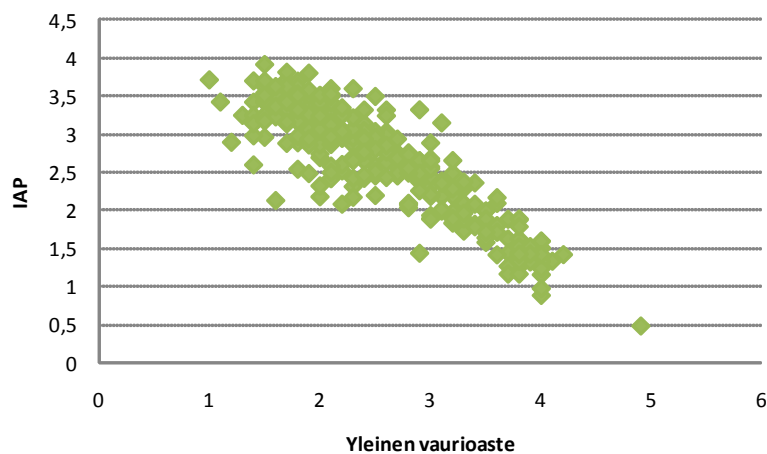
Sekä yleinen vaurioaste että sormipaisukarpeen vaurioaste olivat sitä suurempia mitä yleisempää levä oli tutki-
musalalla. Koska levä on ilman epäpuhtauksien positiivinen indikaattori, on odotettavaa, että levän yleistyessä
myös jäkälän vauriot ovat suurempia. Levän yleistyessä ilmanpuhkausindeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsi-
vien jäkälän lajilukumäärä puolestaan pienenevät. Ilmanpuhkausindeksiin ja ilman epäpuhtauksista kärsivien
jäkälän lajilukumäärän ja luppojen peittävyyden väliset positiiviset korrelaatiot olivat myös odotettuja, sillä ne
kaikki ovat ilman epäpuhtauksien negatiivisia indikaattoreita eli niiden arvojen oletetaan olevan sitä suurempia
mitä puhtaampaa ilma on. Levä, yleinen vaurioaste ja sormipaisukarpeen vaurioaste (kuva 75) puolestaan kor-
reloivat negatiivisesti luppojen peittävyyden kanssa.

Taulukko 22. 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 (***).

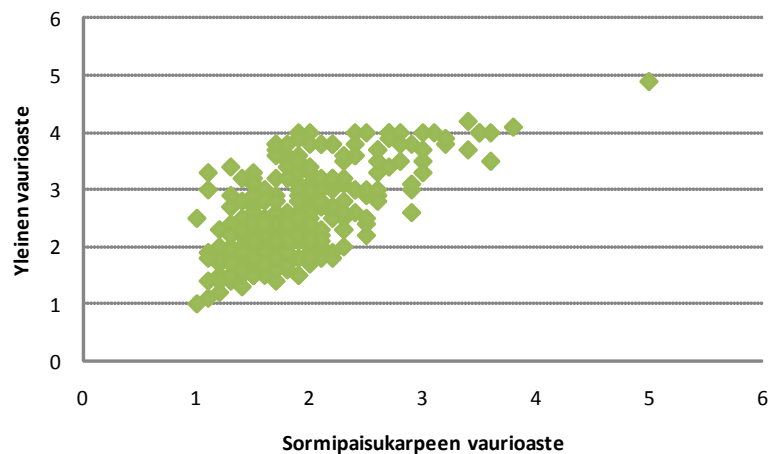
	IAP	Lajilukumäärä	Sormipaisukarpeen peittävyys %	Luppojen peittävyys %	Sormipaisukarpeen vaurioaste	Yleinen vaurioaste
Lajilukumäärä	0,817***	1				
Sormipaisukarpeen peittävyys %	0,023	0,069	1			
Luppojen peittävyys %	0,606***	0,452***	-0,084	1		
Sormipaisukarpeen vaurioaste	-0,363***	-0,346***	-0,214***	-0,268***	1	
Yleinen vaurioaste	-0,850***	-0,690***	0,038	-0,666***	0,591***	1
Levä	-0,439**	-0,378***	-0,026	-0,301***	0,607***	0,563***



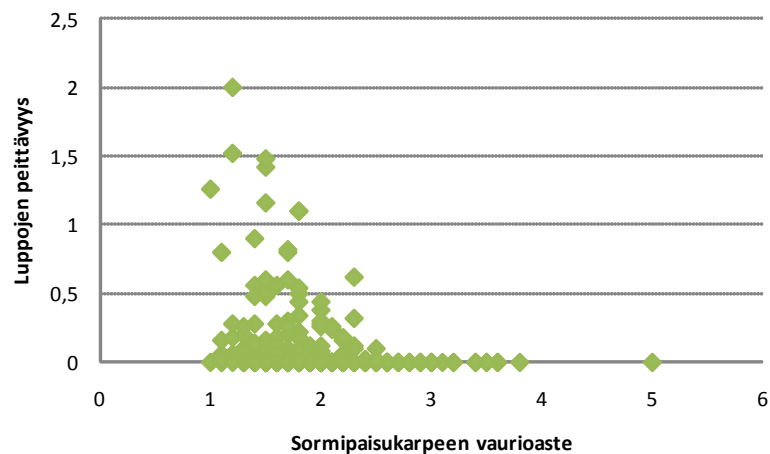
Kuva 72. IAP-indeksin ja lajilukumäärän välinen riippuvuus vuonna 2010.



Kuva 73. IAP-indeksin ja yleisen vaurioasteen välinen riippuvuus vuonna 2010.



Kuva 74. Sormipaisukarpeen vaurioasteen ja yleisen vaurioasteen välinen riippuvuus vuonna 2010.



Kuva 75. Sormipaisukarpeen vaurioasteen ja luppojen peittävyden välinen riippuvuus vuonna 2010.

Myös sammalten alkuainepitoisuuksien välisiä riippuvuuksia tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiokertoimen avulla. Tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita havaittiin lähes kaikkien alkuaineiden välillä. (Taulukko 23). Erittäin voimakkaita korrelaatioita havaittiin arseenin ja nikkelin, arseenin ja raudan, fosforin ja rikin, fosforin ja magnesiumin, kromin ja nikkelin, kromin ja raudan, kuparin ja magnesiumin, kuparin ja raudan, nikkelin ja raudan, nikkelin ja vanadiinin sekä raudan ja vanadiinin välillä. Raskasmetallien väliset voimakkaat korrelaatiot voivat kertoa siitä, että niitä vapautuu samoista teollisuuden prosesseista. Fosforin, rikin ja magnesiumin välisiä voimakkaita korrelaatioita voi myös selittää se, että ne kaikki ovat kasveille tärkeitä ravinteita.

Taulukko 23. 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 (***).

	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Mg mg/kg	Ni mg/kg	Fe mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg
P mg/kg	0,093	1										
Cd mg/kg	0,291***	0,112	1									
Cr mg/kg	0,810***	0,271**	0,216*	1								
Cu mg/kg	0,582***	0,433***	0,312**	0,717***	1							
Pb mg/kg	0,273**	-0,036	0,557***	0,216*	0,230*	1						
Mg mg/kg	0,321***	0,687***	0,131	0,592***	0,729***	0,078	1					
Ni mg/kg	0,810***	0,303**	0,216*	0,902***	0,696***	0,269**	0,561***	1				
Fe mg/kg	0,745***	0,244*	0,183	0,907***	0,665***	0,248*	0,522***	0,812***	1			
S mg/kg	0,400***	0,648***	0,267**	0,496***	0,600***	0,114	0,578***	0,512***	0,433***	1		
Zn mg/kg	0,313***	0,524***	0,348***	0,387***	0,553***	0,293**	0,450***	0,345***	0,410***	0,568***	1	
V mg/kg	0,671***	0,268**	0,327***	0,779***	0,670***	0,493***	0,497***	0,772***	0,887***	0,481***	0,421***	1

Taulukossa 24 on esitetty sammalten alkuainepitoisuuksien ja ilmanlaatua kuvaavien jäkälämuuttujien väliset Spearmanin korrelaatiokertoimet. Levä korreloi positiivisesti useiden sammalesta määritettyjen alkuainepitoisuuksien kanssa eli mitä korkeampia tiettyjen alkuaineiden pitoisuudet havaintoaloilla olivat sitä yleisempää levä oli. Myös sormipaisukarpeen ja yleisen vaurioasteen sekä muun muassa sammalen arseeni, kromi-, kupari-, rauta ja vanadiipitoisuuksien välillä havaittiin positiivisia korrelaatioita eli sormipaisukarpeen vauriot ja yleinen vaurioaste kasvoivat näiden alkuainepitoisuuksien kasvaessa sammalessa. Ilmanpuhtausindeksi ja ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkäläien lajilukumäärä puolestaan olivat sitä pienempiä mitä suurempi oli sammalten magnesiumpitoisuus. Sormipaisukarpeen ja luppojen peittävyden ja sammalen alkuainepitoisuuksien väliset korrelaatiot olivat pääasiassa heikkoja. Vaurioasteiden ja levän sekä sammalen alkuainepitoisuuksien väliset korrelaatiot kertovat siitä, että niiden vasteet muuttujien vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin ovat samansuuntaisia.

Taulukko 24. 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	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Mg mg/kg	Ni mg/kg	Fe mg/kg	S mg/kg	Zn mg/kg	V mg/kg
Levä	0,344***	0,386***	0,051	0,420***	0,443***	0,04	0,484***	0,393***	0,415***	0,523***	0,428***	0,397***
IAP	-0,074	-0,253*	0,205*	-0,213*	-0,270**	0,158	-0,412***	-0,164	-0,216*	-0,158	-0,098	-0,13
Lajilukumäärä	-0,148	-0,228*	0,182	-0,228*	-0,217*	0,137	-0,324***	-0,201*	0,241*	-0,218*	-0,154	-0,136
Sormipaisukarpeen vaurioaste	0,513***	0,284**	0,074	0,595***	0,560***	-0,076	0,362***	0,488***	0,565***	0,453***	0,445***	0,449***
Yleinen vaurioaste	0,224*	0,279**	-0,219*	0,413***	0,396***	-0,198*	0,500***	0,343***	0,392**	0,249*	0,153	0,282**
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	0,108	0,105	-0,091	0,168	0,097	0,139	0,176	0,278**	0,163	-0,09	-0,179	0,209*
Luppojen peittävyys (%)	-0,071	-0,15	0,172	-0,269**	-0,273**	0,108	-0,356***	-0,214*	-0,244*	-0,023	-0,047	-0,175

5.3 Regressioanalyysit

Regressioanalyysin avulla tutkittiin taustamuuttujien vaikutusta viiteen jäkälämuuttujaan, joiden oletetaan kuvaavan ilmanlaatua: IAP-indeksiin, ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien lajilukumäärään, yleiseen vaurioasteeseen, sormipaisukarpeen vaurioasteeseen ja sormipaisukarpeen peittävyteen. Myös levän yleisyydelle ja luppojen peittävydelle tehtiin regressioanalyysi, mutta analyysistä ei saatu mielekkäitä tuloksia. Regressioanalyysissä hyödynnettiin ilmanlaatatietoina etäisyyttä lähimpään lupavelvolliseen laitokseen sekä tämän laitoksen rikkidioksidi-, hiukkas- ja typen oksidien päästöjä (ks. luku 2.2.1). Lähimmän lupavelvollisen laitoksen

etäisyyden ja päästömäärien 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.

Taulukoissa esiintyvä vakio (regressiokerroin) kertoo selitettävän muuttujan riippuvuutta selittävästä muuttujasta eli se kuvaa selittävän muuttujan muutoksen vaikutuksen suuruutta selitettävän muuttujan arvoihin. Vakion etumerkki kertoo riippuvuuden suunnan. Standardoitu B-kerroin kertoo puolestaan kunkin selittävän 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.

