

KAJAANIN ALUEEN PÄÄSTÖJEN LEVIÄMISMALLISELVITYS

ENERGIANTUOTANNON, TEOLLISUUDEN JA AUTOLIIKENTEEN TYPENOKSIDI- JA HIUKKASPÄÄSTÖJEN LEVIÄMISLASKELMAT

Jatta Salmi

Pirjo Ranta

Timo Rasila

Sari Lappi



ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

KAJAANIN ALUEEN PÄÄSTÖJEN LEVIÄMISMALLISELVITYS

ENERGIANTUOTANNON, TEOLLISUUDEN JA AUTOLIIKENTEEEN
TYPENOKSIDI- JA HIUKKASPÄÄSTÖJEN LEVIÄMISLASKELMAT

Jatta Salmi
Pirjo Ranta
Timo Rasila
Sari Lappi

ILMATIETEEN LAITOS – ILMANLAADUN ASiantuntijapalvelut
Helsinki 17.3.2009

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa arvioitiin Kajaanin seudun energiatuotannon, teollisuuden ja autoliikenteen typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen ilmanlaatuvaikutuksia. Laskelmissa ei ole huomioitu lentoasematoiminnan, lento- ja rautatieliikenteen eikä puun pienpolton päästöjä. Mallilaskelmat toteutettiin kahdelle eri tutkimusalueelle, jotka kattoivat Kajaanin keskustan lähialueet sekä Vuolijoen ja Otanmäen taajamat. Laskelmissa käytettiin vuoden 2007 päästöjä.

Päästöjen leviämislaskelmat suoritettiin Ilmatieteen laitoksessa kehitettyjen leviämismallien avulla. Suurempien katujen ja teiden autoliikenteen päästöt mallinnettiin viivalähteinä ja tonttikatujen osuus liikennepäästöistä pintalähteruutuina. Kajaanin tutkimusalueella liikenteen typenoksidipäästöt olivat 251 t/a ja hiukkaspäästöt 15 t/a. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella liikenteen typenoksidipäästöt olivat 66 t/a ja hiukkaspäästöt 3,4 t/a. Teollisuuden- ja energiatuotannon päästöt mallinnettiin pistemäisinä päästölähteinä. Kajaanin tutkimusalueelta laskelmissa oli mukana viisi laitosta, joiden typenoksidipäästöt olivat yhteensä 361 t/a ja hiukkaspäästöt 94 t/a. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueelta laskelmissa oli mukana kolmen laitosta, joiden typenoksidipäästöt olivat yhteensä 34 t/a ja hiukkaspäästöt 7,1 t/a. Päästöjen aiheuttamat pitoisuudet laskettiin tutkimusalueiden maanpintatasoon. Laskelmissa huomioitiin typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus tutkimusalueilla sekä typenoksidipäästöjen ilmakemiallinen muutunta kulkeutumisen aikana. Mallilaskelmien meteorologisina tietoina käytettiin tutkimusalueen ilmastollisia olosuhteita edustavaa kahden sääaseman havainnoista muodostettua aineistoa. Päästöjen leviämistä ja pitoisuuksien muodostumista tutkimusalueille tarkasteltiin kaikissa vuosien 2005–2007 tunneittaisissa ilmastollisissa tilanteissa.

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista molemmilla tutkimusalueilla. Nykyisillä päästöillä pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueiden kokonaispitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän. Kajaanin tutkimusalueen korkeimmat typpidioksidipitoisuudet ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet syntyvät Kajaanin ydinkeskustan alueelle sekä vilkasliikenteisimpien teiden varsille ja suurimmille risteysalueille. Korkeimpien pitoisuuksien alueita muodostuu etenkin Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle sekä Kauppakadun ja Sotkamontien varrelle. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella suurimmat pitoisuudet syntyvät valtatie 28 varrelle, maantien 879 varrelle ja Vuottolahden taajamassa sijaitsevalle teiden 28 ja 879 risteysalueelle. Pitoisuudet laskevat nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylästä.

Leviämismallilaskelmista saatuja tuloksia on työssä vertailtu Kajaanin keskustan ilmanlaadun mittausasemilla mitattuihin tuloksiin sekä ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoihin. Mallilaskelmien tulokset ovat pääsääntöisesti hyvin yhteensopivia ilmalaadun mittaustulosten kanssa. Keskustan alueella ilmanlaatua voidaan pitää leviämismallilaskelmien mukaan vähintäänkin tyydyttävänä, sillä pitoisuudet pääsääntöisesti alittavat typpidioksidille ja hengitettävälle hiukkasille asetetut ohje- ja raja-arvot. Korkeimmillaan typpidioksidipitoisuudet voivat lyhytaikaisesti olla ohjearvojen suuruisia vilkkaaimmin liikennöityjen teiden varsilla ja niiden risteysalueilla. Kajaanin keskustan alueen ulkopuolella ja Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella ilmanlaatua voidaan pitää hyvänä, koska typpidioksidille ja hengitettävälle hiukkasille asetetut ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot alittuvat selvästi.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	2
2	TAUSTATIETOA ILMAN EPÄPUHTAUKSISTA.....	2
2.1	Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät.....	2
2.2	Typpidioksidi.....	3
2.3	Hiukkaset.....	4
2.4	Ilmanlaadun raja- ja ohjearvot.....	5
3	MENETELMÄT.....	7
3.1	Leviämismallilaskelmien kuvaus.....	7
3.2	Leviämismallilaskelmien lähtötiedot.....	9
4	TULOKSET.....	14
4.1	Typpidioksidipitoisuudet (NO ₂).....	14
4.1.1	Typpidioksidipitoisuudet Kajaanin tutkimusalueella.....	14
4.1.2	Typpidioksidipitoisuudet Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.....	16
4.2	Hengitettävien hiukkasten (PM ₁₀) pitoisuudet.....	17
4.2.1	Hiukkaspitoisuudet Kajaanin tutkimusalueella.....	17
4.2.2	Hiukkaspitoisuudet Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.....	19
4.3	Mallilaskelmien tulosten vertailu ilmanlaadun mittauksiin.....	21
4.3.1	Typpidioksidipitoisuuksien vertailu mittaustuloksiin.....	21
4.3.2	Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien vertailu mittaustuloksiin.....	23
4.4	Mallilaskelmien tulosten epävarmuustekijät.....	24
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	26
	VIITELUETTELO.....	28
	LIITEKUVAT	

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää leviämismallilaskelmilla Kajaanin alueen energiantuotannosta, teollisuudesta ja liikenteestä vapautuvien päästöjen ilmanlaatuvaikutuksia. Tarkastelun kohteena olivat typenoksidien ja hengitettävien hiukkasten päästöt vuodelta 2007. Mallilaskelmat toteutettiin kahdelle tutkimusalueelle, joista toinen sijaitsi Kajaanin keskustan ympäristössä ja toinen entisen Vuolijoen kunnan alueella, Vuolijoen ja Otanmäen taajamien ympäristössä.

Työn tilasi Kajaanin kaupungin ympäristötekniinen lautakunta. Laskelmissa tarvittavia energiantuotannon ja teollisuuden päästöihin ja laitosten teknisiin tietoihin liittyviä lähtötietoja sekä liikenteen päästötietoja ja tieverkkoon liittyviä tietoja toimittivat ympäristönsuojelutarkastaja Paula Malinen ja suunnitteluinsinööri Jari Kauppinen Kajaanin kaupungin ympäristöteknisestä palvelukeskuksesta. Laskelmat tehtiin Ilmatieteen laitoksella, Ilmanlaadun asiantuntijapalvelut -yksikössä.

2 TAUSTATIETOA ILMAN EPÄPUHTAUKSISTA

2.1 Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät

Ilmanlaatua heikentävien ilman epäpuhtauksien suurimpia päästölähteitä Suomessa ovat liikenne, energiantuotanto, teollisuus ja talojen lämmitys. Ilman epäpuhtauksia kulkeutuu Suomeen myös kaukokulkeumana maamme rajojen ulkopuolelta. Ilmansaasteiden päästöistä suurin osa vapautuu ilmakehän alimpaan kerrokseen, jota kutsutaan rajakerrokseksi. Rajakerroksessa päästöt sekoittuvat ympäröivään ilmaan ja epäpuhtauspitoisuudet laimenevat. Päästöt voivat levitä liikkuvien ilmamassojen mukana laajoille alueille. Tämän kulkeutumisen aikana epäpuhtaudet voivat reagoida keskenään sekä muiden ilmassa olevien yhdisteiden kanssa muodostaen uusia yhdisteitä. Ilman epäpuhtaudet poistuvat ilmasta sateen huuhtomina, kuivalaskeumana erilaisille pinnoille tai kemiallisen muutunnan kautta.

Ilman epäpuhtauksien leviäminen tapahtuu pääosin ilmakehän alimmassa osassa, rajakerroksessa. Sen korkeus on Suomessa tyypillisesti alle kilometri, mutta varsinkin kesällä se voi nousta yli kahteen kilometriin. Matalimmat rajakerroksen korkeudet havaitaan yleensä talvella kovilla pakkasilla. Rajakerroksen korkeus määrää ilmatilavuuden, johon päästöt voivat välittömästi sekoittua. Rajakerroksen tuuliolosuhteet määräävät karkeasti ilman epäpuhtauksien kulkeutumissuunnan, mutta rajakerroksen ilmavirtausten pyörteisyys ja kerroksen korkeus vaikuttavat merkittävästi epäpuhtauksien sekoittumiseen ja pitoisuuksien laimenemiseen kulkeutumisen aikana. Leviämisen kannalta keskeisiä meteorologisia muuttujia ovat tuulen suunta ja nopeus, ilmakehän stabiilisuutta kuvaava suure ja sekoituskorkeus. Ilmakehän stabiilisuudella tarkoitetaan ilmakehän herkkyyttä pystysuuntaiseen sekoittumiseen. Stabiilisuuden määrää ilmakehän pystysuuntainen lämpötilarakenne.

Inversiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa ilmakehän lämpötila nousee ylöspäin mentäessä. Erityisesti maanpintainversion aikana ilmanlaatu voi paikallisesti huonontua nopeasti. Maanpintainversiossa maanpinta ja sen lähellä oleva ilmakerros jäähtyy niin, että kylmempi ilma jää ylempänä olevan lämpimämmän ilman alle. Kylmä pintailma ei raskaampana pääse kohoamaan yläpuolellaan olevan lämpimän kerroksen läpi, ja ilmakehän pystysuuntainen liike estyy. Inversiokerroksessa tuuli on hyvin heikkoa ja näin ollen ilmaa sekoittava pyörteisyys on hidasta. Tämän seurauksena ilman epäpuhtauksien laimeneminen on vähäistä. Inversiotilanteissa pitoisuudet kohoavat taajamissa etenkin liikenneneruuhkien aikana, koska epäpuhtaudet kerääntyvät matalaan ilmakerrokseen päästölähteiden lähelle.

2.2 Typpidioksidi

Typen yhdisteitä vapautuu päästölähteistä ilmaan typen oksideina eli typpimonoksidina (NO) ja typpidioksidina (NO₂). Typpidioksidin pitoisuus on kaupunki-ilmassa yleensä pienempi kuin typpimonoksidin pitoisuus. Näistä yhdisteistä terveysvaikutuksiltaan haitallisempaa on typpidioksidi, jonka pitoisuuksia ulkoilmassa säädellään ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoilla. Typpidioksidin määrään ilmassa vaikuttavat myös kemialliset muutuntareaktiot, joissa typpimonoksidi hapettuu typpidioksidiksi.

Ulkoilman typpidioksidipitoisuuksille altistuminen on suurinta kaupunkien keskustojen ja taajamien liikenneympäristöissä. Typpidioksidipitoisuudet kohoavat tyypillisesti ruuhka-aikoina. Korkeimmillaan typpidioksidipitoisuudet ovat erityisesti tyyninä ja kylminä talvipäivinä, jolloin myös energiantuotannon päästöt ovat suurimmillaan. Taajamien ja kaupunkien korkeimmat typpidioksidipitoisuudet aiheuttaa pääasiassa autoliikenne, vaikka energiantuotannon ja teollisuuden aiheuttamat päästöt (pistemäiset päästölähteet) olisivat määrällisesti jopa suurempia autoliikenteeseen verrattuna. Ihmiset altistuvat helposti liikenteen päästöille, sillä autojen pakokaasupäästöt vapautuvat hengityskorkeudelle.

Typpidioksidille herkimpiä väestöryhmiä ovat lapset ja astmaatikoit, joiden hengitysoireita kohonneet pitoisuudet voivat lisätä suhteellisen nopeasti. Pakkaskaudella tapahtuva typpidioksidipitoisuuden kohoaminen on erityisen haitallista astmaatikaille, koska jo puhtaan kylmän ilman hengittäminen rasituksessa aiheuttaa useimmille astmaatikaille keuhkoputkien supistusta ja typpidioksidi pahentaa tästä aiheutuvia oireita kuten hengenahdistusta ja yskää.

Ilmatieteen laitoksella tehdyn ilmanlaadun alustavan arvioinnin (Pietarila ym., 2001) tulosten mukaan typpidioksidipitoisuuden raja-arvot voivat nykyisin ylittyä etenkin suurimpien kaupunkien vilkkaasti liikennöidyillä keskusta-alueilla lähinnä liikenneväylien ja risteyksien läheisyydessä. Korkeimmillaan vuosikeskiarvot ovat olleet ilmanlaadun mittausten mukaan Helsingin vilkasliikenteisimmillä alueilla noin 40–50 µg/m³. Yleensä Suomen kaupungeissa vuosikeskiarvot ovat noin 20–30 µg/m³. Ilmatieteen laitoksen puhtailla tausta-alueilla tehtyjen ilmanlaatumittausten mukaan typpidioksidin vuosikeskiarvot ovat olleet Etelä-Suomessa noin 2–8 µg/m³ ja Pohjois-Suomessa noin 1 µg/m³.

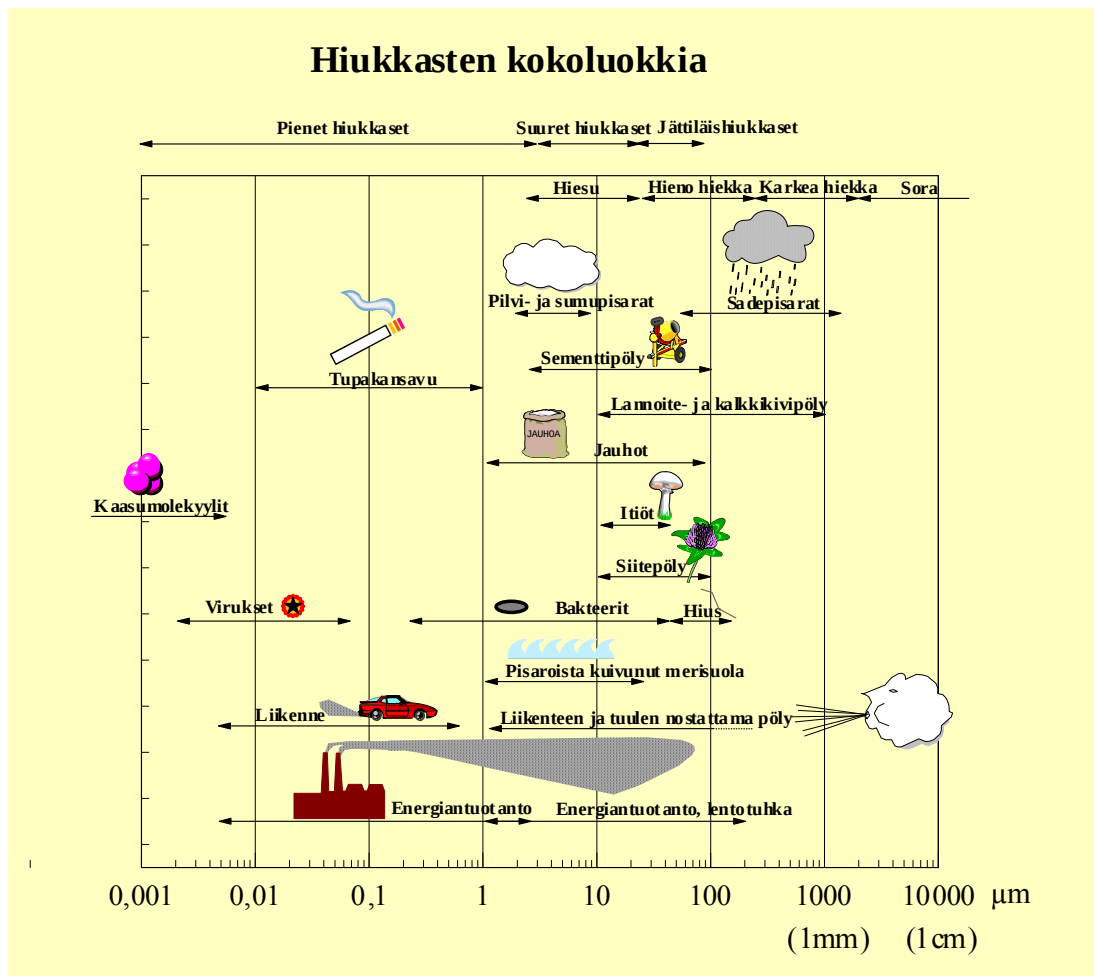
2.3 Hiukkaset

Ulkoilman hiukkaset ovat nykyisin merkittävimpiä ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä Suomen kaupungeissa. Pienhiukkasia pidetään länsimaissa haitallisimpana ympäristökijänä ihmisten terveydelle. Ulkoilman hiukkaset ovat taajamissa suurelta osin peräisin liikenteen ja tuulen nostattamasta katupölystä (ns. resuspensio) eli epäsuorista päästöistä. Hiukkaspitoisuuksia kohottavat myös nk. suorat hiukkaspäästöt, jotka ovat peräisin energiantuotannon ja teollisuuden prosesseista, autojen pakokaasuista ja puun pienpoltoista. Suorat hiukkaspäästöt ovat pääasiassa pieniä hiukkasia. Hiukkasiin on sitoutunut myös erilaisia haitallisia yhdisteitä kuten hiilivetyjä ja raskasmetalleja.

Ulkoilman hiukkasten koko on yhteydessä niiden aiheuttamiin erilaisiin vaikutuksiin. Suurempien hiukkasten korkeat pitoisuudet vaikuttavat merkittävimmin viihtyvyyteen ja aiheuttavat likaantumista. Terveysvaikutuksiltaan haitallisempia ovat ns. hengitettävät hiukkaset ja pienhiukkaset, jotka kykenevät tunkeutumaan syvälle ihmisten hengitysteihin. Hengitettävillä hiukkasilla, joiden halkaisija on alle 10 mikrometriä (PM_{10}), on annettu ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot. Hengitettävien hiukkasten pitoisuudet kohoavat erityisesti keväällä, jolloin jauhautunut hiekoitushiekka ja asfalttipöly nousevat ilmaan kuivilta kaduilta liikenteen nostattamana. Pienhiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 mikrometriä ($PM_{2,5}$), ovat pääasiassa peräisin suorista autoliikenteen ja teollisuuden päästöistä ja kaukokulkeumasta, jonka lähde voi olla esimerkiksi metsä- ja maastopalot. Hiukkasten kokoluokkia on havainnollistettu kuvassa A.

Suurimmat hiukkaspitoisuudet esiintyvät vilkkaasti liikennöidyissä kaupunkikeskustoissa. Suomessa hiukkaspitoisuudet kohoavat yleensä voimakkaasti keväällä maaliskuuhuhtikuussa, kun maanpinnan kuivuessa tuuli ja liikenne nostattavat katupölyä ilmaan. Liikenteen vaikutukset korostuvat matalan päästökorkeuden vuoksi. Hengitettävillä hiukkasilla annettu vuorokausiohjarvo ylittyy keväisin yleisesti Suomen kaupungeissa. Hengitettävien hiukkasten vuorokausipitoisuudelle annettu raja-arvo on sen sijaan ylittynyt viime vuosina vain Helsingin keskustassa.

Maamme suurimpien kaupunkien keskusta-alueilla on mitattu useina vuosina yli $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$:n hengitettävien hiukkasten (PM_{10}) pitoisuuden vuosikeskiarvoja. Hengitettävien hiukkasten vuosipitoisuudelle annettu raja-arvo $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on kuitenkin alittunut Suomessa. Pienempien kaupunkien keskusta-alueilla hengitettävien hiukkasten pitoisuuden vuosikeskiarvot voivat ylittää $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja kaupunkien keskusta-alueiden ulkopuolella pitoisuudet ovat olleet yli $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Pietarila ym., 2001). Puhtailla tausta-alueilla vuosikeskiarvopitoisuudet ovat olleet Etelä-Suomessa noin $10\text{--}12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja Pohjois-Suomessa noin $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Kuva A. Hiukkasten kokoluokkia. Hiukkasten koko ilmaistaan halkaisijana mikrometreissä (μm). Mikro (μ) etuliite tarkoittaa miljoonasosa. 1 μm on siten metrin miljoonasosa eli millimetrin tuhannesosa.

2.4 Ilmanlaadun raja- ja ohjearvot

Leviämismallilaskelmilla tai ilmanlaadun mittauksilla saatuja ilman epäpuhtauspitoisuuksia voidaan arvioida vertaamalla niitä ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoihin. EU-maissa voimassa olevat raja-arvot ovat sitovia ja ne eivät saa ylittyä alueilla, joissa asuu tai oleskelee ihmisiä. Raja-arvot eivät ole voimassa esimerkiksi teollisuusalueilla tai liikenneväylillä, lukuun ottamatta kevyen liikenteen väyliä. Kansalliset ilmanlaadun ohjearvot eivät ole yhtä sitovia kuin raja-arvot, mutta niitä käytetään esimerkiksi kaupunkisuunnittelun tukena ja ilman pilaantumisen vaaraa aiheuttavien toimintojen sijoittamisessa. Tavoitteena on ennalta ehkäistä ohjearvojen ylittyminen sekä taata hyvän ilmanlaadun säilyminen.

Raja-arvot määrittelevät ilman epäpuhtauksille sallitut korkeimmat pitoisuudet. Raja-arvoilla pyritään vähentämään tai ehkäisemään terveydelle ja ympäristölle haitallisia vaikutuksia. Raja-arvon ylittyessä kunnan tai alueellisen ympäristökeskuksen on tiedotettava väestöä ja ryhdyttävä toimiin ilmanlaadun parantamiseksi ja raja-arvon

ylitysten estämiseksi. Tällaisia toimia voivat olla esimerkiksi määräykset liikenteen tai päästöjen rajoittamisesta. Ilman epäpuhtauksien aiheuttamien terveyshaittojen ehkäisemiseksi ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet eivät saisi ylittää taulukon 1 raja-arvoja alueilla, joilla ihmiset saattavat altistua ilman epäpuhtauksille.

Taulukko 1. Terveyshaittojen ehkäisemiseksi annetut ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia koskevat raja-arvot (Vna 711/2001).

Aine	Keskiarvon laskenta-aika	Raja-arvo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (293 K, 101,3 kPa)	Sallittujen ylitysten määrä kalenteri-vuodessa (vertailujakso)	Ajankohta, jolloin pitoisuuksien viimeistään tulee olla raja-arvoa pienemmät
Typpidioksidi (NO_2)	1 tunti	200	18	1.1.2010
	kalenterivuosi	40	–	1.1.2010
Hengitettävät hiukkaset (PM_{10})	24 tuntia	50 ¹⁾	35	1.1.2005
	kalenterivuosi	40 ¹⁾	–	1.1.2005

1) Tulokset ilmaistaan ulkoilman lämpötilassa ja paineessa.

Typen oksidien (NO_x) vuosiraja-arvo ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) on annettu kasvillisuuden ja ekosysteemien suojelemiseksi ja se on voimassa laajoilla maa- ja metsätalousalueilla ja luonnonsuojelun kannalta merkityksellisillä alueilla.

Ilmanlaadun ohjearvot on otettava huomioon suunnittelussa ja niitä sovelletaan mm. alueiden käytön, kaavoituksen, rakentamisen ja liikenteen suunnittelussa ja ympäristölupaharkinnassa. Ohjearvojen soveltamisen avulla pyritään ehkäisemään epäpuhtauksien aiheuttamia terveysvaikutuksia. Suomessa voimassa olevat ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia koskevat ilmanlaadun ohjearvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia koskevat ilmanlaadun ohjearvot (Vnp 480/1996).

Epäpuhtaus	Ohjearvo (20 °C, 1 atm)	Tilastollinen määrittely
Typpidioksidi (NO_2)	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kuukauden tuntiarvojen 99. prosenttipiste
	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kuukauden toiseksi suurin vuorokausiarvo
Hengitettävät hiukkaset (PM_{10})	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kuukauden toiseksi suurin vuorokausiarvo

3 MENETELMÄT

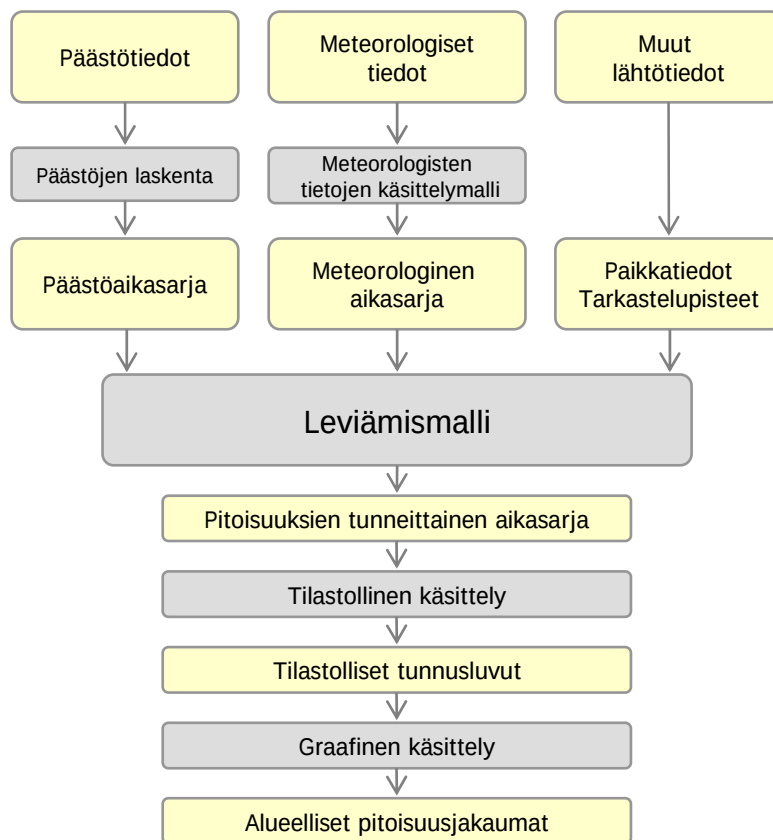
3.1 Leviämismallilaskelmien kuvaus

Ilman epäpuhtauksien leviämismalleilla tutkitaan eri epäpuhtauksien kulkeutumista ilmakehässä. Malleihin sisältyy usein myös laskentamenetelmiä, joiden avulla voidaan kulkeutumisen lisäksi tarkastella epäpuhtauksien muuntumista ja kemiallisia reaktioita ilmakehässä sekä poistumista ilmakehästä laskeutuvana. Tässä tutkimuksessa käytettiin Ilmatieteen laitoksella kehitettyjä leviämismalleja tieliikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden päästöjen leviämisen kuvaamiseen ja niiden ilmalaatuvaikutusten arvioimiseen.