Saadut tulokset osoittavat, että jäkälämuuttujien ja päästölähteiden välillä on malliin sisältyvistä epävarmuus-tekijöistä ja rajoitteista huolimatta melko selvä yhteys. Regressioanalyysien selitysasteet olivat kuitenkin melko pieniä kaikkien jäkälämuuttujien suhteen, mikä kertoo lähinnä siitä, että malleissa eivät todennäköisesti olleet mukana kaikki jäkäliin vaikuttavat tekijät. Esimerkiksi laajempien ja yksityiskohtaisempien päästö- ja ilmanlaatu-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

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 13,3 % ilmanpuhtausindeksin vaihtelusta. Taustamuuttujat selittivät ilmanpuhtausindeksin vaihtelusta 10,0 % ja ilmanlaatua kuvaavat muuttujat vain 3,3 %. Alan etäisyys päästölähteestä ja puuston läpimitta ennustivat melkein yhtä hyvin ilmanpuhtausindeksin alakohtaista arvoa. Ilmanpuhtausindeksin arvot kasvoivat, kun etäisyys lähimpään lupavelvolliseen päästölähteeseen kasvoi.

Taulukko 25. Ilmanpuhtausindeksille tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***)*

	B	standardoitu B	testisuure t	p-arvo
vakio	3,79		10,76	0,000***
läpimitta	-0,04	-0,26	-3,78	0,000***
etäisyys päästölähteestä	0,02	0,19	2,70	0,008**

Puuston läpimitan vaikutus ilmanpuhtausindeksiin liittyy todennäköisesti havaintoalojen epätasaiseen jakaantumiseen läpimitan suhteen tausta- ja taajama-aloille, eli taajama-aloilla puut olivat keskimäärin iäkkäämpiä ja paksumpia kuin tausta-aloilla.

5.3.2

Ilman epäpuhtauksista kärsivät jäkälälajit

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 9,0 % ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälä-lajilukumäärän vaihtelusta. Puuston läpimitta selitti 5,9 % ja etäisyys lähimmästä päästölähteestä 3,1 % lajilukumäärän vaihtelusta. Pieni selitysaste kertoo siitä, että regressiomallissa eivät välttämättä ole mukana kaikki jäkälä-lajilukumäärään vaikuttavat tekijät. Alan etäisyys päästölähteestä ja puuston läpimitta ennustivat melkein yhtä hyvin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien alakohtaista arvoa. Kun etäisyys lähimpään lupavelvolliseen päästölähteeseen kasvoi, kasvoi myös alakohtainen jäkälä-lajilukumäärä. Jäkälä-lajilukumäärä puolestaan pieneni kun puuston läpimitta kasvoi. (Taulukko 26.)

Taulukko 26. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälien lajilukumäärälle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (*), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***)

	B	standardoitu B	testisuure t	p-arvo
vakio	9,00		12,20	0,000***
läpimitta	-0,06	-0,19	-2,67	0,008**
etäisyys päästölähteestä	0,03	0,18	2,56	0,011**

Ilman epäpuhtauksista kärsivien lajien määrä ei ollut aivan yhtä hyvä ilman epäpuhtauksien indikaattori kuin IAP-indeksi. Tämä johtuu siitä, että IAP-indeksi ottaa huomioon eri lajien herkkyiden epäpuhtauksille, kun taas lajilukumäärä käsittelee herkkyydeltään erilaisia lajeja samanarvoisina. Lajimäärään vaikuttivat kuitenkin samat muuttujat kuin IAP-indeksiinkin.

5.3.3

Sormipaisukarpeen vaurioaste

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

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti 24,4 % sormipaisukarpeen vaurioasteen vaihtelusta. Puuston läpimitta selitti 5,6 % ja etäisyys päästölähteestä 18,9 % sormipaisukarpeen vaurioasteen vaihtelusta. Sormipaisukarpeen vaurioaste oli sitä suurempi mitä lähempänä päästölähdettä havaintoala sijaitsi. Regressiomallin mukaan puuston läpimitan kasvaessa sormipaisukarpeen vaurioasteet kasvoivat. Jännösten autokorreloituneisuutta mittaava Durbin-Watsonin testisuureen pienehkö arvo ($d=1,34$) viittaa positiivisen autokorrelaation olemassaoloon, mikä voi heikentää sormipaisukarpeelle tehdyn regressiomallin estimointia. (Taulukko 27.)

Taulukko 27. 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 (***)

	B	standardoitu B	testisuure t	p-arvo
vakio	1,72		6,81	0,000***
läpimitta	0,01	0,11	1,71	0,090
etäisyys päästölähteestä	-0,03	-0,45	-6,90	0,000***

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

5.3.4

Yleinen vaurioaste

19,8 % yleisen vaurioasteen vaihtelusta selittyi kahden selittävän muuttujan hierarkkisella regressiomallilla. Taustamuuttujat selittivät yleisen vaurioasteen vaihtelusta 5,9 % ja ilmanlaatuun liittyvät muuttujat 13,9 %. Etäisyys lähimmästä lupavelvollisesta päästölähteestä ennusti eniten yleisen vaurioasteen alakohtaisesta vaihtelusta: yleinen vaurioaste pieneni etäisyyden kasvaessa päästölähteeseen. Yleinen vaurioaste puolestaan kasvoi puuston läpimitan kasvaessa. (Taulukko 28.)

Taulukko 28. 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 (***)

	B	standardoitu B	testisuure t	p-arvo
vakio	2,12		5,77	0,000***
läpimitta	0,02	0,14	2,01	0,045*
etäisyys päästölähteestä	-0,03	-0,39	-5,76	0,000***

Odotetusti yleisen vaurioasteen regressiomalli muistuttaa muiden lajistotunnusten regressiomallia: yleinen vaurioaste pyrkii kuvaamaan useiden ilman epäpuhtauksiin reagoivien lajien muutoksia.

5.3.5

Sormipaisukarpeen peittävyys

Kahden selittävän muuttujan hierarkkinen regressiomalli selitti vain 8,6 % sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelusta. Taustamuuttujista puuston ikä selitti 6,4 % ja puuston pohja-pinta-ala 2,2 % sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelusta. Ilmanlaatua kuvaavat muuttujat eivät regressiomallin mukaan selittäneet merkittävästi sormipaisukarpeen peittävyyden vaihtelua. Puuston ikä ennusti parhaiten alakohtaista sormipaisukarpeen peittävyyttä: puuston iän kasvaessa sormipaisukarpeen peittävyys pieneni. Puuston pohjapinta-alan kasvaessa sormipaisukarpeen peittävyys puolestaan kasvoi. (Taulukko 29.)

Taulukko 29. Sormipaisukarpeen peittävyydelle tehdyn regressioanalyysin tulokset. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) riippuvuus on merkitty yhdellä tähdellä (), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***)*

	B	standardoitu B	testisuure t	p-arvo
vakio	5,16		7,84	0,000***
ikä	-0,01	-0,22	-3,13	0,002**
pohjapinta-ala	-0,03	-0,15	-2,15	0,033*

Tarkastelluista muuttujista sormipaisukarpeen peittävyys oli huonoin ilmanlaadun indikaattori. Havaintoalan ominaisuudet vaikuttavat sormipaisukarpeen peittävyyteen enemmän kuin ilmanlaatua kuvaavat muuttujat. Sormipaisukarpeen peittävyyden ilmanlaadun indikaatio näkyy lähinnä kilpailuvaikutuksena: sormipaisukarve on vahva kilpailija, joka kestää ilman epäpuhtauksia melko hyvin, ja pystyy valtaamaan kuormitetuilla alueilla herkemmltä jäkälälajeilta vapautunutta kasvutilaa.

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. Sammalnäytteistä mitatut alkuaineet yhdistyivät korrelaatiomatriisiin perustuvassa pääkomponenttialyysissä kolmeksi pääkomponentiksi, jotka selittivät yhteensä 76 % muuttujien vaihtelusta. Muuttujien kommunaliteetit, jotka kertovat kuinka suuren osan muuttujien välisestä vaihtelusta pääkomponenttiratkaisu selittää, ovat suuria eli pääkomponenttiratkaisua voidaan pitää hyvänä. Pääkomponenttialyysin tulokset ovat kuitenkin yleistys kokonaistilanteesta, joka selviää paremmin tarkastelemalla yksittäisten alkuaineiden pitoisuuksien jakaumaa tutkimusalueella.

Ensimmäisellä pääkomponentilla, joka selittää 43 % muuttujien vaihtelusta suurimmat lataukset saivat kupari, magnesium, rauta, rikki, sinkki ja vanadiini (taulukko 30). Pääkomponentin suurimmat pistemäärät sijoittuivat Nurmeksen ja Juuan väliselle vyöhykkeelle, Outokummun koillisosaan, Ilomantsin eteläosaan, Joensuusta Hammaslahden kautta Rääkkylään ulottuvalle vyöhykkeelle ja Kiteelle. Ensimmäisen pääkomponentin pistemääräjakaumien, pääkomponenteille latautuneiden alkuaineiden lupavelvollisten päästölähteiden perusteella ensimmäinen pääkomponentin voidaan katsoa kuvaavan ensisijaisesti lämpökeskusten päästöjä. Etenkin puun poltosta vapautuu sinkkipäästöjä. (Kuva 76.)

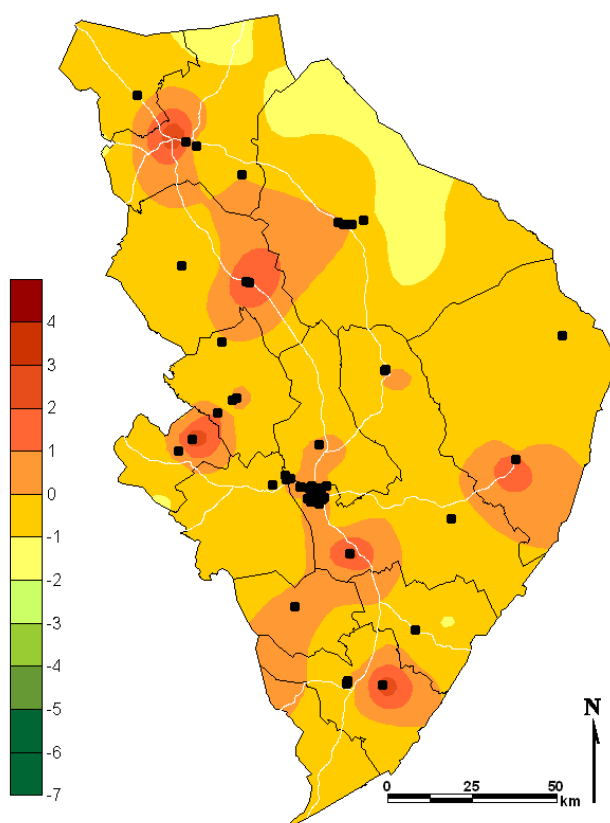
Toisella pääkomponentilla, joka selittää 22 % sammalten alkuainepitoisuuksien välisestä vaihtelusta, suurimmat lataukset saivat arseeni, kromi ja nikkeli (taulukko 30). Nämä alkuaineet latautuivat pääkomponentille negatiivisesti ja pääkomponentin pienimmät lataukset sijoituivat Outokummun koillisosaan, Vuonoksen jatkojalostamon ja Horsmanahon ja Pehmytkiven kaivoksen läheisyyteen, sekä Juukaan Tulikiven ja Nunnanunin louhosten ja jatkojalostuslaitosten läheisyyteen. Toisen pääkomponentin voidaankin katsoa kuvaavan kaivosten ja jatkojalostuslaitosten päästöjä. (Kuva 77.)

Kadmium ja lyijy saivat suurimmat lataukset kolmannella pääkomponentilla, joka selitti 11 % muuttujien välisestä

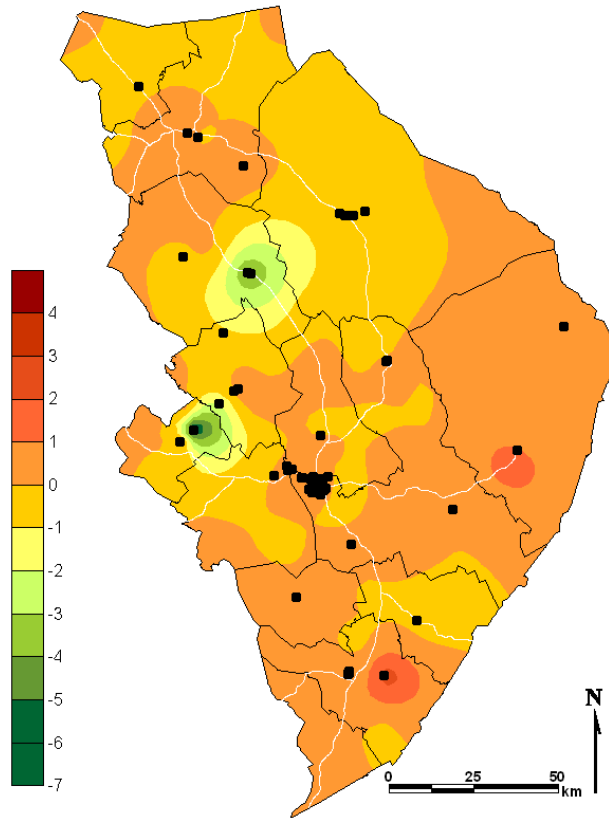
vaihtelusta (taulukko 30). Kolmannen pääkomponentin suurimmat pistemäärät sijoittuivat Kiihtelysvaaraan, Kiteen keskustaajaman alueelle Kiteen Lämpö Oy:n läheisyyteen ja Pielisin pohjoisosan etelä- ja pohjoisrannoille Nurmeksen Höljäkän kyllästämön läheisyyteen ja Juukaan Nunnanuunin ja Tulikiven kaivosalueen läheisyyteen (kuva 78). Kolmas pääkomponentti kuvastaneekin näiden laitosten kadmiumin ja lyijypäästöjä. Esimerkiksi Kiteen lämpö Oy käyttää polttoaineenaan haketta ja palaturvetta, joiden poltosta voi vapautua muiden raskasmetallien ohella myös kadmiumia ja lyijyä.

Taulukko 30. Pääkomponenttien lataukset ja kommunaliteettiärvot metsäsammalnäytteistä analysoiduille alkuainepitoisuuksille Pohjois-Karjalassa (n = 101).

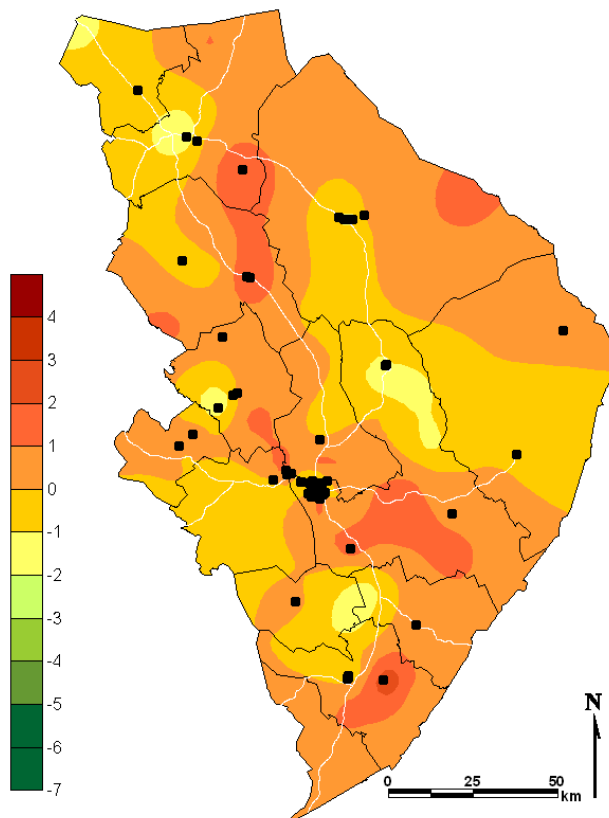
	PCA 1	PCA 2	PCA3	Kommunaliteetti
	43 %	22 %	11 %	76%
Arseeni	0,49	-0,68	0,14	0,719
Fosfori	0,49	0,45	-0,61	0,812
Kadmium	0,38	0,45	0,56	0,662
Kromi	0,61	-0,63	0,08	0,775
Kupari	0,82	0,05	-0,16	0,702
Lyijy	0,46	0,44	0,66	0,838
Magnesium	0,82	-0,33	-0,15	0,801
Nikkeli	0,53	-0,81	0,12	0,948
Rauta	0,84	0,01	0,00	0,704
Rikki	0,74	0,28	-0,28	0,696
Sinkki	0,67	0,50	-0,06	0,705
Vanadiini	0,81	0,29	0,12	0,753



Kuva 76. Pääkomponentti 1:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä. Valkoisella viivalla on kuvattu alueen vilkkaimmat tiet.



Kuva 77. Pääkomponentti 2:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä. Valkoisella viivalla on kuvattu alueen vilkkaimmat tiet.



Kuva 78. Pääkomponentti 3:n pistemäärän vyöhykkeet tutkimusalueella vuonna 2010. Mustat pisteet kuvaavat tutkimusalueen merkittävimpiä päästölähteitä. Valkoisella viivalla on kuvattu alueen vilkkaimmat tiet.

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.

Sormipaisukarpeen peittävyys oli tarkastelluista muuttujista huonoin ilmanlaadun indikaattori, sillä sen vaihtelua selittivät tarkastelluilla tilastomenetelmillä miltei pelkästään luonnolliset tekijät. Parhaiten ilmanlaatua kuvasi sormipaisukarpeen vaurioaste. Yleinen vaurioaste kuvasi myös melko 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.

6. Vertailu

6.1

Vuosien välinen vertailu

Tässä luvussa vertaillaan vuoden 2010 tuloksia vuoden 1998 bioindikaattoritutkimuksen tuloksiin (Niskanen ym. 1999). Vertailussa ovat mukana männyn epifyyttijäkälät ja neulasten rikkipitoisuudet, sillä vuosien 1998 ja 1999 tutkimuksessa sammalen alkuainepitoisuuksia ei määritetty. Vertailuvuosina käytetyt menetelmät ja havaintoalat ovat samoja muuten, mutta neulasten rikkipitoisuuksien vertailussa havaintoalat eivät ole täysin samoja tutkimusvuosien välillä. Vertailun havainnollistamiseksi alla esitetään vyöhykekartat sormipaisukarpeen vaurioasteesta, lajilukumäärästä ja IAP-indeksistä vuosilta 1998 ja 2010. Vyöhykekarttoja laadittaessa vaihtuneita aloja ei ole jätetty pois, vaan tarkoituksena on saada yleiskuva jäkäläien indikoimasta ilmanlaadun vaihtelusta alueella eri vuosina. Myöhemmin aloja ja puita sekä niiden keskiarvoja eri vuosina jäkälämuuttujien osalta vertailtaessa on vertailusta jätetty vaihtuneet alat ja puut pois.

6.1.1

Mäntyjen epifyyttijäkälät

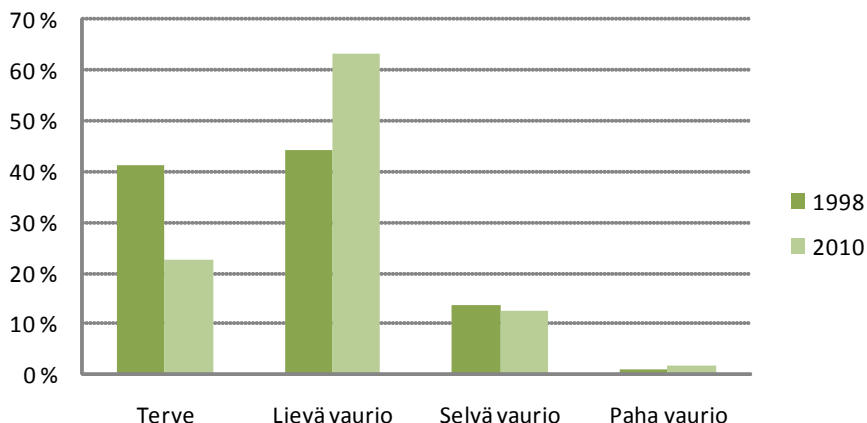
Mäntyjen runkojäkälää kuvaavia tunnuslukuja vuosina 1998 ja 2010 ja vuosien väliset tilastolliset vertailut on esitetty taulukossa 31. Ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja havaittiin hieman enemmän vuonna 1998 kuin vuonna 2010 ja keskimääräinen ilmanpuhtausindeksi oli vuonna 1998 hieman suurempi ja kuin vuonna 2010, mutta vuosien väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Sormipaisukarpeen vaurioaste ja yleinen vaurioaste olivat vuonna 2010 keskimäärin 0,2 vaurioluokkaa suurempia kuin vuonna 1998. Sormipaisukarpeen ja yleisen vaurioasteen alakohtainen maksimiarvo oli kuitenkin suurempi vuonna 1998. Sormipaisukarpeen ja luppojen keskimääräiset peittävyudet pienenevät selvästi vuodesta 1998 vuoteen 2010. Levä oli yleisempää tutkimusalueen rungoilla vuonna 2010 kuin vuonna 1998 ja vuosien välinen ero oli tilastollisesti merkitsevä. (Taulukko 31.)

Taulukko 31. Männyn runkojäkälää kuvaavia tunnuslukuja Pohjois-Karjalan samoina pysyneillä havaintoaloilla vuosina 1998 ja 2010. Vuosien väliset parittaiset vertailut on tehty merkkitestillä. Melkein merkitsevä ($p < 0,05$) testi tulos on merkitty yhdellä tähdellä (), merkitsevä ($p < 0,01$) kahdella (**) ja erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) kolmella (***) N = 185. Vuoden 1998 tulokset ovat julkaisusta Niskanen ym. 1999.*

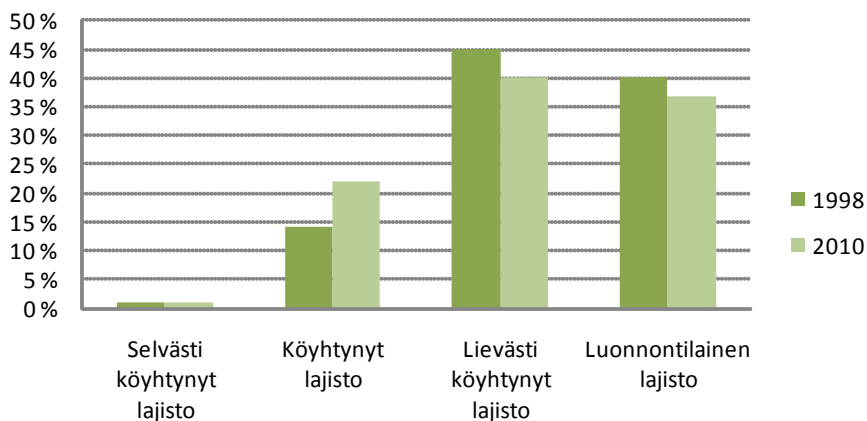
n = 185	Vuosi	Keskiarvo	Pienin	Suurin	Keskihajonta	testisuure Z	p-arvo
Ilmanpuhtausindeksi	1998	2,7	1,0	3,7	0,65	1 714	0,086
	2010	2,6	0,9	3,8	0,72		
Lajilukumäärä (alakohtainen)	1998	7,5	3	10	1,37	1 592	0,111
	2010	7,3	3	9	1,45		
Sormipaisukarpeen vaurioaste	1998	1,8	1	4,2	0,65	-5 632	0,000***
	2010	2,0	1	3,8	0,55		
Yleinen vaurioaste	1998	2,7	1,5	5	0,67	4 598	0,000***
	2010	2,5	1	4,2	0,80		
Sormipaisukarpeen peittävyys (%)	1998	17,2	1,2	53,8	10,55	13 087	0,000***
	2010	2,3	0	7,74	1,42		
Luppojen peittävyys (%)	1998	0,9	0	14,6	1,68	9 558	0,000***
	2010	0,1	0	2	0,31		
Levän yleisyys	1998	1,3	0	5	1,84	-3 858	0,000***
	2010	1,8	0	5	1,98		

Kuvissa 79 ja 80 on esitetty havaintoalojen jakaantuminen luokkiin sormipaisukarpeen vaurioasteen ja IAP-indeksin mukaan vuosina 1998 ja 2010. Sormipaisukarpeen vaurioasteen terve luokka on pienentynyt 45 % vuoteen 1998 verrattuna, ja lievien vaurioiden luokka on puolestaan kasvanut 43 % edeltävään tutkimukseen verrattuna. Selvät ja pahat sormipaisukarpeen vauriot omaavien alojen määrä on pysynyt ennallaan. Jäkälälajistoltaan köyhtyneet alat ovat lisääntyneet jonkin verran (57 %) vuodesta 1998 vuoteen 2010, ja vastaavasti

lajistoltaan lievästi muuttuneiden ja luonnontilaisen lajiston omaavien alojen määrät ovat vähentyneet noin 10 % verrattaessa vuoden 1998 tämän tutkimuksen tuloksiin.