Ilmatieteen laitoksen leviämismalleja on kehitetty pitkäjänteisesti tavoitteena tuottaa luotettavaa tietoa ilmanlaadusta mm. kaupunki- ja liikennesuunnittelun ja ilmansuojelutoimenpiteiden suunnittelun tueksi sekä pitoisuuksien ja väestön altistumisen arvioimiseksi. Mallien toimintaa on kehitetty lukuisissa tutkimusprojekteissa, ja verifiointitutkimusten mukaan mallinnusten tulokset on todettu hyvin yhteensopiviksi Suomen taajamien ja teollisuusympäristöjen ilmanlaadun mittaustulosten kanssa. Nykyisissä Ilmatieteen laitoksen leviämismalleissa kuvataan tarkasti päästökohdassa tapahtuvaa nousulisää (jonka aiheuttavat poistokaasujen nousunopeus piipussa sekä ulkolämpötilan ja poistokaasujen lämpötilan välinen ero), ilmassa tapahtuvia päästöaineiden kemiallisia prosesseja sekä epäpuhtauksien poistumamekanismeja. Malleihin sisältyy laskentamenetelmä typenoksidien kemialliselle muutunnalle. Autoliikenteen ja energiantuotannon typenoksidipäästöt koostuvat typpidioksidista sekä typpimonoksidista, jota on valtaosa päästöistä. Osa typpimonoksidista hapettuu ilmassa terveydelle haitallisemmaksi typpidioksidiksi.

Tässä selvityksessä käytetyillä leviämismalleilla voidaan arvioida ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia päästölähteiden lähialueilla. Liikenteen päästöjen aiheuttamia ilmanlaatuvaikutuksia arvioitiin viivalähdemallilla (CAR-FMI) ja pistemäisten päästölähteiden (esim. piippujen) ilmanlaatuvaikutuksia kaupunkimallilla (UDM-FMI, Urban Dispersion Modelling system). Malleja ja niiden toimintaperiaatteita sekä tieteellistä perustaa on kuvattu tarkemmin liitteenä toimitettavassa raportissa. Kaavio leviämismallin toiminnasta on esitetty kuvassa B.

Leviämismallien lähtötiedoiksi tarvitaan tietoja päästöistä ja niiden lähteistä, mittaamalla ja mallittamalla saatuja tietoja ilmakehän tilasta sekä tietoja epäpuhtauksien taustapitoisuuksista. Lisäksi lähtötiedoiksi tarvitaan erilaisia paikkatietoja, kuten tietoja maanpinnan muodoista ja laadusta. Liikenteen päästölaskennassa huomioidaan liikennemäärät ja niiden tunneittainen vaihtelu, erityyppisten ajoneuvojen osuudet liikennemääristä, liikennevirtojen nopeudet ja ajoneuvokohtaiset päästökertoimet. Energiantuotannon ja teollisuuden päästöjen laskennassa huomioidaan lähdekohtaiset päästöt, savukaasujen ominaisuudet ja laitoksen tekniset tiedot. Leviämislaskelmia varten muodostetaan kaikille eri päästölähteille päästöaikasarjat, joissa on jokaiselle tarkastelujakson tunnille (1–3 vuotta, 8760–26304 tuntia) laskettu päästömäärä erikseen kaikille ilman eri epäpuhtauksille.



Kuva B. Kaaviokuva Ilmatieteen laitoksella kehitettyjen leviämismallien, viivalähdemallin (CAR-FMI) ja kaupunkimallin (UDM-FMI), toiminnasta.

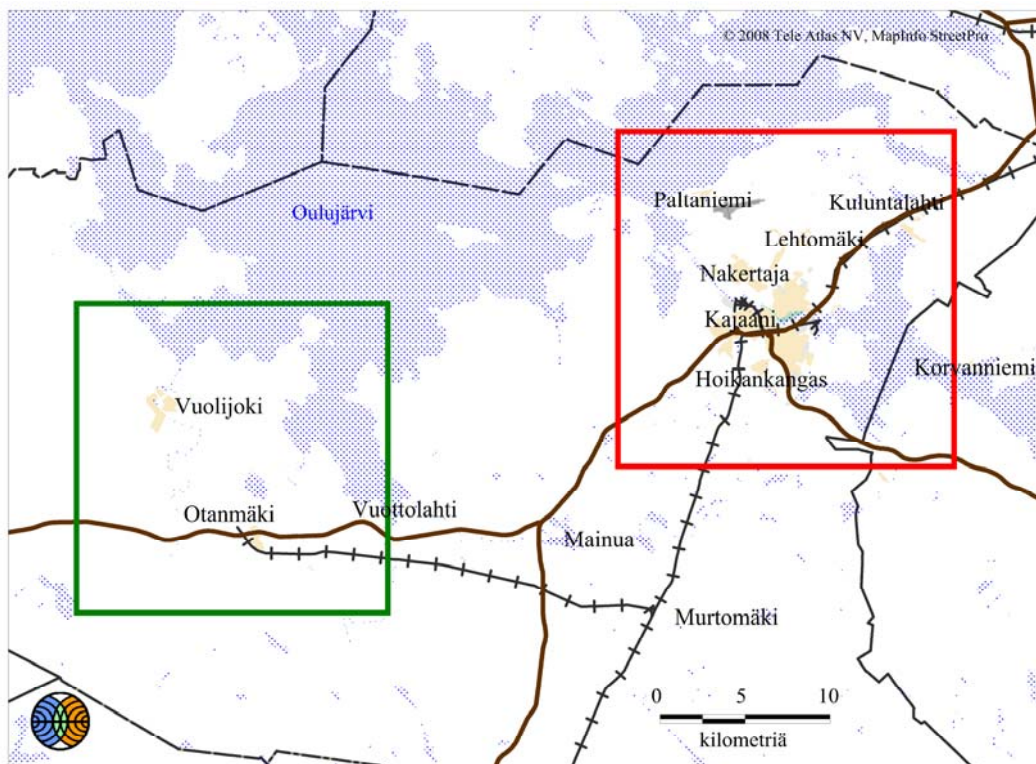
Leviämismallin tarvitseman meteorologisen aikasarjan muodostuksessa käytetään Ilmatieteen laitoksella kehitettyä meteorologisten tietojen käsittelymallia, joka perustuu ilmakehän rajakerroksen parametrisointimenetelmään (Rantakrans, 1990; Karppinen, 2001). Menetelmän avulla voidaan meteorologisten rutiinihavaintojen ja fysiikan perusyhtälöiden avulla arvioida rajakerroksen tilaan vaikuttavat muuttujat, joita tarvitaan epäpuhtauksien leviämismallilaskelmissa. Tarvittavat mittaustiedot saadaan Ilmatieteen laitoksen havaintotietokantaan tallennetuista sää-, auringonpaiste- ja radio-luotaushavainnoista. Menetelmässä huomioidaan tutkimusalueen paikalliset tekijät, kuten leviämisalustan rosoisuus ja vuodenaikaiset albedoarvot (maanpinnan kyky heijastaa auringon säteilyä) eri maanpinnan laaduilla. Laskelmissa käytetään yleensä 1–3 vuoden pituista tutkimusalueen sääolosuhteita edustavaa meteorologista aineistoa. Laskelmissa käytettäväksi sääasemiksi valitaan tutkimusaluetta lähimpänä sijaitsevat sääasemat, joilla mitataan kaikkia mallin tarvitsemia suureita. Tuulen suunta- ja nopeustiedot muodostetaan kahden tai useamman sääaseman havaintojen etäisyyspainotettuna tilastollisena yhdistelmänä. Lopputuloksena saadaan leviämismalleissa tarvittavien meteorologisten tietojen tunneittaiset aikasarjat.

Leviämismallit laskevat epäpuhtauspitoisuuksia tarkastelujakson jokaiselle tunnille laskentapisteikköön, joka muodostetaan kullekin tutkimusalueelle sopivaksi. Laskentapisteitä on yleensä useita tuhansia, ja niiden etäisyys toisistaan vaihtelee muutamasta

kymmenestä metristä satoihin metreihin riippuen tutkimusalueen koosta ja tarkasteltavista kohteista. Mallin tuottamasta pitoisuusaikasarjasta lasketaan ilmanlaadun raja- ja ohjearvoihin verrannollisia tilastollisia suureita, jotka esitetään raportissa mm. pitoisuuksien aluejakaumakuvina ja taulukkoina.

3.2 Leviämismallilaskelmien lähtötiedot

Tässä tutkimuksessa laskettiin teollisuuden, energiantuotannon ja tieliikenteen päästöjen aiheuttamat typpidioksidi- ja hiukkaspitoisuudet kahdelle erilliselle tutkimusalueelle. Tutkimusalueiden sijainnit esitetään kuvassa C. Kajaanin keskustan ympäristössä tutkimusalue oli kooltaan 20×20 km ja Vuolijoen ja Otanmäen taajamien ympäristössä 18×18 km. Päästöjen aiheuttamat pitoisuudet laskettiin maanpintatasolle kahteen laskentapisteikköön, jossa Kajaanin tutkimusalueella oli 9780 laskentapistettä ja Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella 8020 laskentapistettä. Laskentapisteiköissä pisteiden välisiä etäisyyksiä on tihennetty pitoisuuksien muodostumisen kannalta merkittävimmissä kohteissa eli pistemäisten päästölähteiden lähiympäristössä ja teiden läheisyydessä. Laskentapisteikön pisteet olivat tiheimmillään 50 metrin etäisyydellä toisistaan ja harvimmillaan 250 metrin etäisyydellä toisistaan. Tutkimusalueiden maanpinnan korkeuserot huomioitiin laskentapisteissä Maanmittauslaitoksen maastonkorkeusmallin mukaisesti.



Kuva C. Kahden tutkimusalueen sijainti. Kajaanin tutkimusalue on esitetty kuvassa punaisella rajauksella ja Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalue vihreällä rajauksella.

Energiatuotannon ja teollisuuden typenoksidipäästöt olivat Kajaanin alueella 316,4 t/a ja hiukkaspäästöt 93,6 t/a. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella pistemäisten päästölähteiden typenoksidipäästöt olivat 33,6 t/a ja hiukkaspäästöt 7,1 t/a. Leviämislaskelmissa huomioitiin Kajaanista viiden eri laitoksen päästöt, Vuolijoelta yhden laitoksen ja Otanmäestä kahden laitoksen päästöt. Laskelmissa käytetyt päästötiedot olivat vuodelta 2007. Laskennassa huomioitiin laitosten toiminta-ajat, päästövaihtelut ja laitosten tekniset tiedot, kuten esimerkiksi laitosrakennusten ja piipun korkeus, savukaasuvirtaama ja savukaasun lämpötila. Energiatuotantoa ja teollisuutta koskevat lähtötiedot toimitti Kajaanin kaupungin ympäristötekninen palvelukeskus. Energiantuotannon ja teollisuuden laitoskohtaiset päästöt on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Energiantuotannon ja teollisuuden laitoskohtaiset päästöt Kajaanin tutkimusalueella ja Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

Laitos	Typenoksidipäästöt (t/a)	Hiukkaspäästöt (t/a)
Kainuun Voima Oy	280,8	88,9
Kajaanin Lämpö Oy, Palokankaan lämpökeskus	14,3	1,0
Kainuun keskussairaalan lämpökeskus	19,2	2,9
NCC Roads, asfalttiasema, Karankalahti	0,6	0,03
Lemminkäinen Infra Oy, asfalttiasema, Mustalahti	1,5	0,8
Kajaanin tutkimusalue yhteensä	316,4	93,6
Otanmäen Lämpö Oy, Vuolijoen lämpökeskus	2,5	2,8
Otanmäen Lämpö Oy, Otanmäen lämpökeskus	25,0	0,8
Vapo Oy, Otanmäen lämpökeskus	6,1	3,5
Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalue yhteensä	33,6	7,1

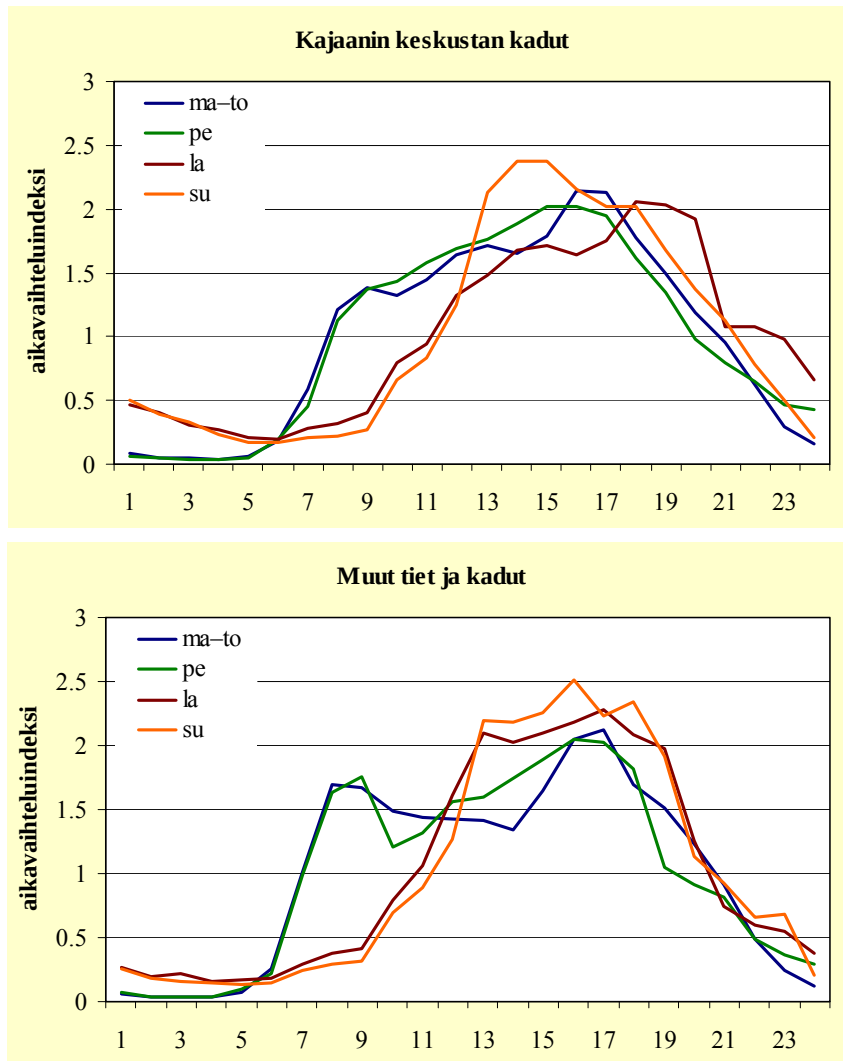
Kajaanin tutkimusalueella vuonna 2007 liikenteen typenoksidipäästöt olivat 251,4 t/a ja hiukkaspäästöt 15,1 t/a. Tutkimusalueiden suurimpien katujen ja teiden tieliikennepäästöt laskettiin ja mallinnettiin tiekohtaisina viivalähteinä. Liikenneväylää kuvattiin siis peräkkäisinä lyhyinä viivoina, joista jokaisesta vapautuu ympäristöönsä erikseen laskettavan suuruinen päästö. Tonttikatujen ja muiden pienten katujen liikennepäästöt mallinnettiin 1 km²:n suuruisina pintalähderuutuina. Pintalähderuutuina käsiteltyjen teiden ja katujen liikenteen aiheuttamat typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen osuudet olivat yhteensä 7 t/a ja 0,4 t/a. Viivalähteitä oli Kajaanin tutkimusalueella yhteensä 479 kappaletta ja pintalähderuutuja 214 kappaletta. Kajaanin keskusta-aluetta koskevat liikennemäärä- ja nopeusrajoitustiedot toimitti Kajaanin kaupungin ympäristötekninen palvelukeskus. Keskusta-alueen ulkopuolisia teitä koskevat tiedot saatiin Tiehallinnon tierekisteristä. Kajaanin tutkimusalueen liikennemäärät ja liikenteen aiheuttamat tiekohtaiset typenoksidi- ja hiukkaspäästöt on esitetty liitekuviissa 1–2 ja 14–15.

Otanmäen ja Vuolijoen tutkimusalueella vuonna 2007 liikenteen typenoksidipäästöt olivat 66,3 t/a ja hiukkaspäästöt 3,4 t/a. Tutkimusalueen suurimpien teiden tieliikennepäästöt laskettiin ja mallinnettiin tiekohtaisina viivalähteinä, joita oli tutkimusalueella 174 kappaletta. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueen suurimpia teitä koskevat liikennemäärä- ja nopeusrajoitustiedot saatiin Tiehallinnon tierekisteristä. Taajamien pienemmistä kaduista ei ollut saatavilla tarvittavia liikennetietoja, joten niitä ei voitu laskennassa huomioida. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueen liikennemäärät ja liikenteen aiheuttamat tiekohtaiset typenoksidi- ja hiukkaspäästöt on esitetty liitekuvin 3 ja 16.

Liikenteen päästöjen mallinnuksessa huomioitiin liikenteen päivittäinen ja tunneittainen vaihtelu Kajaanissa 27.10.–2.11.2008 suoritettujen liikennelaskentojen perusteella. Liikennelaskennat suoritti Eltel Networks Oy. Liikennemäärien tunneittaista vaihtelua kuvaavat aikavaihteluindeksit eri viikonpäiville on esitetty kuvassa D. Ylemmässä kaaviossa esitetyt aikavaihteluindeksit on laskettu Pohjolankadulla tehtyjen liikennelaskentojen perusteella ja niitä on käytetty kuvaamaan liikennemäärien vaihtelua Kajaanin keskustan kaduilla. Alemmassa kaaviossa esitetyt indeksit on saatu Sotkamontien liikennelaskentojen perusteella ja niitä on käytetty kaikilla muilla Kajaanin tutkimusalueen teillä ja kaduilla. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella on käytetty alemmassa kaaviossa esitettyjä aikavaihteluindeksejä.

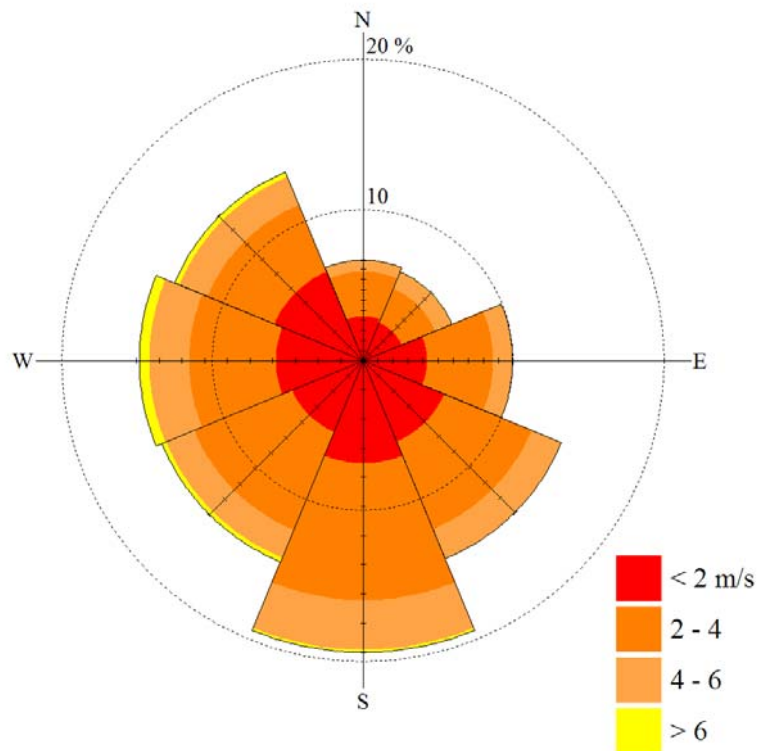
Eri autotyyppien ajon aikaiset päästökertoimet perustuvat Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) päästölaskelmiin ja CAR-FMI mallia varten kehitettyihin nopeusriippuviin päästökerroinfunktioihin. Päästön ja nopeuden suhde perustuu ajoneuvojen päästöjen laboratoriomittauksiin (*Laurikko, 1998*). Leviämismallilaskelmissa on oletettu autoliikenteen typenoksidipäästöistä olevan typpidioksidia keskimäärin 16 %.

Tutkimusalueen tonttikatujen ja muiden pienten katujen liikennepäästön osuus arvioitiin LIISA-mallin kunnittaisista tuloksista eri tietyypeille arvioiduista liikenteen ajosuoritemääristä (*Mäkelä ym., 2008*). Tonttikatujen osuus liikennepäästöistä jaettiin pinalähderuutuihin käyttämällä hyväksi alueellisia asukaslukuja ja katuverkon tiheyttä sekä ottamalla huomioon viivalähteinä käsiteltyjen katujen ajosuoritteet. Valtaosa liikennesuoritteesta sisältyi viivalähteisiin.



Kuva D. Liikenteen tunneittaista vaihtelua kuvaavat aikavaihteluindeksit eri viikonpäiville. Ylemmässä kaaviossa esitettyjä aikavaihteluindeksejä on käytetty Kajaanin keskustan alueella ja alemmassa kaaviossa esitettyjä indeksejä kaikilla muilla Kajaanin tutkimusalueen teillä ja kaduilla. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella on käytetty alemmassa kaaviossa esitettyjä aikavaihteluindeksejä.

Tutkimusalueen ilmastollisia olosuhteita edustava meteorologinen aikasarja muodostettiin Kajaanin lentoaseman ja Kuopion lentoaseman sääasemien havaintotiedoista vuosilta 2005–2007. Sekoituskorkeuden määrittämiseen käytettiin Jokioisten observatorion radioluotaushavaintoja vuosilta 2005–2007. Lähempänä sijaitsevan Sodankylän observatorion luotausaseman havintosarja ei ollut riittävän kattava vuoden 2007 osalta, joten käytimme Jokioisten observatorion luotaushavaintoja. Kuvassa E on esitetty tuulen suunta- ja nopeusjakauma tutkimusalueella tuuliruusun muodossa.



Kuva E. Tuulen suunta- ja nopeusjakauma tutkimusalueella vuosina 2005–2007. Tehdyn tilastollisen tarkastelun mukaan etelätuulet ovat tutkimusalueella vallitsevia. Vähiten esiintyi pohjoisen ja koillisen puoleisia tuulia. Lasketut tuulitiedot kuvaavat olosuhteita 10 metrin korkeudella maan pinnasta.

Tutkimusalueen typpidioksidin ja otsonin taustapitoisuudet saatiin Oulangassa sijaitsevalta taustailmanlaadun mittausasemalta. Hengitettävien hiukkasten taustapitoisuus saatiin laskemalla keskiarvo tutkimusalueesta yhtä etäällä sijaitsevien Virolahden ja Sammaltunturin taustailmanlaadun mittausasemien pitoisuuksista. Tutkimusaluetta lähempänä sijaitsevilla taustailmanlaadun mittausasemilla ei mitata hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia. Tutkimusalueen taustapitoisuuksina käytettiin leviämismallissa pitoisuuksien kuukausittain laskettuja tunneittaisia keskiarvoja, joilla pyrittiin kuvaamaan taustapitoisuuksien vuorokauden sisäistä vaihtelua. Typpidioksidin taustapitoisuus tutkimusalueella on vuosikeskiarvona noin $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, otsonin noin $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja hengitettävien hiukkasten noin $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4 TULOKSET

4.1 Typpidioksidipitoisuudet (NO₂)

4.1.1 Typpidioksidipitoisuudet Kajaanin tutkimusalueella

Leviämismallilaskelmien tuloksina saadut ulkoilman typpidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot Kajaanin tutkimusalueella on esitetty taulukossa 4. Taulukossa on esitetty erikseen pistemäisistä päästölähteistä, liikenteestä ja kaikista päästölähteistä yhdessä aiheutuvat pitoisuudet. Leviämismallilaskelmilla saatujen pistemäisten päästölähteiden typpidioksidipitoisuuksien alueellinen vaihtelu käy ilmi raportin liitekuvista 4 ja 7. Kaikkien päästölähteiden kokonaispäästöistä aiheutuneiden typpidioksidipitoisuuksien alueellinen vaihtelu on esitetty liitekuviissa 5–6 ja 8–9. Laskelmissa on huomioitu typpidioksidin alueellinen taustapitoisuus (vuosikeskiarvona noin 1 µg/m³) sekä typenoksidipäästöjen ilmakemiallinen muutunta kulkeutumisen aikana.

Taulukko 4. Leviämismallilaskelmilla saadut pistemäisten päästölähteiden, liikenteen ja kaikkien päästölähteiden yhdessä aiheuttamat ulkoilman typpidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot vuosina 2005–2007 Kajaanin tutkimusalueella. Kaikkien päästölähteiden sarakkeessa on huomioitu typpidioksidin alueellinen taustapitoisuus.

Typpidioksidipitoisuus (µg/m ³)	Raja- tai ohjearvo	Pistemäiset päästölähteet	Liikenne	Kaikki päästölähteet
Vuosikeskiarvo	40	0,04	29	30
Korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	70	0,6	68	70
Korkein tuntiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	150	1,8	140	142
Korkein tuntiraja-arvoon verrannollinen pitoisuus	200	1,7	129	130

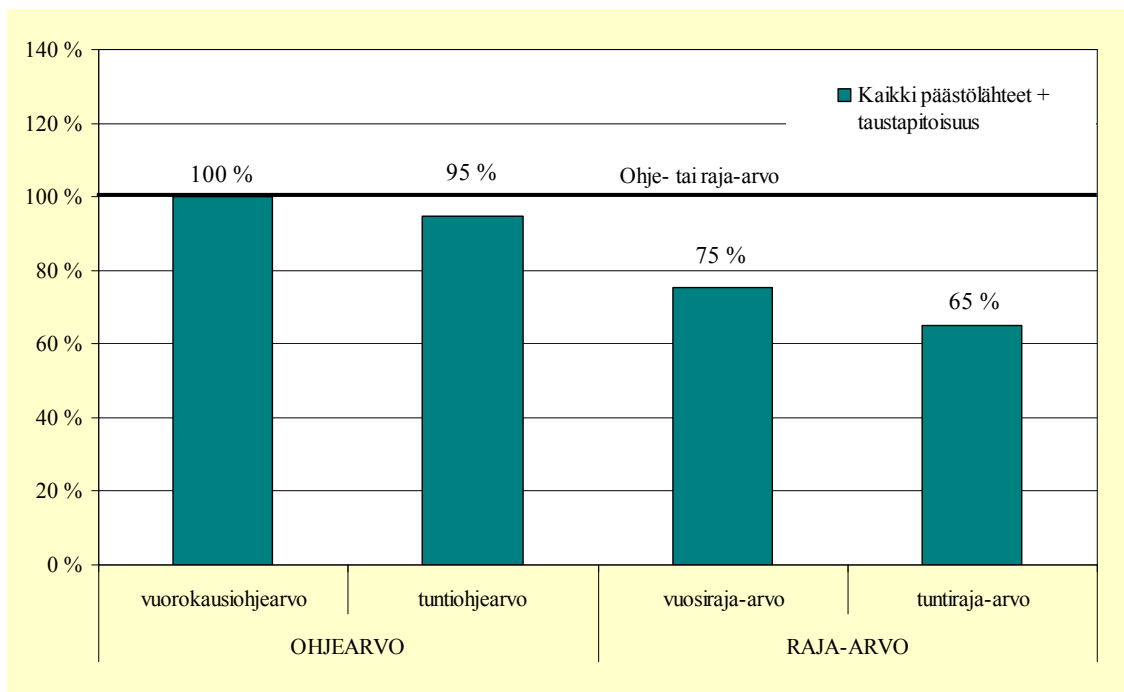
Suurimmat pistemäisten päästölähteiden aiheuttamat typpidioksidipitoisuudet muodostuvat vallitsevien tuulensuuntien mukaisesti päästölähteiden pohjois- ja koillispuolelle (liitekuva 4). Tuulen käydessä päästölähteiden eteläpuolelta poistokaasuvanat etenevät piipuista pohjoissuuntaan, jolloin päästöt eivät laskennassa vaikuta lähteen eteläpuoleisiin pitoisuuksiin. Kainuun Voima Oy:n voimalaitoksen ympärille muodostuu selvä katvealue, jolla pitoisuudet ovat minimissään ja kasvavat lyhyellä etäisyydellä nopeasti. Tällaisen aivan päästölähteen ympärille muodostuvan, muita arvoja matalampien pitoisuuksien alueen laajuuteen vaikuttaa poistokaasujen nousulisä. Nousulisää aiheuttavat poistokaasujen nousunopeus piipussa sekä ulkolämpötilan ja poistokaasujen lämpötilan välinen ero.

Korkeimmat liikenteen päästöjen aiheuttamat typpidioksidipitoisuudet syntyvät Kajaanin ydinkeskustan alueelle sekä vilkasliikenteisimpien teiden varsille ja suurimmille

risteysalueille. Korkeimpien pitoisuuksien alueita muodostuu Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle sekä näiden katujen varsille ja Sotkamontien varrelle. Pitoisuudet laskevat nopeasti mentäessä keskusta-alueen ulkopuolelle ja suurimmalla osalla Kajaanin tutkimusaluetta pitoisuudet ovat typpidioksidin taustapitoisuuden tasolla.

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman typenoksidipitoisuuksista Kajaanin tutkimusalueella. Nykyisillä päästöillä pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueen kokonaistypidioksidipitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän. Aluejakaumakuvissa, joissa esitetään pistemäisten päästölähteiden ja liikenteen päästöjen yhteisvaikutuksen aiheuttamia pitoisuuksia, ei pysty erottamaan yksittäisten pistelähteiden vaikutusta pitoisuustasoihin (liitekuvat 5–6 ja 8–9).

Kuvassa F esitetään leviämislaskelmien tuloksina saatujen Kajaanin tutkimusalueen suurimpien typpidioksidipitoisuuksien suhde maassamme voimassa oleviin ilmanlaadun raja- ja ohjearvoihin. Typpidioksidin vuorokausi-ohjearvoon verrannollinen pitoisuus oli suurimmillaan ohjearvon ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) suuruinen (liitekuvat 8 ja 9) ja tuntiohjearvoon verrannollinen pitoisuus 95 % ohjearvosta ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Suurimmat pitoisuudet esiintyvät Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueella ja koko muulla tutkimusalueella vuorokausi- ja tuntipitoisuudet ovat selvästi ohjearvoa pienempiä. Typpidioksidipitoisuuden vuosiraja-arvoon ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja tuntiraja-arvoon ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet alittuvat koko Kajaanin tutkimusalueella. Korkeimmat vuosi- ja tuntiraja-arvoon verrannolliset pitoisuudet muodostuvat Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle.



Kuva F. Leviämismallilaskelmilla saatujen ulkoilman korkeimpien typpidioksidipitoisuuksien (NO_2) suhde ilmanlaadun terveysvaikutusperusteisiin ohje- ja raja-arvoihin Kajaanin tutkimusalueella. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvotasoa, johon pitoisuuksia verrataan.

4.1.2 Typpidioksidipitoisuudet Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella

Leviämismallilaskelmien tuloksina saadut ulkoilman typpidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella on esitetty taulukossa 5. Taulukossa on esitetty erikseen pistemäisistä päästölähteistä, liikenteestä ja kaikista päästölähteistä yhdessä aiheutuvat pitoisuudet. Leviämismallilaskelmilla saatujen pistemäisten päästölähteiden typpidioksidipitoisuuksien alueellinen vaihtelu käy ilmi raportin liitekuvista 10 ja 12. Kaikkien päästölähteiden kokonaispäästöistä aiheutuneiden typpidioksidipitoisuuksien alueellinen vaihtelu on esitetty liitekuviissa 11 ja 13. Laskelmissa on huomioitu typpidioksidin alueellinen taustapitoisuus sekä typenoksidipäästöjen ilmakemiallinen muutunta kulkeutumisen aikana.

Taulukko 5. Leviämismallilaskelmilla saadut pistemäisten päästölähteiden, liikenteen ja kaikkien päästölähteiden aiheuttamat ulkoilman typpidioksidipitoisuuksien maksimi-arvot vuosina 2005–2007 Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Kaikkien päästölähteiden sarakkeessa on huomioitu typpidioksidin alueellinen taustapitoisuus.

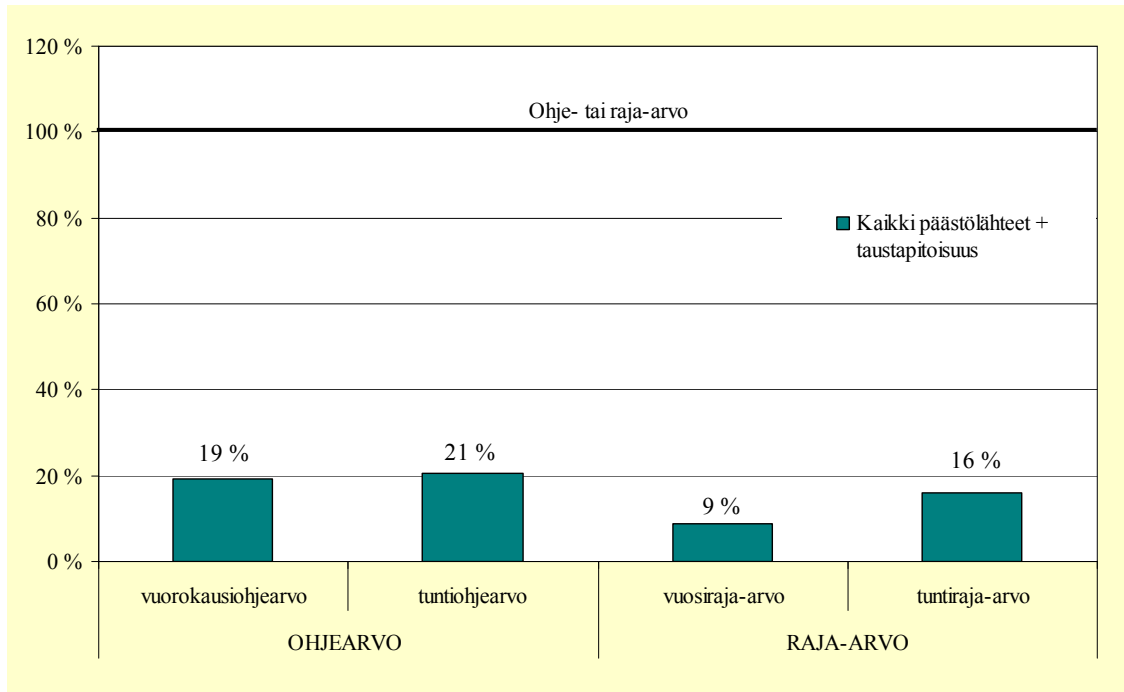
Typpidioksidipitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Raja- tai ohjearvo	Pistemäiset päästölähteet	Liikenne	Kaikki päästölähteet
Vuosikeskiarvo	40	0,1	2,6	3,5
Korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	70	0,9	13	14
Korkein tuntiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	150	1,7	29	31
Korkein tuntiraja-arvoon verrannollinen pitoisuus	200	1,7	31	32

Suurimmat pistemäisten päästölähteiden aiheuttamat typpidioksidipitoisuudet muodostuvat vallitsevien tuulensuuntien mukaisesti päästölähteiden pohjois- ja koillispuolelle (liitekuva 10). Suurimmat pitoisuudet syntyvät Otanmäen kahden lämpökeskuksen lähiympäristöön, koska niiden typenoksidien yhteispäästö (31 t/a) on huomattavasti suurempi kuin Vuolijoen lämpökeskuksen typenoksidipäästö (2,5 t/a).

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman typenoksidipitoisuuksista Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueen kokonaistypenoksidipitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän, eikä kokonaispäästöjen aluejakaumakuvista (liitekuvat 11 ja 13) pysty erottamaan yksittäisten pistelähteiden vaikutusta pitoisuustasoihin.

Kuvassa G esitetään leviämislaskelmien tuloksina saatujen Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueen suurimpien typpidioksidipitoisuuksien suhde maassamme voimassa oleviin ilmanlaadun raja- ja ohjearvoihin. Typpidioksidin vuorokausiohjearvoon ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja tuntiohjearvoon ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet olivat suurimmillaan noin 20 % ohjearvoista. Typpidioksidin vuosiraja-arvoon ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet olivat suurimmillaan 9 % raja-arvosta ja tuntiraja-arvoon ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet 16 % raja-arvosta. Suurimmat pitoisuudet esiintyivät Otanmä-

en läpi kulkevan valtatie 28 varrella ja Vuottolahden taajamassa sijaitsevalla teiden 28 ja 879 risteysalueella. Pitoisuudet laskevat nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylistä ja suurella osalla Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella pitoisuudet ovat typpidioksidin taustapitoisuuden tasolla.



Kuva G. Leviämismallilaskelmilla saatujen ulkoilman korkeimpien typpidioksidipitoisuuksien (NO_2) suhde ilmanlaadun terveysvaikutusperusteisiin ohje- ja raja-arvoihin Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvotasoa, johon pitoisuuksia verrataan.

4.2 Hengitettävien hiukkasten (PM_{10}) pitoisuudet

4.2.1 Hiukkaspitoisuudet Kajaanin tutkimusalueella

Leviämismallilaskelmien tuloksina saadut ulkoilman hengitettävien hiukkasten (PM_{10}) pitoisuuksien maksimi-arvot Kajaanin tutkimusalueella on esitetty taulukossa 6. Taulukossa on esitetty erikseen pistemäisistä päästölähteistä, liikenteestä ja kaikista päästölähteistä yhdessä aiheutuvat pitoisuudet. Leviämismallilaskelmilla saatujen pistemäisten päästölähteiden hiukkaspitoisuuksien alueellinen vaihtelu käy ilmi raportin liitekuvista 17 ja 20. Kaikkien päästölähteiden kokonaispäästöistä aiheutuneiden typpidioksidipitoisuuksien alueellinen vaihtelu on esitetty liitekuviissa 18–19 ja 21–22. Laskelmissa on huomioitu hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus (vuosikeskiarvona noin $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Taulukko 6. Leviämismallilaskelmilla saadut pistemäisten päästölähteiden, liikenteen ja kaikkien päästölähteiden aiheuttamat ulkoilman hiukkaspitoisuuksien maksimiarvot vuosina 2005–2007 Kajaanin tutkimusalueella. Kaikkien päästölähteiden sarakkeessa on huomioitu hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus.

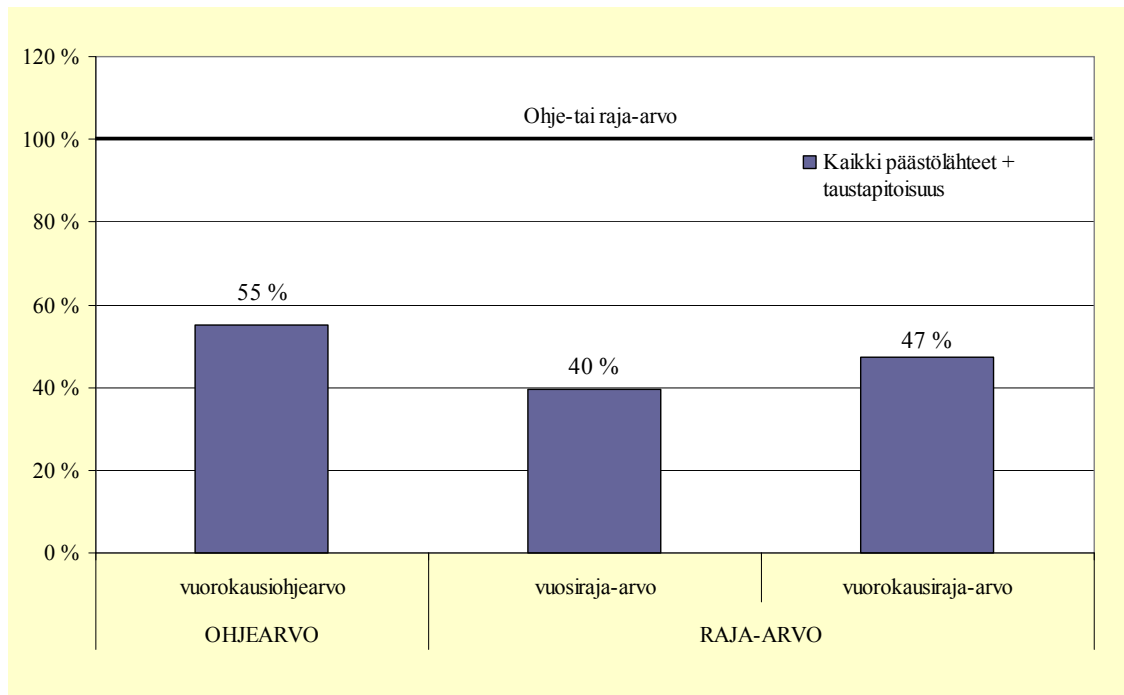
Hiukkaspitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Raja- tai ohjearvo	Pistemäiset päästölähteet	Liikenne	Kaikki päästölähteet
Vuosikeskiarvo (PM_{10})	40	0,2	9,1	16
Korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	70	5,1	33	39
Korkein vuorokausiraja-arvoon verrannollinen pitoisuus	50	0,3	17	24

Suurimmat pistemäisten päästölähteiden aiheuttamat hengitettävien hiukkasten pitoisuudet muodostuvat vallitsevien tuulensuuntien mukaisesti päästölähteiden pohjois- ja koillispuolelle (liitekuva 17). Kainuun Voima Oy:n voimalaitoksen ympärille muodostuu selvä katvealue, jolla pitoisuudet ovat minimissään ja kasvavat lyhyellä etäisyydellä nopeasti.

Korkeimmat liikenteen päästöjen aiheuttamat hiukkaspitoisuudet syntyvät Kajaanin ydinkeskustan alueelle sekä vilkasliikenteisimpien teiden varsille ja suurimmille risteysalueille. Korkeimpien pitoisuuksien alueita muodostuu Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle sekä Lönnrotinkadun, Pohjolankadun, Kauppakadun ja Sotkamontien varrelle. Pitoisuudet laskevat nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylistä. Suurella osalla Kajaanin tutkimusaluetta hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat taustapitoisuuden tasolla (liitekuva 18).

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista Kajaanin tutkimusalueella. Pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueen kokonaishiukkaspitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän, eikä kaikkien päästölähteiden aluejakaumakuvista juurikaan pysty erottamaan yksittäisten pistelähteiden vaikutusta pitoisuustasoihin (liitekuvat 18 ja 21).

Kuvassa H esitetään leviämislaskelmien tuloksina saatujen Kajaanin tutkimusalueen suurimpien hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien suhde maassamme voimassa oleviin ilmanlaadun raja- ja ohjearvoihin. Hiukkasten vuorokausiohjearvoon ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannollinen pitoisuus oli suurimmillaan 55 % ohjearvosta. Hiukkasten vuosiraja-arvoon ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet olivat suurimmillaan 40 % raja-arvosta ja vuorokausiraja-arvoon ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet 47 % raja-arvosta. Suurimmat pitoisuudet muodostuvat Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle.



Kuva H. Leviämismallilaskelmilla saatujen ulkoilman korkeimpien hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien (PM_{10}) suhde ilmanlaadun terveysvaikutusperusteisiin ohje- ja raja-arvoihin Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvotasoa, johon pitoisuuksia verrataan.

4.2.2 Hiukkaspitoisuudet Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella

Leviämismallilaskelmien tuloksina saadut ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien maksimi-arvot Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella on esitetty taulukossa 7. Taulukossa on esitetty erikseen pistemäisistä päästölähteistä, liikenteestä ja kaikista päästölähteistä yhdessä aiheutuvat pitoisuudet. Leviämismallilaskelmilla saatu pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkaspitoisuuksien alueellinen vaihtelu käy ilmi raportin liitekuvista 23 ja 25. Kaikkien päästölähteiden kokonaispäästöistä aiheutuneiden hiukkaspitoisuuksien alueellinen vaihtelu on esitetty liitekuvissa 24 ja 26. Laskelmissa on huomioitu hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus.

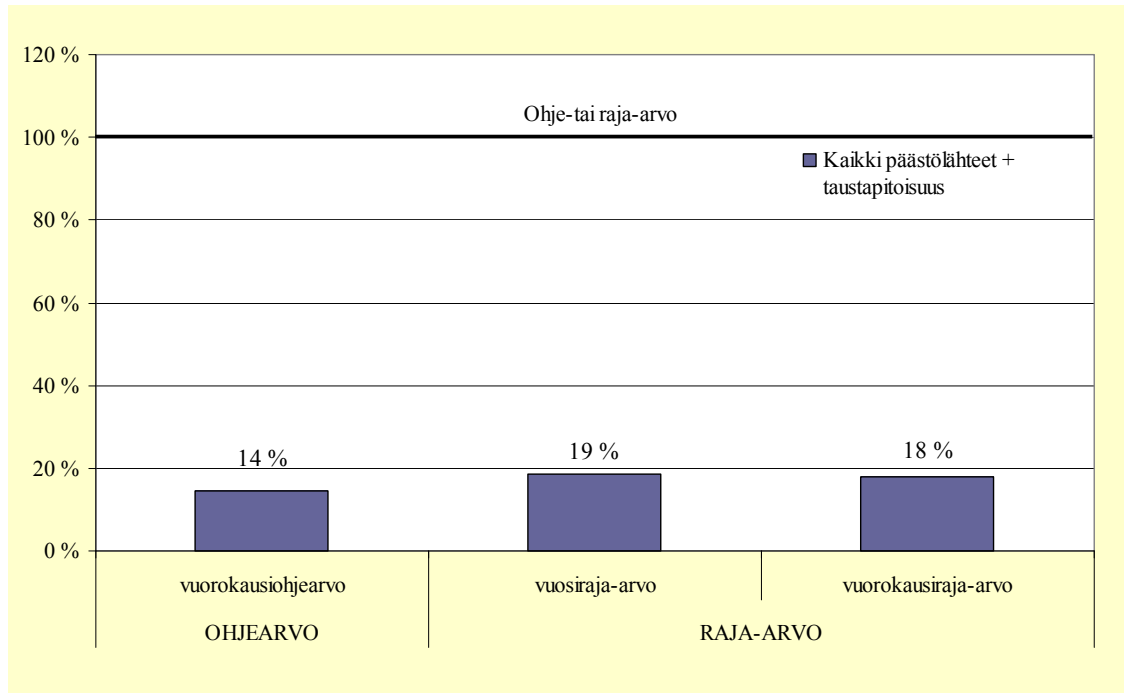
Taulukko 7. Leviämismallilaskelmilla saadut pistemäisten päästölähteiden, liikenteen ja kaikkien päästölähteiden aiheuttamat ulkoilman hiukkaspitoisuuksien maksimiavot vuosina 2005–2007 Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Kaikkien päästölähteiden sarakkeessa on huomioitu hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus.

Hiukkaspitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Raja- tai ohjearvo	Pistemäiset päästölähteet	Liikenne	Kaikki päästölähteet
Vuosikeskiarvo (PM_{10})	40	0,2	0,7	7,4
Korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus	70	1,8	3,3	10
Korkein vuorokausiraja-arvoon verrannollinen pitoisuus	50	0,8	1,5	9,0

Suurimmat pistemäisten päästölähteiden aiheuttamat hiukkaspitoisuudet muodostuvat vallitsevien tuulensuuntien mukaisesti päästölähteiden pohjoispuolille (liitekuva 23). Sekä Vuolijoen lämpökeskuksen että Otanmäen kahden lämpökeskuksen lähiympäristöön muodostuvat kohonneiden pitoisuuksien alueet. Pitoisuudet ovat molemmilla alueilla samaa suuruusluokkaa koska Vuolijoen lämpökeskuksen hiukkaspäästömäärässä (2,8 t/a) ei ollut merkittävää eroa verrattuna Otanmäen kahden lämpökeskuksen hiukkasten yhteispäästömäärään (4,3 t/a).

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueen kokonaishiukkaspitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän. Hiukkaspitoisuudet laskevat nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylistä. Suurimmalla osalla Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusaluetta hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat taustapitoisuuden tasolla (liitekuva 24).

Kuvassa I esitetään leviämislaskelmien tuloksina saatujen Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueen suurimpien hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien suhde maassamme voimassa oleviin ilmanlaadun raja- ja ohjearvoihin. Laskelmissa on otettu huomioon sekä pistemäisten päästölähteiden ja liikenteen päästöjen aiheuttama pitoisuus että taustapitoisuus. Hiukkasten vuorokausiohjearvoon ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannollinen pitoisuus oli suurimmillaan 14 % ohjearvosta. Hiukkasten vuosiraja-arvoon ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet olivat suurimmillaan 19 % raja-arvosta ja vuorokausiraja-arvoon ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verrannolliset pitoisuudet 18 % raja-arvosta. Suurimmat pitoisuudet esiintyivät Otanmäen läpi kulkevan valtatie 28 varrella ja Vuolijoen ja Vuottolahden välillä kulkevan tien 879 varrella sekä Vuottolahden taajamassa sijaitsevalla teiden 28 ja 879 risteysalueella. Pitoisuudet laskevat nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylistä.



Kuva I. Leviämismallilaskelmilla saatujen ulkoilman korkeimpien hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien (PM_{10}) suhde ilmanlaadun terveystaustaperusteisiin ohje- ja raja-arvoihin Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai rajatasoa, johon pitoisuuksia verrataan.

4.3 Mallilaskelmien tulosten vertailu ilmanlaadun mittauksiin

Kajaanin kaupunki on mitannut ilmanlaatua jatkuvatoimisesti kahdella ilmanlaadun mittausasemalla, jotka sijaitsevat kaupungin keskustassa Pohjolankadun ja Lönnrotinkadun risteysalueen läheisyydessä. Mittausasemalla ”Kajaanin keskusta”, joka sijaitsee Kajaanin kaupungintalon sisäpihalla, on mitattu typenoksideja (NO , NO_2 , NO_x) vuodesta 1991 maaliskuuhun 2008 asti ja hengitettäviä hiukkasia vuosina 1993–1997. Hengitettävien hiukkasten mittaus siirrettiin vuonna 1997 kaupungintalon Lönnrotinkadun puoleiselle seinustalle (asema ”Kajaanin keskusta 2”), jossa hengitettäviä hiukkasia mitattiin maaliskuuhun 2008 saakka. Huhtikuusta 2008 Kajaanin ilmanlaatumittauksia on hoitanut Ilmatieteen laitos ja nykyinen mittausasema (”Kajaanin keskusta 3”) sijaitsee Lönnrotinkadun varressa kaupunginteatterin kohdalla. Kajaanin keskustan mittausasemien merkityksellisimpiä liikenneväyliä ilmanlaadun kannalta ovat Lönnrotinkatu, Kauppakatu ja Pohjolankatu.