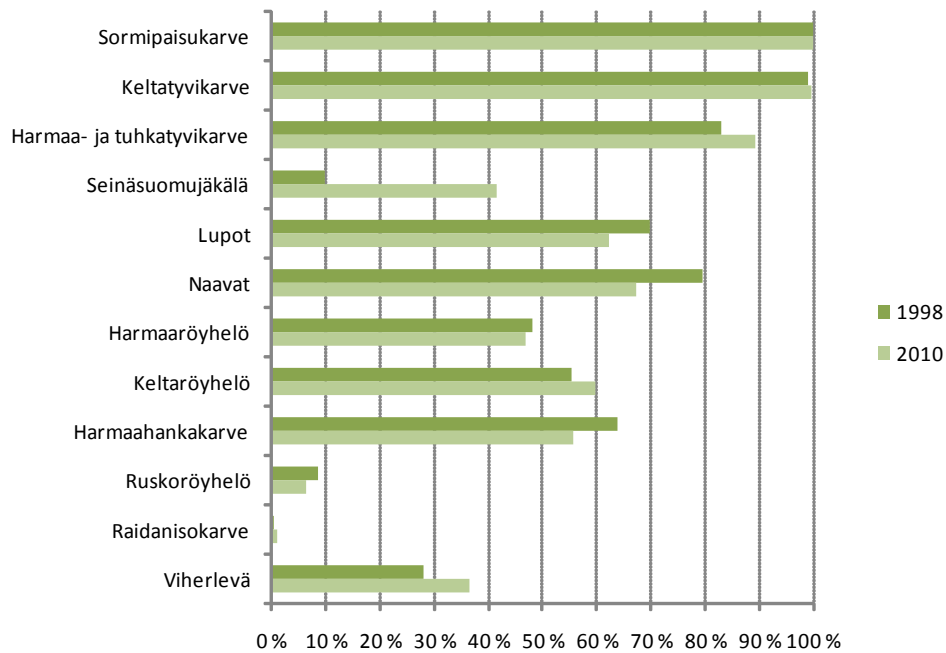


Kuva 79. Samana pysyneet havaintoalat luokiteltuna sormipaisukarpeen vaurioasteen mukaan vuosina 1998 ja 2010. N = 185.



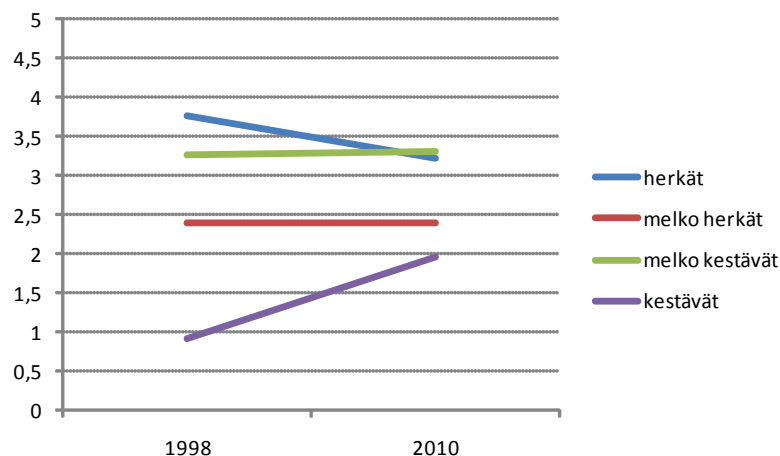
Kuva 80. Samana pysyneet havaintoalat luokiteltuna IAP-indeksin arvon mukaan vuosina 1998 ja 2010. N = 185.

Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit samana pysyneillä rungoilla vuosina 2004–2009 on esitetty kuvassa 81. Harmaa- ja tuhkatyvikarve, seinäsuomujäkälä, keltaröyhelö ja viherlevä olivat yleisempiä vuonna 2010 kuin 1998. Etenkin harmaa- ja tuhkatyvikarve oli selvästi yleistynyt tutkimusalueella. Ilman epäpuhtauksille herkät lajit lupot, naavat ja harmaahankakarve harvinaistuivat vuodesta 1998 vuoteen 2010. Myös harmaaröyhelö harvinaistui tutkimusalueella hieman. (Kuva 81.)



Kuva 81. Jäkälälajien esiintymisfrekvenssit tutkimusalueella vuosina 1998 ja 2010. N = 835.

Molemmat kestävät jäkälälajit, levä ja seinäsuomujäkälä, yleistyivät havaintoaloilla ajanjakson 1998–2010 aikana Melko kestävästä jäkälälajeista sormipaisukarpeen ja keltatyvikarpeen yleisyydet pysyivät seurantajakson aikana melko samoina, mutta keltaröyhelö yleistyi ja ruskoröyhelö harvinaistui hieman. Melko herkistä jäkälälajeista harmaahankakarve harvinaistui hieman, mutta harmaa- ja tuhkatyvikarve sekä harmaaröyhelö puolestaan yleistyivät tutkimusvuosien välillä. Raidanisokarvetta esiintyi tutkimusrungoilla niin harvoin, että sen esiintymisestä on vaikea tehdä johtopäätöksiä. Ilman epäpuhtauksille herkkien loppujen ja naavojen esiintyminen tutkimusrungoilla väheni vuodesta 1998 vuoteen 2010 samalla tavalla. Ilman epäpuhtauksia hyvin kestävien lajien yleisyyden muutos vuosien 1998 ja 2010 välillä oli tilastollisesti merkitsevä. Samoin ilman epäpuhtauksille herkät lajit harvinaistuivat tutkimusalueella tilastollisesti merkitsevästi tutkimusvuosien välillä. Melko herkkien ja melko kestävien jäkälälajien yleisyydessä ei tutkimusvuosien välillä tapahtunut tilastollisesti merkitsevää muutosta (kuva 82).

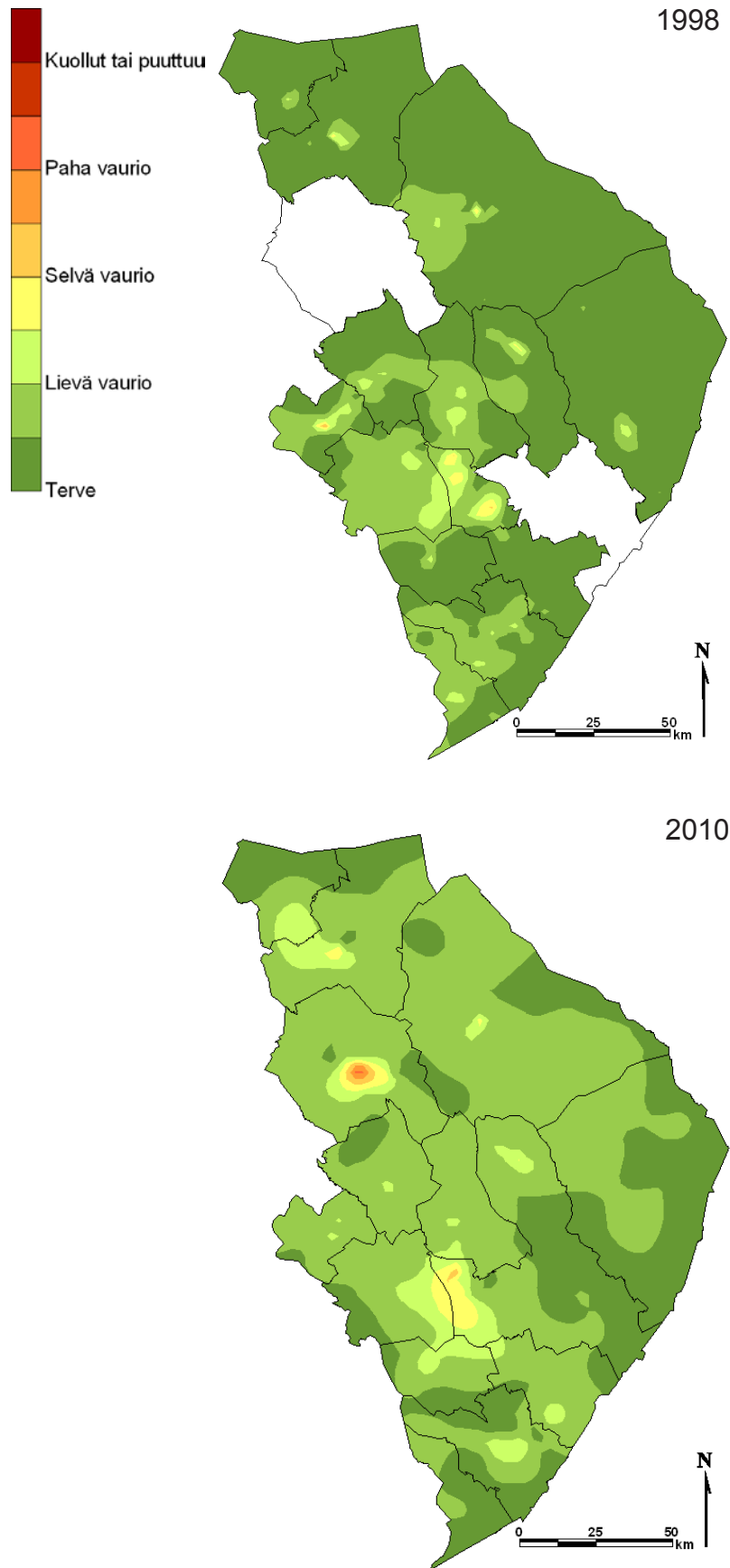


Kuva 82. Herkkien, melko herkkien, melko kestävien ja kestävien jäkälälajien keskimääräinen esiintyminen (esiintymisrunkojen lukumäärä) Pohjois-Karjalan samoilla havaintoaloilla vuosina 1998 ja 2010.

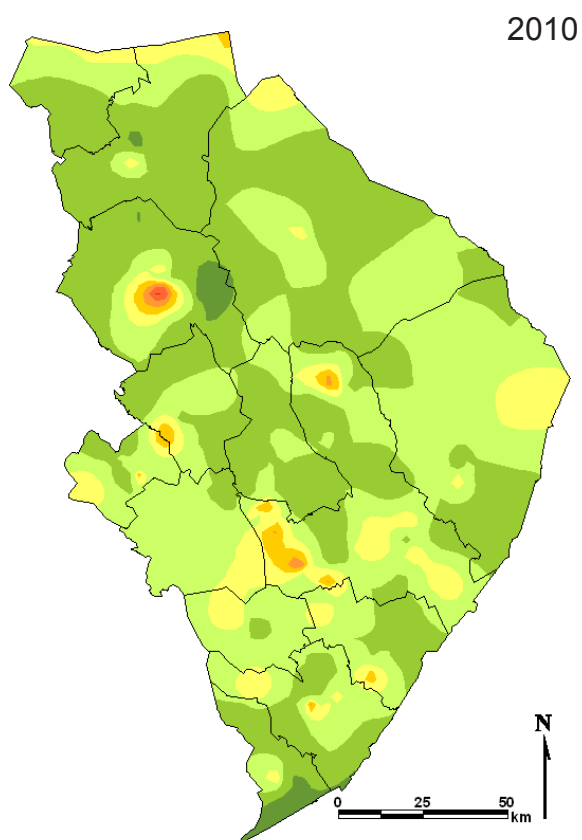
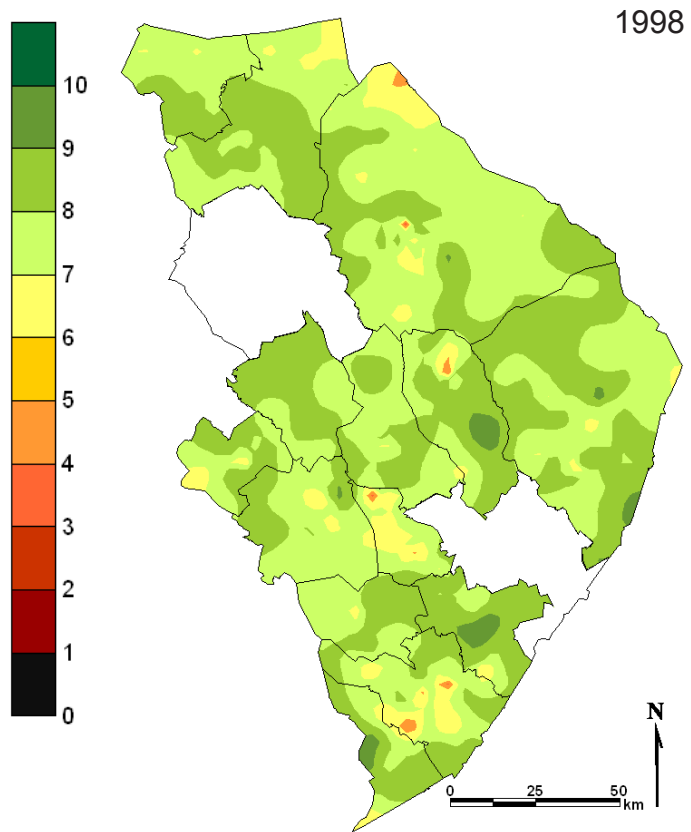
Sormipaisukarpeen suurimmat vauriot sijoittuivat molempina tutkimusvuosina Hammaslahden-Joensuun väliselle vyöhykkeelle. Molempina tutkimusvuosina Uimaharjuun ja Nurmeksen ja Lieksan keskusta-alueelle muodostui lievien vaurioiden vyöhyke. Vuonna 1998 Polvijärven ja Outokummun kuntien rajojen tuntumaan sijoittui pienialaisia lievien ja selvien vaurioiden vyöhykkeitä, joita ei vuonna 2010 alueella enää ollut. Vuonna 2010 Juukaan entisen turkistarhan läheisyyteen muodostui pahojen vaurioiden vyöhyke. Vuonna 1998 valtaosan tutkimusalueesta kattoi terveen sormipaisukarpeen vyöhyke, kun vuonna 2010 sormipaisukarve oli tutkimusalueella lievästi vaurioitunutta. (Kuva 83.)

Vuonna 1998 jäkälälajistoltaan köyhtyneitä alueita muodostui tutkimusalueen pohjoisrajalle, Uimaharjuun, Lieksan ja Joensuun keskusta-alueille ja Kiteelle Puhokseen ja kunnan etelärajalle. Vuoden 2010 lajistoltaan köyhtyneet alueet sijoittuivat osittain samoille alueille kuin vuonna 1998, mutta etenkin Joensuun keskusta-alueen ja Uimaharjun vyöhykkeet ulottuivat laajemmalle alueelle. Vuonna 2010 lajisto oli köyhtynyttä tai selvästi köyhtynyttä myös Juuan entisen turkistarhan ympäristössä, Polvijärven ja Outokummun kuntien rajalla sekä Hammaslahdessa. Vuonna 2010 jäkälälajistoltaan luonnontilaiset alueet painoutuivat tutkimusalueen pohjoisosiin, kun vuonna 1998 jäkälälajisto oli luonnontilaista kapealla Nurmeksesta pohjoisen Pielisen halki Polvijärvelle ja Liperiin ulottuvalla vyöhykkeellä, Lieksan ja Ilomantsin rajoilta Uimaharjun kautta Kontiolahteen ulottuvalla vyöhykkeellä sekä Rääkkylän ja Tohmajärven alueella. (Kuva 84.)

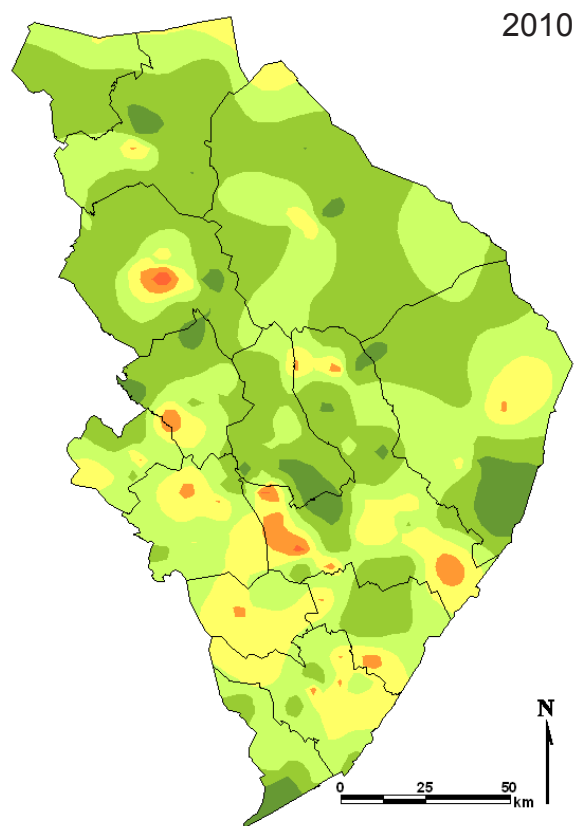
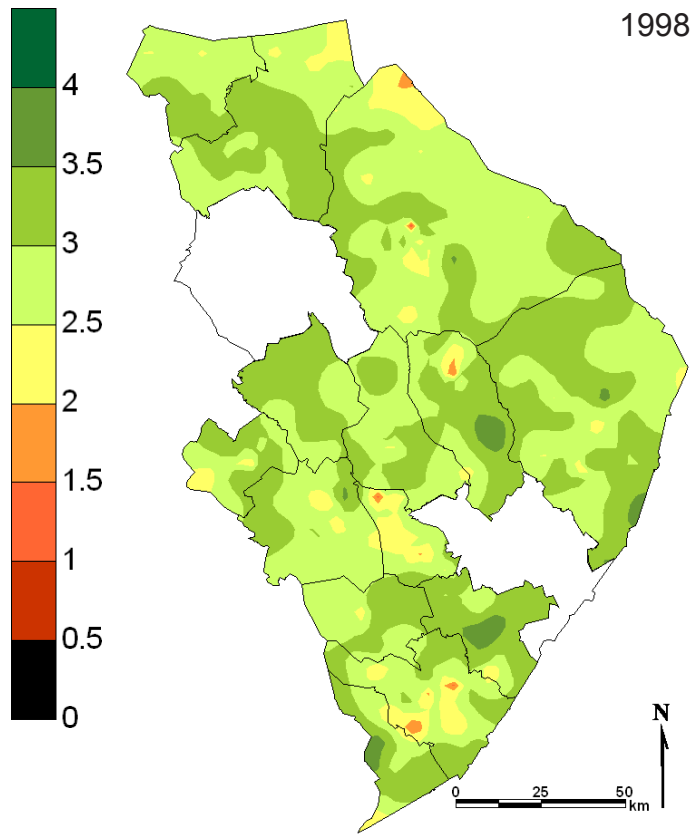
IAP-indeksin vaihtelu eri tutkimusvuosina oli hyvin samankaltaista kuin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän vaihtelu. IAP-indeksin perusteella lajistoltaan lievästi ja selvästi köyhtyneiden alueiden vyöhykkeet olivat hieman laajempia kuin ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärän perusteella muodostetut. IAP-indeksin perusteella muodostetut luonnontilaisen lajiston vyöhykkeet sijoittuivat pääosin samoille alueille kuin jäkälä-lajilukumäärän perusteella muodostetut. (Kuva 85.)



Kuva 83. Sormipaisukarpeen vaurioasteet tutkimusalueella vuosina 1998 ja 2010.



Kuva 84. Ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälälajien lukumäärät tutkimusalueella vyöhykkeittäin vuosina 1998 ja 2010.



Kuva 85. IAP-indeksin vyöhykkeet tutkimusalueella vuosina 1998 ja 2010.

6.1.2

Männyn neulasten rikki­pitoisuus

Taulukossa 32 verrataan tämän tutkimuksen tuloksia männyn neulasten rikki­pitoisuuden osalta vuoden 1998 tutkimuksen tuloksiin. Tulosten vertailukelpoisuutta heikentää se, että havaintoalat eivät ole täysin samat eri tutkimusvuosina.

Enocell Oy:n läheisyydessä neulasten keskimääräisessä rikki­pitoisuudessa ei tutkimusvuosien välillä ollut suurta eroa: keskimääräinen neulasten rikki­pitoisuus oli vuonna 2010 noin 5 % alhaisempi kuin vuonna 1998. Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun voimalaitoksen läheisyydessä neulasten rikki­pitoisuus oli vuonna 2010 noin 20 % korkeampi kuin vuonna 1998, mutta eroa selittää se, että vuoden 1998 havaintoala sijaitsi kauempana laitoksesta kuin vuoden 2010 havaintoalat. Männyn neulasten rikki­pitoisuudet olivat molempina tutkimusvuosina selvästi koholla tarkasteltujen laitosten lähistöllä verrattuna koko Pohjois-Karjalan keskiarvoon vuonna 1998.

Taulukko 32. Männyn neulasten keskimääräinen rikki­pitoisuus Uimaharjun Enocell Oy:n ja Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun voimalaitoksen läheisyydessä sekä koko Pohjois-Karjalassa vuosina 1998 ja 2010.

	Vuosi	n	S mg/kg
Enocell Oy	1998	5	1069
Enocell Oy	2010	3	1019
Fortum Joensuun voimalaitos	1998	1	931
Fortum Joensuun voimalaitos	2010	2	1110
Pohjois-Karjala	1998	101	888

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

Mäntyjen runkojäkälät

Taulukossa 33 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 keskimääräinen sormipaisukarpeen vaurioaste oli lähimpänä Pohjois-Karjalan tasoa. Keskimääräisen ilmanpuhtausindeksi oli Pohjois-Karjalassa selvästi vertailualueita korkeampi; Pohjois-Karjalan jäkälälajisto oli selvästi lähempänä luonnontilaista kuin esimerkiksi Länsi-Suomessa ja Turussa. Pohjois-Karjalassa havaittiin myös selvästi enemmän ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja runkoa kohti kuin muilla tutkimusalueilla. (Taulukko 33.)