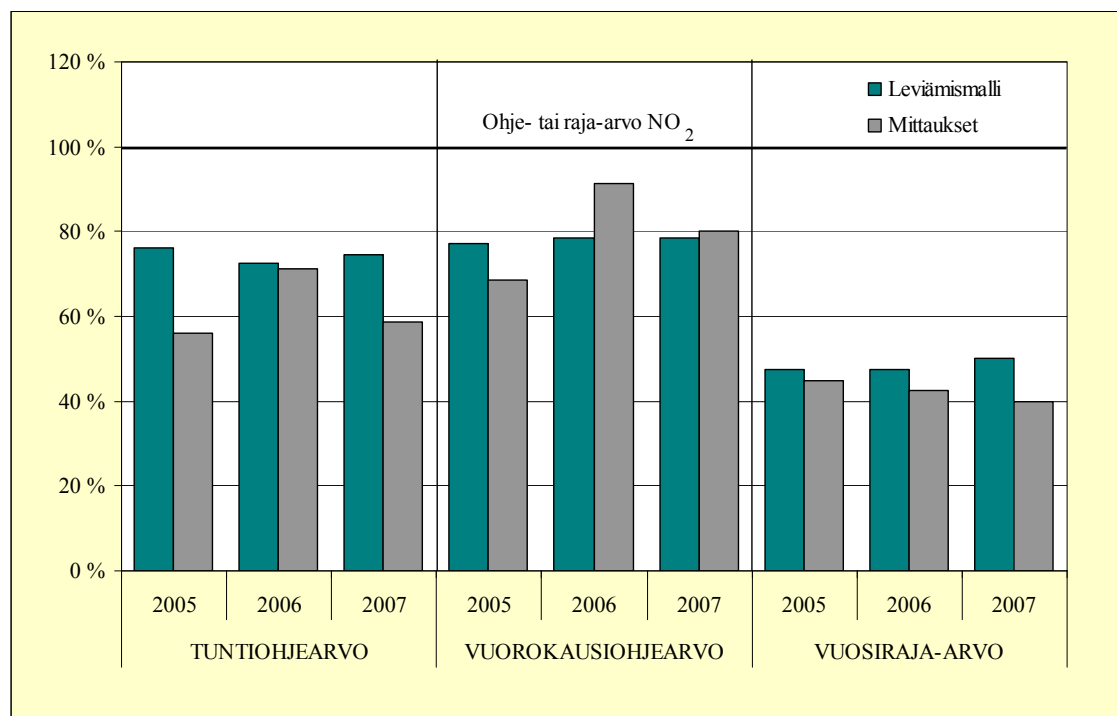
4.3.1 Typpidioksidipitoisuuksien vertailu mittaustuloksiin

Taulukossa 8 on esitetty kaupungintalon sisäpihan mittausasemalla (Kajaanin keskusta) mitattuja ulkoilman typpidioksidipitoisuuksia (ILSE, 2009) sekä leviämismallilla samaan pisteeseen laskettuja typpidioksidipitoisuuksia samoilta ajanjaksoilta. Leviämismallilla lasketussa pitoisuudessa on huomioitu pistemäisten päästölähteiden ja

liikenteen päästöjen aiheuttamat pitoisuudet sekä alueellinen taustapitoisuus. Kuvassa J on esitetty pylväin mittausasemalla vuosina 2005–2007 mitattujen typpidioksidipitoisuuksien ja leviämismallilla samaan pisteeseen laskettujen pitoisuuksien suhde maassamme voimassa oleviin typpidioksidin ohje- ja raja-arvoihin. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvoa, johon pitoisuuksia verrataan.

Taulukko 8. Ilmanlaadun mittausasemalla (Kajaanin keskusta) mitatut ulkoilman typpidioksidipitoisuudet ja leviämismallilla mittausaseman kohdalle lasketut vastaavat typpidioksidipitoisuudet vuosina 2005–2007. Leviämismallilla lasketuissa pitoisuuksissa on otettu huomioon piste-mäisten päästölähteiden ja liikenteen päästöt sekä typpidioksidin alueellinen taustapitoisuus.

Typpidioksidipitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2005		2006		2007	
	mittaus	malli	mittaus	malli	mittaus	malli
Vuosikeskiarvo	18	19	17	19	16	20
Korkein vuorokausiohjarvoon verrannollinen pitoisuus	48	54	64	55	56	55
Korkein tuntiohjarvoon verrannolli- nen pitoisuus	84	114	107	109	88	112



Kuva J. Kajaanin keskustan ulkoilman tarkkailumittausten typpidioksidipitoisuudet vuosilta 2005–2007 (ILSE, 2009) ja leviämismallilaskelmilla saadut typpidioksidipitoisuudet samassa pisteessä. Pitoisuuksia on verrattu maassamme voimassa oleviin ulkoilman typpidioksidipitoisuudelle määritettyihin raja- ja ohjarvoihin. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa raja- tai ohjarvoa.

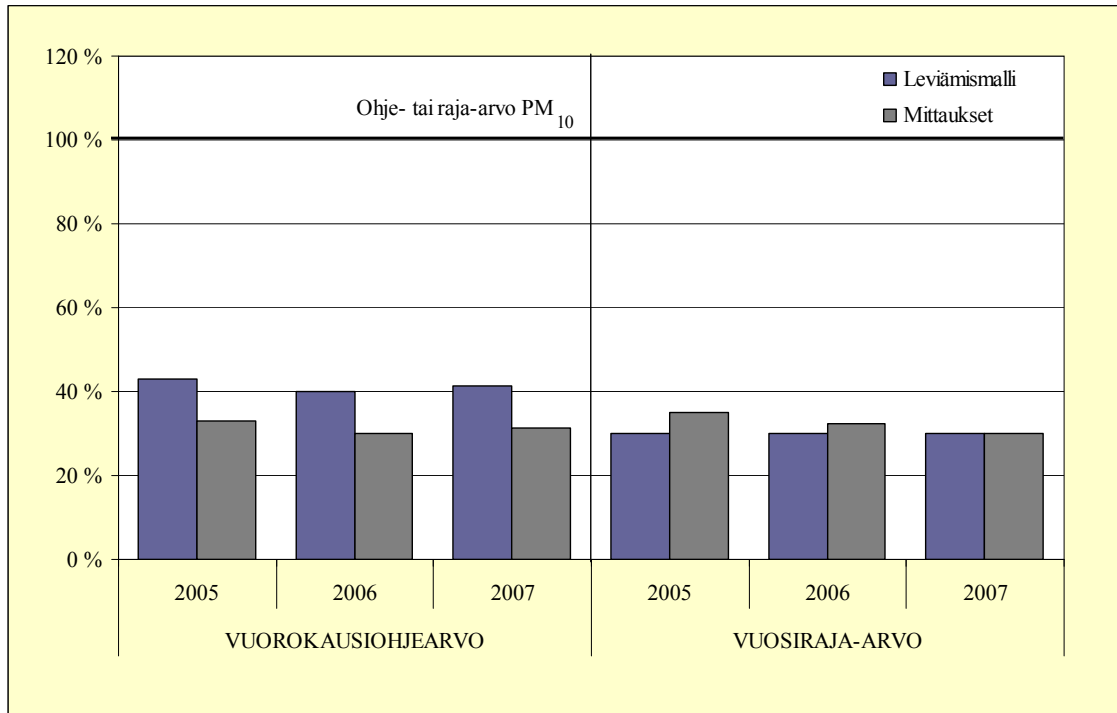
Leviämislaskelmilla saadut typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudet ovat hieman mitattuja arvoja korkeampia. Ero selittyy etenkin sillä, että typenoksidien mittauspiste sijaitsi kaupungintalon sisäpihalla ja malli ei yksityiskohtaisesti huomioi rakennusten tai muiden esteiden vaikutusta päästöjen leviämisolosuhteisiin. Mallinnuksessa rakennusten ja muiden esteiden vaikutus päästöjen leviämiseen käsitellään kaupunkialueen ns. yleisenä rosoisuutena. Vuosiraja-arvoon verrannollisten pitoisuuksien ero vaihteli mittausten ja mallinnuksen välillä 5–20 % vuodesta riippuen. Tuntiohjeeseen verrannollisten pitoisuuksien ero vaihteli mittausten ja mallinnuksen välillä noin 2–25 % ja vuorokausiohjeeseen verrannolliset pitoisuudet noin 2–11 %. Ottaen huomioon sekä mallinnuksen että mittauksien epävarmuudet, voidaan tulosten yhteensopivuuden arvioida olevan hyvä.

4.3.2 Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien vertailu mittaustuloksiin

Taulukossa 9 on esitetty Lönrotinkadun mittausasemalla (Kajaanin keskusta 2) mitattuja ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia (ILSE, 2009) sekä leviämismallilla samaan pisteeseen laskettuja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia samoina ajanjaksoina. Leviämismallilla lasketussa pitoisuudessa on huomioitu pistemäisten päästölähteiden ja liikenteen päästöjen aiheuttamat pitoisuudet sekä alueellinen taustapitoisuus. Kuvassa K on esitetty pylväin mittausasemalla vuosina 2005–2007 mitattujen hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien ja leviämismallilla samaan pisteeseen laskettujen suhde maassamme voimassa oleviin hengitettävien hiukkasten ohje- ja raja-arvoihin. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvoa, johon pitoisuuksia verrataan.

Taulukko 9. Ilmanlaadun mittausasemalla (Kajaanin keskusta 2) mitatut ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ja leviämismallilla mittausaseman kohdalle lasketut vastaavat hengitettävien hiukkasten pitoisuudet vuosina 2005–2007. Leviämismallilla lasketuissa pitoisuuksissa on otettu huomioon pistemäisten päästölähteiden ja liikenteen päästöt sekä hengitettävien hiukkasten alueellinen taustapitoisuus.

Hengitettävien hiukkasten pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2005		2006		2007	
	mittaus	malli	mittaus	malli	mittaus	malli
Vuosikeskiarvo	14	12	13	12	12	12
Korkein vuorokausiohjeeseen verrannollinen pitoisuus	23	30	21	28	22	29



Kuva J. Kajaanin keskustan ulkoilman tarkkailumittausten hengitettävien hiukkasten pitoisuudet vuosilta 2005–2007 (ILSE, 2009) ja leviämismallilaskelmilla saadut hengitettävien hiukkasten pitoisuudet samassa pisteessä. Pitoisuuksia on verrattu maassamme voimassa oleviin ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuudelle määritettyihin raja- tai ohjearvoihin. Kuvassa y-akselin 100 % kuvaa ohje- tai raja-arvoa.

Leviämismallilla arvioitujen hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvojen yhteensopivuus mittaustulosten kanssa oli hyvä. Mitattujen ja mallinnettujen vuosiraja-arvoon verrannollisten pitoisuuksien ero vaihteli välillä 0–15 % ja vuorokausiohjearvoon verrannollisten pitoisuuksien ero 23–25 %. Taustapitoisuus on mallinnuksessa huomioitu keskiarvoisina pitoisuuksina, jolloin yksittäisten lyhytaikaisten kaukokulkeumien tai muiden syiden aiheuttamat korkeat pitoisuudet jäivät huomioimatta. Mallinnettujen ja mitattujen pitoisuuksien yhteensopivuuden voidaan arvioida olevan hyvä.

4.4 Mallilaskelmien tulosten epävarmuustekijät

Leviämismallilaskelmilla saatavien tulosten luotettavuuteen vaikuttavat malliin syötettävät tiedot sekä itse mallin toiminta. Mallilaskelmilla kuvataan ilmiöiden tavanomaista kehittymistä pitkällä aikavälillä yksinkertaistaen jossain määrin todellisuutta. Malliin sisältyy olettamuksia ja yksinkertaistuksia, jotka ovat välttämättömiä mallin toiminnan ja tietojen puutteellisen saatavuuden vuoksi. Leviämismallilaskelmien tuloksiin liittyy yleensä epävarmuutta sitä enemmän mitä lyhyemmän jakson pitoisuuskeskiarvoista on kyse.

Leviämismallinnusten tulosten tarkkuus riippuu päästötietojen oikeellisuudesta, päästöjen ja niiden vaihteluiden kuvaamisen tasosta mallilaskelmissa sekä meteorologisen

aineiston alueellisesta ja ilmastollisesta edustavuudesta. Mallilaskelmilla saadaan tilastollisia pitoisuusarvoja, joiden muodostumiseen vaikuttaa voimakkaasti mm. se kuinka päästöjen lyhytaikaisvaihtelu on kuvattu mallissa. Myös mallilaskelmiin lisätyn taustapitoisuuden oikeellisuus ja mahdolliset mittausvirheet vaikuttavat vertailun tuloksiin. Liikenteen ilmanlaatuvaikutuksia arvioidessa leviämismallilaskelmien tulosten epävarmuuteen vaikuttavat mallilaskelmien lähtötietoina käytetyt liikennemääräarviot ja niiden perusteella lasketut liikenteen päästömäärät. Pistemäisten päästölähteiden kohdalla tulosten epävarmuuteen vaikuttavat eri päästölähteiden päästötietojen oikeellisuus ja kattavuus.

Viivalähdemallinnuksessa suurimmat epävarmuustekijät liittyvät paikallisiin tuuliolosuhteisiin. Mallien käyttämät tuulen nopeus ja suunta ovat säähavaintoasemilla mitattuja keskiarvoja. Tällainen keskiarvo saattaa poiketa merkittävästi paikallisista tuuliolosuhteista. Mäkien, rakennusten tai metsän tuulen suuntaan ja nopeuteen aiheuttamat muutokset on malleissa huomioitu vain karkeasti. Tuulensuunnan vaihtelu kasvaa, kun tuulen nopeus pienenee. Tästä johtuen viivalähdemallinnus on ongelmallista aina kun heikon keskituulen suunta lähestyy tien suuntaa. Suuntavaihtelusta johtuen liikenteen päästöt leviävät todellisuudessa tien molemmille puolille, mutta malli käyttää keskituulen vakiosuuntaa. Tällaisissa olosuhteissa viivalähdemalli voi ennustaa pitoisuuksien tuntikeskiarvot liian suuriksi.

Alimman ilmakehän stabiilisuus eli rajakerroksen sekoittumisolosuhteet säätelevät sekä pitoisuustasoja että kemiallisia reaktioita. Erittäin stabiileissa olosuhteissa (inversiotilanteissa) sekoittuminen käytännössä estyy. Tällaisissa olosuhteissa leviämismallit voivat ennustaa typpidioksidipitoisuudet (NO_2) liian suuriksi ja vastaavasti typpi-monoksidin (NO) ja otsonin (O_3) pitoisuudet liian pieniksi. Kokonaistypenoksidien pitoisuuteen ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) tämä ei kuitenkaan oleellisesti vaikuta.

Hiukkaspitoisuuksien arviointiin leviämismalleilla sisältyy typenoksidipäästöjen mallinnusta suurempia epävarmuuksia. Hiukkaspitoisuuksista merkittävä osa on peräisin liikenteen nostattamasta katupölystä esim. kevät-pölykauden aikaan, jolloin etenkin lyhytaikaiset pitoisuudet voivat nousta hyvinkin korkeiksi. Tällaisia tilanteita on leviämismallilaskelmilla vaikea arvioida luotattavasti.

Pitoisuuksien arvioinnin luotettavuutta voidaan lisätä käyttämällä hyväksi mittaus- ja mallinnustuloksia yhdessä. Tässä työssä on mallinnettuja pitoisuuksia verrattu Kajaanissa mitattuihin pitoisuuksiin. Valtioneuvoston ilmanlaatuasetuksen (*Vna 711/2001*) mukainen laatutavoite mallintamisen epävarmuudelle on typpidioksidipitoisuuden tunti- ja vuorokausikeskiarvolle 50–60 %, typpidioksidipitoisuuden vuosikeskiarvolle 30 % ja hiukkaspitoisuuden vuosikeskiarvolle 50 %. Epävarmuus määritetään enimmäispoikkeamana mitatuista ja mallinnetuista raja-arvoihin verrannollisista pitoisuuksista ottamatta huomioon tapahtumien ajoitusta. Edellä esitetyn vertailun mukaan tässä tutkimuksessa tehdyt leviämislaskelmat täyttäisivät hyvin kyseiset laatutavoitteet.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa arvioitiin leviämislaskelmilla energiantuotannon, teollisuuden ja liikenteen päästöjen aiheuttamia typenoksidien ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia Kajaanin alueella. Mallilaskelmat toteutettiin kahdelle tutkimusalueelle, joista toinen sijaitsi Kajaanin keskustan ympäristössä ja toinen Vuolijoen ja Otanmäen taajamien ympäristössä. Tarkastelun kohteena olivat typenoksidien ja hengitettävien hiukkasten päästöt vuodelta 2007. Katujen ja teiden autoliikenteen päästöt mallinnettiin viivalähteinä ja muut laskelmissa käytetyt päästölähteet pistelähteinä. Mallinnuksessa käytettiin alueellista kattavaa kolmen vuoden meteorologista aineistoa.

Leviämismallin lähtötietoina käytetyt päästöt kattavat merkittävän osan Kajaanin alueella syntyvistä typenoksidien ja hengitettävien hiukkasten päästöistä. Laskelmissa ei kuitenkaan ole huomioitu lentoasematoiminnan ja lentoliikenteen aiheuttamia päästöjä, rautatieliikenteen päästöjä eikä puun pienpolton päästöjä (talojen lämmitys). Autoliikenteen päästöillä on suuri vaikutus kaupunkien ilmanlaatuun, koska päästöt vapautuvat matalalta ja nostavat näin hengitettävän ilman epäpuhtauspitoisuuksia. Liikenteen päästöjen aiheuttamista epäpuhtauspitoisuuksista erityisesti typpidioksidi- ja hiukkaspitoisuudet ovat nykytietämyksen mukaan terveysvaikutuksiltaan merkittäviä.

Ilman epäpuhtauspitoisuuksien muodostumiseen vaikuttaa päästömäärien lisäksi päästöjen ajallinen vaihtelu ja vallitsevat säätilanteet. Suurimpia pitoisuuksia esiintyy kaupunkialueella useimmiten liikenteen päästöjen vaikutuksesta ruuhka-aikoina. Korkeita pitoisuuksia voi syntyä myös sellaisissa meteorologisissa tilanteissa, joissa päästöjen laimeneminen on heikkoa. Tällaisia meteorologisia tilanteita voivat olla tyynet säätilanteet tai inversiotilanteet, jolloin ilman pystysuuntainen sekoittuminen on estynyt. Mallilaskelmilla on tarkasteltu pitoisuuksien muodostumista ainoastaan maanpintatasoon eikä rakennusten vaikutusta päästöjen leviämiseen ole yksityiskohtaisesti huomioitu. Ylöspäin mentäessä pitoisuudet pääsääntöisesti laimenevat ja yläkerrosten korkeudella sekä rakennusten sisäpihoilla ilmanlaadun voidaan olettaa olevan tien- vierustojen maanpintatason ilmanlaatua parempaa.

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista Kajaanin tutkimusalueella. Nykyisillä päästöillä pistemäiset päästölähteet aiheuttavat tutkimusalueen kokonaispitoisuuksiin vain hyvin pienen lisän. Kajaanin tutkimusalueen korkeimmat typpidioksidipitoisuudet ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet syntyvät Kajaanin ydinkeskustan alueelle sekä vilkasliikenteisimpien teiden varsille ja suurimmille risteysalueille. Korkeimpien pitoisuuksien alueita muodostuu etenkin Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueelle sekä kauppakadun ja Sotkamontien varrelle. Pitoisuudet laskevat nopeasti mentäessä keskusta-alueen ulkopuolelle ja suurimmalla osalla Kajaanin tutkimusaluetta pitoisuudet ovat taustapitoisuuden tasolla.

Liikenne aiheuttaa suurimman osan ulkoilman typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista myös Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella. Tutkimusalueen korkeimmat typpidioksidipitoisuudet ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet syntyvät Otanmäen läpi kulkevan valtatie 28 varrelle, Vuolijoen ja Vuottolahden välillä kulkevan maantien 879 varrelle ja Vuottolahden taajamassa sijaitsevalle teiden 28 ja 879

risteysalueelle. Pitoisuudet laskevat hyvin nopeasti etäisyyden kasvaessa liikenneväylästä ja suurimmalla osalla Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusaluetta pitoisuudet ovat taustapitoisuuden tasolla.

Epäpuhtauksien pitoisuuksia ulkoilmassa säädellään ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoilla. Ilmanlaadun ohje- ja raja-arvot tulisi ottaa huomioon esimerkiksi liikennesuunnittelussa, kaavoituksessa, rakennusten sijoittelussa ja teknisissä ratkaisuissa, jolloin pyritään etukäteen välttämään ihmisten pitkäaikainen altistuminen terveydelle haitallisen korkeille epäpuhtauspitoisuuksille. Leviämislaskelmien tulosten mukaan voidaan ilmanlaadua Kajaanin keskustassa pitää vähintään tyydyttävänä. Keskustan alueella pitoisuudet pääsääntöisesti alittavat typpidioksidille ja hengitettäville hiukkasille asetetut ohje- ja raja-arvot, mutta korkeimmillaan typpidioksidipitoisuudet voivat kuitenkin olla ohje-vojen suuruisia Lönnrotinkadun ja Pohjolankadun risteysalueella. Kajaanin keskustan alueen ulkopuolella ilmanlaatua voidaan pitää hyvänä, koska ohje- ja raja-arvot alittuvat selvästi. Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella ilmanlaatua voidaan myös pitää hyvänä, koska typpidioksidille ja hengitettäville hiukkasille asetetut ohje- ja raja-arvot alittuvat selvästi.

VIITELUETTELO

ILSE, 2009. Ilmanlaadun seurannan tietojärjestelmä (ILSE), Ilmatieteen laitos.

Karppinen, A. 2001. Meteorological pre-processing and atmospheric dispersion modelling of urban air quality and applications in the Helsinki metropolitan area. Academic dissertation. Finnish Meteorological Institute, Contributions No. 33, Helsinki

Laurikko, J. 1998. On exhaust from petrol-fuelled passenger cars at low ambient temperatures. VTT julkaisu 348. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo.

Mäkelä, K., Laurikko, J. & Kanner, H., 2008. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2007 laskentajärjestelmä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimusraportti VTT-R-05607-08.

Pietarila, H., Salmi, T., Saari H. & Pesonen, R., 2001. Ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa. Rikkidioksidi, typen oksidit, PM₁₀ ja lyijy. The preliminary assessment under the EC air quality directives in Finland. SO₂, NO₂/NO_x PM₁₀, lead. Ilmatieteen laitos, Ilmanlaadun tutkimus.

Rantakrans, E. 1990. Uusi menetelmä meteorologisten tietojen soveltamiseksi ilman epäpuhtauksien leviämismalleissa. Ilmansuojelu-uutiset 1/90, s. 18–20.

Vnp 480/96. Valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvoista.

Vna 711/2001. Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta.

LIITEKUVAT

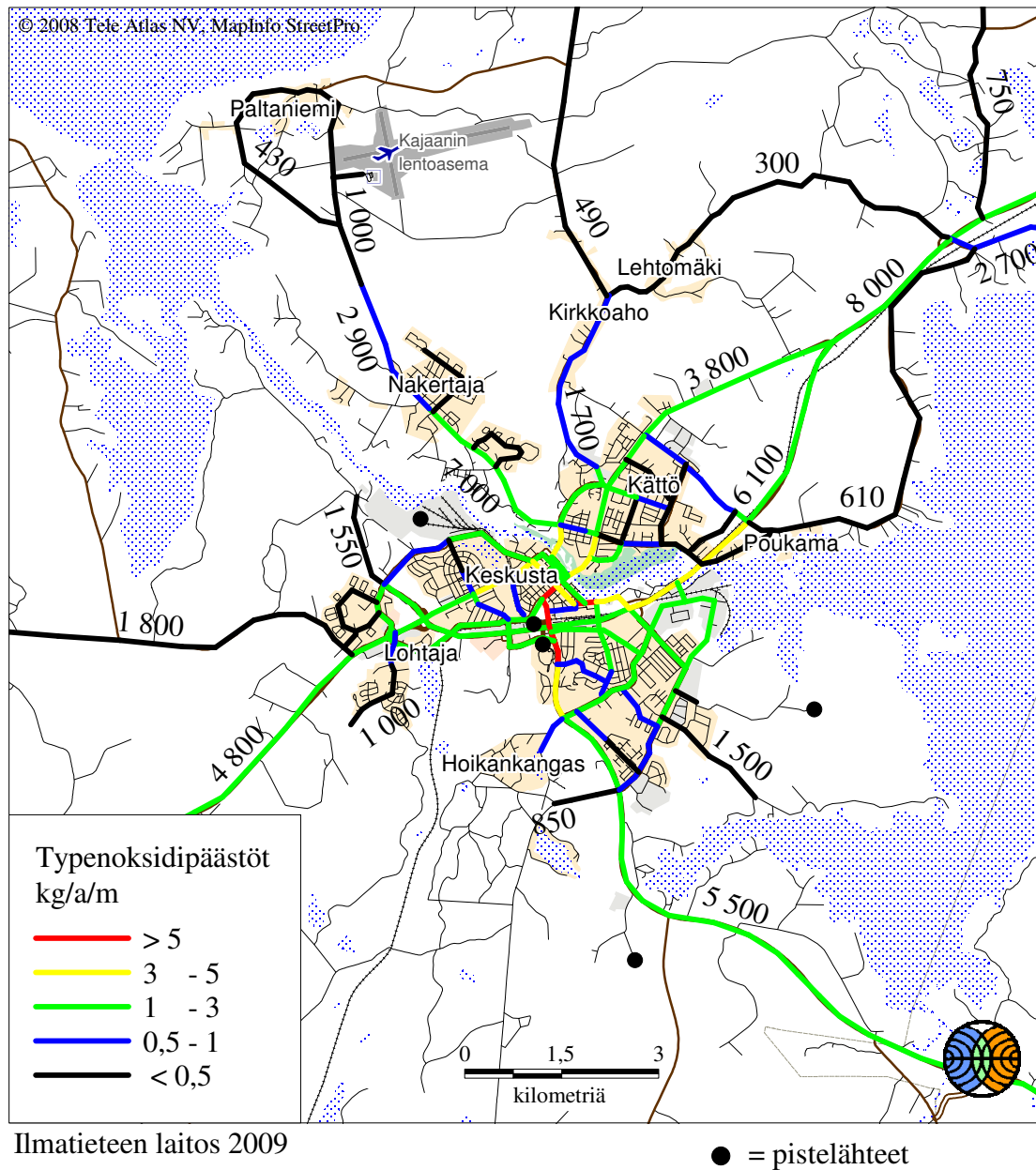
Seuraavissa karttakuvissa on esitetty laskentapisteittäisistä keskiarvoista samanarvonviivoin muodostetut korkeimpien pitoisuuksien alueet, joilla tietyn pitoisuuden ylittyminen on pitkän havaintojakson aikana todennäköistä. Laskentapiste, johon muodostui koko tutkimusalueen suurin pitoisuus, on esitetty kuvassa valkoisella tähdellä.

Pitoisuuksien aluejakaumat eivät edusta koko tulostusalueella yhtä aikaa vallitsevaa pitoisuustilannetta vaan ne kuvaavat eri päivinä ja eri tunteina esiintyvien, raja- ja ohjearvoihin verrannollisten pitoisuuksien maksimitasoa tutkimusalueen eri osissa. Suurimman osan ajasta pitoisuudet ovat kaikissa laskentapisteissä selvästi pienempiä kuin aluejakaumakuvissa esitetyt korkeimmat arvot. Lisäksi suurimmassa osassa tutkimusaluetta pitoisuudet ovat jatkuvasti merkittävästi pienempiä kuin niissä kohteissa, joissa maksimiarvot esiintyvät.

Pitoisuuksien aluejakaumissa esiintyy kohonneiden pitoisuuksien kielekkeitä, joiden sijaintiin vaikuttaa varsinkin tuulen pysyvyys pitkällä tarkastelujaksolla tietyssä ilmansuunnassa. Maanpinnan muodot voivat aiheuttaa aluejakaumiin erillisiä suppeita alueita, joissa pitoisuudet ovat joko korkeampia tai matalampia kuin lähiympäristössään.

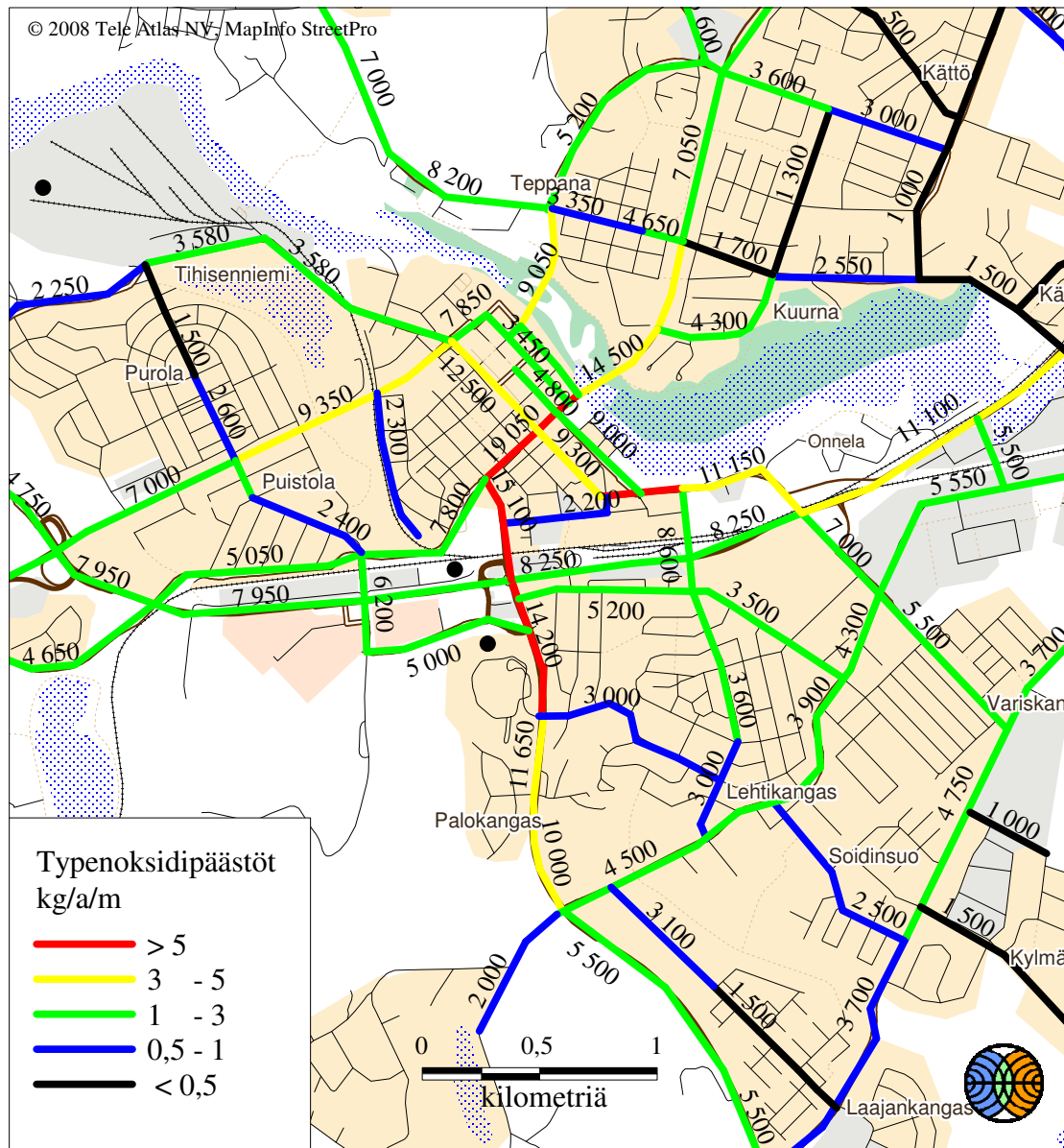
Pistemäisten päästölähteiden välittömään läheisyyteen muodostuu usein ns. katvealue, jolla pitoisuudet ovat minimissään ja kasvavat lyhyellä etäisyydellä nopeasti. Tällaisten aivan päästölähteen ympärille muodostuvien, muita arvoja matalampien pitoisuuksien alueiden laajuuteen vaikuttavat piipun korkeus ja poistokaasujen nousulisä. Nousulisää aiheuttavat poistokaasujen nousunopeus piipussa sekä ulkolämpötilan ja poistokaasujen lämpötilan välinen ero.

KAJAANI



Kuva 1. Liikenteen aiheuttamat typenoksidipäästöt (kg/a/m)
Kajaanin tutkimusalueella ja tiekohtaiset liikennemäärät
(ajoneuvoa/vrk) keskusta-alueen ulkopuolella.

KAJAANI

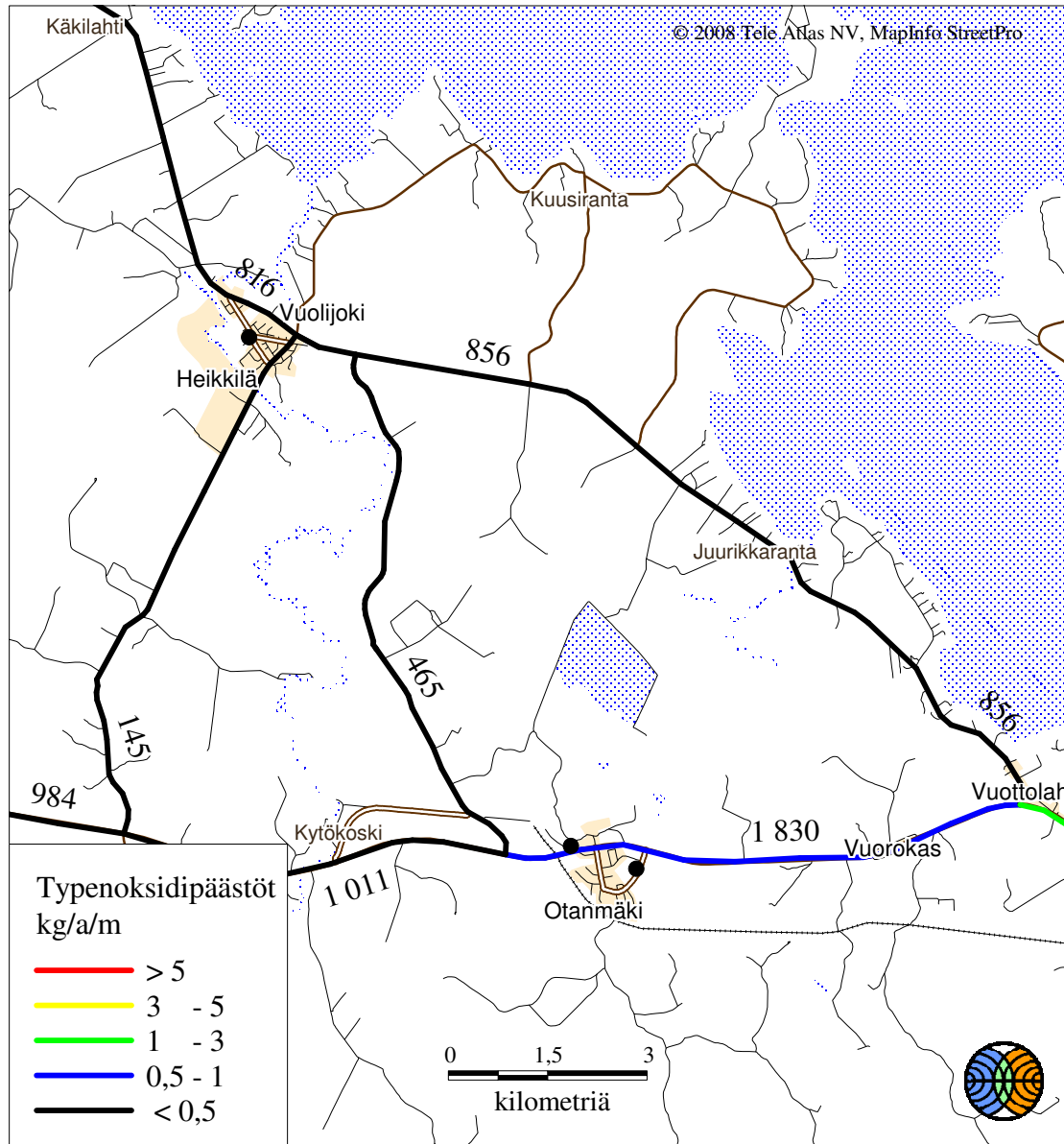


Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

Kuva 2. Liikenteen aiheuttamat typenoksidipäästöt (kg/a/m) ja tiekohtaiset liikennemäärät (ajoneuvoa/vrk) Kajaanin keskustan alueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI

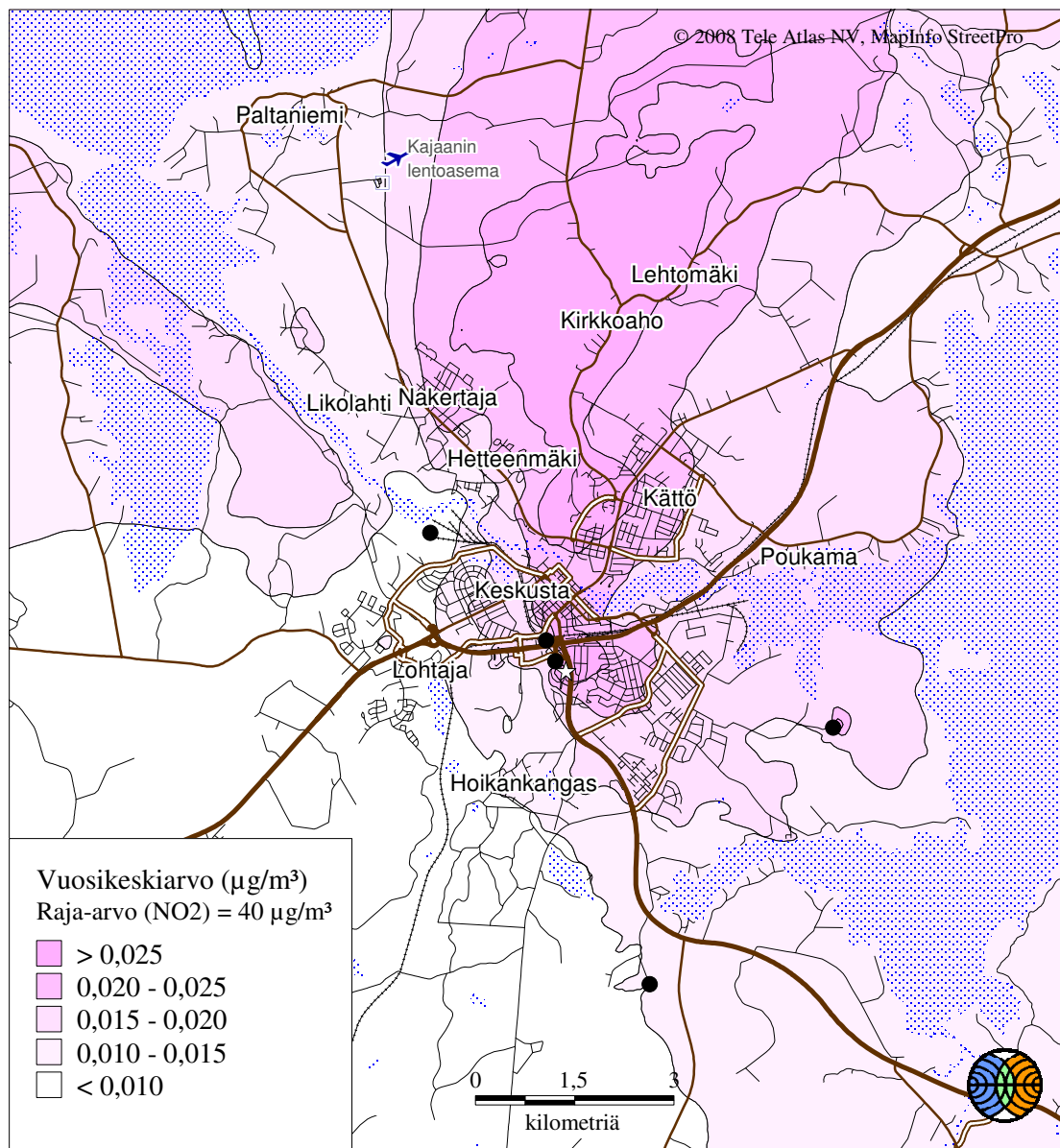


Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

Kuva 3. Liikenteen aiheuttamat typenoksidipäästöt (kg/a/m) ja tiekohtaiset liikennemäärät (ajoneuvoa/vrk) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

KAJAANI



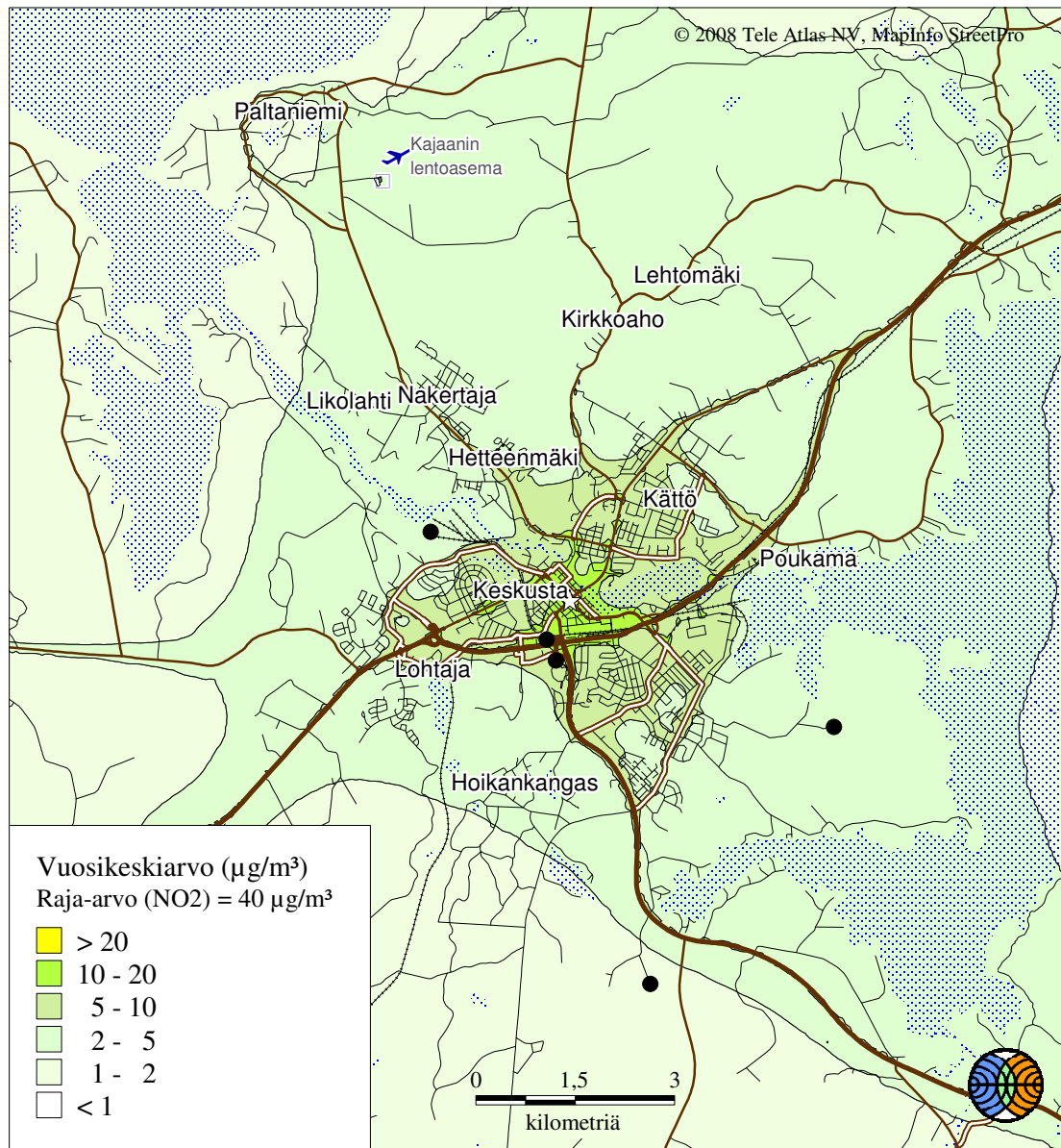
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 4. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

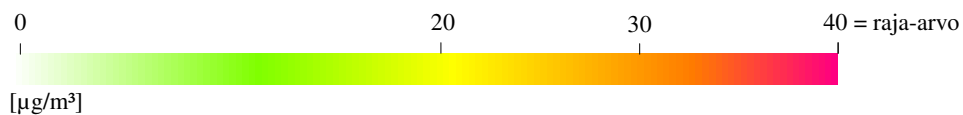
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

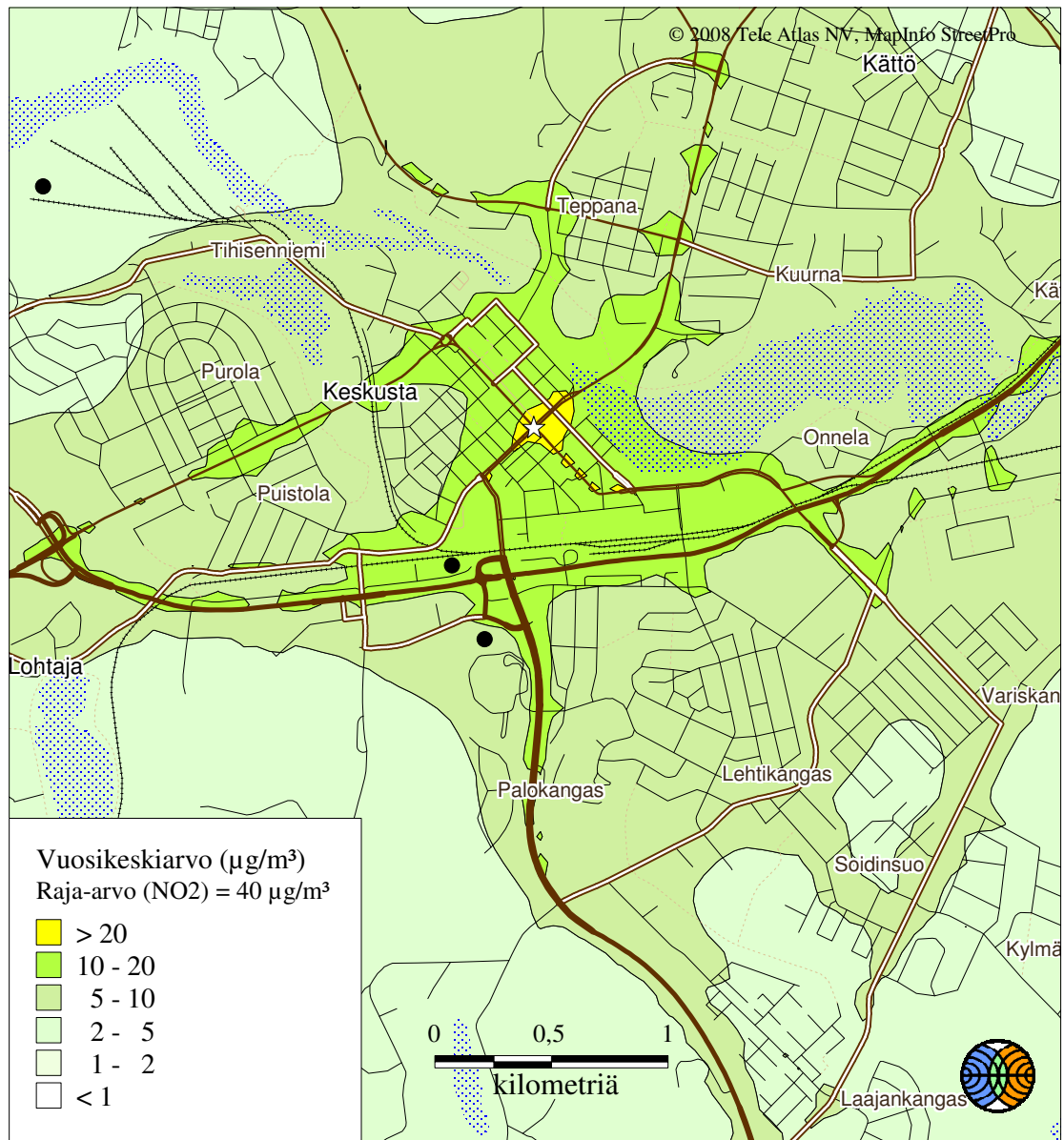
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 5. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidipitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

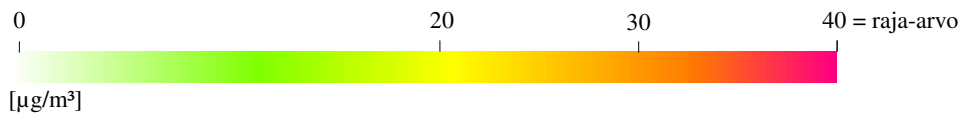
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

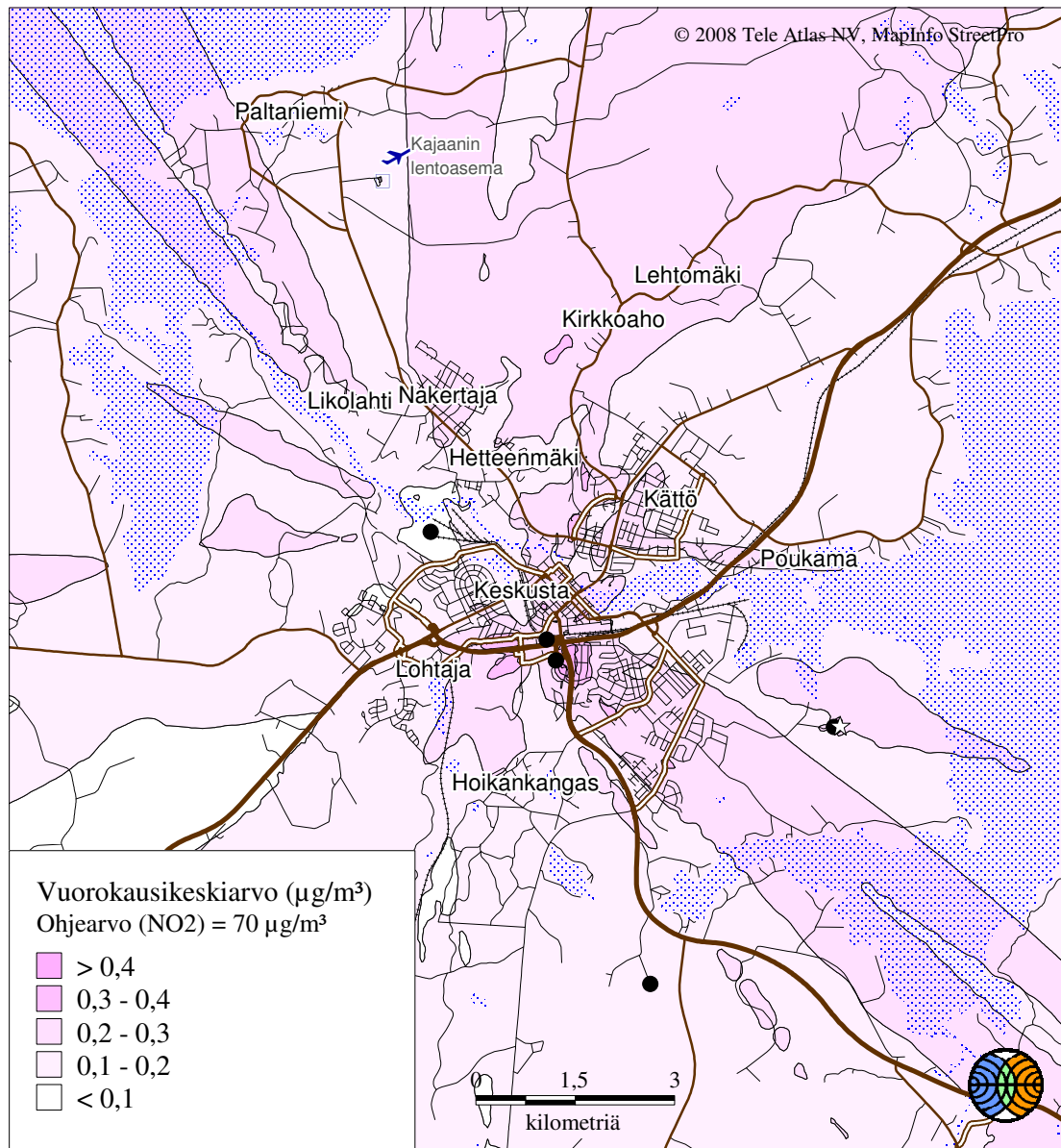
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 6. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidipitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin keskustan alueella.