Taulukko 33. Mäntyjen runkojäkälästä kuvaavia muuttujia Pohjois-Karjalan maakunnan alueen bioindikaattoritutkimuksessa 2010 sekä eri puolilla Suomea toteutetuissa tutkimuksissa. Tulokset lähteistä 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 vaurio	IAP	Lajilukumäärä / puu
Pohjois-Karjala	300	2010	1,9	2,7	6,0
Uusimaa	776	2009	2,1	2,0	4,7
Pyhäjärviseu­tu	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	

Taulukossa 34 on vertailtu tutkimusalueen kuntia keskenään sormipaisukarpeen vaurioasteen, lajilukumäärän sekä IAP-indeksin osalta. Tutkimusalueen jäkälälajistoltaan luonnontilaisimmat kunnat olivat Kesälahti, Kontiolahti ja Valtimo. Jäkälälajisto oli köyhtyneintä Joensuussa, Kiteellä ja Rääkkylässä, mutta näissäkin kunnissa jäkälälajisto oli vain lievästi köyhtynyttä. Juuan kunnan alueella sijaitsevat sekä vähiten että eniten ilman epäpuhtauksista kärsiviä jäkälälajeja sisältäneet alat. Sormipaisukarve oli vaurioituneinta Joensuun, Juuan ja Nurmeksen kuntien alueella, mutta näissäkin kunnissa sormipaisukarpeen vauriot olivat keskimäärin vain lieviä. Sormipaisukarve oli terveintä Ilomantsin ja Kesälahden kunnissa. (Taulukko 34.)

Taulukko 34. Sormipaisukarpeen vaurioasteen, lajilukumäärän ja ilmanpuhtausindeksin keskiarvot sekä pienimmät ja suurimmat arvot Pohjois-Karjalan tutkimuskunnissa sekä koko tutkimusalueella vuonna 2010.

	Ilmanpuhtausindeksi			Lajilukumäärä			Sormipaisukarpeen vaurioaste		
	Keskiarvo	Pienin	Suurin	Keskiarvo	Pienin	Suurin	Keskiarvo	Pienin	Suurin
Ilomantsi	2,8	1,5	3,7	7,5	4,0	9,0	1,6	1,1	2,1
Joensuu	2,4	0,9	3,8	6,7	3,0	9,0	2,2	1,0	3,8
Juuka	2,8	0,5	3,7	7,5	1,0	10,0	2,0	1,1	5,0
Kesälahti	3,1	2,4	3,9	8,5	6,0	10,0	1,4	1,1	1,7
Kitee	2,5	1,2	3,4	7,4	4,0	9,0	1,7	1,2	2,7
Kontiolahti	3,2	2,4	3,8	8,1	7,0	9,0	1,9	1,6	2,2
Lieksa	2,8	1,9	3,6	7,8	6,0	9,0	1,8	1,3	2,9
Liperi	2,7	1,8	3,4	7,7	7,0	9,0	1,8	1,3	2,1
Nurmes	2,9	1,4	3,6	7,9	4,0	9,0	2,0	1,2	3,5
Outokumpu	2,8	1,3	3,6	7,6	4,0	9,0	1,8	1,3	2,3
Polvijärvi	2,8	1,4	3,7	7,8	5,0	9,0	1,8	1,4	2,5
Rääkkylä	2,3	1,9	2,7	7,5	6,0	8,0	1,8	1,4	2,6
Tohmajärvi	2,8	1,4	3,5	7,6	5,0	9,0	1,7	1,2	2,2
Valtimo	3,2	2,5	3,5	8,2	7,0	9,0	1,8	1,2	2,5
Koko tutkimusalue	2,7	7,4	1,9						

6.2.2

Sammalten alkuainepitoisuudet

Taulukossa 35 on verrattu tutkimuksessa mitattuja Pohjois-Karjalan sammalen alkuainepitoisuuksia muualla Suomessa tehtyjen tutkimusten tuloksiin. Valtakunnallista tasoa vertailussa kuvaavat Metlan koko Suomea koskevat tulokset, jotka on saatu valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koealaverkostolta.

Sammalen alkuainepitoisuudet Pohjois-Karjalassa olivat valtakunnallista tasoa korkeammat arseenin, kromin, kuparin, nikkelin, raudan, sinkin ja vanadiinin osalta. Sammalen kadmiumpitoisuudet olivat Pohjois-Karjalassa samalla tasolla ja sammalen lyijypitoisuudet alhaisemmalla tasolla kuin koko Suomessa keskimäärin. Tässä tutkimuksessa määritetyt sammalen kadmium-, kromi-, kupari-, nikkeli-, rauta-, rikki-, sinkki- ja vanadiinipitoisuudet olivat lisäksi korkeampia kuin Metlan Pohjois-Karjalan havaintoaloilta määrittämät vastaavat alkuainepitoisuudet. Erot pitoisuuksissa johtunevat siitä, että tässä tutkimuksessa sammalalat osittain painottuivat merkittävimpien päästölähteiden läheisyyteen, kun taas Metlan havaintoalat painottuivat kartoitusten luonteesta ja säännöllisestä havaintoverkosta johtuen ns. tausta-alueille.

Sammalen arseeni-, fosfori, kadmium-, kupari-, lyijy-, rikki-, sinkki- ja vanadiinipitoisuudet olivat Pohjois-Karjalassa pääasiassa pienempiä kuin vertailualueilla. Sammalen keskimääräiset kromi- ja nikkelpitoisuudet olivat Pohjois-Karjalassa kuitenkin korkeampia kuin vertailualueilla lukuun ottamatta Pori-Harjavallan aluetta. Pohjois-Karjalassa sammalen rautapitoisuudet olivat suurempia kuin useilla muilla vertailualueilla, mutta pienempiä kuin Pori-Harjavallan ja Seinäjoen alueilla. Vertailualueita suurempia kromi- ja nikkelpitoisuuksia selittää Pohjois-Karjalan ja etenkin Outokummun ja Polvijärven alueen kaivosteollisuus (Taulukko 35.)

Taulukko 35. Sammalten alkuainepitoisuuksia eri puolilla Suomea tehdyissä tutkimuksissa. Tulokset lähteistä 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.

Alue	n	Tutkimusvuosi	As mg/kg	P mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Pb mg/kg
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
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

7. Johtopäätökset

Pohjois-Karjalan ilmanlaatua on selvitetty 1980- ja 1990-luvuilla useissa ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa. Vuonna 1998 ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus toteutettiin koko maakunnan laajuudessa, ja vuoden 2010 tutkimus on jatkoa tälle aikaisemmalle tutkimukselle. Tutkimuksessa ilman epäpuhtauksien ilmentäjinä käytettiin mäntyjen epifyyttijäkälää, sammalten alkuainepitoisuuksia ja neulasten rikkipitoisuutta. 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 päästömäärät ovat laskeneet selvästi 1980- ja 1990-luvuilta 2000-luvulle tultaessa, mutta 2000-luvulla etenkin rikkidioksidien ja hiukkasten päästökehitys on ollut aaltomaista, ja päästömääriin ovat vaikuttaneet lähinnä tuotannon intensiteetti sekä energiankulutus. Liikenteen osalta rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästömäärät ovat tarkasteluajanjaksolla vähentyneet selvästi. Myös ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ovat pääasiassa laskeneet 2000-luvulle tultaessa verrattuna 1980- ja 1990-lukuihin. Tutkimusalueen päästömääriltään suurimmat lupavelvolliset rikkidioksidin ja typen oksidien pistemäiset päästölähteet sijaitsivat Joensuussa ja Lieksassa. Suurimmat hiukkasten päästölähteet sijaitsivat Kiteellä, Tohmajärvellä, Joensuussa ja Nurmeksessa. Lupavelvollisia laitoksia tutkimusalueella on paljon etenkin Joensuun ja Lieksan keskustaajamien tuntumassa, Kiteen Puhoksen teollisuusalueella ja Uimaharjussa. Vähiten päästöjä tutkimusalueella syntyi Kesälahdella, Rääkkylässä ja Valtimolla. Alueen vilkkaimmin liikennöidyt tiet ovat valtatie 6, 9 ja 23.

Vuonna 2010 sormipaisukarpeen vauriot olivat tutkimusalueella keskimäärin lieviä. Terveintä sormipaisukarvetta kasvoi Kesälahdella, Kiteellä, Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa ja Kiihtelysvaarassa, Ilomantsissa sekä Valtimon ja Nurmeksen pohjoisosissa. Vaurioituneinta sormipaisukarve oli Joensuun keskustaajamasta Hammaslahteen ulottuvalla vyöhykkeellä, Juuan kunnan keskiosassa ja Nurmeksen keskustaajamasta Valtimon kunnan eteläosaan ulottuvalla vyöhykkeellä. Sekä ilmanpuhtausindeksin että ilman epäpuhtauksista kärsivien jäkälän lajilukumäärän suhteen jäkälälajisto oli tutkimusalueella keskimäärin lievästi vaurioitunutta, mutta suurimmalla osalla havaintoaloista jäkälälajisto oli luonnontilaista. Tutkimusalueen pohjoisosissa jäkälälajisto oli laajalti luonnontilaista ja etelä- ja keskiosassa lievästi köyhtynyttä. Monipuolisin ja luonnontilaisin jäkäläläyhteisö tutkimusalueella oli Kesälahden, Kontiolahden ja Valtimon kuntien alueella ja köyhtynein puolestaan Joensuun, Kiteen ja Rääkkylän alueella. Keski-Karjalassa on melko paljon viljelysmaata, ja maanviljeilyn päästöt ovat voineet paikallisesti vaikuttaa Rääkkylän jäkälälajistoon. Paikallisesti köyhtyneimmän jäkälälajiston alat tutkimusalueella sijaitsivat Joensuun keskustan tuntumassa, Pyhäselässä, Juuassa entisen turkistarhan läheisyydessä, Tuupovaaran Öllölän alueella Polvijärven lounaisrajalla ja Uimaharjussa. Öllölän alueen havaintoalat soveltuivat jäkäläkartoitukseen vain kohtalaisesti, mikä voi selittää Öllölän alueen köyhtynyttä jäkälälajistoa. Ilman epäpuhtauksille herkät lajit, kuten naavat ja lupot sekä harmaaröyhelö, olivat yleisimpiä tutkimusalueen pohjoisosassa ja esiintyivät harvemmin tutkimusalueen eteläosassa. Levä oli tutkimusalueella yleisintä päästölähteiden läheisyydessä. 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.

Neulasten rikkipitoisuuksia määritettiin viideltä havaintoalalta tutkimusalueen suurimpien päästölähteiden läheisyydessä. Rikkipitoisuudet olivat laitosten läheisyydessä jonkin verran normaalia pitoisuutta korkeammalla tasolla. Korkeimmat pitoisuudet havaittiin laitosten lähimmiltä aloilta, mutta kauempana laitoksista pitoisuudet olivat pienempiä. Neulasten rikkipitoisuuksissa ei ollut tapahtunut merkittävää muutosta vuoden 1998 tutkimukseen verrattuna, kun otetaan huomioon neulashavaintoalojen toisistaan poikkeava sijoittelu eri tutkimusvuosina. Korkeimmat sammalten alkuainepitoisuudet tutkimusalueella määritettiin pistemäisten päästölähteiden läheisyydestä. Alkuainepitoisuuksien voimakkaat korrelaatiot antoivat hyvän lähtökohdan pääkomponenttianalyysi-

sille, jolla tiivistettiin sammalten alkuainepitoisuuksien sisältämää vaihtelua tutkimusalueella. 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 keskimääräiset alkuainepitoisuudet olivat joidenkin alkuaineiden osalta korkeampia kuin Metlan valtakunnallisessa tai Metlan Pohjois-Karjalaa koskevassa tutkimuksissa havaitut sammalten alkuainepitoisuudet. Erot tuloksissa voivat johtua siitä, että tämän tutkimuksen sammalhavaintoaloja sijaitti paljon myös päästölähteiden ympäristössä, kun taas Metlan koealat sijaitsevat kartoitusten luonteesta ja säännöllisestä sijainnista johtuen pääosin ns. tausta-alueilla. Sammalten alkuainepitoisuudet olivat Pohjois-Karjalan maakunnan alueella kuitenkin pääosin pienempiä kuin muualla Suomessa tehdyissä alueellisissa ilmanlaadun bioindikaattoritutkimuksissa. Vertailualueita suurempia kromi- ja nikkelpitoisuuksia selittää Pohjois-Karjalalle ominainen kaivosteollisuus etenkin Outokummussa ja Polvijärvellä. Tulosten perusteella sammalten raskasmetallipitoisuudet Pohjois-Karjalassa edustavat suhteellisen puhtaan tausta-alueen pitoisuuksia. Keskimääräistä korkeampia raskasmetallipitoisuuksia todettiin paikallisten päästölähteiden kuten teollisuuslaitosten, avolouhosten ja asutuksen läheisyydessä.

Metlan metsien terveydentilaa koskevien tulosten mukaan männyn keskimääräinen harsuuntuminen vuosina 1985-2010 oli Pohjois-Karjalassa 9,4 % ja kuusen 13,4 %. Vastaavat luvut maan eteläosassa olivat männyn osalta 10,6 % ja kuusen osalta 20,0 %. Kuusen harsuuntuminen oli Pohjois-Karjalassa tilastollisesti merkitsevästi vähäisempää kuin muualla maan eteläosassa. Männyn harsuuntuminen ei poikennut muun Etelä-Suomen arvoista. Erilaiset tuhot ja puiden ikä selittävät suuren osan havupuiden harsuuntumisen vaihtelusta.

Tulosten tilastollinen tarkastelu osoitti, että etäisyys lähimmästä päästölähteestä vaikutti tarkasteltuihin jäkälämuuttujiin. Parhaiten ilman epäpuhtauksien vaikutuksia osoitti sormipaisukarpeen vaurioaste. Tutkittujen muuttujien välillä havaittiin merkitseviä korrelaatioita, mikä kertoo siitä, että muuttujien vasteet vaihtelua aiheuttaviin tekijöihin kuten ilman epäpuhtauksiin ovat samankaltaisia. Liikenteen vaikutusta tutkittuihin muuttujiin ei tilastollisten testien yhteydessä ole otettu huomioon, mutta liikenteen päästöillä voi olla 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 jäkälälajiin, mutta tätä vaikutusta voidaan vakioida sijoittamalla havaintoalat indikaattorilajien kannalta soveltuvimpiin metsiköihin.

Jäkäläkartoituksen tuloksia vertailtiin vuosien 1998 ja 2010 välillä. Jäkälälajisto oli keskimäärin yhtä runsasta ja monipuolista molempina tutkimusvuosina, mutta keskimääräiset sormipaisukarpeen vauriot olivat kasvaneet hieman vuodesta 1998 vuoteen 2010. Levä oli yleistynyt ja sormipaisukarpeen ja luppojen peittävyys olivat pienentyneet selvästi tutkimusalueella tutkimusvuosien välillä. Sormipaisukarpeen lievät vauriot lisääntyivät ja terveet sormipaisukarpeet vähentyivät hieman tutkimusvuosien välillä. Myös lievästi köyhtyneiden ja luonnontilaisen jäkälälajiston omaavien alojen määrä vähentyi ja köyhtyneiden alojen määrä kasvoi hieman vuodesta 1998 vuoteen 2010. Kestävät lajit yleistyivät ja lupot puolestaan harvinaistuivat tutkimusalueella tutkimusvuosien välillä. Muutokset jäkälämuuttujissa vuosien välillä olivat kuitenkin kokonaisuudessaan pieniä. Enemmän tietoa muutosten suunnasta saadaan, kun tarkastellaan muutoksia vuosien 1998 ja 2010 välillä alueellisesti. Molempina vuosina valtaosan tutkimusalueesta kattoi terveen sormipaisukarpeen vyöhyke, ja sormipaisukarpeen suurimmat vauriot sijoittuivat molempina tutkimusvuosina Hammaslahden-Joensuun väliselle vyöhykkeelle, Uimaharjuun ja Nurmeksen ja Lieksan keskusta-alueille. Molempina tutkimusvuosina valtaosa tutkimusalueesta oli lajistoltaan lievästi köyhtynyt. Myös jäkälälajistoltaan köyhtyneimmät alueet sijoittuivat molempina tutkimusvuosina pääosin samoille seuduille, eli tutkimusalueen pohjoisrajalle, Uimaharjuun, Lieksan ja Joensuun keskusta-alueille ja Kiteen kaupungin alueelle, mutta vuonna 2010 köyhtyneimmän lajiston alueet olivat hieman laajempia. Vuonna 2010 myös Juuan keskiosiin muodostui pahojen vaurioiden ja selvästi köyhtyneen lajiston vyöhyke. Lajisto oli köyhtynyt vuonna 2010 myös Polvijärven kunnan koillisrajalla.

Kaiken kaikkiaan joissain ilmanlaatua kuvaavissa 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 1998 ja 2010 välillä. Vaikka päästömäärät ovat pienentyneet tutkimusvuosien välillä, on etenkin rikkidioksidin päästöissä havaittavissa lievää

kasvusuuntaus 2000-luvun loppupuolella. Jäkälät reagoivat herkästi juuri ympäristön tilan muutokseen. Päästömäärien lievä kasvu 2000-luvun loppuvuosina on todennäköisesti vaikuttanut jäkäliin ja vaikutus näkyi vielä tässä tutkimuksessa, vaikka päästömäärät olivatkin pienempiä kuin 1990-luvulla. Hajapäästöjä aiheuttavan toiminnan (esim. kaivostoiminta, turvetuotanto ja maatalous) lisääntyminen tutkimusalueella voi myös osittain selittää tutkimusvuosien välisiä lieviä muutoksia jäkälälajistossa ja jäkälien kunnossa tausta-alueilla. Myös muutokset päästölähteiden toiminnassa voivat selittää vuosien välisiä lieviä paikallisia muutoksia jäkälälajistossa ja jäkälien kunnossa. Esimerkiksi Polvijärven ja Outokummun kuntien rajan tuntumaan on Vuonoksen jatkojalostuslaitoksen lisäksi tullut lisää toimintoja, kun Horsmanahon ja Pehmytkiven kaivos aloitti toimintansa 2000-luvun loppupuolella. Juuan kunnan alueella jo toimintansa lopettaneen turkistarhan päästöt ovat vaikuttaneet selvästi läheisen havaintoalan jäkäliin ja vaikutus näkyi vielä tässä tutkimuksessakin. Bioindikaattoritutkimusten melko pitkä aikaväli (12 vuotta) vaikeuttaa selkeiden johtopäätösten vetämistä Pohjois-Karjalan ilmanlaadun muutoksista, sillä ilmanlaadun muutokset ja jäkälissä nähtävät muutokset ovat voineet olla tätä ajanjaksoa lyhytaikaisempia.

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.



Lähteet

- Aho, J. 2010. Lupavelvollisten laitosten sijainti Pohjois-Karjalassa vuonna 2010. Pohjois-Karjalan ELY-keskus. Kirjallinen tiedonanto 3/2010.
- Anttonen, T. 1990. Laskeuman ravinteiden vaikutus sormipaisukarvejäkälän (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.) kasvuun. Kuopion yliopisto, ekologisen ympäristöhygienian laitos. Opinnäytetutkielma.
- Berg, T., Royset, O., Steinnes, E. & Vadset, M. 1995a. Atmospheric trace element deposition: principal component of ICP-MS data from moss samples. *Environmental Pollution* 88: 67-77.
- 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.
- Brække, F. 1994. Diagnostiske grenseverdier for næringselementer i gran-og furunåler. *Aktuelt fra skog-forsk* 15/94. 11 s.
- Gladstonefamily 2011. Joensuun lentoaseman tuulitiedot vuodelta 2010. <http://weather.gladstonefamily.net/site/EFJO>. [viitattu 1/2011].
- 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 951-40-1270-4.
- Helmisaari, H-S. 1993. Metsikön ja puun ravinnekierto. Teoksessa Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkela, H. ja Nieminen, T. (toim.). *Metsäluonto ja ilmansaasteet*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446. Gummerus, Jyväskylä. S. 44-48.
- Helmisaari, H-S. 1998. Metsäekosysteemin toiminta ympäristömuutoksen ilmentäjänä. Teoksessa Mälkönen, E. (toim.). *Ympäristömuutos ja metsien kunto*. Metsien terveydentilan tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 691.
- Huttunen, S. 1982. Some experience on standardized monitoring of urban pollution in forest ecosystems. Teoksessa Steubing, L. ja Jäger, H.-J. (toim.). *Monitoring of air pollutants by plants*. Junk publisher, The Hague. S. 155-161.
- Huuskonen, I., Lehtonen, E. & Ellonen, E. 2009. Pyhäjärvisuon 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.
- Hyttinen, T. 2011. Liikennemäärätietoja Pohjois-Karjalan alueelta vuosina 1998 ja 2010. Kirjallinen tiedonanto 4/2011.
- ICP Vegetation 2009. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. United Nation Economic Commission for Europe (UNECE).
- Jussila, I., Joensuu, E. & Laiho, P. 1999. Ilman laadun bioindikaattorisuranta metsäympäristössä. Ympäristöopas 59. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto. Edita, Helsinki.
- Jussila, I. 1997. Porin-Harjavalan alueen ja Pohjois-Satakunnan alueen ilman laadun seuranta bioindikaattorien avulla vuosina 1996-1997. Turun yliopisto, Satakunnan ympäristöntutkimuskeskus. Sykesarja B 12.
- 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.
- Kuusinen, K., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E.-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960s to 1980s in Finland. Teoksessa Kauppi, P., Anttila, P. ja Kenttämies, K. (toim.). *Acidification in Finland*. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-52213-1. S. 397-420.
- Laita, M., Huuskonen, I., 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. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 164. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T., Lehtonen, E., & Ellonen, T. 2008b. Länsi-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T. & Lehtonen, E. 2008c. Kookolan seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 169. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T. & Lehtonen, E. 2008d. Kookolan seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 167. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- Laita, M., Huuskonen, I., Keskitalo, T. & Lehtonen, E. 2008e. Seinäjoen seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 165. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus.
- 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-Saira, E. & Hokkanen, T. 1990. Bioindikaattoritutkimukset Lieksassa 1990. Joensuun yliopisto. Biologian laitos 1990.
- Lehtonen-Saira, E. & Hokkanen, T. 1991a. Bioindikaattoritutkimukset Kontiolahdella 1990-1991. Joensuun yliopisto. Biologian laitos 1991.

- Lehtonen-Saira, E. & Hokkanen, T. 1991b. Ilmanlaatuselvitys bioindikaatiomenetelmin Enossa. Joensuun yliopisto. Biologian laitos 1991.
- Lehtonen-Saira, E. & Hokkanen, T. 1992a. Bioindikaattoritutkimukset Outokummussa 1992. Joensuun yliopisto. Biologian laitos 1992.
- Lehtonen-Saira, E. & Hokkanen, T. 1992b. Pohjois-Karjalan läänin tausta-alueiden bioindikaattoritutkimukset 1991-1992. Joensuun yliopisto. Biologian laitos 1992.
- LIISA-laskentajärjestelmä 2009. <http://lipasto.vtt.fi/liisa/kunnat2.htm>. [Tiedot tallennettu 1/2011].
- Lodenius, M., Manninen, S., Nieminen, T., Raikinen, H., Ranta, P. & Willamo, R. 2002. Bioindikaattorit. Ympäristönsuojelun opetusmonisteita N:o 21. Helsingin yliopisto, Limnologian ja ympäristönsuojelun laitos. ISSN 1456-8284.
- Mälkönen, E. 1991. Maa- ja neulasanalyysin käyttökelpoisuus metsänhoitotoimenpiteiden suunnittelussa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 381. Joensuun tutkimusasema. 52-61.
- Nevalainen, S. 2011. Metsien terveydentilan seurannan tuloksia Pohjois-Karjalassa, verrattuna koko maan tuloksiin. Metsäntutkimuslaitos, Muhos.
- Nieminen, T., Raitio, H. & Salemaa, M. 1993. Neulasten kemiallinen koostumus elinvoimatunnuksena. Teoksessa Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkilä, H. ja Nieminen, T. (toim.). Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446, Helsinki. Gummerus, Jyväskylä. S. 92-96.
- Niskanen, I. 1995. Pääkaupunkiseudun metsien bioindikaattoriseuranta vuonna 1994. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV), Helsinki. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1995:11. ISSN 0357-5454.
- Niskanen, I., Veijola, H. & Ellonen, T. 1996. Pääkaupunkiseudun ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 1996. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996: 17.
- Niskanen, I., Ellonen, T., Nousiainen, O., Veijola, H. & Miettinen, M. 1999. Pohjois-Karjalan bioindikaattoritutkimus vuosina 1998-1999. Pohjois-Karjalan ympäristökeskus, Joensuu. Alueelliset ympäristöjulkaisut 146. ISBN 952-11-0642-5.
- Niskanen, I., Ellonen, T. & Nousiainen, O. 2001. Uudenmaan ja Itä-Uudenmaan maakuntien alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2000 ja 2001. Uudenmaan ympäristökeskus, Helsinki. Alueelliset ympäristöjulkaisut 238. ISBN 952-11-0999-8.
- Niskanen, I., Polojärvi, K., Witick, A., Haahla, A. & Laitakari, V. 2003a. Kokkolan seudun ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuonna 2002. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 156. Jyväskylän yliopisto. ISBN 951-39-1583-2.
- Niskanen, I., Polojärvi, K., Haahla, A. & Laitakari, V. 2003b. Kotkan kaupungin ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2002. Ympäristöntutkimuskeskuksen tiedonantoja 155. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. ISBN 951-39-1438-0.
- Paavo Ristola Oy 1988. Kiteen kunta. Bioindikaattoritutkimukset 1989.
- Paavo Ristola Oy 1989. Liperin kunta. Ympäristönsuojelulautakunta. Bioindikaattoritutkimukset 1989.
- Partanen, P. ja Veijola, H. 1996. Bioindikaattoriseurannan tilastollinen arviointi. YTV, Helsinki. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1996:18. ISSN 0357-5454.
- Pohjois-Karjalan ympäristökeskus 2009. Pohjois-Karjalan ympäristön tila 2008. Saatavilla osoitteesta: www.ymparisto.fi/pka/ymparistontila2008/
- Poikolainen, J. 2004. Mosses, epiphytic lichens and tree bark biomonitors for air pollutants – specifically for heavy metals in regional surveys (väitöskirja). Acta Universitatis Ouluensis. Series A, Scientiae rerum naturalium A 421. 69 s. + 5 osajulk.
- Poikolainen, J., Kubin, E., Piispanen, J. & Karhu, J. 2004. Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators. The Science of the Total Environment 318: 171-185.
- Poikolainen, J., Piispanen, J., Karhu, J. & Kubin, E. 2009. Long-term changes in nitrogen deposition in Finland (1990-2006) monitored using the moss *Hylocomium splendens*. Environmental Pollution 157(11): 3091-3097.
- Poikolainen, J., Karhu, J. & Piispanen, J. 2011. Sammalten raskasmetalli-, rikki- ja typpipitoisuuksista Pohjois-Karjalassa vuosina 1985-2010. Metsäntutkimuslaitos, Joensuu.
- Polojärvi, K., Niskanen, I., Haahla, A. & Ellonen, T. 2005a. Mittaustarkkuus mäntyjen runkojäkälistön ja sormipaisukarpeen (*Hypogymnia physodes*) vaurioiden havainnoinnissa. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. Tutkimusraportti 89/2005.
- Polojärvi, K., Niskanen, I., Haahla, A. & Ellonen, T. 2005b. Mittaustarkkuus männyn neulasten rikki- ja typpipitoisuuksien kartoittamisessa. Jyväskylän yliopisto, ympäristöntutkimuskeskus. Tutkimusraportti 64/2005.
- Raitio, H. 1994. Kangasmetsien ravinnetila neulasanalyysin valossa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 527. 25-34.
- Raitio, H. & Merilä, P. 1998. Seasonal variation in the size and composition of Scots pine and Norway spruce needles in different weather conditions. European programme for the intensive monitoring of forest ecosystems / Level II, Finland. Pilot study, technical report. The Finnish forest research institute, Parkano.
- Ranta, E., Rita, H. ja Kouki, J. 1989. Biometria. Helsinki, Yliopistopaino, 569 s. ISBN 951-570-032-9.
- Reinikainen, A., Veijalainen, H. & Nousiainen, H. 1998. Puiden ravinnepuutokset – metsänkasvattajan ravinneopas. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 688.
- Rinne, R. & Mäkinen, A. 1988. Regional and species variation in metal content of two woodland mosses *Pleurozium schreberi* and *Hylocomium splendens* in Finland and northern Norway. *Silva Fennica* 22 (1): 89-97.
- Rühling, Å. & Tyler, G. 1970. Sorption and retention of heavy metals in the woodland moss *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. et Sch. *Oikos* 21(1):92-97.
- Rühling, Å., Rasmussen, L., Pilegaard, K., Mäkinen, A. ja Steinnes, E. (1987). Survey of atmospheric heavy metal deposition in the Nordic countries in 1985 – monitored by moss analyses. *Nord* 1987:21. Göteborg.

- Salmi, T. 2011a. Ilomantsin ja Kuusamon tausta-asemien pitoisuustietoja. Ilmatieteen laitos. Kirjallinen tiedonanto 03/2011.
- Salmi, T. 2011b. Liekan Hietajärven tausta-aseman laskeumatietoja. Ilmatieteen laitos. Kirjallinen tiedonanto 04/2011.
- SFS 5669. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Havupuiden neulasten kokonaisrikkipitoisuus. Näytteenotto, esikäsittely ja tulosten esittäminen. (1990). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.
- SFS 5670. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Jäkäläkartoitus. 1990. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.
- SFS 5671. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Sammalten kemiallinen analyysi. Näytteenotto, esikäsittely ja tulosten esittäminen. (1990). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.
- SFS 5781. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Havupuiden neulasten rikkipitoisuuden määrittäminen ICP-emissiometrillä. (1994). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.
- Suomen ympäristökeskus (2006). Raskasmetallit. <http://www.ymparisto.fi>. [viitattu 03/2011].
- Ympäristöhallinnon Hertta-tietojärjestelmä 2011. Tiedot poimittu 3/2011.
- Ympäristöhallinnon Vahti-tietojärjestelmä 2011. Tiedot poimittu 3/2011.
- Veijola, H. & I. Niskanen 1998. Sammaleesta ja humuksesta tutkittavien muuttujien mittaustarkkuuden arviointi. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV), Helsinki. Muistio 1/1998.

KUVAILEHTI

Julkaisusarjan nimi ja numero Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja 2/2010				
Vastuualue Ympäristö ja luonnonvarat				
Tekijät Emmi Lehtonen, Irene Huuskonen, Toni Keskitalo, Jar- mo Poikolainen, Seppo Nevalainen ja Mika Laita		Julkaisuaika Kesäkuu 2011		
		Julkaisija Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus		
		Hankkeen rahoittaja/toimeksiantaja Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus		
Julkaisun nimi Pohjois-Karjalan maakunnan ilmanlaadun bioindikaattoriseuranta vuonna 2010				
Tiivistelmä Ilmanlaatua on seurattu Pohjois-Karjalan alueen kunnissa 1980-luvulta lähtien käyttäen ilmentäjinä havupuita ja niiden rungoilla kasvavia jäkäläiä. Vuonna 1998 seuranta toteutettiin ensimmäisen kerran koko maakunnan laajuisena. Vuonna 2010 ilmanlaatua arvioitiin männyn epifyyttijäkälien esiintymisen ja kunnan sekä sammalten ja neulasten alkuainepitoisuuksien perusteella koko Pohjois-Karjalan maakunnan alueella. Tutkimusalueen päästömäärät ovat laskeneet selvästi 1980- ja 1990-luvuilta 2000-luvulle tultaessa, mutta 2000-luvulla etenkin rikkidioksidien ja hiukkasten päästökehitys on ollut aaltomaista. Myös liikenteen rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkasten päästöt ovat vähentyneet selvästi tarkasteluajanjaksolla. Ilmasta mitattujen epäpuhtauksien pitoisuudet ovat pääasiassa laskeneet 2000-luvulle tultaessa verrattuna 1980- ja 1990-lukuihin. Tutkimusalueen suurimmat päästölähteet sijaitsevat Joensuussa, Lieksassa ja Kiteellä. 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. Terveintä sormipaisukarvetta tutkimusalueella kasvoi Kesälähdellä, paikoin Kiteellä, Joensuun kaupungin alueella Tuupovaarassa ja Kiihtelysvaarassa, Ilomantsissa sekä Valtimon ja Nurmeksen pohjoisosissa. Vaurioituneinta sormipaisukarve oli Joensuun keskustaajamasta Hammaslahteen ulottuvalla vyöhykkeellä, Juuan kunnan keskiosassa ja Nurmeksen keskustaajamasta Valtimon kunnan eteläosaan ulottuvalla vyöhykkeellä. Tutkimusalueen pohjoisosissa jäkälälajisto oli laajalti luonnontilaista ja etelä- ja keskiosassa lievästi köyhtynyttä. Monipuolisin ja luonnontilaisin jäkäläyhteisö tutkimusalueella oli Kesälähdän, Kontiolähdän ja Valtimon kuntien alueella ja köyhtynein puolestaan Joensuun, Kiteen ja Rääkkylän alueella. 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. Kuusen harsuuntuminen oli Pohjois-Karjalassa tilastollisesti merkitsevästi vähäisempää kuin muualla maan eteläosissa. Männyn harsuuntuminen ei poikennut muun Etelä-Suomen arvoista. Erilaiset tuhot ja puiden ikä selittävät suuren osan havupuiden harsuuntumisen vaihtelusta. Neulasten rikkipitoisuuksissa ei ollut tapahtunut merkittävää muutosta tutkimusalueen merkittävimpien päästölähteiden läheisyydessä vuoden 1998 tutkimukseen verrattuna, kun otetaan huomioon neulashavaintoalojen toisistaan poikkeava sijoittelu eri tutkimusvuosina. Verrattuna vuonna 1998 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 sijoituivat pääosin samoille alueille molempina tutkimusvuosina eli Joensuun-Hammaslahden väliselle alueelle, Uimaharjuun, Kiteelle ja Nurmeksen ja Lieksan keskusta-alueille, mutta vuonna 2010 köyhtyneimmän lajiston vyöhykkeet olivat hieman laajempia. Päästö määrärien lievä kasvu 2000-luvun loppuvuosina on todennäköisesti vaikuttanut jäkäläin ja vaikutus näkyi vielä tässä tutkimuksessa, vaikka päästö määrät ovatkin 2000-luvulla olleet pienempiä kuin 1990-luvulla. Hajapäästöjä aiheuttavan toiminnan (esim. kaivostoiminta, turvetuotanto ja maatalous) lisääntyminen tutkimusalueella voi myös osittain selittää tutkimusvuosien välisiä lieviä muutoksia jäkälälajistossa ja jäkälän kunnossa tausta-alueilla.				
Asiasanat bioindikaattorit, jäkälät, ilmanlaatu, ympäristön tila, seuranta, Pohjois-Karjala				
ISBN (painettu)	ISBN (PDF)	ISSN-L	ISSN (painettu)	ISSN (verkkojulkaisu)
978-952-257-322-3	978-952-257-323-0	1799-2524	1799-2524	1799-2532
Kokonaissivumäärä		Kieli		Hinta (sis. alv 8%)
107		Suomi		-
Julkaisun myynti/jakaja Julkaisu on saatavana vain verkossa: www.ely-keskus.fi/pohjois-karjala/julkaisut				
Julkaisun kustantaja Pohjois-Karjalan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus				
Painopaikka ja -aika Kopijyvä Oy, Jyväskylä 2011				

Pohjois-Karjalan elinkeino-,
liikenne- ja ympäristökeskus
Kauppakatu 40 B (3. kerros)
80101 Joensuu
puh. 020 63 60110
www.ely-keskus.fi/pohjois-karjala

ISBN 978-952-257-322-3 (painettu)
ISBN 978-952-257-323-0 (PDF)

ISSN-L 1799-2524
ISSN 1799-2524 (painettu)
ISSN 1799-2532 (verkkojulkaisu)