KAJAANI



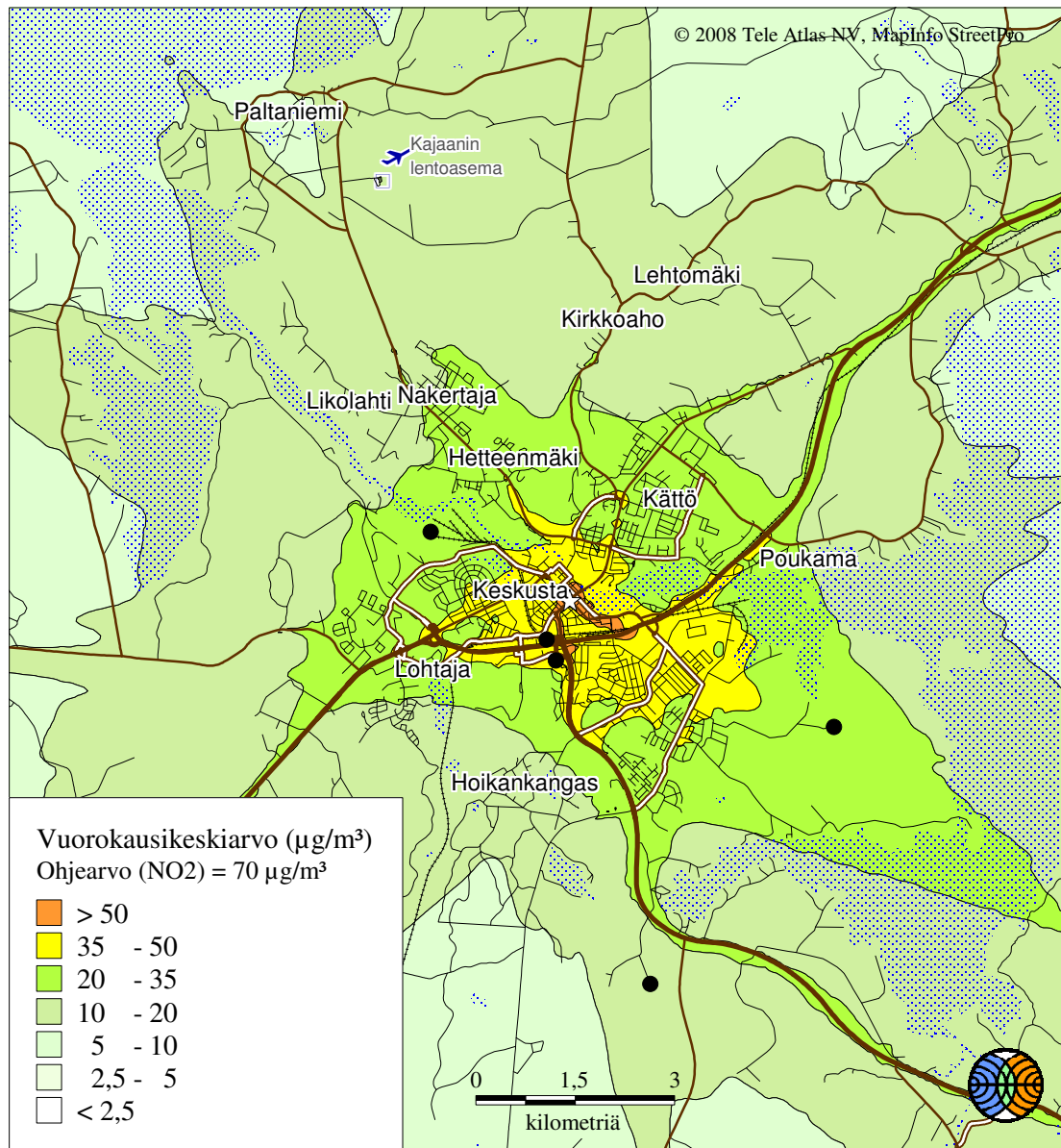
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 7. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

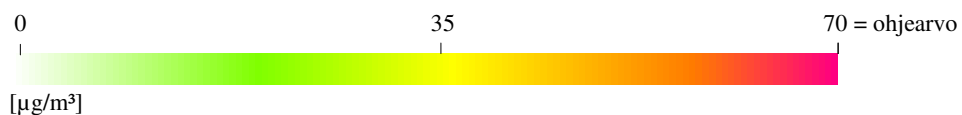
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

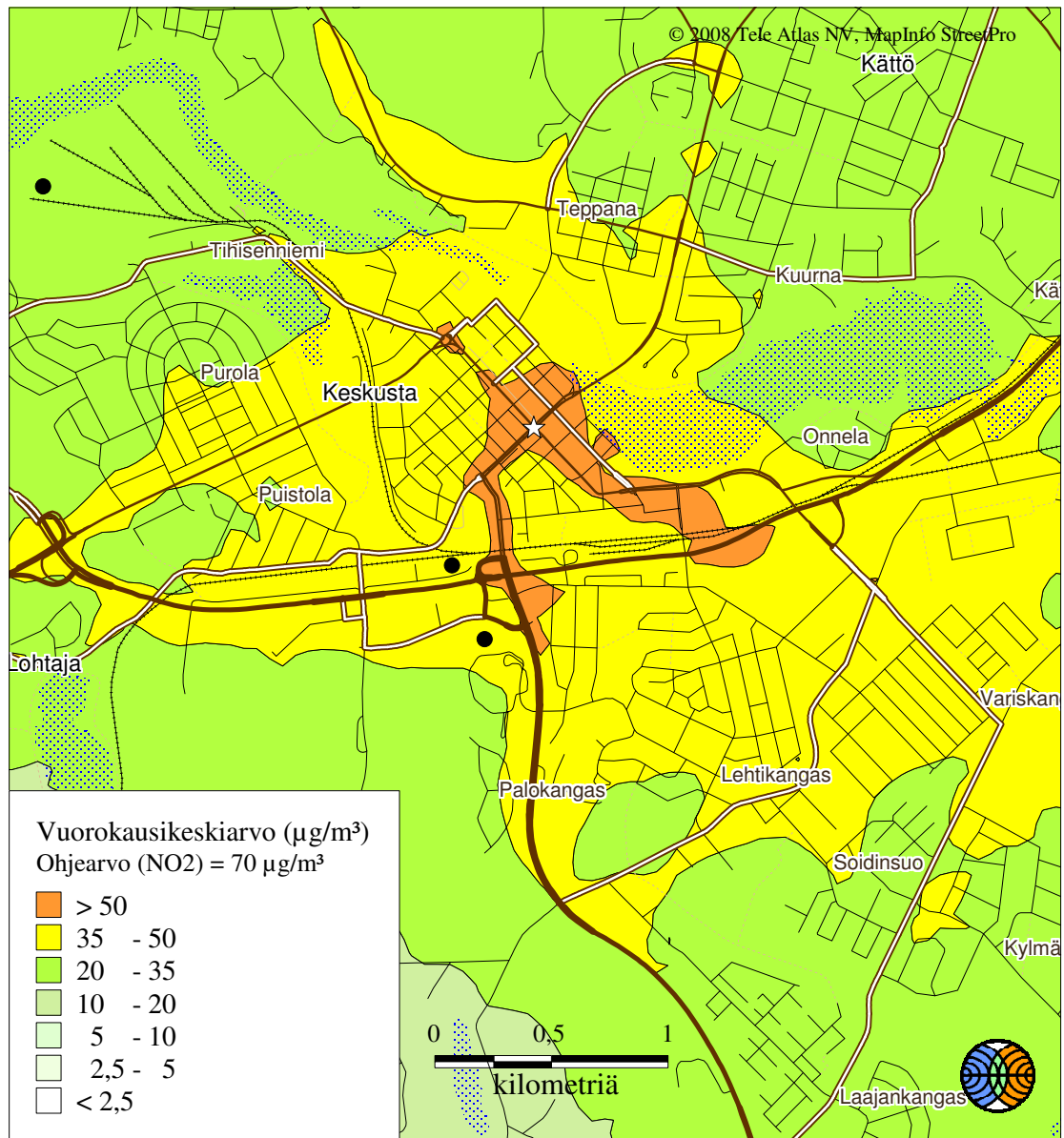
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$



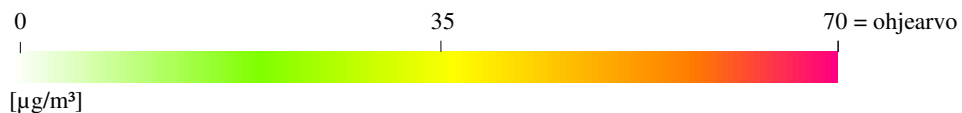
Kuva 8. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

KAJAANI



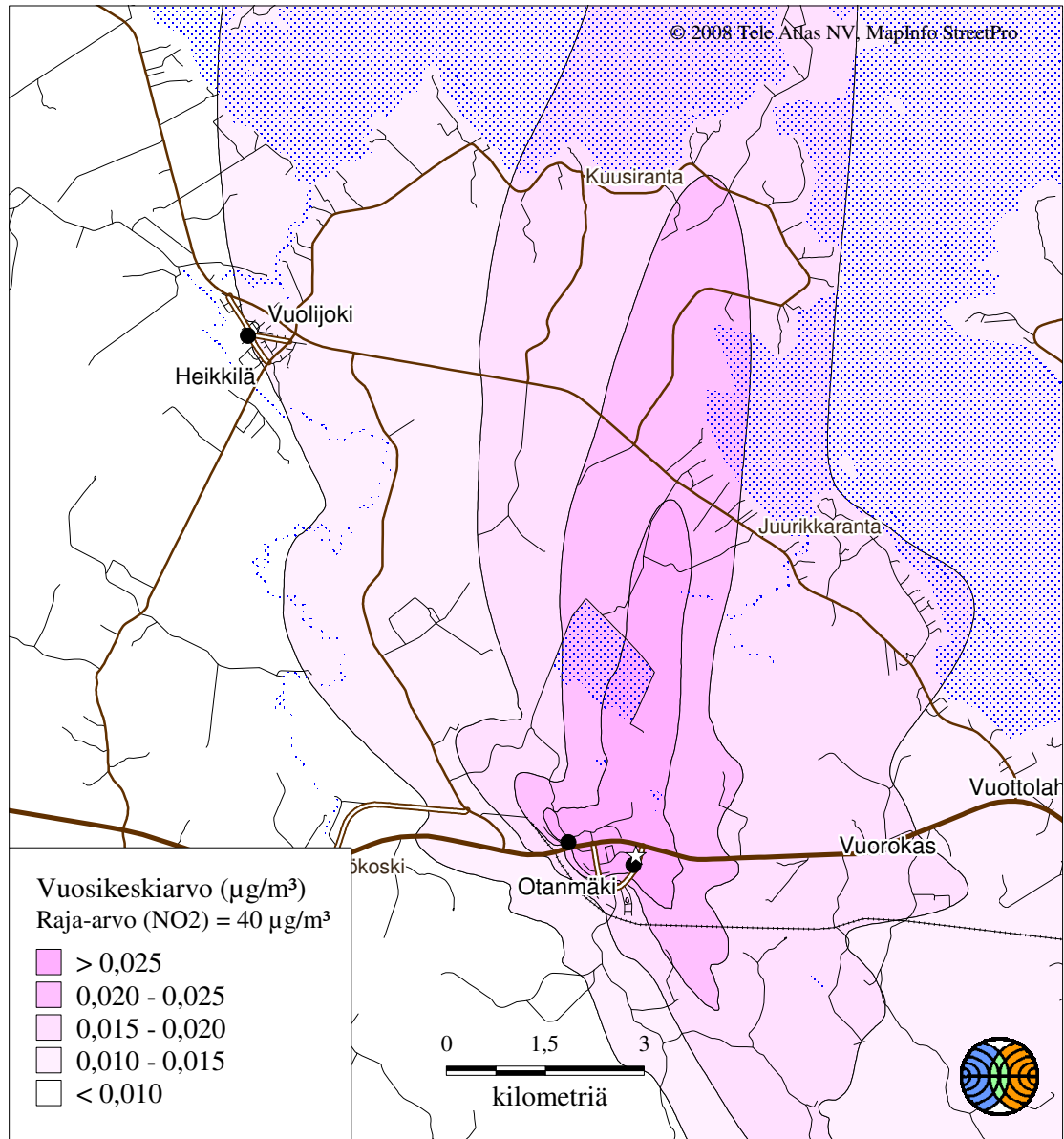
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet
☆ = maksimi = $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 9. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin keskustan alueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



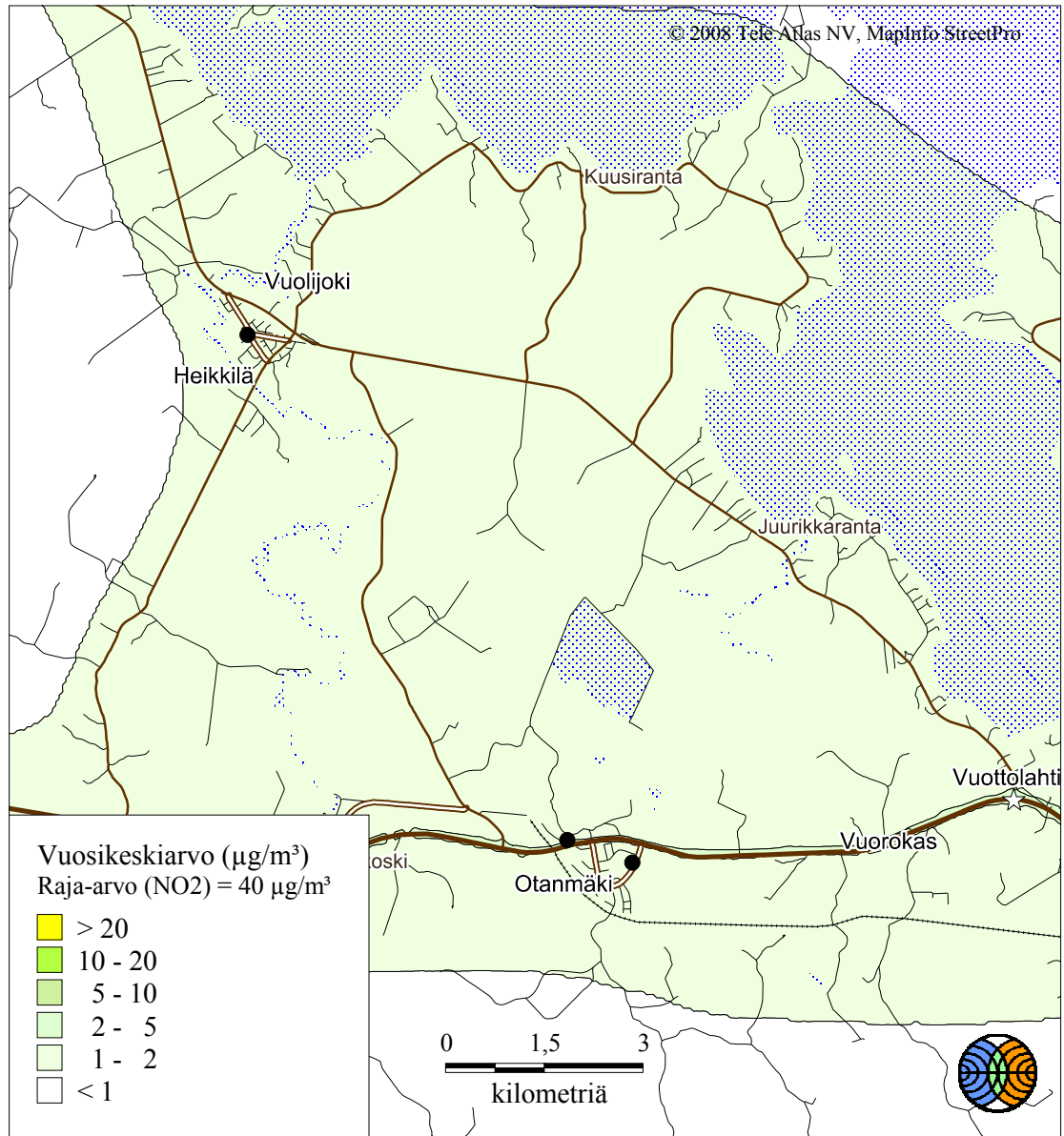
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

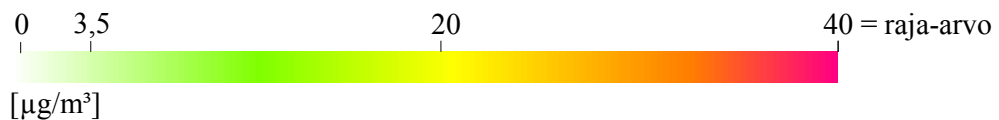
☆ = maksimi = $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 10. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI

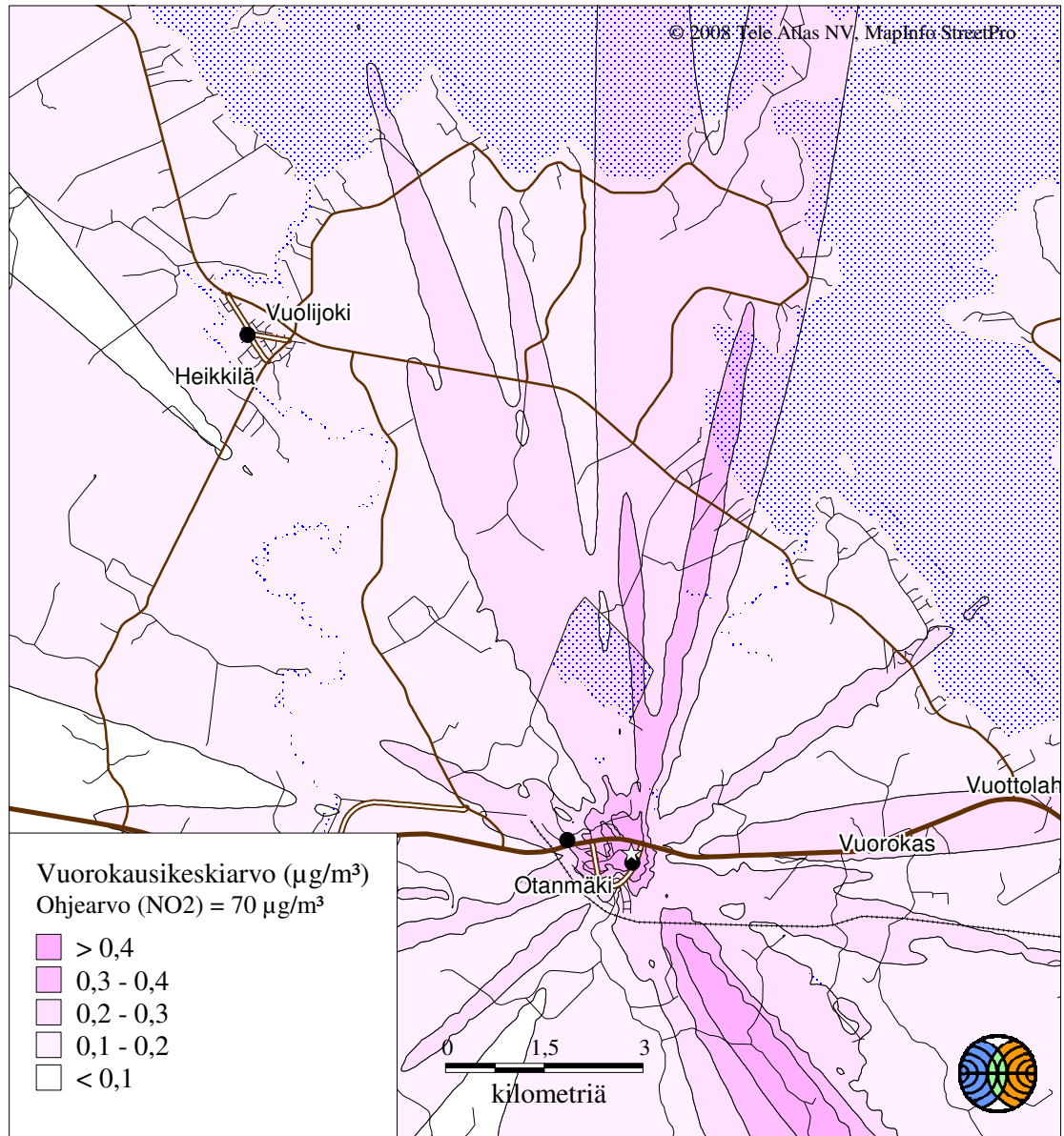


Ilmatieteen laitos 2009



Kuva 11. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidipitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



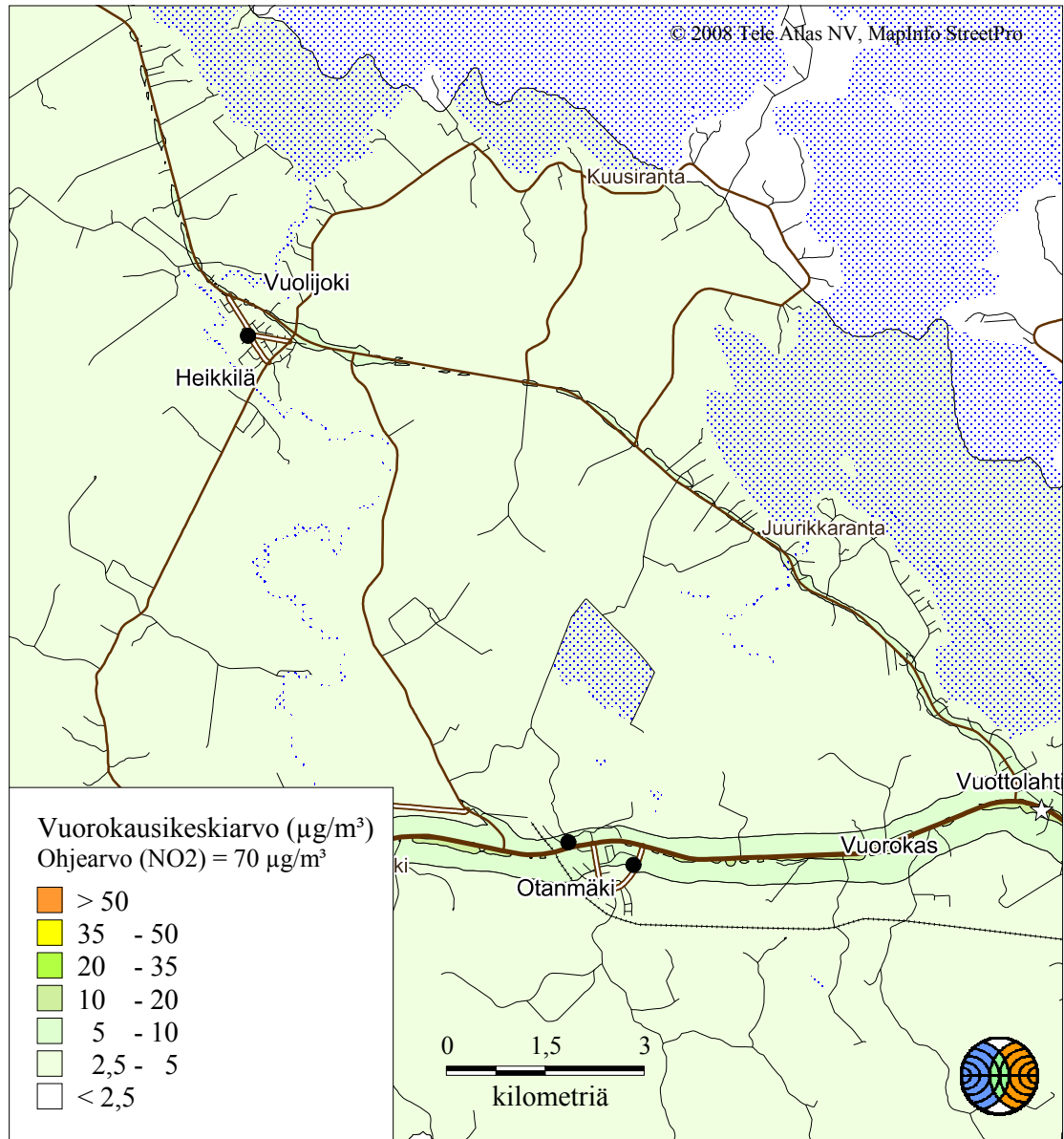
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 12. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

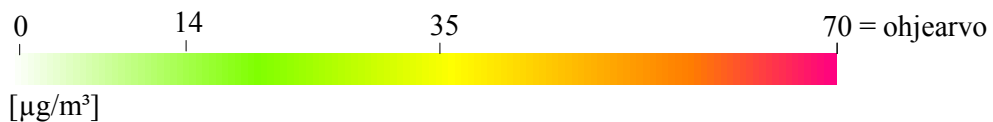
VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



Ilmatieteen laitos 2009

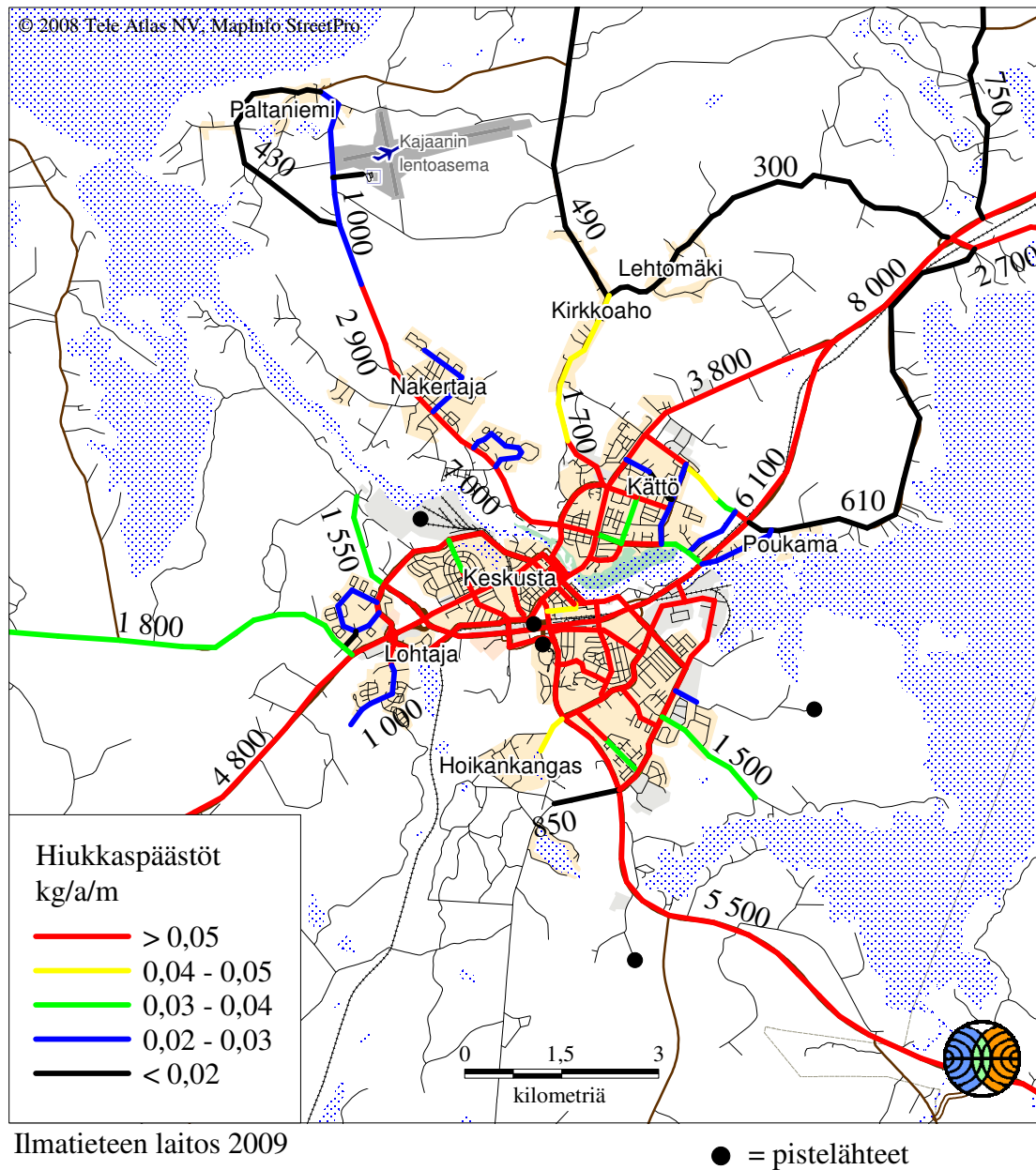
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$



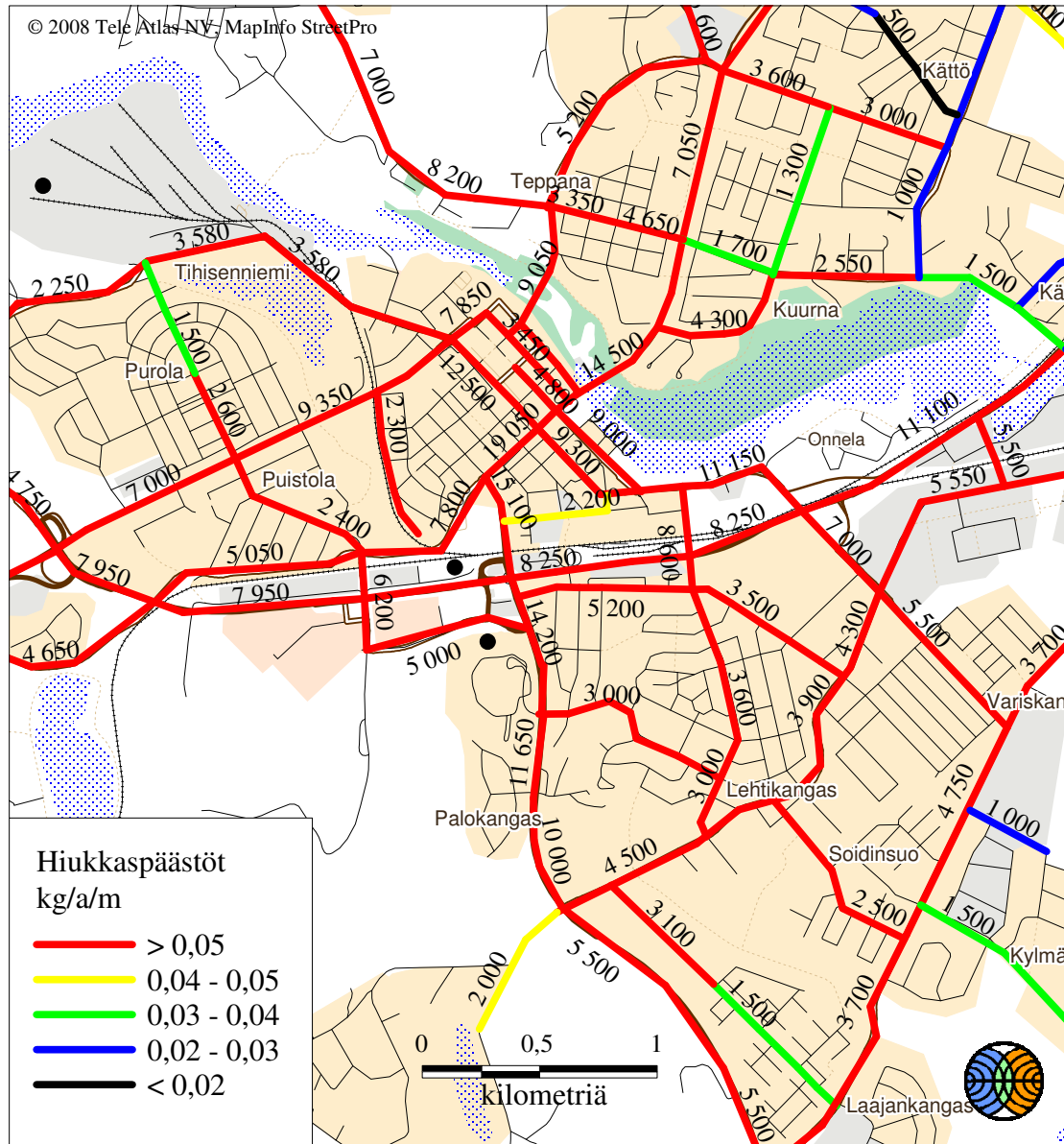
Kuva 13. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama typpidioksidin korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

KAJAANI



Kuva 14. Liikenteen aiheuttamat hiukkaspäästöt (kg/a/m)
Kajaanin tutkimusalueella ja tiekohtaiset liikennemäärät
(ajoneuvoa/vrk) keskusta-alueen ulkopuolella.

KAJAANI

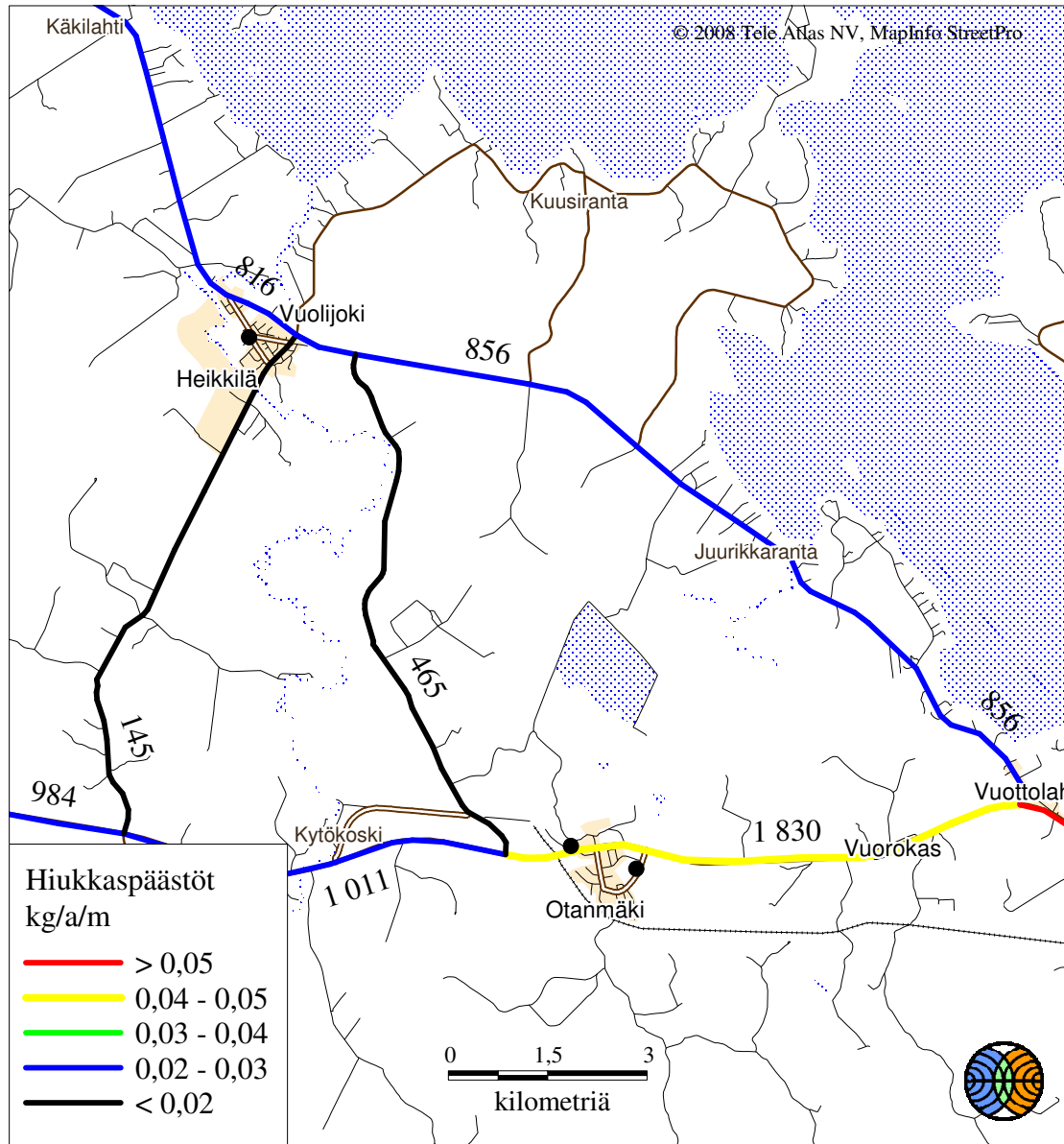


Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

Kuva 15. Liikenteen aiheuttamat hiukkaspäästöt (kg/a/m) ja tiekohtaiset liikennemäärät (ajoneuvoa/vrk) Kajaanin keskustan alueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI

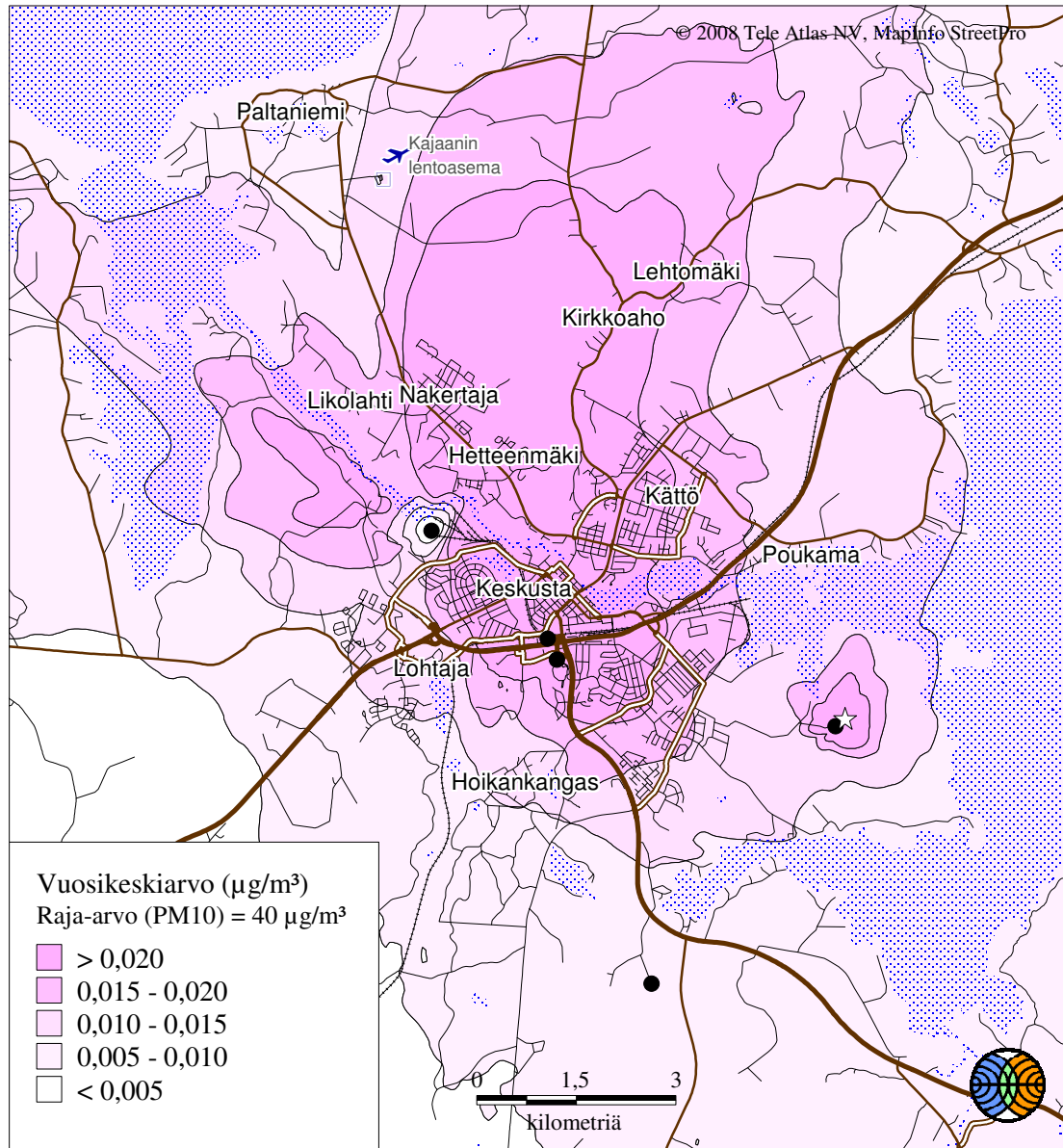


Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

Kuva 16. Liikenteen aiheuttamat hiukkaspäästöt (kg/a/m) ja tiekohtaiset liikennemäärät (ajoneuvoa/vrk) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

KAJAANI



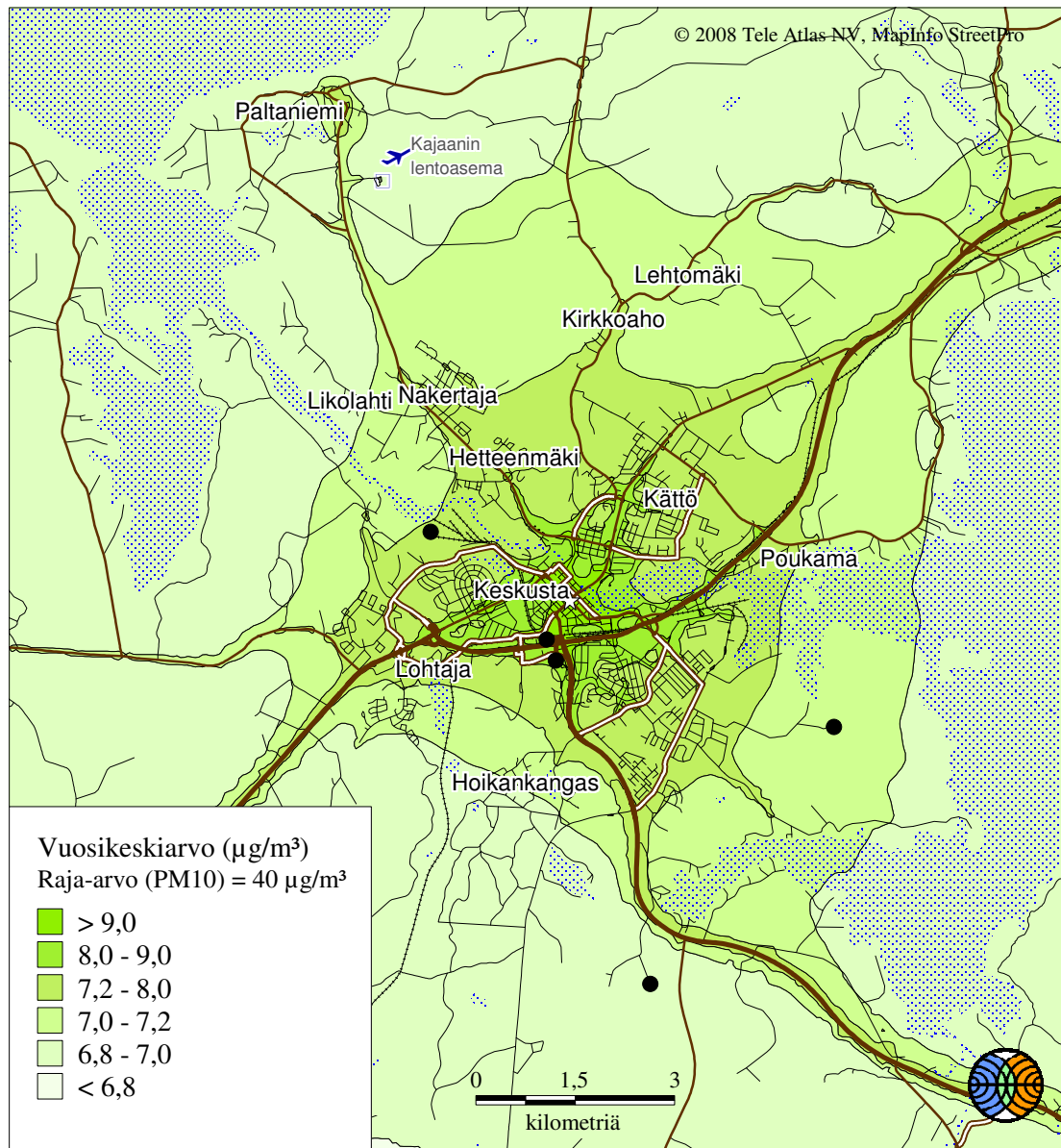
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 17. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

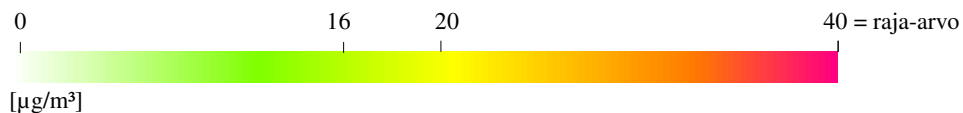
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

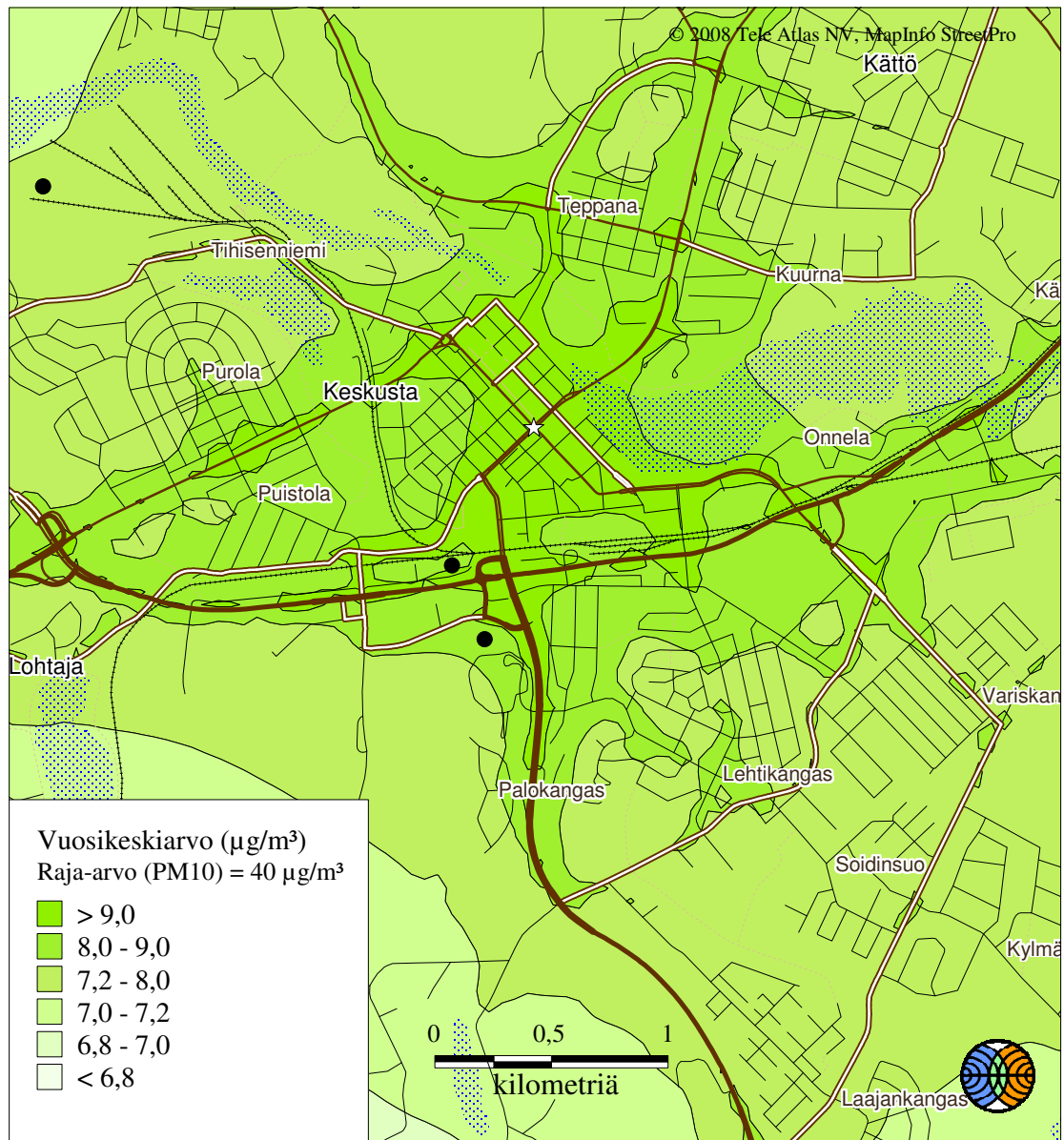
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 18. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkaspitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

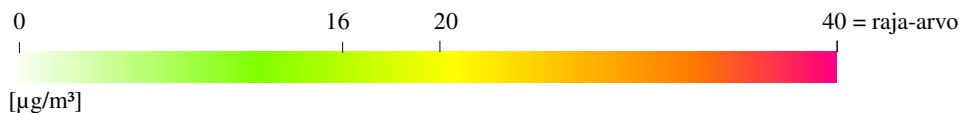
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

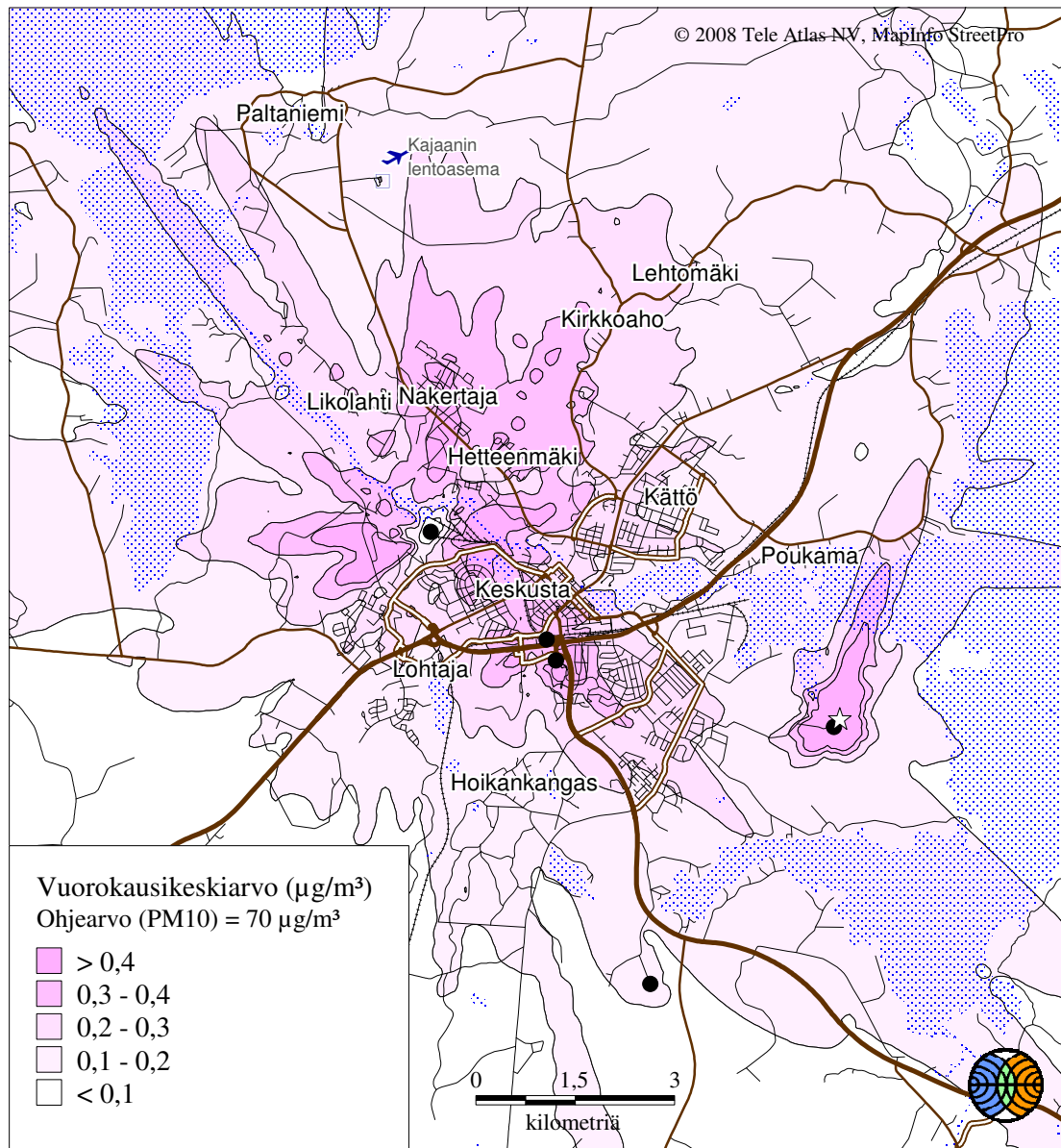
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 19. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkaspitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin keskustan alueella.

KAJAANI



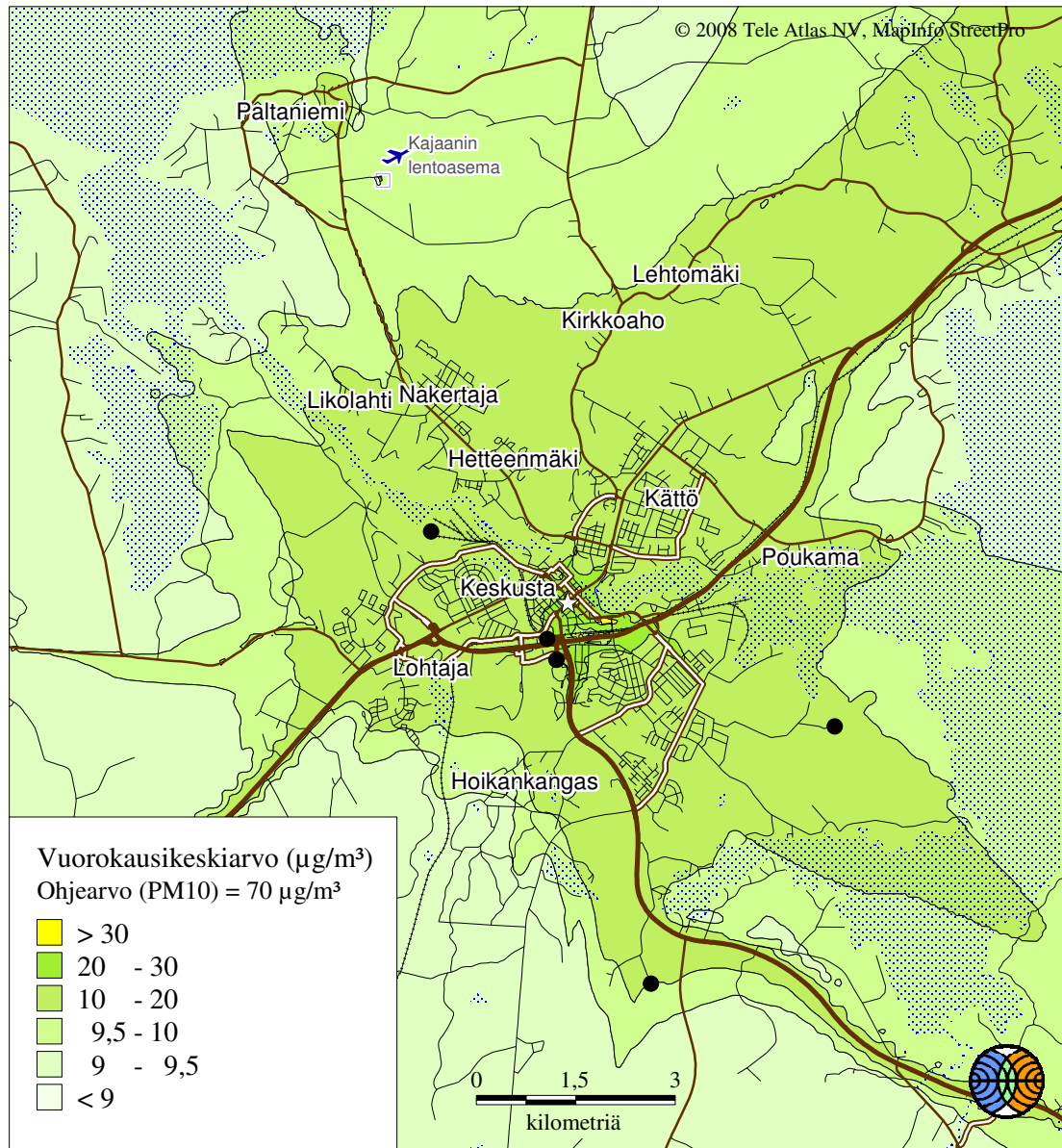
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 20. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

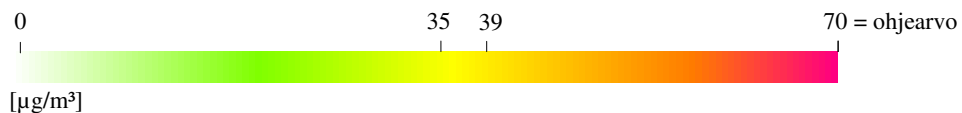
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

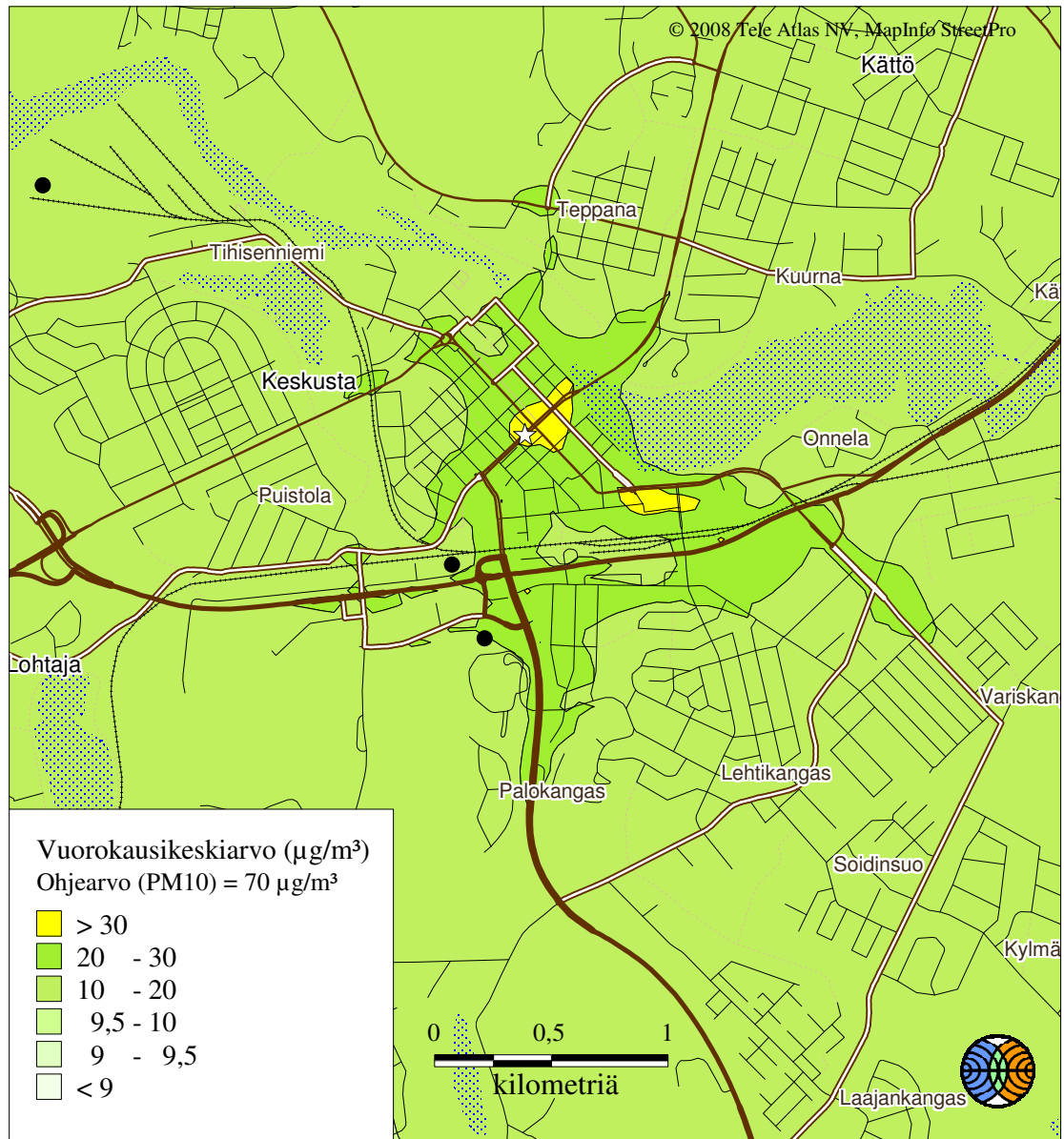
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 21. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin tutkimusalueella.

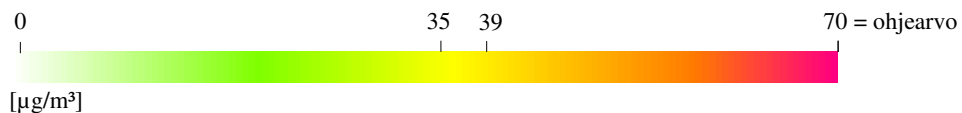
KAJAANI



Ilmatieteen laitos 2009

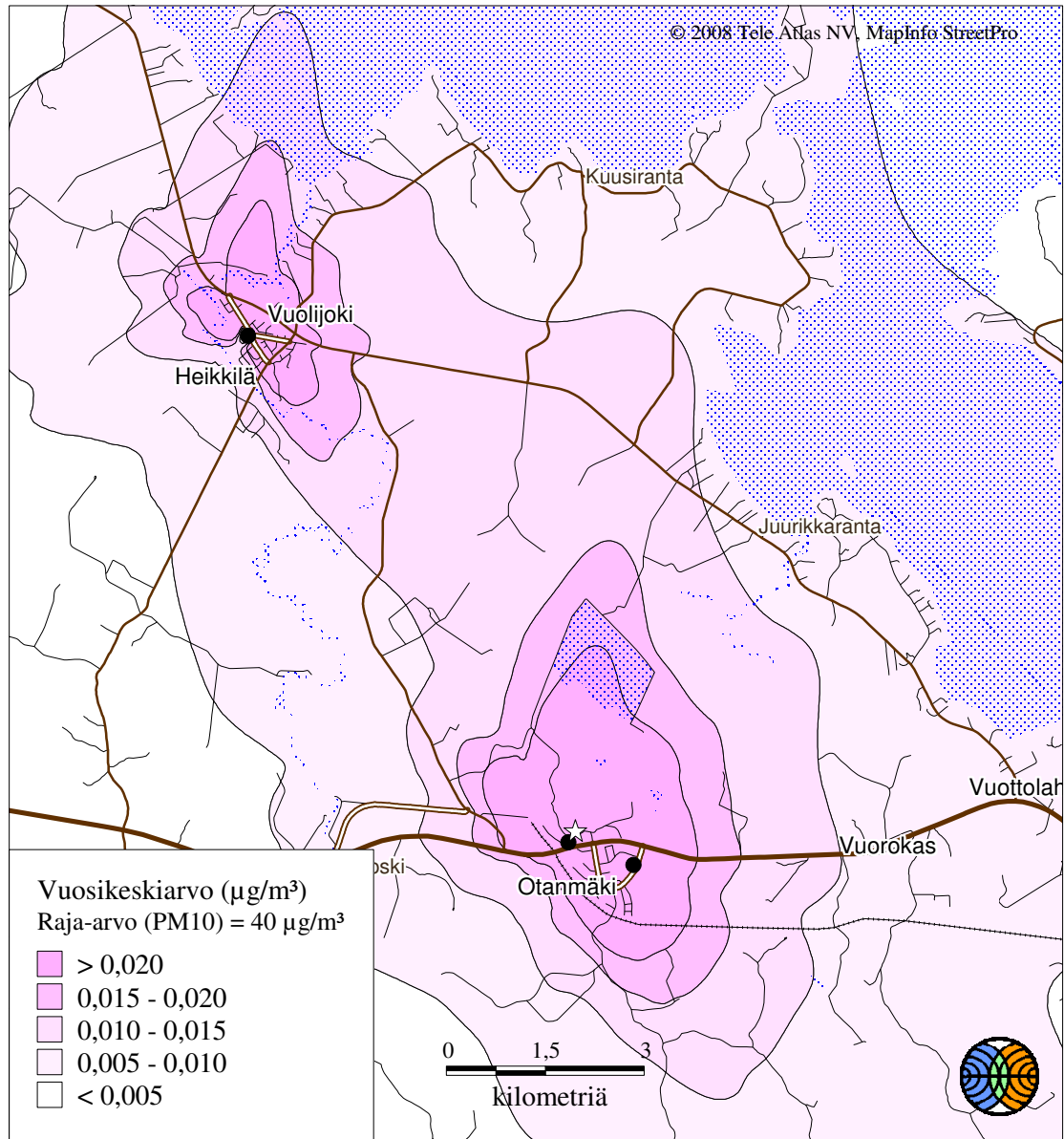
● = pistelähteet

☆ = maksimi = $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 22. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Kajaanin keskustan alueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



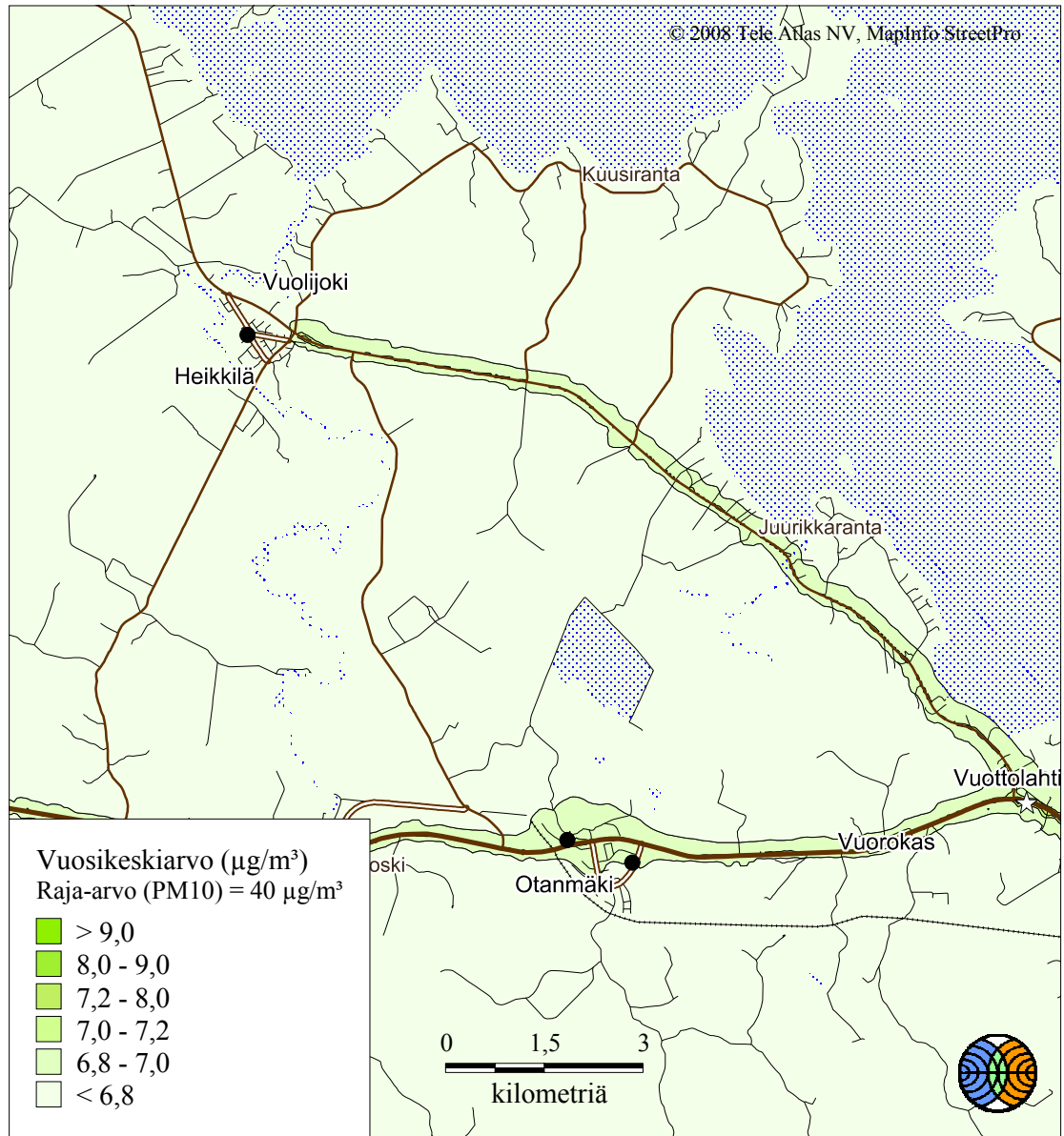
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

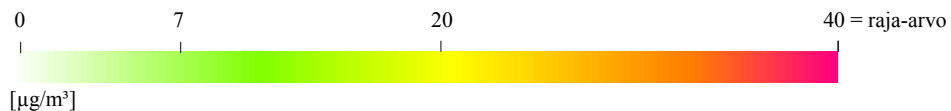
☆ = maksimi = $0,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 23. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI

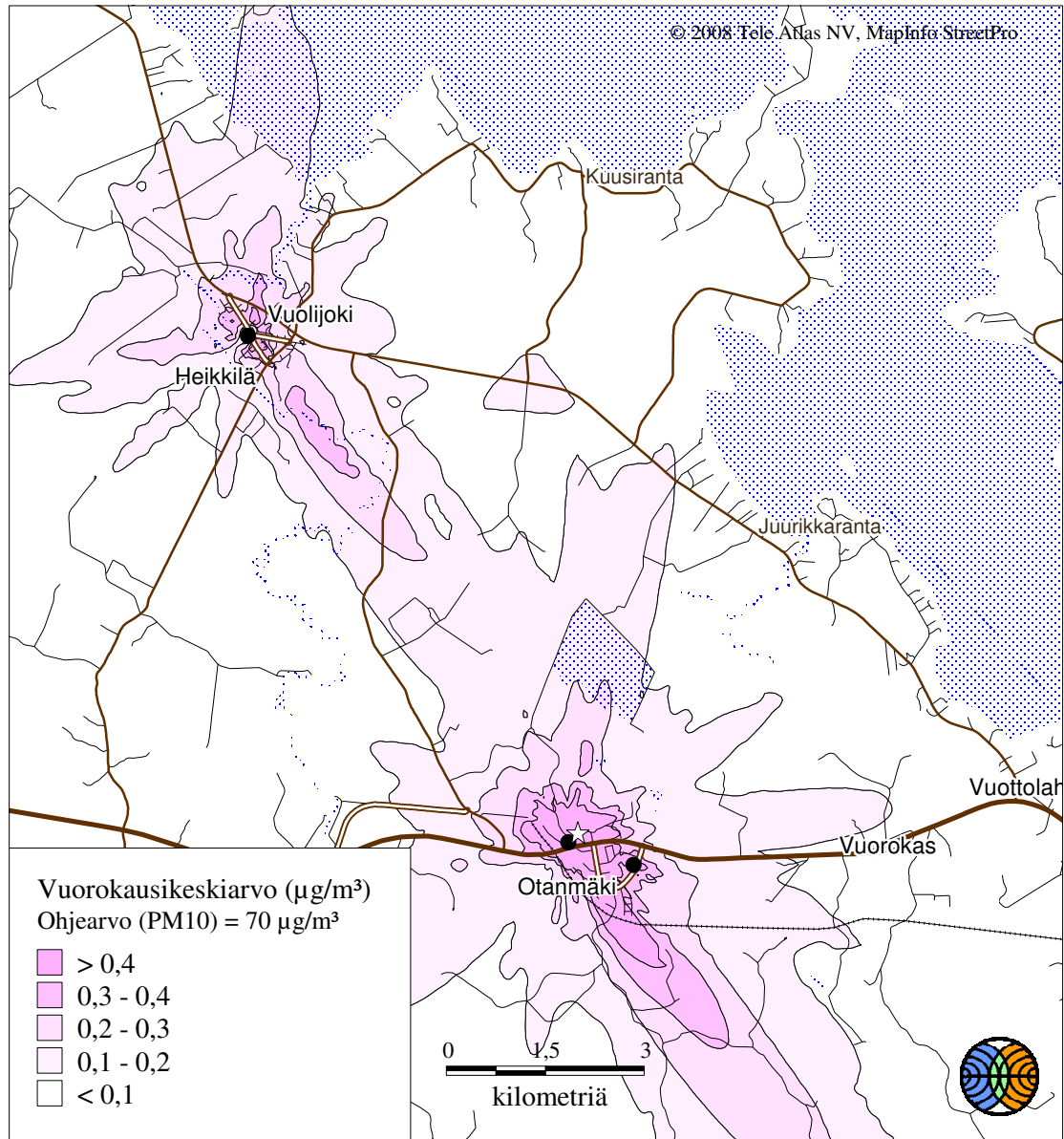


Ilmatieteen laitos 2009



Kuva 24. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkaspitoisuuden korkein vuosikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



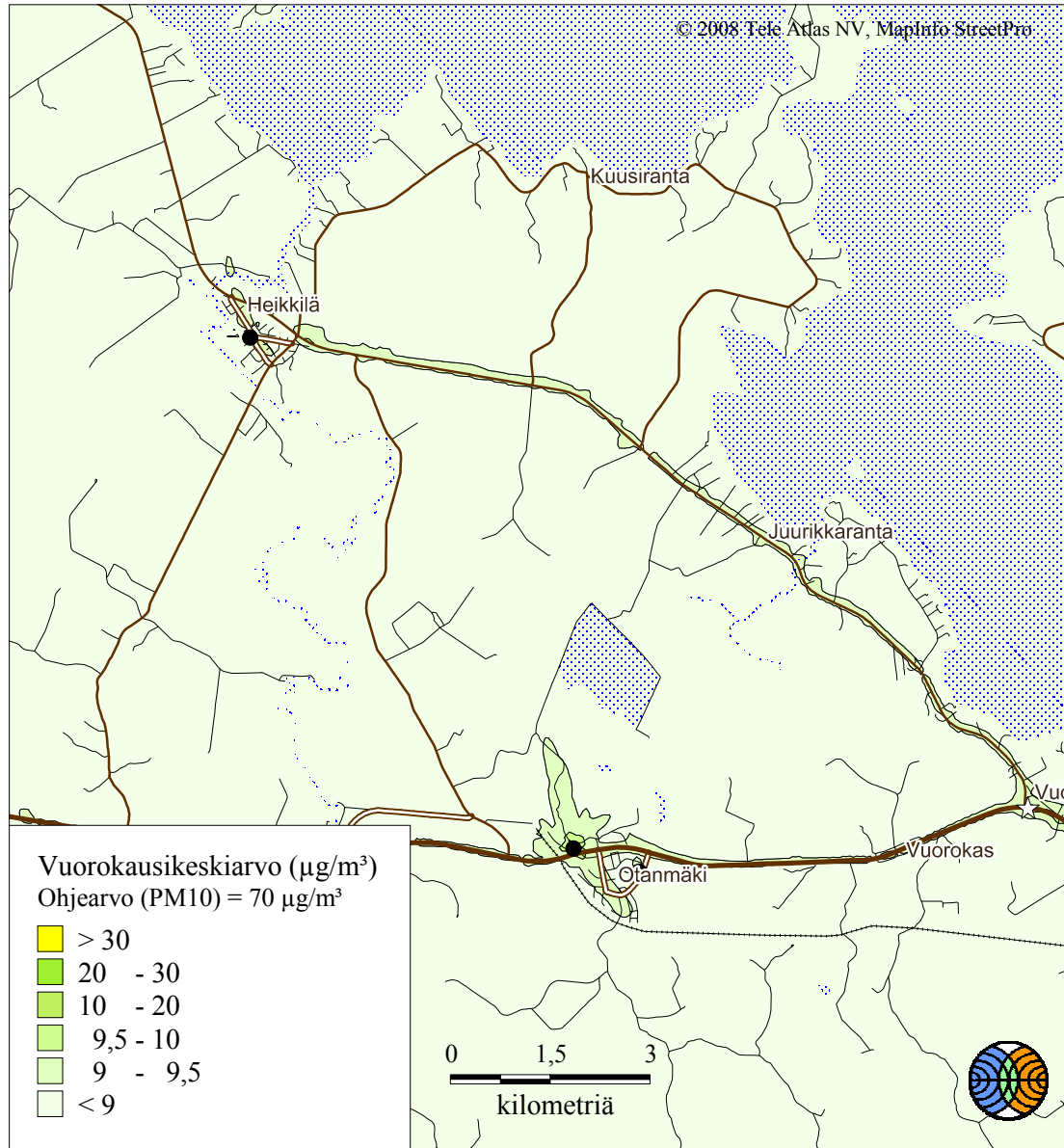
Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Kuva 25. Pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

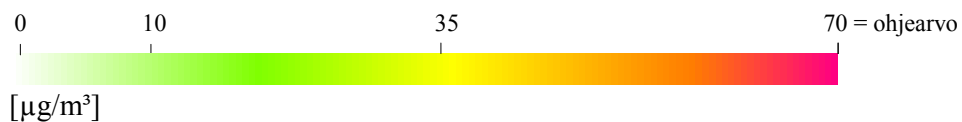
VUOLIJOKI JA OTANMÄKI



Ilmatieteen laitos 2009

● = pistelähteet

☆ = maksimi = $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Kuva 26. Liikenteen ja pistemäisten päästölähteiden aiheuttama hiukkasten korkein vuorokausiohjearvoon verrannollinen pitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Vuolijoen ja Otanmäen tutkimusalueella.

Ilmanlaadun asiantuntijapalvelut

PL 503

00101 HELSINKI

puh. (09) 19291

ilmanlaatupalvelut@fmi.fi

Air quality expert services

P.O.Box 503

FIN-000101 HELSINKI

tel. +358 9 19291

airquality.services@fmi.fi

www.fmi.fi



ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE