



## Kasvillisuuden ja melusteiden vaikutus ilmanlaatuun liikenneympäristöissä

**Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä**

Opastinsilta 6 A

00520 Helsinki

puhelin 09 156 11

faksi 09 1561 2011

[www.hsy.fi](http://www.hsy.fi)

**Lisätietoja**

Anu Kousa, puhelin 09 1561 2398

[anu.kousa@hsy.fi](mailto:anu.kousa@hsy.fi)

**Copyright**

Kuvat: Figures are reprinted with permission from Elsevier

Kansikuva: HSY / Kai Widell

## Esipuhe

Liikenteen hiukkas- ja typenoksidipäästöt heikentävät ilmanlaatua pääkaupunkiseudulla. Typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) ja hengitettävien hiukkasten (PM<sub>10</sub>) ohjearvot ylittyvät vilkasliikenteisissä ympäristöissä. Paikoin Helsingin keskustan katukuiluissa ylitetään myös EU:n asettama typpidioksidin vuosiraja-arvo, joka olisi pitänyt alittaa vuoteen 2010 mennessä. Ulkoilman pienhiukkaset arvioidaan suurimmaksi ympäristöterveysriskiksi Suomessa ja liikenteen pienhiukkaspäästöt aiheuttavat merkittäviä terveyshaittoja.

Kasvillisuuden lisäämistä esitetään usein keinona liikenteen päästöjen vaikutusten vähentämiseksi. Samoin meluvallien ja muiden melusteiden avulla suojaavan asukkaita melun ohella myös ilmansaasteilta. YTV teki vuonna 2002 selvityksen siitä, miten tehokkaasti puilla ja pensailta voidaan parantaa ilmanlaatua. Tuolloin tutkimustulokset antoivat viitteitä siitä, että kasvillisuudella voitaisiin parantaa ilmanlaatua vain hieman. Tosin tutkimusaineistoa aiheesta oli tuolloin kovin niukasti saatavissa, eikä suomalaisia tutkimuksia aiheesta ollut juurikaan.

Viime vuosina puiden, pensaiden ja melusteiden ilmanlaatuvaikutuksista on julkaistu monia uusia tutkimuksia, ja siksi oli syytä päivittää käsitys kasvillisuuden ja melusteiden vaikutuksista tuoreimpien tutkimustulosten valossa. Selvitykseen koottiin laajasti tuloksia alan tieteellisistä julkaisuista. Kirjallisuuskatsauksen laati ympäristötekniikan insinööri Jani Vuorinen osana ympäristöekologian opintojaan Helsingin yliopistossa. Työtä ohjasivat ja raportin laatimiseen osallistuivat ilmansuojeluasiantuntijat Jarkko Niemi ja Anu Kousa HSY:stä.

Helsinki 19.5.2015

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

Tarja Koskentalo  
Ilmansuojeluyksikön päällikkö

## Tiivistelmä

Tässä kirjallisuuskatsauksessa koottiin mittauksilla, mallinuksilla ja tuulitunnelikokeilla saatua tutkimustietoa melusteiden ja tienvarsikasvillisuuden vaikutuksesta autoliikenteen aiheuttamiin ilmanlaatuhaittoihin. On esitetty, että nämä esteet voivat vähentää epäpuhtauksien pitoisuuksia niiden takana. Vaikutusmekanismina pidetään ilmapirtausten kohoamista esteen yläpuolelle, sekoittumisen lisääntymistä ja saasteiden pidättymistä pinnoille.

Teitä reunustavat melusteet voivat nostaa tiellä olevien epäpuhtauksien pitoisuuksia huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa tietä ei reunusta meluste. Melusteen taakse jää ns. katvealue, jolla pitoisuudet ovat alhaisempia kuin samalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä ts. ympäristössä ilman melustetta. Katvealueen laajuus ja pitoisuusvähennys riippuu ensisijaisesti melusteen korkeudesta. Katvealueen on esitetty ulottuvan tyypillisesti noin 5-15 kertaa esteen korkeuden etäisyydelle. Tulokset katvealueen laajuudesta ja pitoisuuslaskun voimakkuudesta ovat kuitenkin osittain ristiriitaisia ja hankalasti yleistettävissä, koska päästöviuhkan käyttäytymiseen vaikuttavat erilaisissa ympäristöissä monet tekijät. Melusteen vaakasuuntaisissa päädyissä esiintyy ns. reunavaikutus. Reunavaikutus syntyy ilmapirtauksen siepatessa esteen eteen kertynyttä likaisempaa ilmaa esteen reunan taakse. Osa virtauksesta ohjautuu reunan kohdalta tuulen suuntaan nostaen avoimen ympäristön pitoisuuksia ja osa ohjautuu esteen taakse nostaen pitoisuuksia katvealueella. Katvealueen pitoisuudet eivät kuitenkaan nouse suuremmiksi kuin avoimessa ympäristössä.

Tienvarsikasvillisuus toimii osittain kuten meluste, mutta saasteiden pidättyminen pinnoille on tehokkaampaa suuren lehtialan vuoksi. Puu- ja pensasvyöhyke vähentää hieman autoliikenteen aiheuttamia ilman hiukkaspitoisuuksia kasvillisuuskaistaleen keskellä ja sen takana katvealueella. Sekä kasvillisuus että melusteet vähentävät pitoisuuksia tuulen ollessa tieltä kohti estettä tai kasvillisuuskaistaletta.

Katukuiluissa olevat puut heikentävät ilmapirtauksien kulkemista pois kuilusta ja siten ilman epäpuhtauspitoisuuksien laimenemistä. Liikenteen päästöjä kertyy katukuiluun erityisen paljon, kun kuilun leveys/korkeus-suhde pienenee ja puuston latvuston peittämä alue kasvaa. Tuulettumista voidaan siis parantaa rajoittamalla puiden latvusten kokoa ja kokonaispeittoa. Mallinnustutkimusten perusteella on esitetty pensaskaistaleiden ja viherseinien vähentävän epäpuhtauspitoisuuksia katukuilussa. Suomessa vaikutusta pienentää kuitenkin se, että pensaat ja köynnökset ovat lehdettäviä suurimman osan vuodesta. Katukuilun mittasuhteet vaikuttavat kasvillisuutta enemmän tuulettuvuuteen.

Yleisenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että kasvillisuudella ja melusteilla voidaan parantaa hieman ilmanlaatua ja saavuttaa monia muita myönteisiä vaikutuksia kaupunkiympäristössä, mutta liikenteen aiheuttamien ilmanlaatuongelmien ratkaisukeinona kasvillisuudella ja melusteilla on vain pieni rooli. Liikenteen päästöjen vähentäminen ja erilaisten toimintojen sijoittaminen ovat avainasemassa suunniteltaessa turvallista, terveellistä ja viihtyisää kaupunkiympäristöä.

**Julkaisija:** Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä

**Tekijä:** Jani Vuorinen, Jarkko Niemi, Anu Kousa

**Julkaisun nimi:** Kasvillisuuden ja melusteiden vaikutus ilmanlaatuun liikenneympäristöissä

**Avainsanat:** ilmanlaatu, kasvillisuus, melusteet, liikenne

**Sarjan nimi ja numero:** HSY:n julkaisuja 4/2015

**Issn-l:** 1798-6095

**Isbn:** 978-952-6604-96-1

**Issn:** 1798-6095

**Kieli:** suomi

**Sivuja:** 49

**Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä**

PL 100, 00066 HSY, puhelin 09 156 11, faksi 09 1561 2011, www.hsy.fi



## Sammandrag

I denna litteraturoversikt samlades forskningsdata, om bullerskydds och väggkantsväxtlighets inverkan på luftkvalitetsskador orsakade av biltrafiken, som fåtts via fältmätningar, modelleringar och vindtunnelförsök. Det har framställts att dessa hinder kan minska på koncentrationen av föroreningar bakom dem. Verkningsmekanismen anser man vara, att luftströmmarna stiger ovanför hindret, att omblandningen ökar och att föroreningarna stannar kvar på ytorna.

Bullerskydd längs väggkanterna kan avsevärt öka koncentrationerna av föroreningar på vägen i förhållande till en situation, där vägen inte kantas av ett bullerskydd. Bakom bullerskyddet blir ett s.k. skuggställe, på vilket koncentrationerna är lägre än på samma avstånd i öppen miljö, m.a.o. i en omgivning utan bullerskydd. Skuggområdets vidsträckthet och minskande koncentration beror främst på bullerskyddets höjd. Skuggområdet har framställts att sträcka sig cirka 5-15 gånger av bullerskyddets höjd och sluta, då koncentrationerna har nått halterna i öppen miljö. Resultaten rörande skuggområdets utbredning och koncentrationssänkningens styrka är dock delvis motstridiga och besvärliga att göra allmängiltiga, då utsläppsplymens beteende i olika miljöer påverkas av många faktorer. I ett bullerskydds horisontella ändrar förekommer en s.k. kanteffekt. Kanteffekten uppkommer då luftströmmen tar smutsigare luft, som samlats framför skyddet och för den bakom dess kant. En del av strömningen styrs från kanten i vindriktningen och ökar därvid den öppna miljöns koncentrationer och en del styrs bakom skyddet och ökar koncentrationerna i skuggområdet. Koncentrationer i skuggområdet stiger dock aldrig högre än i den öppna miljön.

Väggkantsväxtligheten fungerar delvis som ett bullerskydd. Träd- och buskzonen minskar luftens partikelhalter, orsakade av biltrafiken, en aning i mitten av och bakom remsan med växtlighet. Såväl växtlighetens, som bullerskyddens, koncentrationsminskande effekt förekommer då vinden kommer från vägen mot skyddet eller mot remsan med växtlighet.

Träden i gatukanjonerna hindrar luftströmningarna från att avlägsna sig från kanjonen och sålunda utspädningen av föroreningskoncentrationerna. Trafikutsläpp samlas i speciellt stor mängd i gatukanjonen, då kanjonens förhållande bredd/höjd minskar och området som täcks av trädskronor ökar. Ventilationen kan således förbättras genom att begränsa trädskronornas storlek och totaltäckning. På basen av undersökningar med datormodeller har det framställts, att buskremor och grönväggar minskar koncentrationerna av föroreningar i gatukanjoner. I Finland minskas dock effekten av, att buskar och rankor är utan blad största delen av året. Gatukanjonens proportioner påverkar ventilationen mer än växtligheten.

Som en allmän slutsats kan man konstatera, att man med växtlighet och bullerskydd kan förbättra luftkvaliteten något och uppnå många andra positiva effekter i stadsmiljö, men att som lösningsmetod för luftkvalitetsproblemen orsakade av trafiken har växtlighet och bullerskydd endast en liten roll. Minskningen av trafikens utsläpp och förläggandet av olika verksamheter innehar en nyckelroll då man planerar en trygg, hälsosam och trivsamt stadsmiljö.

**Utgivare:** Samkommunen Helsingforsregionens miljöjänster

**Författare:** Jani Vuorinen, Jarkko Niemi, Anu Kousa

**Publikationens namn:** Växtlighets och bullerskydds inverkan på luftkvaliteten i trafikmiljöer

**Nyckelord:** växtlighet, bullerskydd, trafikens utsläpp, luftkvalitet

**Publikationsseriens titel och nummer:** HRM:s publikationer 4/2015

**Issn-I:** 1798-6095

**Isbn:** 978-952-6604-96-1

**Issn:** 1798-6095

**Språk:** finska

**Sidor:** 49

**Samkommunen Helsingforsregionens miljöjänster**

PB 100, 00066 HSY, telefon 09 156 11, fax 09 1561 2011, www.hsy.fi

## Abstract

This report reviews the recent research on the impacts of noise barriers and roadside vegetation on air quality in traffic environments. It has been suggested that these barriers can reduce the concentrations of pollutants behind them. This reduction can be caused by three major mechanisms; rising of pollution plume due to barrier, increased mixing of air flows and more efficient deposition of pollutants on surfaces.

Noise barriers may increase the concentrations of pollutants on roads compared with roads without barriers. There exists a “quiet zone” behind a noise barrier, where pollutant concentrations are lower than those at the same distance from a road in open environment without a barrier. The height of a noise barrier is the main factor related to the reduction rate of pollutants and the horizontal extent of quiet zone. The horizontal extent of quiet zone is estimated to be about 5-15 times the height of barrier, after which pollution concentrations reach the same level as in open environments. However, the results on the strength and extend of quiet zone are partly contradictory and difficult to generalize, since the dispersion of pollutant plume is affected by several factors in different environments. At the horizontal ends of barriers so called “edge effect” is observed, since the emissions of traffic are dispersed as high concentrations to an open environment at the ends of barrier.

Roadside vegetation acts partly similarly as noise barrier, but the deposition of particles is more efficient due to large surface area of leaves and branches. Tree and bush zone slightly reduces particles concentrations inside the vegetation and after it at the “quiet zone”. Both noise barriers and vegetation decrease pollutant concentrations when wind is blowing from the direction of the road.

In street canyons, trees restrict air flows away from the canyon, decreasing the dilution of air pollutants in canyons. The emissions of traffic are accumulated in high concentrations in canyons, especially if the ratio of canyon width to height is small and if the cover area of tree crowns is large. Thus, the ventilation of air in canyons can be improved by restricting the size and total cover of trees. Based on modeling studies, it has been suggested that bush rows and vegetation on building walls decrease pollutant concentrations in street canyons. However, most bush and creeper plants in Finland are leafless in winter, which decrease their impacts on pollutant concentrations. The ventilation of street canyon is more affected by canyon design (e.g. height and width) than the properties of vegetation.

In conclusion, both vegetation and noise barriers slightly improve air quality and they also provide other positive impacts in urban environments. However, they have only a small role as a solution to air quality problems caused by traffic. The reduction of emissions from traffic and the planning of different land use forms are in key roles to achieve safe, healthy and comfortable urban environment.

**Published by:** Helsinki Region Environmental Services Authority

**Author:** Jani Vuorinen, Jarkko Niemi, Anu Kousa

**Title of publication:** The impact of noise barriers and roadside vegetation on air quality in traffic environments

**Keywords:** air quality, vegetation, noise barrier, traffic

**Publication series title and number:** HSY publications 4/2015

**Issn-I:** 1798-6095

**Isbn:** 978-952-6604-96-1

**Issn:** 1798-6095

**Language:** Finnish

**Pages:** 49

**Helsinki Region Environmental Services Authority**

PO Box 100, 00066 HSY, Tel. +358 9 156 11, Fax +358 9 1561 2011, [www.hsy.fi](http://www.hsy.fi)

# Sisällys

Esipuhe	3
Tiivistelmä	4
Sammandrag	5
Abstract	6
1. Johdanto	8
2. Melusteiden vaikutus	9
2.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet	9
2.2 Kenttämittaukset	18
3. Tienvarsikasvillisuuden vaikutus	28
3.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet	28
3.2 Kenttämittaukset	29
4. Katukuilut ja kasvillisuus	36
4.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet	36
4.2 Kenttämittaukset	42
5. Yhteenveto ja johtopäätöksiä	44
6. Lähdeluettelo	47
Liite: Melusteiden ja puustokaistojen vaikutusarviot	49

# 1. Johdanto

Huonolle kaupunki-ilmalle ja erityisesti hiukkasmaisille ilman epäpuhtauksille altistuminen aiheuttaa terveyshaittoja. Ajoneuvoliikenteen aiheuttamat epäpuhtauspitoisuudet ovat korkeimmillaan aivan tien vieressä, pudoten avoimessa ympäristössä eksponentiaalisesti etäisyyden kasvaessa tiestä. Ilmanlaatuun tien lähellä vaikuttavat mm. liikennesuorite, ruuhkautuminen, alueen meteorologia sekä tien varsilla olevat rakennukset ja maasto. Riippuen edellä esitetyistä tekijöistä ja erityisesti alueen tuuliolosuhteista tieliikenteen ilmanlaatuun vaikuttavat epäpuhtaudet laimenevat taustapitoisuuksien tasolle viimeistään noin 300-500 m matkalla.

Kaupungistuminen, liikennemäärien lisääntyminen ja tiivistyvä kaupunkirakenne lisäävät helposti tieliikenteen aiheuttamille haitoille altistuvien ihmisten määrää. Perinteisesti haittojen vähentämiskeinona on käytetty puuttumista päästölähteeseen ts. itse liikenteen määrään, nopeuteen, ominaispäästöihin jne. Ilman epäpuhtauksien pitoisuuksia voidaan laskea myös vaikuttamalla niiden leviämiseen ja laimenemiseen sekä depositioon eli laskeumaan. Depositioilla tarkoitetaan ilmiötä, jossa ilmassa olevat komponentit pidättyvät pinnoille. Pinta itsessään voi olla elävä esim. puun runko tai lehti tai vaihtoehtoisesti esim. rakennuksen seinä. Meluntorjunnan myötä melusteet ja tienvarsikasvillisuuskaistaleet ovat nykyään hyvin yleisiä alueilla, joissa esim. asutusta on tieliikenteen lähellä. Samojen rakenteiden käyttöä on esitetty yhdeksi ratkaisukeinoksi parantaa ilmalaatua päästölähteen lähellä.

Korkeiden ja yhtenäisten rakennusten reunustamat kadut eli katukuilut ovat kaupunkirakentamiselle ominainen tila, jossa ilmanvaihto ja siten liikenteen aiheuttamien epäpuhtauksien laimeneminen on rajoitettua. Kasvillisuuden roolia katukuilujen problematiikkaan on tutkittu sekä sen haittojen, että sen positiivisten vaikutusten selvittämiseksi. Tässä kirjallisuuskatsauksessa esitetään nykyinen tutkimuksen tila ja keskeiset tutkimuskohteet kasvillisuuden ja melusteiden vaikutuksesta erityisesti liikenneperäisiin hiukkas- ja typenoksidipitoisuuksiin. Työtä voidaan hyödyntää kaavoituksessa ja kaupunkisuunnittelussa.

## 2. Melusteiden vaikutus

Melusteella tarkoitetaan rakennetta, joka vähentää äänen kulkua ja siten meluvaikutusta esteen takana. Melun vaimentamiseen voidaan käyttää seinämäisiä rakenteita tai esim. valleja. Tässä melusteilla tarkoitetaan seinämäistä estettä. Joidenkin tutkimustulosten voidaan katsoa soveltuvan myös meluvalleja koskevaan tarkasteluun, mutta yleisellä tasolla tällaista johtopäätöstä ei voida tehdä.

### 2.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet

Matemaattisilla virtausmalleilla ja tuulitunnelikokeilla on mahdollisuus tuottaa kenttämittausta edullisemmin ja nopeammin aineistoa ilmavirtauksista ja epäpuhtauksien leviämisestä ja muuntumista. Tuulitunnelikokeiden etuna voidaan pitää myös useiden muuttujien vertailua ja vaikutustarkastelua samassa perustilanteessa. Tällaisia muuttujia ovat esimerkiksi erilaiset maantieteelliset ympäristöt ja meteorologiset olosuhteet.

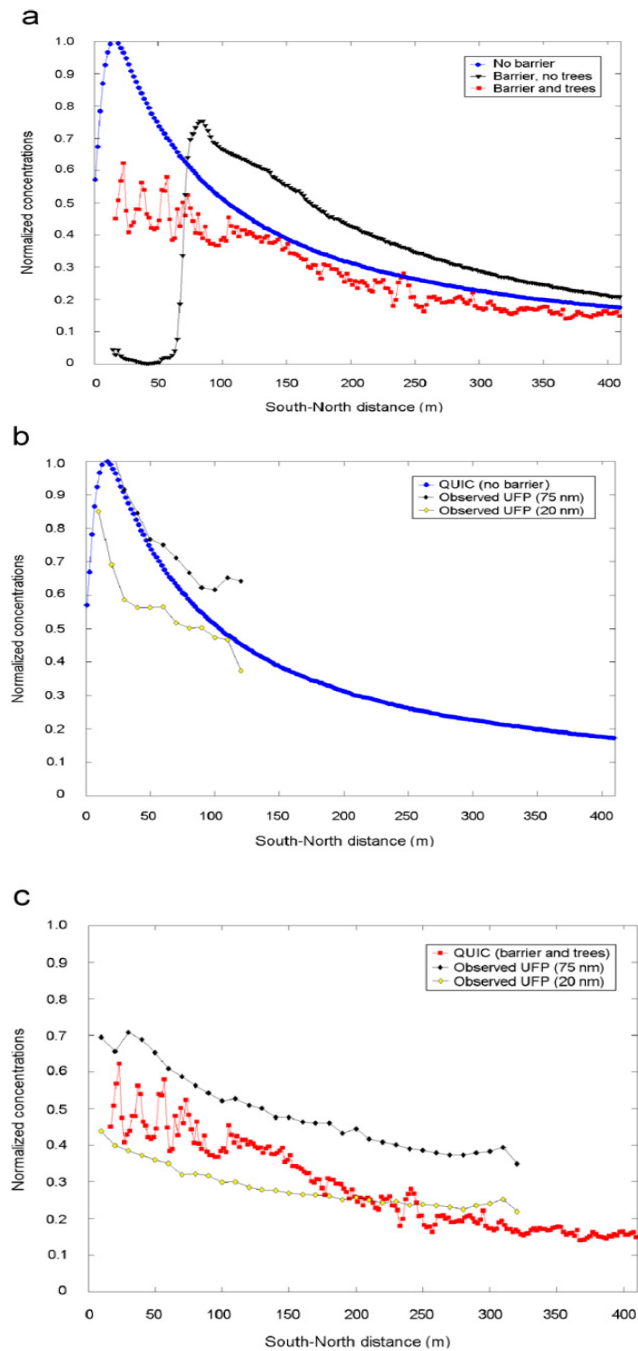
Mallintavien laskentojen sekä tuulitunnelikokeiden tuottaman tiedon pohjalta tehdyt tutkimukset ovat järjestelmällisesti esittäneet, että virtauksen katkaiseva rakenne vähentää epäpuhtauspitoisuuksia rakenteen takana. Pitoisuuksien vähenemää tarkasteluissa verrataan avoimen ympäristön tilanteeseen, ts. tilanteeseen jossa rakennetta ei ole. Pääasiallisena vähentävänä mekanismina esitetään päästön rajoittumista esteen eteen ja pystysuuntaisen sekoittumisen lisääntymistä virtauksen noustessa esteen myötäisesti. Vaikutus saadaan aikaan, kun tuuli on päästölähteestä rakenteeseen päin. Tuulen suunnalla on päästöjen leviämisen kannalta ratkaiseva merkitys. Tuulen yläpuolella olevalla tienvarrella epäpuhtauspitoisuudet eivät nouse taustaan nähden merkittävästi.

Bowker ym. (2007) käyttivät tekemäänsä mallia arvioidakseen kuusi metriä korkean melusteiden aikaansaamaa epäpuhtauspitoisuuksien muutosta. Malliin sovitettu meluste sijaitsi runsasliikenteisen moottoritien läheisyydessä USA:ssa, Pohjois-Carolinassa. Malli perustuu virtausprofiilien laskemiseen esteiden ympärille. Tuloksien luotettavuutta arvioitiin mittaamalla ultrapientien hiukkasten (20 ja 75 nm) lukumääräpitoisuudet liikkuvalla mittaustaitteistolla. Koepaikka mahdollisti avoimen ympäristön sekä melusteiden ja puuston yhteisvaikutuksen mittaamisen. Puustoa ei pystytty mallintamaan huokoiseksi, joten se esiintyy mallissa tiiviinä tolppamaisena rakenteena.

Tutkimuksen tuloksena tuotettu malli laskee virtausprofiilin ts. liikenneperäisten ilman epäpuhtauspitoisuuksien olevan eri tilanteissa kuvan 1a mukainen. Huomataan, että avoimessa ympäristössä epäpuhtauspitoisuudet laskevat etäisyyden kasvaessa. **Melusteiden taakse jää hyvinkin matalan epäpuhtauspitoisuuden alue ns. katvealue. Pitoisuudet ovat katvealueella jopa 95 % pienemmät kuin vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä. Pitoisuuksia alentava vaikutus jatkuu 40-50 m esteen jälkeen. Tämän etäisyyden jälkeen malli esittää pitoisuuksien nousevan suuremmiksi kuin vastaavassa etäisyyspisteessä ilman estettä.** Pitoisuuksien nousun selitetään johtuvan päästöviuhkan laskeutumisesta takaisin maanpinnalle katvealueen jälkeen. Katvealueen on esitetty jatkuvan 3-12-kertaisesti esteen korkeuden verran. Huomioitavaa on myös, että mallinnetut pitoisuudet jäävät melusteiden takana avointa ympäristöä korkeammiksi jopa 400 m etäisyydellä päästölähteestä. Lisäksi malli esittää korkeita pitoisuuksia melusteiden vaakasuuntaisissa päätepisteissä, joissa esteen eteen jäänyttä korkeamman epäpuhtauspitoisuuden ilmaa kertyy virtauksen mukaan ja edelleen pois päin tieltä. Pitoisuudet ovat päätepisteen kohdalla korkeampia kuin vastaavalla etäisyydellä muualla avoimessa ympäristössä. Kun



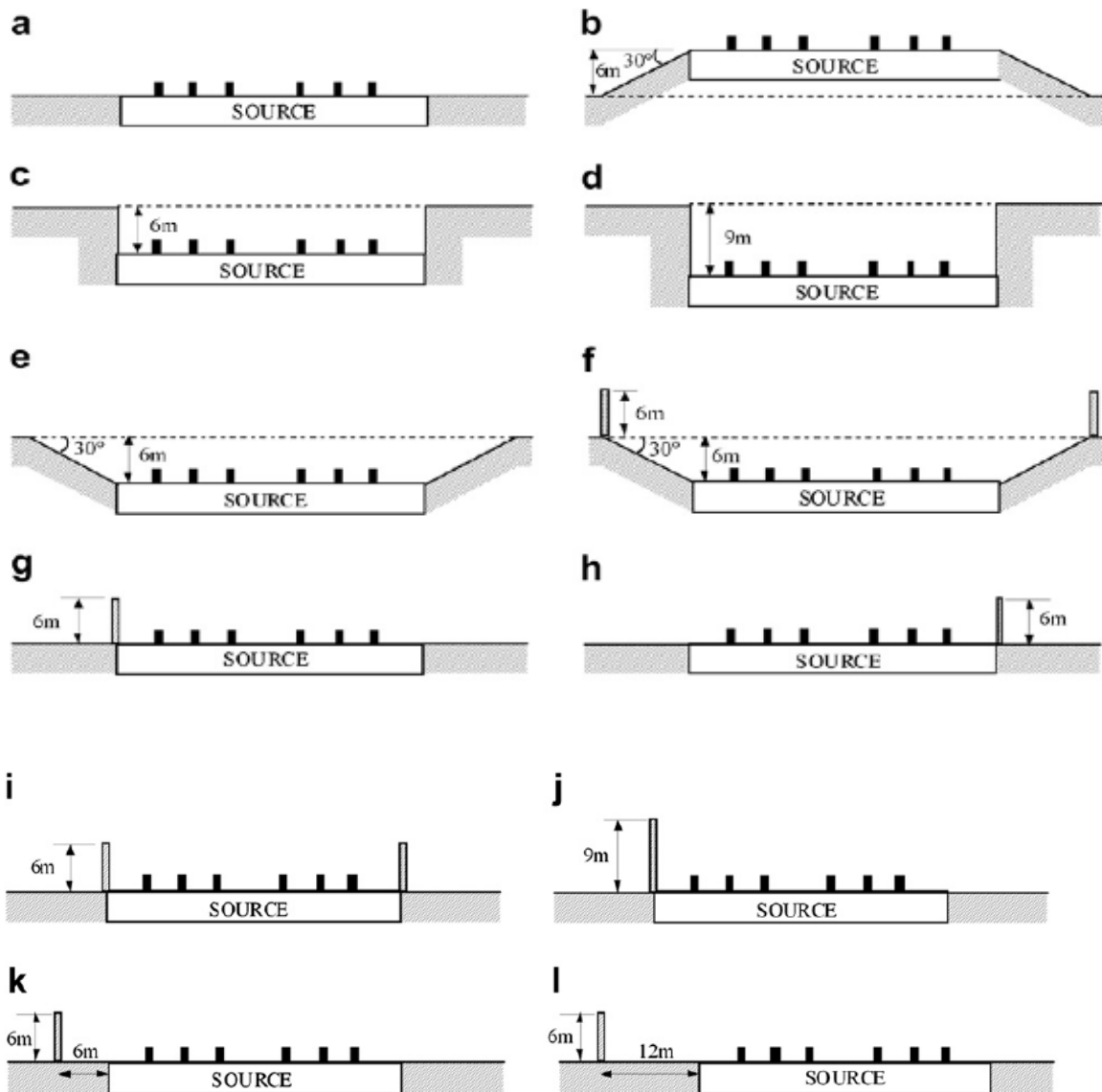
melusteeseen yhdistettiin puustovyöhyke, mallinnetut pitoisuudet olivat avointa ympäristöä matalampia katvealueella ja edelleen koko mitatulla 400 m etäisyydellä. Hiukkasten lukumääräpitoisuuksia mitattiin avoimen ympäristön ja melusteen sekä puuston yhdistelmästä. Mittaukset tukivat mallin johtopäätöksiä (kuva 1b ja 1c). Sen sijaan melusteen katvealueen jälkeistä mahdollista pitoisuuden nousua ei tutkittu mittauksilla.



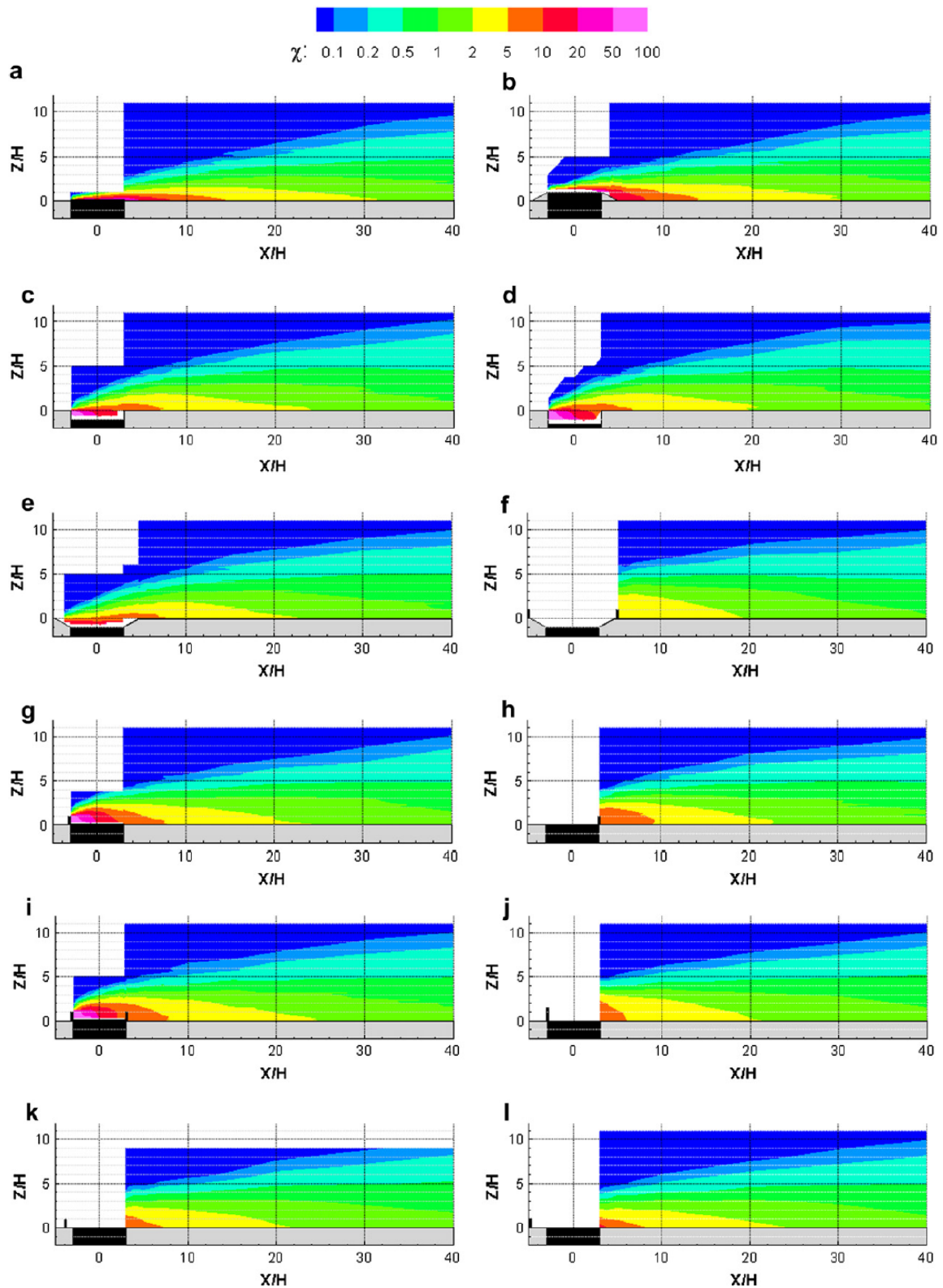
Kuva 1. Normalisoidut pitoisuudet etäisyyden funktiona 3 m korkeudessa. a) Kolme eri mallinnusta b) Lukumääräpitoisuusmittaukset ja avoimen ympäristön mallinnus c) Lukumääräpitoisuusmittaukset ja melusteen sekä puuston mallinnus. Meluste sijaitsee 12 m päästölähteestä. Bowker ym. (2007)

Tuulitunnelikokeilla voidaan tutkia esimerkiksi erilaisten tierakenteiden vaikutusta liikenneperäisten ilman epäpuhtauksien leviämiseen. Heist ym. (2009) tutkivat tuulitunnelikokeilla 12 eri tien korkeussuhde- ja virtausestetilannetta. Tuulensuunta vakioitiin kohtisuoraan tieltä puhaltavaksi tuuleksi. Kaikki rakennetut mallit johtivat pienempiin epäpuhtauspitoisuuksiin esteiden takana verrattaessa tasaiseen, avoimeen ympäristöön. Merkkiaineena tutkimuksessa käytettiin etaania ja mallinnuksen pohjana 2x3-kaistaista moottoritietä skaalattuna 1:150. Meluesteen korkeutena tutkimuksessa käytettiin 6 metriä. Tutkitut rakenteet esitetään kuvassa 2. Epäpuhtauspitoisuusgradientit esitetään kuvassa 3.

Heist ym. (2009) tutkimuksen keskeinen tulos oli, että **tuulen alapuolella pitoisuudet maanpinnassa olivat alhaisempia kaikissa tasaisesta ympäristöstä poikkeavissa tilanteissa**. Suurin pitoisuuksien alenema oli tilanteessa, jossa tie kulkee kuilussa ts. on madallettu suhteessa ympäristöön ja tien kummallakin puolella on melueste (kuva 2f). Tällöin tien ja esteen yhteiskorkeus oli 12 m. Yhteys katukuilumaiseen tilaan on ilmeinen. Huomioitavaa on, että tuulitunnelikoe ei osoita virtauksen terävää laskeutumista, ja siten epäpuhtauspitoisuuksien kohoamista katvealueen jälkeen suuremmaksi kuin avoimen ympäristön vertailutilanteessa.



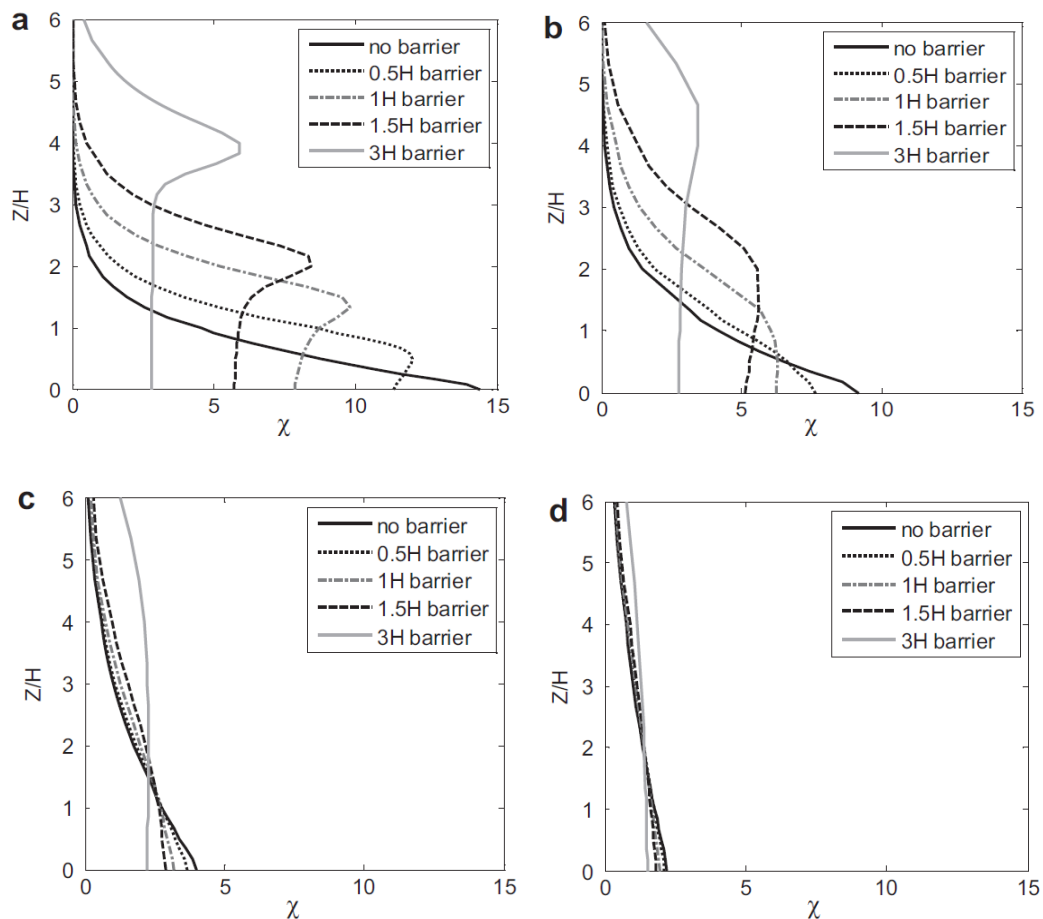
Kuva 2. Tuulitunnelikokeiden 12 eri tiekonfiguraatioita. Heist ym. (2009).



Kuva 3. Tuulitunnelikokeiden pitoisuusgradientit tuulen ollessa vasemmalta oikealle. Suhteelliset pitoisuustasot esitetään väriasteikolla ( $\chi$ ). Heist ym. (2009).

Edellä esitetyn tuulitunnelikokeen tulosten pohjalta Hagler ym. (2011) tekivät laskennallisen virtausmallinnuksen. Mallinnuksen tavoite oli osoittaa epäpuhtauspitoisuuksien muutokset, kun muutetaan meluesteen etäisyyttä päästölähteeseen, esteen korkeutta ja tuulensuuntaa. Hagler ym. (2011) esittävät työnsä yhdeksi keskeiseksi tavoitteeksi mallintaa epäpuhtauspitoisuuksien pystysuuntainen jakautuminen esteen läheisyydessä. Lisäksi tutkimuksen tavoite oli tarkastella pitoisuuksien käyttäytymistä meluesteen katvealueen jälkeen aina 300 metriin asti.

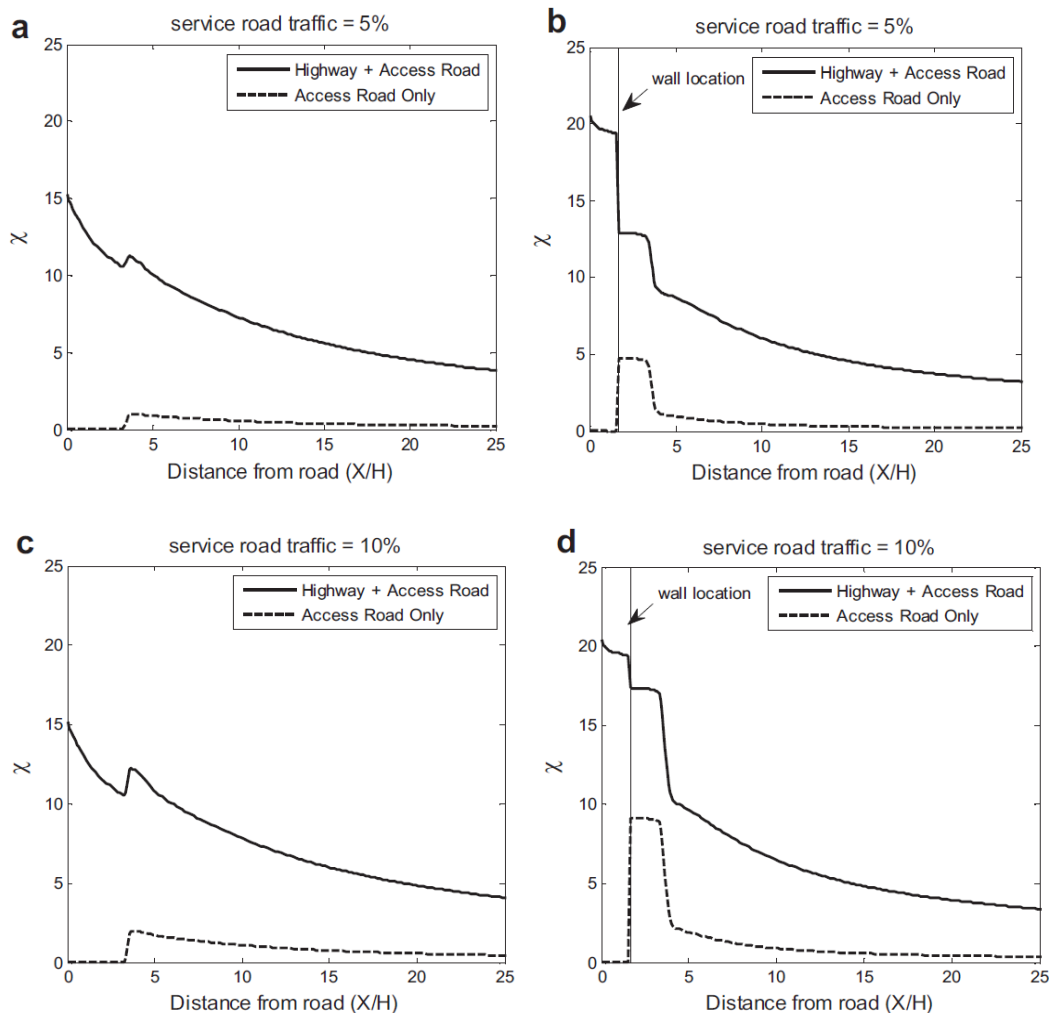
Virtausesteen korkeudella on suuri merkitys ilman epäpuhtauksien leviämiseen. Mitä korkeampi este on, sen pienempiä kokonaispitoisuuksia esteen takaa mallinnettiin. **Pitoisuudet olivat heti 18 m korkean esteen takana noin 80 % ja heti 3 m korkean esteen takana noin 17 % pienempiä kuin vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä (kuva 4).** Kun virtaukset nousevat ylös esteen edessä, ne aikaansaavat esteen korkeudella korkeampia pitoisuuksia kuin avoimessa ympäristössä. Maanpinnassa pitoisuudet ovat sen sijaan alhaisempia. **Noin 150-300 m etäisyydellä virtausesteen vaikutus pitoisuusgradientteihin häviää (kuva 4).** **Virtausesteen edessä ts. tiellä pitoisuudet kasvavat vastaavasti 1,1-2,3-kertaisiksi riippuen esteen korkeudesta.** Tuulensuunta vaikuttaa pitoisuuksiin esteen takana.



**Kuva 4. Mallinnettujen normalisoitujen pitoisuuksien ( $X$ ) pystysuuntainen jakautuminen eri estekorkeudella ja eri etäisyydellä päästölähteestä. Tuuli on kohtisuoraan vasten estettä ja este sijaitsee 9,5 m tiestä. Kuvaajissa korkeus  $Z$  esitetty suhteessa korkeuteen  $H = 6$  m. Mallinnoispiste a) 20 m tiestä, b) 50 m, c) 150 m ja d) 300 m. Hagler ym. (2011).**

Haglerin ym. (2011) mallinnus esittää myös, että **esteen vaakasuuntaisissa päätepisteissä noin 40 m reunasta esteen takana ja sen suuntaisesti ilmenee korkeampia pitoisuuksia virtausten siepatessa esteen eteen kertyneitä epäpuhtauksia esteen taakse**. Pitoisuudet eivät kuitenkaan nouse suuremmiksi kuin vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä. Tämä ns. reunavaikutus ”spill-over effect” on seurausta virtausprofiilin muuttumisesta virtausesteen vaakasuuntaisissa päätepisteissä. Reunavaikutuksen kuvasi ensimmäisenä Baldauf ym. (2008). Tuulen suunnan muuttuessa kohtisuorasta enemmän esteen suuntaiseksi pitoisuudet kasvavat esteen tuulen suuntaan nähden kaukaisemman reunan takana ja alhaisemman pitoisuuden alue havaitaan tuulen suuntaa lähempänä olevan reunan takana.

Tutkimuksessa mallinnettiin myös katvealueella, esteen takana sijaitsevan päästölähteen vaikutus kokonaispitoisuuksiin. Mallinnus osoittaa, kuinka **vähäinenkin päästö katvealueella voi nostaa ilman epäpuhtauspitoisuudet huomattavan suuriksi** (kuva 5). Syyksi tähän Hagler ym. (2011) esittää katvealueella vallitsevat heikot ja pyörivät virtaukset, jotka eivät vie epäpuhtauksia pois päästölähteen läheltä. Käytännössä tällä havainnolla on vaikutusta suunniteltaessa katuja tai teitä välittömästi melusteiden taakse ja katvealueille.



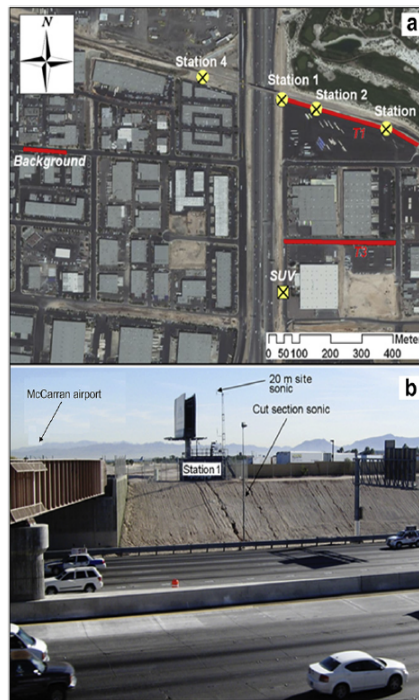
**Kuva 5. Normalisoituja pitoisuuksia eri tilanteissa kun pääpäästölähteen (moottoritie) vieressä kulkee pienempi tie. a) ja c) tilanne ilman virtausestettä ja b) ja d) tilanne virtausesteen kanssa kun pienemmän päästölähteen osuus kokonaispäästöistä on joko 5 tai 10 %. Hagler ym. (2011).**

Baldauf ym. (2013) yhdistää tutkimuksessaan paikallaan olevan mittausaseman ja liikkuvan mittausauton tuloksia sekä tutkimuspaikasta tehdyn mallin tuulitunnelikokeiden havaintoja. Tavoitteena on esittää hiilimonoksidin (CO) ja typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) pitoisuuksien muutoksia erilaisissa tierakenteissa,

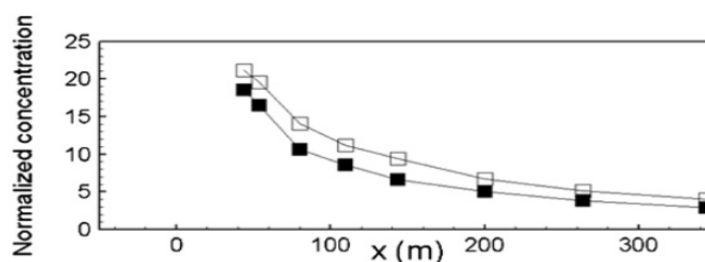


tuuliolosuhteissa sekä päästölähteen määrissä. Vertailtuina ympäristöinä olivat avoin, tien suhteen samassa korossa oleva ympäristö sekä suhteessa ympäristöön madallettu, viistetty tie (kuva 6). Tuulitunnelikokeilla haettiin tilannetta, jossa taustapitoisuuksien vaikutus saataisiin karsittua pois. Erityisesti tavoitteena oli saada näyttöä siitä, laskeeko madallettu ja viistetty tieprofiili ilman epäpuhtauspitoisuuksia tuulen alapuolella. Näin esittää esimerkiksi Heist ym. (2009).

Tuulitunnelikokeiden tulosten perusteella moniulotteisen kaupunkiympäristön mallintaminen on erittäin vaikeaa. Talojen aikaansaamat katvealueet, virtauksen kanavoitumiset ja turbulentsisuuden väheneminen johtavat nopeasti muuttuviin laimenemisolosuhteisiin. **Tuulitunnelikokeiden perusteella madallettu tieprofiili johtaa alhaisempiin epäpuhtauspitoisuuksiin kuin avoin ympäristö** (kuva 7).



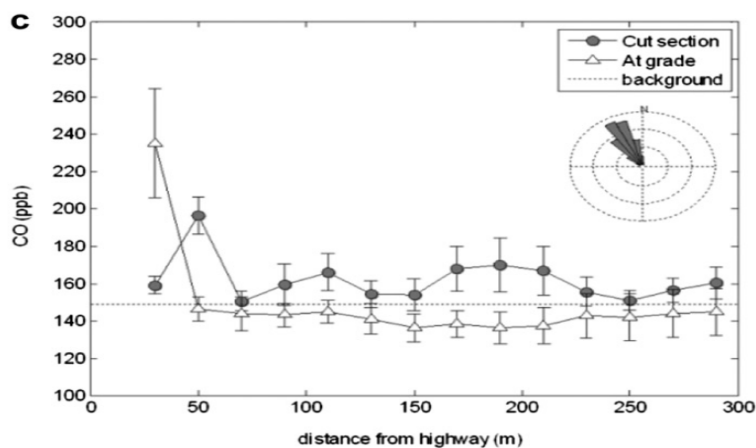
Kuva 6. Mittauspaikan ilmakekuva (a) sekä kuva madalletun, viistetyt tien tilanteesta (b). Madallus on noin 5 m. Karttakuvassa T1 kuvaa madalletun ympäristön mittausaluetta ja T3 tasaista ympäristöä. (Baldauf ym. 2013).



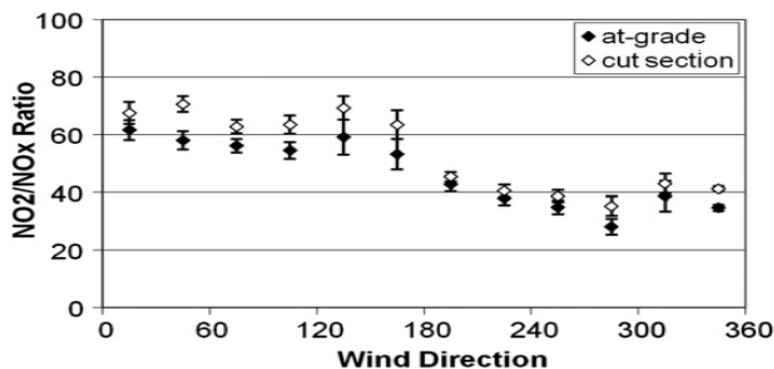
Kuva 7. Tuulitunnelikokeissa mitatut normalisoidut epäpuhtauspitoisuudet etäisyyden funktiona. Valkoinen neliö osoittaa tulokset avoimen ympäristön tilanteesta ja musta neliö madalletun, viistetyt ympäristön tilanteesta. (Baldauf ym. 2013).

**Kenttämittausten tulokset tukevat vain osittain tuulitunnelikokeiden tuloksia ja tehtyjä johtopäätöksiä.** Mittaukset osoittavat erityisesti sen, kuinka vaikea on mallintaa oikean ympäristön olosuhteita. Kenttämittauksia tehtiin Las Vegasissa, USA:ssa runsasliikenteisen 2x5-kaistaisen moottoritien varrella, jossa liikennesuorite on yli 200 000 ajoneuvoa/vrk. Liikkuvilla mittauksilla mitattiin CO-, NO-, NO<sub>2</sub>- ja NO<sub>x</sub>-pitoisuuksia siirtymällä päästölähteestä 300 m etäisyydelle. Mittaustulosten perusteella korkeimmat CO- ja NO<sub>2</sub>-pitoisuudet esiintyvät avoimessa ympäristössä, alhaisen tuulen nopeuden vallitessa. Vaikka suurimmat pitoisuudet mitataankin avoimen ympäristön tilanteessa, ovat keskiarvopitoisuudet suuremmat madalletun, viistetyn tieprofiilin vaikutusalueella. Kuvassa 8 esitetään mitatut CO-pitoisuudet etäisyyden funktiona kummassakin ympäristössä. Lisäksi esitetään mitattu taustapitoisuus. Syynä mittaustulosten poikkeavuuteen mallinnetuista tuloksista pidetään mm. läheisen rautatiesillan vaikutusta virtausprofiiliin.

Vertailupaikkojen NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-suhde mitattiin myös. Suhteen kasvaessa kasvaa päästön ikä, etäisyys lähteeseen jne. Suhteesta (kuva 9) huomataan, että avoimen ympäristön tilanteessa ilman epäpuhtaudet ovat enemmän peräisin lähellä olevasta lähteestä ts. moottoritieltä. Muutunutta ei ole tapahtunut vielä yhtä paljon kuin madalletun, viistetyn ympäristön tilanteessa. Tuulen ollessa tieltä päin kasvaa kummankin mittaustilan NO<sub>x</sub>-osuus suhteessa NO<sub>2</sub>:seen. Tämä kuvaa primääripäästön kasvua. Erityisesti huomataan, että tuulen voimakkuuden kasvaessa ja epäpuhtauspitoisuuksien lasiessa ero vertailupaikkojen välillä korostuu. Tällöin madalletun, viistetyn ympäristön tilanteessa mitataan korkeampia epäpuhtauspitoisuuksia. Syyksi tähän esitetään mm. erilaista epäpuhtauspitoisuuksien kulkeutumista ja sekoittumista vertailupaikkojen välillä ja muun kuin primääripäästön osuuden korostumista madalletun ympäristön tilanteessa.



Kuva 8. Kenttämittauksissa mitattuja CO tuloksia ja vallinnut tuulensuunta vertailuissa ympäristöissä. Avoin ympäristö = kolmio, madallettu ympäristö = ympyrä. (Baldauf ym. 2013).



Kuva 9. Kenttämittauksissa mitattu NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> suhde vertailuissa ympäristöissä. Avoin ympäristö = musta neliö, madallettu ympäristö = valkoinen neliö. (Baldauf ym. 2013).

Steffens ym. (2014) tuulitunnelitutkimuksessa pyrittiin vahvistamaan ja tarkentamaan aikaisemmin mm. Heist ym. (2009) esittämiä havaintoja, miten erilaiset tasaisesta tieprofiilista eroavat rakenteet lisäävät epäpuhtauspitoisuuksien laimenemista päästölähteeseen nähden ja tuulen alapuolella. Lisäksi tässä tutkimuksessa tavoiteltiin ns. reunavaikutuksen tarkempaa määrittelyä.

Tutkimuksensa keskeisenä tuloksena Steffens ym. (2014) nostavat esiin **reunavaikutuksen esiintymisen vähintään 10 m etäisyydellä meluesteen päädyistä eteenpäin avoimen ympäristön suuntaan. Tällä alueella pitoisuudet ovat muuta avointa ympäristöä suuremmat. Reunavaikutus nostaa pitoisuuksia myös esteen takana noin 50 m asti esteen päädyistä esteen suuntaisesti. Tällä alueella pitoisuudet ovat muuta katvealuetta suuremmat, mutta edelleen selkeästi pienemmät kuin avoimessa ympäristössä.** Kaikki rakenteet, jotka vähentävät epäpuhtauspitoisuuksia leviämialueella, lisäävät niitä päästölähteessä eli tiellä. Korkeat rakenteet, jotka saavat aikaan katkuilumaisen ympäristön jättävät epäpuhtaudet tielle. **Tien reunalla, esteen edessä pitoisuudet voivat kohota 2-3-kertaisiksi suhteessa tilanteeseen, jossa estettä tai muuta rakennetta ei ole.** Yleisesti tutkimus vahvistaa käsityksen siitä, että tutkitut tierakenteet laskevat epäpuhtauspitoisuuksia tuulen alapuolella. **Katvealueen vaikutus häviää noin 15 kertaa rakenteen korkeuden mittaisella etäisyydellä,** ts. 6 m korkean meluesteen takana epäpuhtauspitoisuudet vastaavat tilannetta ilman estettä noin 90 m etäisyydellä. Tutkitut mallit olivat samat kuin Heist ym. (2009) tutkimuksessa.

Schulte ym. (2014) sovittaa tuulitunnelikokeiden ja kenttämittauksien tuloksia puoli-kokeelliseen malliin tavoitteenaan yhdistää aikaisemmissa tutkimuksissa havaitut keskeiset ilmiöt toisiinsa mm. Heist ym. (2009). Tarkasteltavia ilmiöitä ovat virtausesteen korkeuden korrelointi epäpuhtauspitoisuuksien esiintymiskorkeuteen ja katvealueen laajuuteen, virtausten pyörteisyyden lisääntyminen esteen takana sekä virtausesteen aikaansaama noste epäpuhtauksien levittäjänä.

Työn tuloksena rakennettu malli kuvaa virtausesteen vaikutuksen katvealueen pituuteen. **Virtausesteen vaikutus näkyy maantasolla esiintyvissä epäpuhtauspitoisuuksissa sitä kauempana mitä alhaisempi on tuulen nopeus ja toisaalta mitä korkeampi on itse virtauseste.** Virtauseste laskee epäpuhtauspitoisuuksia tehokkaimmin silloin, kun ne ovat kaikkein suurimmillaan. **20-50 m etäisyydellä 2 m korkean esteen takana epäpuhtauspitoisuudet ovat noin 60-70 % pienempiä kuin avoimen ympäristön tilanteessa. Vastaavalla etäisyydellä 6 m korkean esteen takana pitoisuudet ovat noin 80-90 % pienempiä kuin avoimen ympäristön tilanteessa.** 3-6 m korkeiden esteiden vaikutus on nähtävissä mallinnuksessa vielä 300-600 m päässä esteen takana. Mallin tulokset vastaavat kohtalaisen hyvin mitattuja tuloksia.

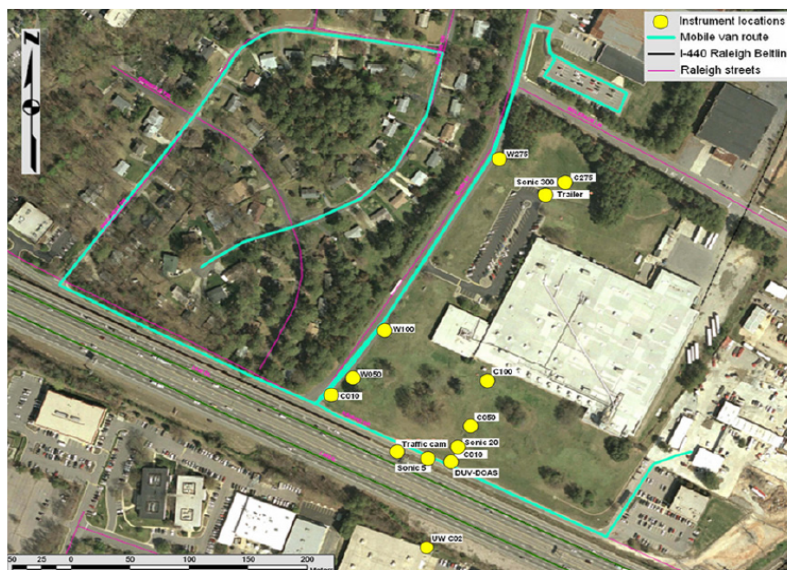
## Kenttämittaukset

Kenttätutkimuksille on tyypillistä mittausjaksojen tekeminen ympäristössä, jossa lyhyellä välimatkalla voidaan kattaa vähintään kaksi erilaista tieprofiilia tai rakennettua tienvarsiympäristöä. Lisäksi koepaikat on pyritty valitsemaan niin, että muiden kuin tarkkailun kohteena olevalta tieltä tulevien liikenneperäisten päästöjen vaikutus olisi mahdollisimman vähäinen.

Bowker ym. (2007) tekemää ja mallinnuksensa luotettavuuden arvioinnissa käyttämää kenttämittausjaksoa on sivuttu edellä mallinnusta käsittelevässä kappaleessa. Laajemmin kyseisen mittausjakson tuloksia ja niistä tehtäviä johtopäätöksiä esittelee saman tutkimusryhmän Baldauf ym. (2008) artikkeli.

Tutkittu ympäristö kattoi avoimen, meluesteen reunustaman ja meluesteen sekä kasvillisuuden reunustaman tienvarsiympäristön (kuva 10). Mittauspaikassa tietä (125 000 ajoneuvoa/vrk) reunustaa 5 m etäisyydellä 6 m korkea melueste. Tien myötäisesti meluesteen takana kulkee liittymätie noin 10 m etäisyydellä päätiestä. Meluesteen takana maastoa kattaa osittain harva, vanhoista lehtipuista koostuva puusto.

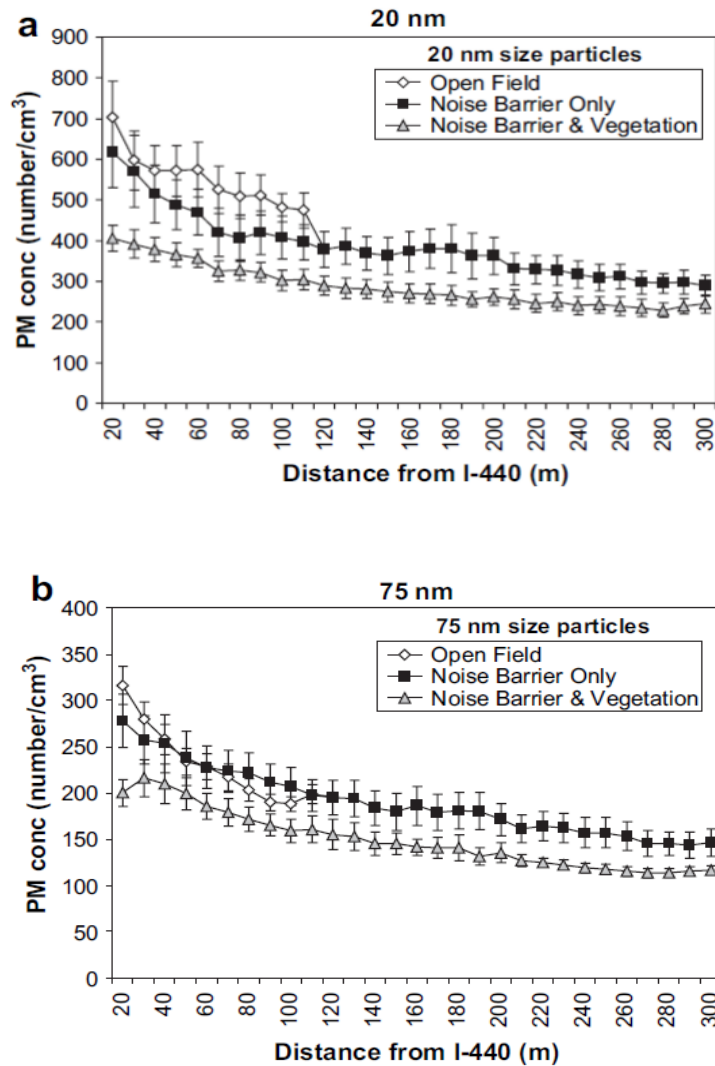
Mittauslaitteisto koostui kiinteistä mittausasemista, joista toiset olivat sijoitettu avoimeen ympäristöön ja toiset meluesteen taakse. Esteen takana olevat asemat sijaitsivat noin 50 m esteen reunasta ja edelleen 20, 50, 100 ja 300 m esteestä poispäin. Kiinteillä mittalaitteilla mitattiin CO ja hiukkasten lukumääräpitoisuuksia. Kiinteiden mittalaitteiden lisäksi tutkimuksessa käytettiin liikkuvaa mittausautoa hiukkasten lukumääräpitoisuuden ja kokojakauman määrittämiseen. Tutkimuksen pääasialliseksi tavoitteeksi nostettiin oikeanlaisten mittaustekniikoiden ja -käytäntöjen löytäminen liikenneperäisten ilman epäpuhtauksien mittaamiseen.



Kuva 10. Mittauspaikan kartta, jossa kiinteiden mittauslaitteiden sijaintia kuvaavat keltaiset ympyrät ja liikkuvan näytteenoton ajamaa reittiä kuvataan vaalean sinisellä viivalla. Baldauf ym. (2008).

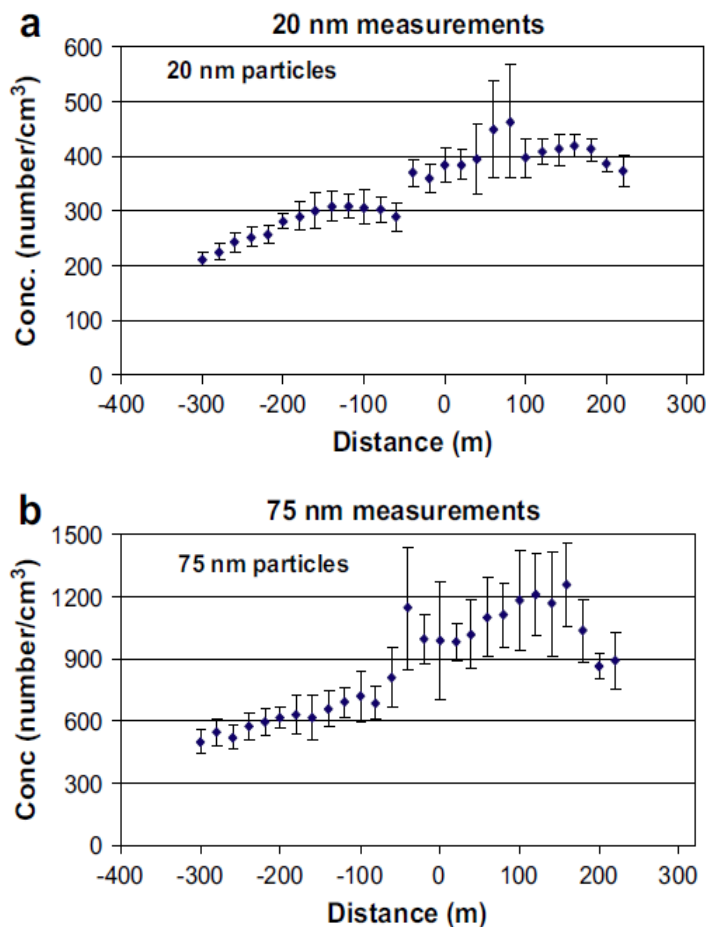
**Tutkimuksen tuloksissa todetaan, että ilman epäpuhtauspitoisuudet ovat välittömästi meluesteen takana ja edelleen noin 50 m asti 15-25 % pienempiä kuin avoimessa ympäristössä tuulen ollessa tieltä päin.** Reunavaikutuksen arvioidaan nostavan pitoisuuksia mittapisteissä esteen takana. Etäisyyden kasvaessa esteen päädyistä esteen suuntaisesti pitoisuusvähennemien esitetään olevan todennäköisesti vielä suurempia. **Meluesteen ja puuston alueella hiukkasten lukumääräpitoisuus on mittauksessa**

**suurimmillaan 50 % pienempi verrattuna avoimeen ympäristöön (kuva 11).** Puuston todetaan lisäävän virtauksen pyörteisyyttä ja sekoittumista ja siksi pudottavan pitoisuuksia. Lisäksi osa pitoisuuksien vähenemisestä voi olla seurausta kasvillisuuden tarjoamasta deponiovaikutuksesta. Reunavaikutus havaitaan selkeästi tehdyistä mittauksista (kuva 12). Kuvasta 12 huomataan, kuinka hiukkaspitoisuudet ovat meluesteen takana koholla vielä noin 40 m päässä esteen päädystä.



Kuva 11. Liikkuvan mittausauton lukumääräpitoisuusmittauksia vertailuympäristöissä esitettynä etäisyyden funktiona alkaen 20 m tiestä ja 15 m meluesteen takaa, a) 20 nm hiukkaset ja b) 75 nm hiukkaset. Baldauf ym. (2008).

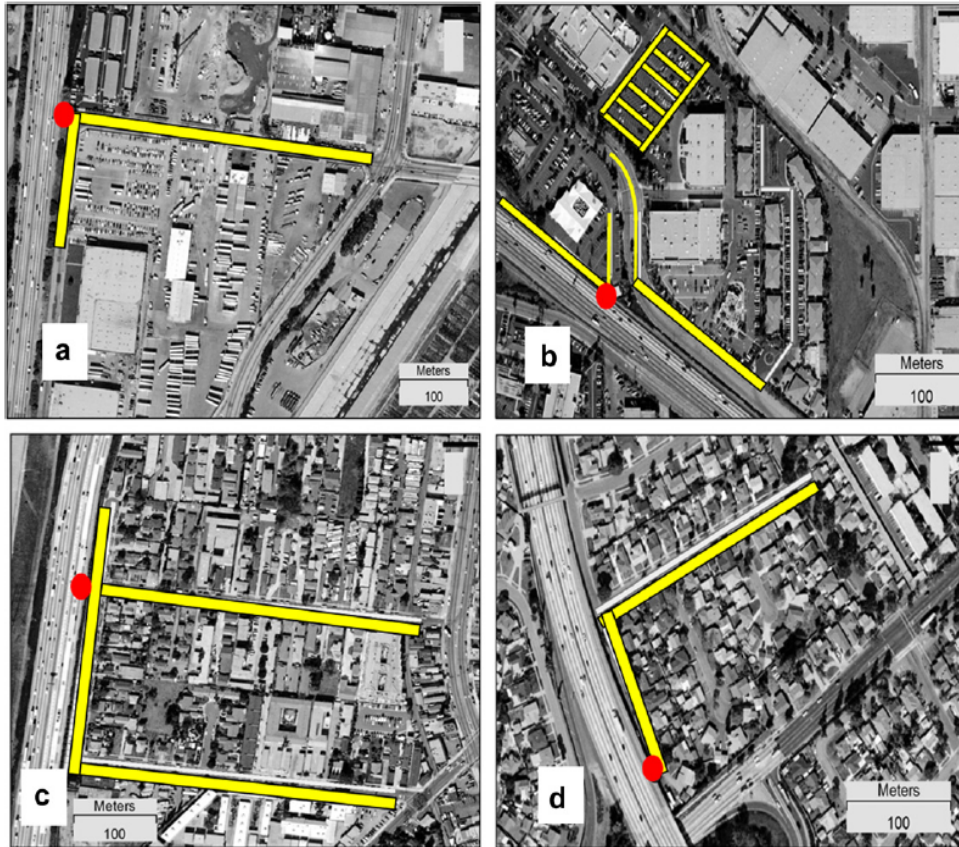




Kuva 12. Liikkuvan mittausauton lukumääräpitoisuusmittauksia tien suuntaisesti noin 15 m etäisyydellä tiestä. 0–piste kuvaa meluesteen päätyä ja miinusmerkkiset etäisyytlukemat matkaa päädyistä meluesteen takana, a) 20 nm hiukkaset ja b) 75 nm hiukkaset. Mittausten lukumäärä 40 per piste, palkit kuvaavat 95 % luottamusväliä. Baldauf ym. (2008).

Ning ym. (2010) kenttätutkimuksessa tehtiin mm. hiukkasten lukumääräpitoisuusmittauksia kahden runsasliikenteisen moottoritien ympäristössä eteläisessä Kaliforniassa. Tutkitut ympäristöt olivat tienvarsi meluesteen kanssa ja avoin ympäristö. Tutkimuksen päätavoite oli saada lisäselvyyttä erityisesti epäpuhtauspitoisuuksien käyttäytymiseen ns. katvealueen jälkeisellä virtauksen laskeutumisalueella.

Tutkimuspaikan kartta esitetään kuvassa 13. Kuvasta nähdään kiinteät mittauspaikat sekä liikkuvan mittausauton reitit. Meluesteen korkeus oli ensimmäisessä tutkimuspaikassa (c) 3,7 m ja mittausalueen etäisyys esteen päätyihin useita satoja metrejä. Toisessa paikassa (d) meluesteen korkeus oli 5,2 m, etäisyyttä reunoihin ei mainita. Kummassakaan tutkimuspaikassa ei katsottu olevan tien lisäksi muita merkittäviä päästölähteitä. Mittauksissa käytetty mittalaitteisto esitetään taulukossa 1. Kiinteillä mittausasemilla mitattiin hiukkaskokojakaumaa alueella 10-225 nm. Lisäksi mitattiin hiukkasten mustaa hiiltä (BC), CO ja NO<sub>2</sub>. Liikkuvalla mittauskalustolla mitattiin hiukkaskokojakauma alueella 6-523 nm sekä BC, CO ja NO<sub>2</sub>. Mittausjakson aikana valitseva tuuli (0,9-3,1 m/s) oli tieltä kohti mittauspaikkoja.



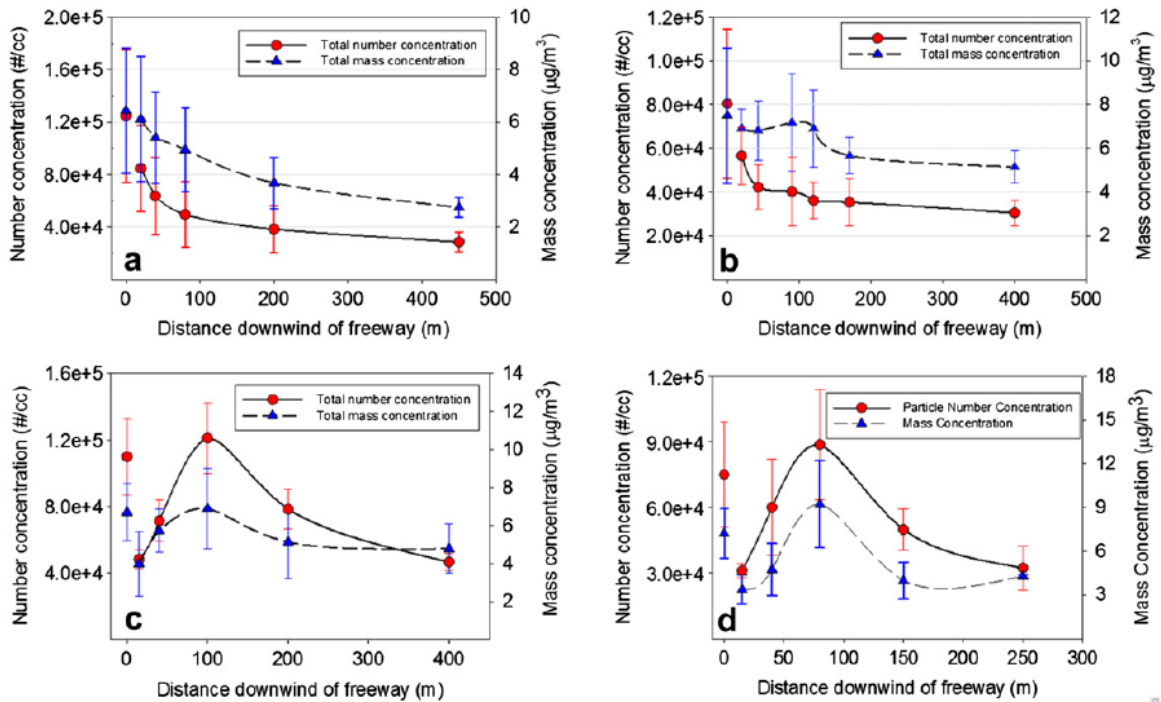
Kuva 13. Ning ym. (2010). tutkimusalueet a) moottoritie I-710 ilmaa meluestettä, b) moottoritie I-5 ilman meluestettä, c) I-710 ympäristö meluesteen takana ja d) I-5 ympäristö meluesteen takana.

Taulukko 1. Mittalaitteet ja menetelmät. Ning ym. (2010).

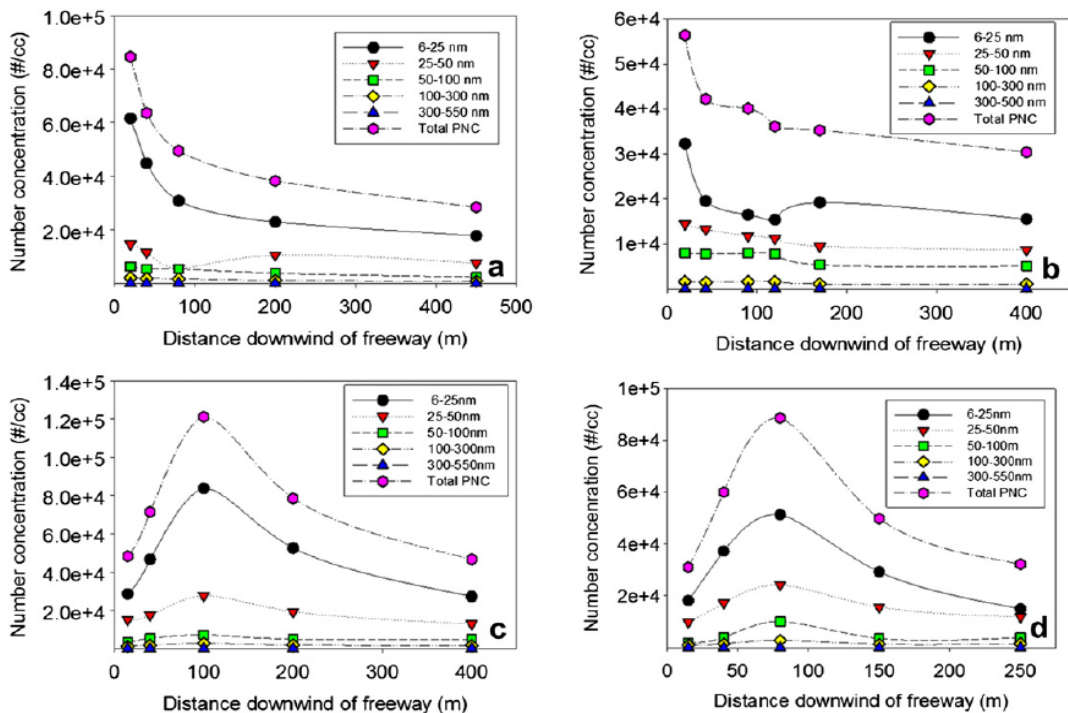
Measurement	Stationary sampling station	Mobile platform
Geodata	GPS (Garmin GPSmap 76CSx)	GPS(Garmin GPSmap 76CSx)
Particle size distribution	SMPS: TSI model 3080 (long DMA) w/TSI model 3022A (CPC) @ 5 min intervals (10–225 nm range)	FMPS: TSI model 3091 @ 20 s intervals (6–523 nm range)
Particle-bound Black Carbon	Aethalometer: Anderson model 14 (dual channel) @ 1 min intervals	Aethalometer: Magee Scientific @ 1 min intervals
CO	QTrak – TSI model 7565 @ 1 min intervals	Teledyne-API model 300E for CO @ 20 s intervals
NO2	Teledyne-API model 200A @ 1 min intervals	Teledyne-API Model 200E @ 20 s intervals
Meteorological data	3-D ultrasonic anemometer (RS Young model 81 000) @ 1 min intervals	2-D Ultrasonic anemometer (RS Young) @ 1 s intervals

Ning ym. (2010) tuloksista keskeisin on Bowker ym. (2007) mallinnuksessaan esittämän ilmiön havaitseminen kenttämittauksin. Tässä ilmiössä virtausesteen taakse jäävän katvealueen jälkeen maantasolla esiintyy korkeampia epäpuhtauspitoisuuksia kuin vastaavalla etäisyydellä ilman estettä. Pitoisuudet ovat tällä alueella huomattavasti korkeampia, kuin heti esteen takana. Kuvassa 14 esitetään mainittu havainto liikkuvalla mittausautolla mitattujen hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksien perusteella. Tarkasteltaessa hiukkaskokojakaumaa etäisyyden funktiona, huomataan noin 10 nm hiukkasten muodostavan selkeästi suurimman osan liikenneperäisten hiukaspäästöjen lukumääräpitoisuudesta. Nämä hiukkaset muodostuvat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden nukleation edetessä heti päästölähteen läheisyydessä. Niiden esiintymisen seuraaminen antaa hyvän kuvan liikenneperäisten hiukaspäästöjen käyttäytymisestä. Kuvasta 15 huomataan, että 10 nm hiukkas- ja kokonaislukumääräpitoisuus on noin 50 % pienempi heti meluesteen takana verrattuna avoimen ympäristön tilanteeseen. **Katvealueen jälkeen, 80-100 m päässä meluestestä, 10 nm hiukkasten pitoisuudet kohoavat ja ovat tutkimuspaikasta riippuen 2,2-2,4 kertaa suuremmat kuin avoimen ympäristön tilanteessa.** Huomioitavaa on myös, että

taustapitoisuudet saavutetaan meluesteen jälkeen noin 100-200 metriä etäämpänä kuin avoimessa ympäristössä.

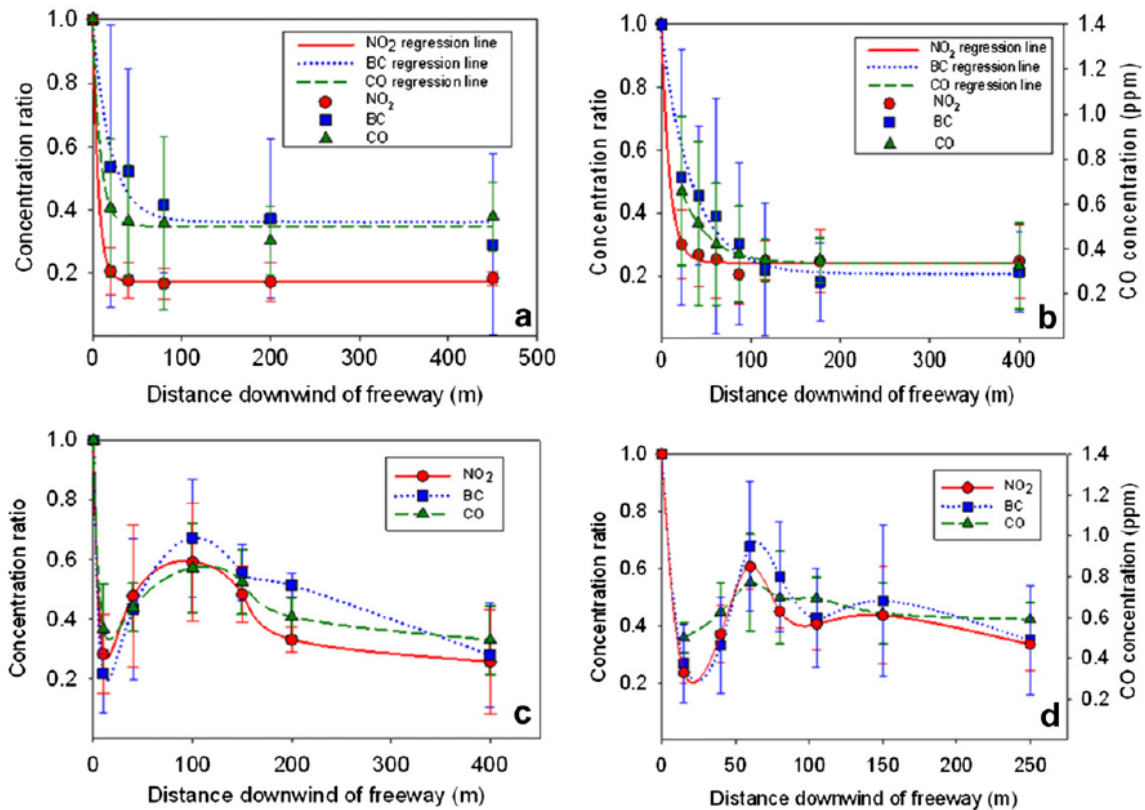


Kuva 14. Hiukkasten lukumääräpitoisuudet ja massapitoisuudet eri etäisyyksillä tiestä a) I-710 ei meluestettä, b) I-5 ei meluestettä, c) I-710 melueste ja d) I-5 melueste.  $X = 0$  m tulokset kiinteältä mittausasemalta. Muut tulokset eri etäisyyksiltä liikkuvalla mittausasemalta. Kiinteä mittausasema sijaitsi meluesteen ja tien välissä. Ning ym. (2010).



Kuva 15. Hiukkasten lukumääräpitoisuudet eri kokoluokissa ja kokonaislukumääräpitoisuus a) I-710 ei meluestettä, b) I-5 ei meluestettä, c) I-710 melueste ja d) I-5 melueste. Ning ym. (2010).

Mitattujen CO, NO<sub>2</sub> ja musta hiili (BC) pitoisuudet käyttäytyvät edellä esitettyjen hiukkaspitoisuuksien tavoin. Tien välittömästä läheisyydestä mitattuihin pitoisuuksiin suhteutetut tulokset etäisyyden funktiona esitetään kuvassa 16. Taustapitoisuudet saavutetaan avoimen ympäristön tilanteessa 80-100 m etäisyydellä tiestä ja 250-400 m etäisyydellä tiestä, kun tietä reunustaa melueste.



Kuva 16. Kaasumaisten ja mustan hiilen normalisoidut pitoisuudet etäisyyden funktiona tiestä a) I-710 ei meluestettä, b) I-5 ei meluestettä, c) I-710 melueste ja d) I-5 melueste. Ning ym. (2010).

Hagler ym. (2010) tutkivat liikkuvalla mittauskalustolla hiilimonoksidin ja hiukkasten lukumääräpitoisuuden (< 100 nm) käyttäytymistä moottoritien läheisyydessä Pohjois-Carolinassa. Tutkimusalue kattoi monta tienvarsiympäristöä mm. meluesteen, kasvillisuutta sekä tiheään rakennetun ympäristön. Vertailua tehtiin samalta alueelta mitattuun taustapitoisuuteen nähden. Viikon aikana mitattiin kuusi kertaa. Kokonaisuudessaan tutkimuksessa katettiin noin 10 km tietä vaihtelevassa ympäristössä (kuva 17). Viikon tutkimusjakson aikana alueella vallitsi kolme erilaista tuulitilannetta. Tutkimuspäivät ryhmiteltiin tuulitilanteiden perusteella. 3-4 m/s luoteistuuli vallitsi päivinä 4 ja 5, 2-3 m/s lounaistuuli päivinä 2 ja 3. Päivinä 1 ja 6 tuulen katsottiin olevan joko vähäinen tai hyvin vaihteleva. Tutkitut ympäristöt (kuva 17) olivat N1, tien ja mittausalueen välissä on puurivistö ja yksikerroksisia toimistotaloja, N2 on avoin ympäristö, N3 ja N4 alueet sijaitsevat 5 metrisen meluesteen takana sillä erolla, että N3 on lähempänä esteen reunaa (135 m) kuin N4 (225 m). Alueiden N3 ja N4 edessä ennen estettä on sivutie. Moottoritien eteläpuoleiset alueet S1 ja S2 erosivat toisistaan siinä, että S2 on 5 metrisen meluesteen takana. Kyseisen meluesteen takana kulkee vähäliikenteinen tie, jota reunustavat puut.

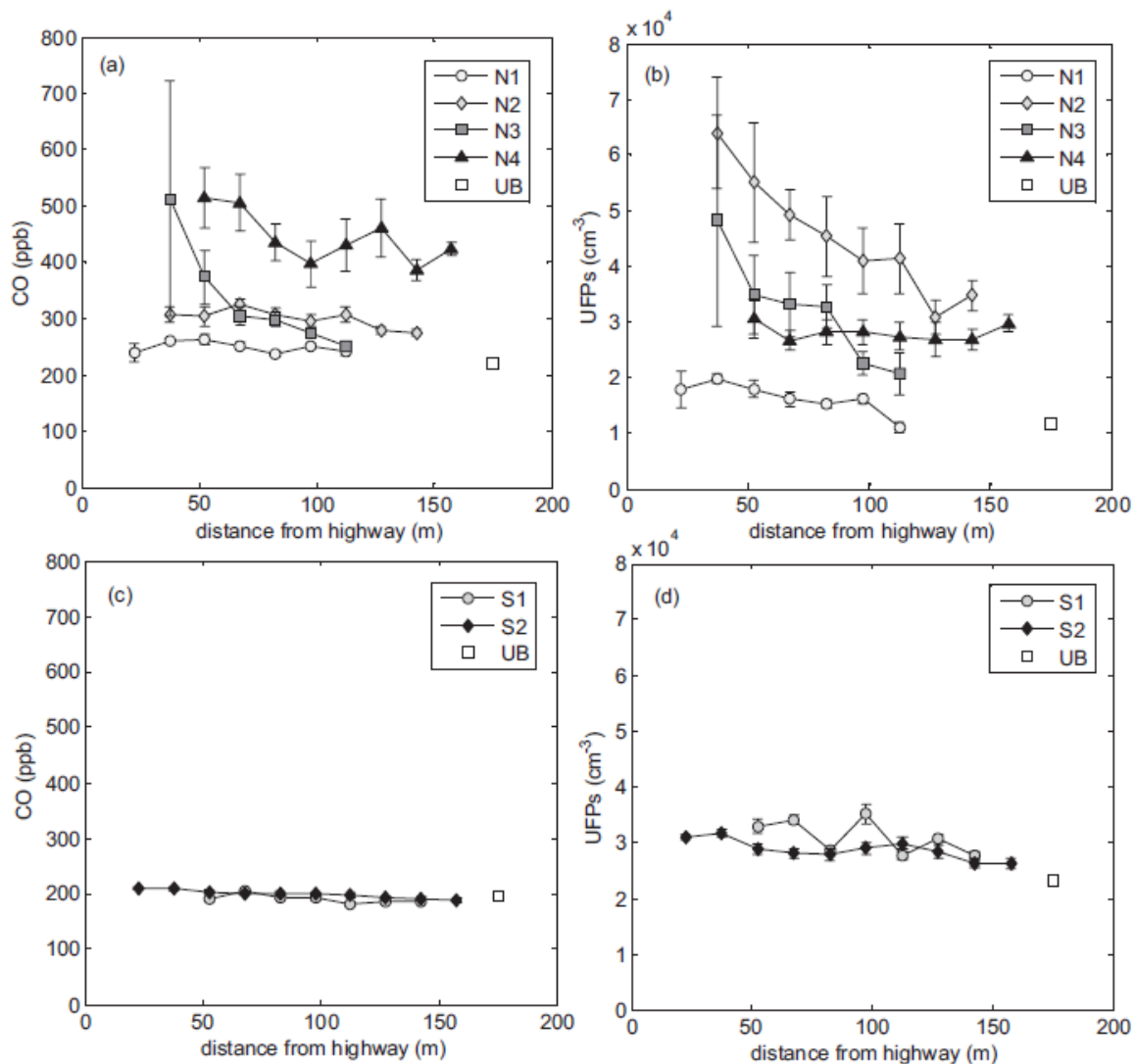




Kuva 17. Tutkimuksessa ajettu reitti väritunnusin. Punainen = moottoritie, Oranssi = pysähtelevää ajoa, Keltainen = moottoritien läheiset alueet (< 150 m), Vaalean sininen = tausta. Pohjoisen puoleiset tienvarsiympäristöt N1 – N4 ja tien eteläpuoleiset alueet S1 ja S2. Hagler ym. (2010).

Tutkimuksen keskeinen tulos on vallitsevan tuulen suunnan ja erityisesti tuulen voimakkuuden merkityksen osoittaminen liikenteen aiheuttamien epäpuhtauksien leviämiseen ja laimenemiseen. Lisäksi havaittiin **puustokaistaleen vaikutusalueella N1 noin 60 % pienemmät hiukkasten lukumääräpitoisuudet kuin avoimessa ympäristössä vastaavalla etäisyydellä**. Kaikkien mitattujen alueiden hiukkas- ja CO-pitoisuudet laskevat etäisyyden kasvaessa tiehen (kuva 18). Tutkimuksessa esitetään mitattujen epäpuhtauspitoisuuksien olevan taustan tasolla alueella N1 tuulen ollessa tieltä päin. Muut pohjoisen puolen alueet eivät saavuta taustapitoisuuksia mitatulla noin 150 metrin matkalla. **Hiukkasten lukumääräpitoisuudet ovat melusteiden vaikutusalueella ns. katvealueella noin 30 % pienempiä kuin vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä**. Tutkimuksen mukaan melusteiden katvealueelle sijoitetulla tiellä on suuri merkitys erityisesti hiukkas- ja CO-pitoisuuksien nostajana. Kun tuuli pohjoisesta ja tuulen nopeus oli kaksinkertainen etelätuuleen verrattuna, mitattiin alueilta S1 ja S2 täysin taustapitoisuuksien suuruisia hiukkas- ja CO-pitoisuuksia. Tuulenopeuden kasvaessa siitä tulee määräävä tekijä epäpuhtauksien laimenemisessä. Tyyneellä tai alhaisella tuulenopeudella pitoisuudet ovat sekä itse tiellä että lähiympäristössä korkeampia kuin suurella tuulenopeudella.





Kuva 18. CO- ja hiukkaspitoisuusgradientit moottoritiehen nähden tuulen alapuolelta. Erilliset tienvarsiympäristöt N1–N4 ja tien eteläpuoleiset alueet S1 ja S2. Hagler ym. (2010).

Hagler ym. (2012) jatkoi Pohjois-Carolinassa tekemiään mittauksia liikkuvalla mittauskalustolla. Tavoitteena tutkimuksessa oli osoittaa melusteiden ja kasvillisuuden vaikutus ilman hiukkaspitoisuuksien laimenemiseen tienvarsiympäristössä. Tutkimuspaikat valittiin niin, että yhdessä oli kapea, leveys < 10 m, ikivihreä puustokaista tien ja tutkimusalueen välillä. Toisessa puusto oli lehtipuuta, puustokaistan leveys < 10 m ja kolmannessa paikassa tien ja tutkimusalueen välissä oli 6 m korkea tiilinen meluste. Mittauksia tehtiin sekä syksyllä lehtipeitteen aikaan, että talvella lehdettömään aikaan.

**Tutkimuksessa osoitettiin jälleen melusteen hiukkaspitoisuuksia maantasossa vähentävä vaikutus heti melusteen takana. Kapealla puustokaistalla ei tämän tutkimuksen tulosten perusteella ole merkittävää vaikutusta < 100 nm kokoluokan hiukkasten pitoisuuksiin.** Lehtipuuvyöhykkeen ja ikivihreän puustovyöhykkeen välille ei löydetä eroa, eikä eroa juurikaan ole lehdettömällä tai lehdellisellä lehtipuulla. Lehdessä olevan lehtipuuvyöhykkeen takaa mitattiin ajoittain avoimeen ympäristöön nähden korkeampia pitoisuuksia. Havainto mitattiin tuulen ollessa tieltä kohti vyöhykettä.

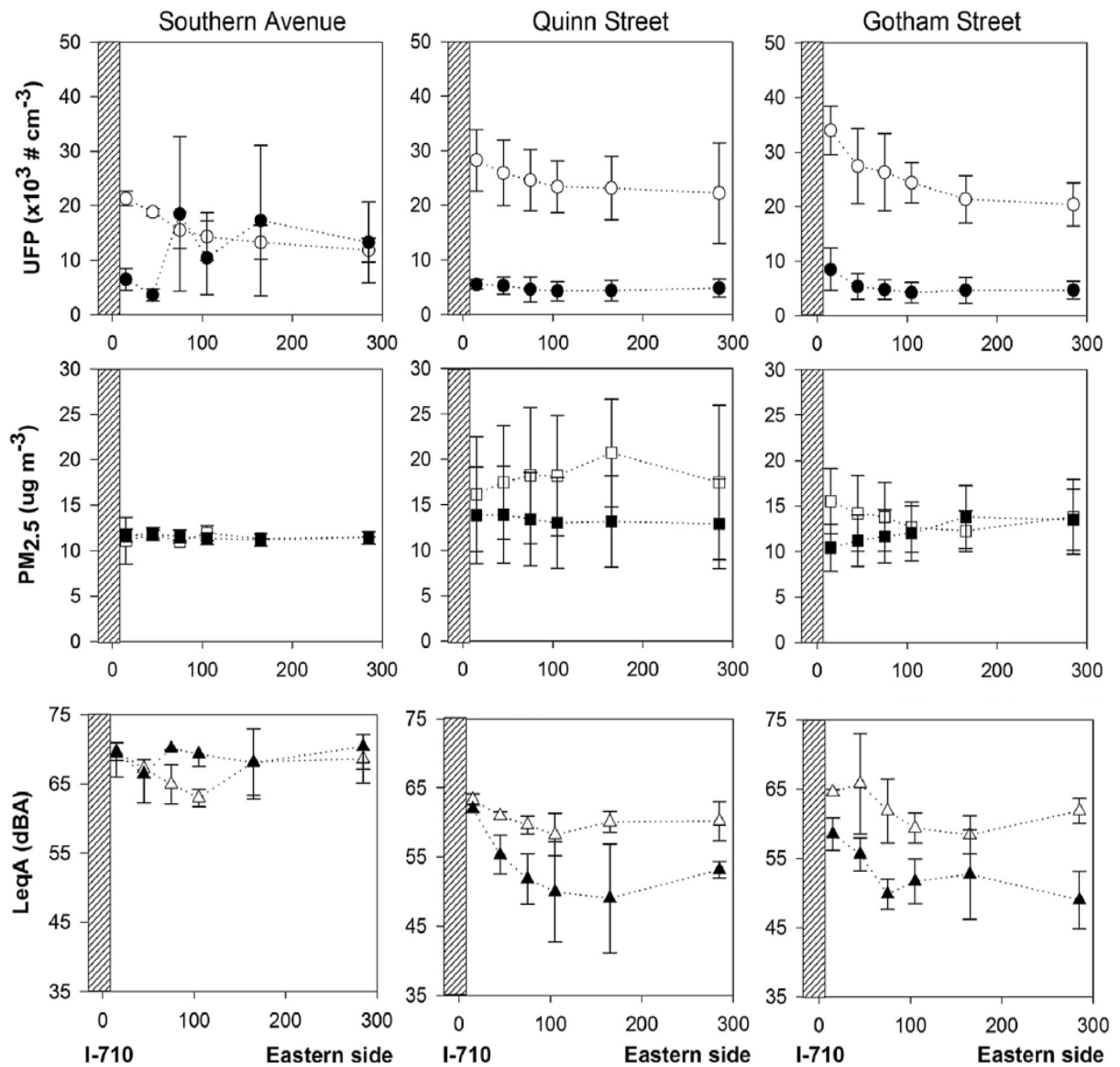
Tutkimuslaitosten ulkopuolelta tuleva M+P-consulting engineers tutki 2007-2009 Hollanissa eri materiaaleista rakennettujen ja korkuisten melusteiden vaikutusta hiukkas- ja NO<sub>x</sub> -pitoisuuksiin heti esteen takana. (Hooghwerff ym. 2010). Paikalleen asennetuilla mittalaitteilla mitattiin 5, 10 ja 28,5 metriä esteen takaa. **Sekä hiukkasten massapitoisuudet (PM<sub>2,5</sub> ja PM<sub>10</sub>) että NO<sub>x</sub>-pitoisuudet olivat pienempiä esteiden takana**

**kuin avoimessa ympäristössä.** 7 metriä korkean esteen takana epäpuhtauspitoisuudet olivat alhaisempia kuin 4 metriä korkean esteen takana. **Vaikutusta ei havaittu olevan erityisillä pinnoitus- tai rakennusmateriaaleilla kuten kasvipeitteellä tai  $TiO_2$ .** Huomioitavaa on, että tutkimus tehtiin hyvin lyhyillä melusteilla, jolloin ns. reunavaikutuksella (mm. Steffens ym. 2014) tulisi olla runsaastikin vaikutusta tuloksiin.

Zhu ym. (2014) kytkivät liikenteen aiheuttaman melutason ilman ultrapienien hiukkasten lukumääräpitoisuuksiin ja  $PM_{2,5}$  massapitoisuuksiin. Tutkimuksessa mitattiin neljällä tutkimuspaikalla, joista kaksi oli saman 4 metriä korkean meluesteen takana 200 metrin päässä toisistaan ja kolmas saman tien varressa, mutta ilman meluestettä. Mittauksia tehtiin 15, 45, 75, 105, 165 ja 285 metrin päässä tien keskilinjalta niin, että ensimmäinen piste oli juuri meluesteen takana.

Tutkimuksen mukaan tuulen suunta ei juurikaan vaikuta liikennemelun voimakkuuteen eikä sen vaimenemisprofiiliin. Sen sijaan hiukkasten lukumääräpitoisuuksissa tuulen suunnan vaikutus näkyy selkeästi. Tuulen alapuolella hiukkasten lukumääräpitoisuudella ja melulla on positiivinen korrelaatio, joka muuttuu riippuen siitä, onko kohteessa meluste vai avoin ympäristö.  $PM_{2,5}$  massapitoisuudella ei havaita merkittävää muutosta tutkituissa ympäristöissä. Tutkituissa ympäristöissä liikenneperäisillä hiukkasten massapäästöillä ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta kokonaispitoisuuksiin. Huomioitavaa on, että vaikka meluesteen vaikutusympäristössä hiukkasten lukumääräpitoisuudet laskevatkin nopeammin kuin ilman estettä, absoluuttiset pitoisuudet ovat kuitenkin noin 35-55 % suurempia kuin avoimen ympäristön tilanteessa. Samanaikaisesti melutaso putoaa heti esteen takana selkeästi (kuva 19).

Hagemann ym. (2014) mittasivat Karlsruhen alueella hiukkasia ja  $NO_x$ :a eri raitiovaunureiteillä. Tutkimus ei tuota suoranaista lisätietoa melusteiden problematiikkaan, mutta korostaa tuulen merkitystä ilman epäpuhtauspitoisuuksia laimentavana tekijänä. Siellä missä ei ole virtausesteitä tuuli kuljettaa epäpuhtaudet laajemmalle alueelle, kun taas tiiviissä kaupunkikeskustassa tuulen suunnalla ei voida osoittaa olevan juurikaan vaikutusta epäpuhtauspitoisuuksien laimentamiseen.



Kuva 19. Melu- ja hiukkasmittaustuloksia saman tien varrelta esitettyinä kasvavalla etäisyydellä tiestä. Tuuli on tieltä päin. Kohteissa Quinn street ja Gotham street on 4 metriä korkea meluste. Valkoinen symboli kuvaa päivällä tehtyjä mittauksia ja musta symboli yöllä tehtyjä mittauksia. Zhu ym. (2014).

## 3. Tienvarsikasvillisuuden vaikutus

Kasvillisuudella on osoitettu olevan kyky sitoa monia ilman epäpuhtauksia. Vaikka kasvillisuus toimii myös monien komponenttien päästölähteenä, sen nettovaikutus ilman epäpuhtauspitoisuuksiin on positiivinen. Usein laajemmilla puustoaalueilla tehtyjen depositio- tai diffuusiokokeiden tulosten suora sovittaminen kaupunkimaiseen puistoympäristöön tai kapeisiin tienvarsipuustoihin on kuitenkin hyvin vaikeaa. Tienvarsikasvillisuuden vaikutusta liikenneperäisten epäpuhtauksien leviämiseen ja pitoisuuksiin lähialueella on selvitetty tutkimuksissa mallintamalla, tuulitunnelikokeilla ja mittauksilla.

### 3.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet

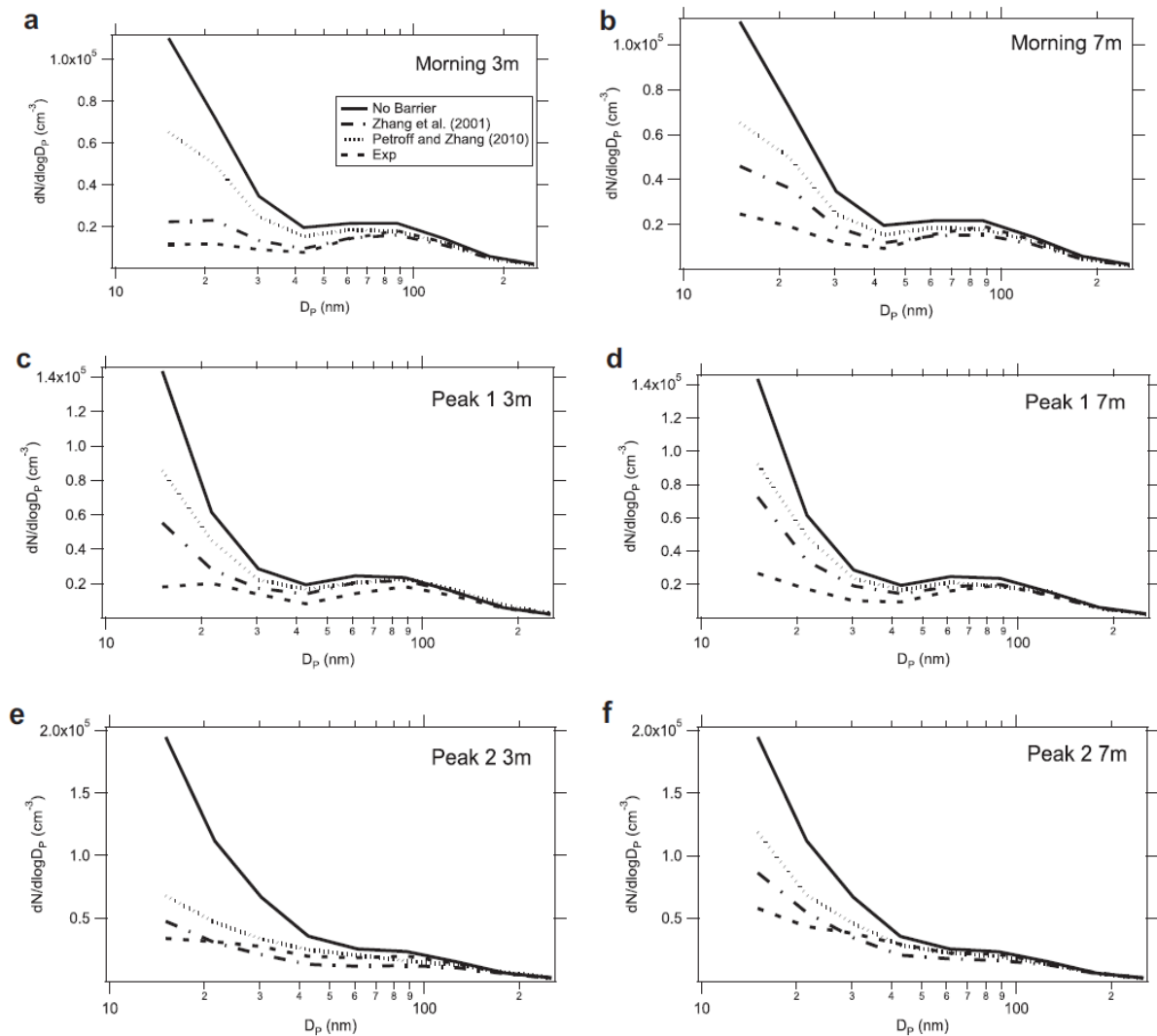
Yksiselitteisesti ja pelkästään kasvillisuuden vaikutusta ilmanlaadun muutoksiin on mallinnoilla ja tuulitunnelikokeilla tutkittu selkeästi vähemmän suhteessa mekaanisiin rakenteisiin kuten meluesteisiin.

Bowker ym. (2007) tutkimusta on käsitelty tässä selvityksessä jo aikaisemmin luvussa 2.1. Siinä kenttämittauksen tuloksia yhdistettiin matemaattiseen malliin, jolla tarkasteltiin virtausprofiilien muutosta esteiden ympärillä. Ympäristöinä olivat päästölähteenä toimivan tien vieressä oleva avoin ympäristö, melueste ja melueste yhdistettynä kasvillisuuteen. Meluesteen ja kasvillisuuden yhdistelmä alensi mallinnus- ja mittaustulosten perusteella pitoisuuksia suhteessa avoimeen ympäristöön.

Steffens ym. (2012) yhdistää hiukkasten aerodynamiikkaa ja depositiomekanismeja kuvaavia yhtälöitä aerosolien ja kaasujen käyttäytymistä kuvaavaan malliin. Tutkimuksen tarkoituksena on simuloida tienvarsikasvillisuuden vaikutusta ultrapientien hiukkasten lukumääräpitoisuuksiin ja -jakaumaan kolmen metrin päässä 6-8 m korkean esteen takana ja verrata saatuja tuloksia kenttämittauksiin. Liikenneperäisten ilman epäpuhtauksien vähentämiseen kasvillisuudella katsotaan olevan kaksi keskeistä vaikutusmekanismia. Nämä ovat sekoittumisen lisääminen turbulenssin kasvun myötä sekä kuivadepositio.

Mallia ja puustokaistaleen takana sekä avoimessa ympäristössä tehtyjä kenttämittauksia verrattiin vain työssä määriteltyjen stabiilien meteorologisten olosuhteiden vallitessa. Stabiilisuus määriteltiin tuulen suunnan ja voimakkuuden perusteella. Varsinaisten kolmen mallinnustilanteen lisäksi mallin herkkyyttä arvioitiin muuttamalla geometriaa, meteorologiaa ja lehtipeitettä. Mallin tarkkuuden kannalta keskeiset muuttujat ovat tuulennopeus mallin pisteissä sekä depositionopeus. Depositionopeuksina käytettiin sekä Zhang ym. (2001) että Petroff ja Zhang (2010) esittämiä nopeuksia.

Tuloksista havaitaan, että tärkein tekijä mallinnuksen onnistumisessa on paikallisten virtausolosuhteiden määrittäminen. Se mitä paremmin malli onnistuu arvioimaan tuulennopeuden, sitä lähemmäs se päätyy kenttämittausten pitoisuustuloksia (kuva 20). **Depositioilla on mallissa merkitystä erityisesti alle 50 nm hiukkasten lukumääräpitoisuuksien vähenemisessä. Mittaustulosten mukaan kolmen metrin päässä tiestä puustovyöhykkeen takana ultrapientien hiukkasten lukumääräpitoisuudet ovat vähintään 50-60 % pienemmät kuin avoimessa ympäristössä.** Mallin kyky simuloida hiukkasten lukumääräpitoisuuksia on kohtalaisen hyvä. Herkkyyksianalyysin perusteella Steffens ym. (2012) esittää, että lehtipeitteen määrän ja geometrian, vuodenaikojen vaihtelun sekä tuulennopeuden arvioinnin tarkkuus on ratkaisevaa simulaation kannalta. Depositionopeuden mallinnukset on tehty laajojen metsävyöhykkeiden puustolle, mutta sopivat kohtalaisen hyvin myös pienemmän puustoaalueen vaikutusten arviointiin.



Kuva 20. Mallinnuksen tuloksia esitettynä mitattujen lukumääräpitoisuustulosten kanssa (Exp). Kuvaajissa esitetään vertailun vuoksi myös mitatut pitoisuudet avoimen ympäristön tilanteessa (yhtenäinen viiva). a) aamuliikenne 3 m korkeus, b) aamuliikenne 7 m korkeus, c) korkean pitoisuuden jakso 1, 3 m korkeus, d) korkean pitoisuuden jakso 1, 7 m korkeus, e) korkean pitoisuuden jakso 2, 3 m korkeus sekä f) korkean pitoisuuden jakso 2, 7 m korkeus. Steffens ym. (2012).

## 3.2 Kenttämittaukset

Kasvillisuuden vaikutusta liikenneperäisten ilman epäpuhtauksien pitoisuuksiin heti liikenneväylien lähellä on pyritty osoittamaan kenttämittauksilla. Kasvillisuuden vaikutusta tutkiville kenttämittauksille on tyypillistä, että kasvillisuusvyöhykettä käsitellään rakennetun meluesteen tavoin ja mittauksia on tehty usein meluestetarkastelun yhteydessä. Leveämmän, kasvillisuudeltaan ja korkeudeltaan vaihtelevan kasvillisuusvyöhykkeen vaikutusta on selvitetty vähemmän.

Tämän selvityksen melusteita käsittelevässä osassa on jo viitattu kasvillisuutta koskeviin mittaustuloksiin ja johtopäätöksiin, mikäli ne on tutkimusjulkaisussa esitetty osana meluesteproblematiikkaa (luku 2).

Kasvillisuuden merkitystä kaupunki-ilmanlaatuun käsittelee mm. Setälä ym. (2013). Tutkimuksessa tienvarsikasvillisuutta ei käsitellä vain kapeana, seinämämäisenä virtausesteenä. Tutkimuksen tavoite on selvittää laaja-alaisesti kaupunkikasvillisuuden ja liikenneperäisten ilman epäpuhtauksien välistä suhdetta. Erityisesti tavoitteena on selvittää avoimen ja kaupunkimetsien sekä -puistojen välinen ero mitattaessa ilman NO<sub>2</sub>, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) passiivikeräimillä. Hiukkasten lukumääräpitoisuuksia sekä massapitoisuuksia (PM<sub>2,5</sub> ja PM<sub>10</sub>) mitattiin lyhytkestoisissa (3x1h) aktiivimittauskampanjoissa. Mittauksia tehtiin Helsingissä ja Lahdessa kesällä sekä talvella lehtipeitteen mahdollisen vaikutuksen selvittämiseksi.

Tutkimuksessa löydettiin selkeä, joskin ilmanlaadun kannalta suhteellisen pieni vähenemä mitatuissa hiukkasten massakertymissä kasvillisuusalueilla suhteessa avoimeen ympäristöön. Hiukkasten poistuma oli suurempaa kuin kaasumaisten komponenttien. Huomioitavaa on, että lukumääräpitoisuuksissa havaitaan suurempi muutos kuin PM<sub>2,5</sub> ja PM<sub>10</sub> massapitoisuuksissa.

Brantley ym. (2014) valitsi tutkimuspaikakseen golfkentän kuusikaistaisen moottoritien vierestä Detroitissa, USA:ssa. Runsaaliikenteistä tietä osin reunustava kasvillisuusvyöhyke oli 5-78 metriä leveä koostuen pääasiassa tammesta ja vaahterasta (kuva 21). Noin 10 metriä korkean puuston lisäksi vyöhykkeessä on pensasmaista kasvillisuutta.

Mustan hiilen pitoisuuksia, hiukkasten massapitoisuuksia (PM<sub>2,5</sub> ja PM<sub>10</sub>) sekä hiukkasten lukumääräpitoisuuksia (0,5-10 µm) mitattiin kiinteillä ja kannettavilla analysointilaitteilla yhteensä 28 vuorokauden ajan mittapisteistä, joiden ympäristöä voidaan kuvata avoimeksi alueeksi ja kasvillisuusvyöhykkeen vaikutusalueeksi. Metsävyöhykkeen keskimääräinen lehtialaindeksi, LAI (*Leaf Area Index*) oli mittauspaikalla 2,6-4,7. Mittauskampanjan aikana tuulen suunta vaihteli siten, että mittapisteet olivat tieltä puhaltavan, tien suuntaisesti puhaltavan ja tielle golfkentältä puhaltavan tuulen alla.

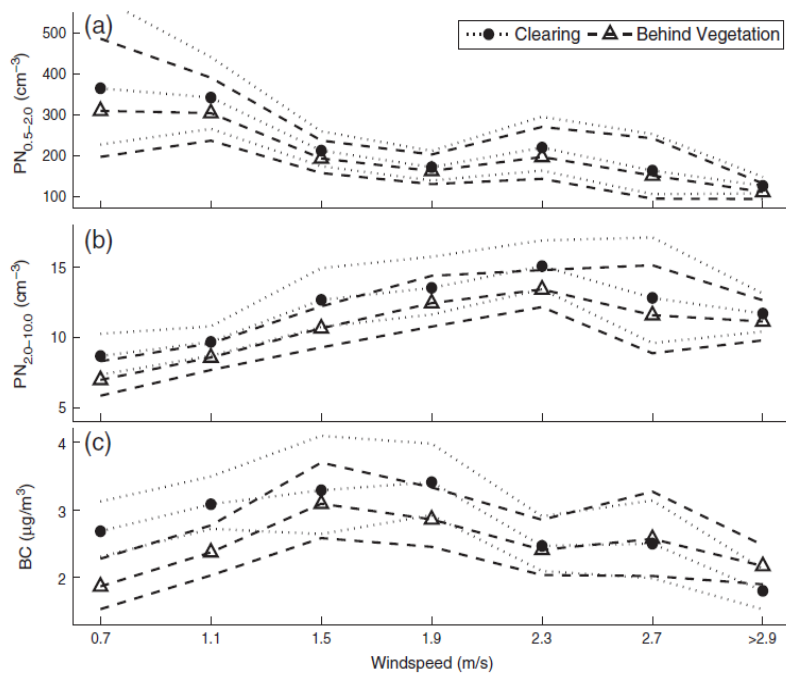




Kuva 21. Tutkimusalue kiinteine mittauspaikeineen ja liikkuvan mittausauton reitti kasvillisuusvyöhykkeen takana. Brantley ym. (2014).

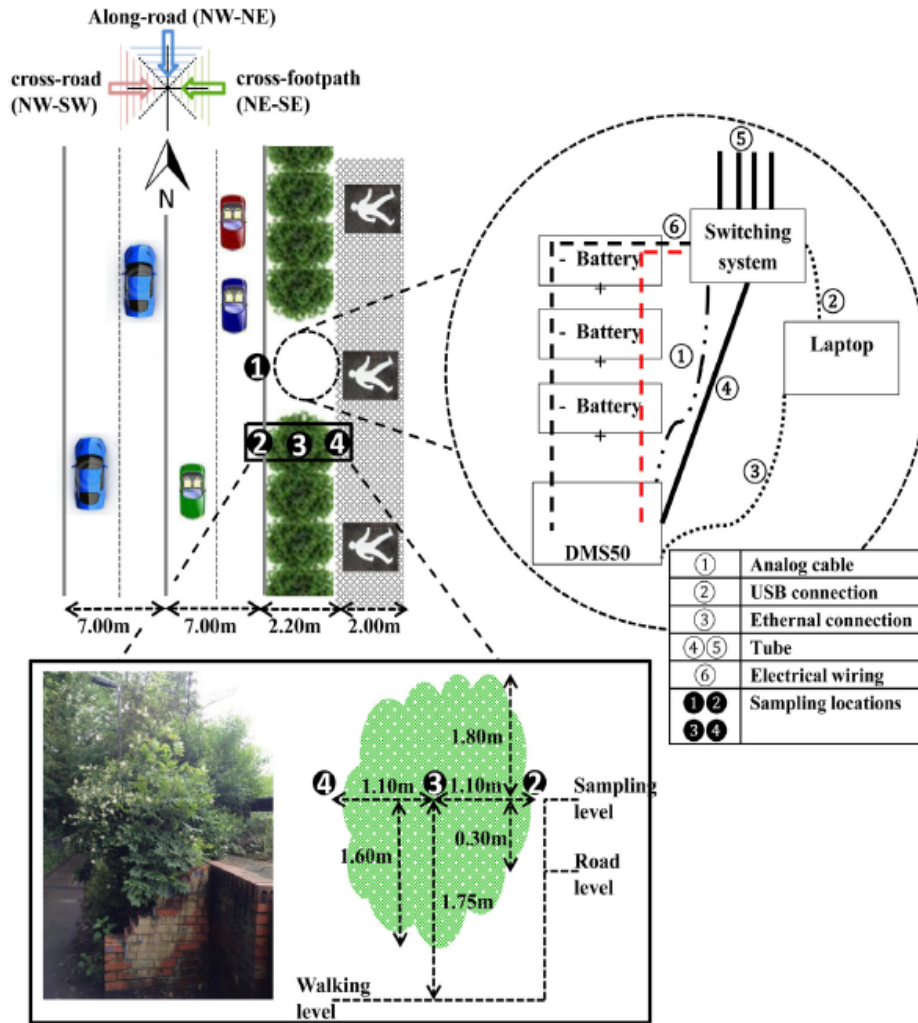
Kiinteiden mittausten mukaan kasvillisuusvyöhyke ei vähennä hiukkasten massa- eikä lukumääräpitoisuuksia. **Mustan hiilen pitoisuudet olivat kuitenkin avoimeen ympäristöön nähden 12,4 % pienempiä tuulen puhaltaessa tieltä ja 7,8 % pienempiä tuulen ollessa tien suuntainen.** Tuulen ollessa idästä ts. golfkentän suunnalta hiukkasten lukumääräpitoisuudet ovat korkeampia kasvillisuuden keskellä olevassa mittapaikassa kuin avoimessa ympäristössä. Tuulennopeus ja -suunta vaikuttavat olevan ratkaisevia tekijöitä ilman epäpuhtauspitoisuuksien laimenemisessä.

Liikkuvan mittauksen aikana tuuli oli joko tien suuntainen tai tieltä mittausalueelle suuntautuva. Näissäkään mittauksissa ei havaita kasvillisuusvyöhykkeen vaikuttavan hiukkasten lukumääräpitoisuuksiin. Syyksi esitetään mm. sitä, että taustapitoisuuksia ei mitattu ja vähennetty tieliikenteen päästöjen erottamiseksi. **Mustan hiilen kokonaispitoisuus laskee enimmillään 22 % tuulen ollessa tieltä päin 35 metrin etäisyydestä 90 metrin etäisyyteen tiestä** osoittaen, että metsävyöhykkeellä on vaikutus tieliikenteen päästöihin (kuva 22).



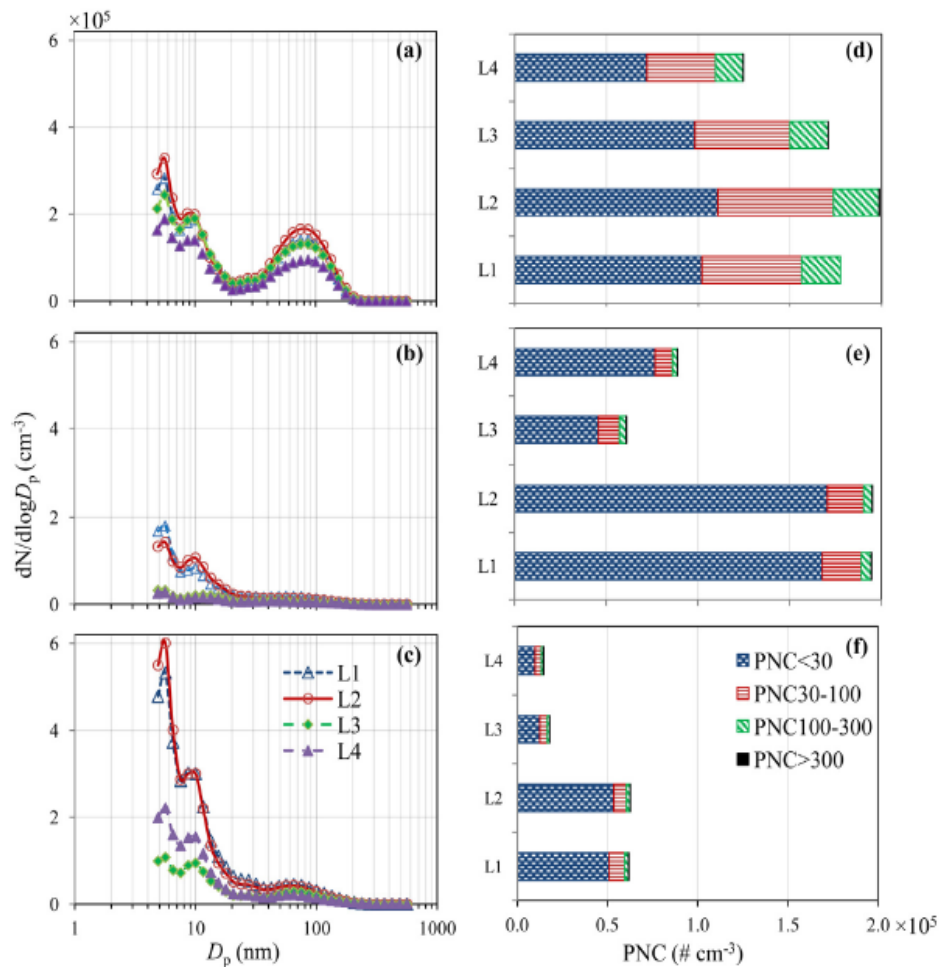
**Kuva 22. Hiukkasten ja mustan hiilen pitoisuusmittauksien tuloksia metsäkaistaleen takaa ja samalta etäisyydeltä avoimesta ympäristöstä eri tuulenopeuksilla. Brantley ym. (2014).**

Al-Dabbous ja Kumar (2014) tutkivat tienvarsikasvillisuuden vaikutusta hiukkasten lukumääräpitoisuuteen ja kokojakaamaan (5-560 nm) erilaisissa tuoliolosuhteissa Ison-Britannian Surreyssä tehtyjen mittausten perusteella. Tutkimusalue sijoittui nelikaistaisen tien välittömään läheisyyteen ja kattoi sekä avoimen että kapean kasvillisuusvyöhykkeen vaikutusalueella olevan ympäristön. Kuvassa 23 esitetään tutkimusalue mittaustaikoinen. Kasvillisuusvyöhykkeenä toimi yksirivinen noin 2,2 metriä leveä puuvyöhyke. Mittauksia tehtiin yhteensä kuutena päivänä noin 2 tuntia päivässä.



Kuva 23. Tutkimusalue mittauspaiikkoineen: L1) avoin ympäristö, L2) ennen kasvillisuusvyöhykettä, L3) kasvillisuusvyöhykkeen keskellä ja L3) kasvillisuusvyöhykkeen jälkeen. Pisteet L1 ja L2 ovat samalla etäisyydellä tiestä. Al-Dabbous ja Kumar (2014).

Mittautulosten mukaan korkeimmat hiukkasten lukumääräpitoisuudet ovat tien vieressä kokoluokassa 5,6-10 nm. Tämä näkyy kaikilla tuulen suunnilla, joskin tuulen ollessa tieltä havaitaan toinen selkeä maksimi 70-80 nm kokoluokassa (kuva 24), mikä on tyypillinen mustan hiilen päästöjen kokoluokka. **Tuulen ollessa tieltä päin hiukkaslukumäärän kokonaispitoisuudet ovat koholla mittauspisteessä ennen kasvillisuutta suhteessa avoimeen ympäristöön ja vähenevät kasvillisuuden läpi kuljettaessa 37 %.** Huomioitavaa on, että vertailumittausta samalta etäisyydeltä ilman kasvillisuutta eikä kauempaa kasvillisuuden takaa ole tehty, joten laimenemisen osuutta pitoisuusmuutokseen ei tiedetä. Pitoisuusvähenemä tapahtuu tasaisesti läpi mitatun alueen eikä eroja eri hiukkaskokoluokkien välillä voida tehdä. Tutkimuksen mukaan kasvillisuusvyöhykkeen aikaansaama altistumisen väheneminen on huomioimisen arvoisen.



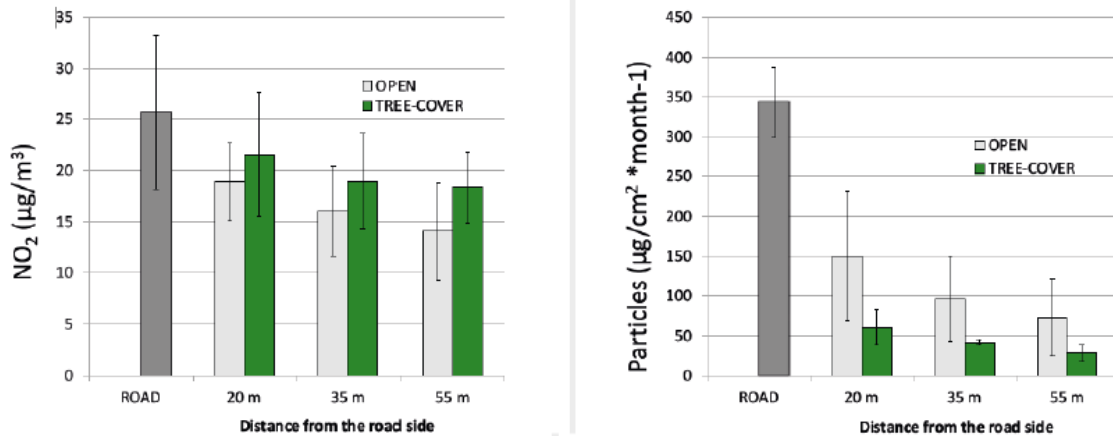
Kuva 24 Mittaustulokset a) ja b) tuuli tieltä, c) ja d) tuuli tielle, e) ja f) tien suuntainen tuuli. Al-Dabbous ja Kumar (2014).

Helsingin yliopiston ympäristötieteiden laitoksen tutkimusryhmä Setälä ym. on vielä julkaisemattomassa tutkimuksessaan verrannut avoimen ympäristön ja puuston vaikutusta  $\text{NO}_2$  ja hiukkasten leviämiseen. Tässä kirjallisuuskatsauksessa mittauksia referoidaan 2014 pidetyn seminaariesityksen (Viippola ym. 2014, julkaisematon) aineiston pohjalta. Kuvassa 25 esitetään tutkimusalue ja kuvassa 26 keskeisiä mittaustuloksia. Huomataan kasvillisuuden vaikutuksen mitattuihin  $\text{NO}_2$ -pitoisuuksiin olevan vähäinen tai sellainen, että  $\text{NO}_2$ -pitoisuudet ovat hieman korkeampia metsävyöhykkeellä. Hiukkasten suhteen on nähtävissä pitoisuuksien väheneminen metsikön sisällä.





Kuva 25. Avoimen ympäristön ja puuston peittämän ympäristön tutkimusalue. Viippola ym. (2014), julkaisematon.



Kuva 26. NO<sub>2</sub> pitoisuus ja hiukkasten massakertymä eri etäisyydellä tiestä olevissa mittauspisteissä. Viippola ym. (2014), julkaisematon.

Grundström ja Pleijel (2014) mittasivat passiivikeräimillä NO<sub>2</sub>- ja O<sub>3</sub>-pitoisuuksia vilkasliikenteistä tietä reunustavan lehtipuuvyöhykkeen sisältä ja ulkopuolelta Göteborgissa Ruotsissa. Mittauksia tehtiin kuutena jaksona lehtipeitteen kehittyessä silmuista täyteen kokoon. Mittauspisteet olivat 8 m ja 12 m etäisyydellä tiestä.

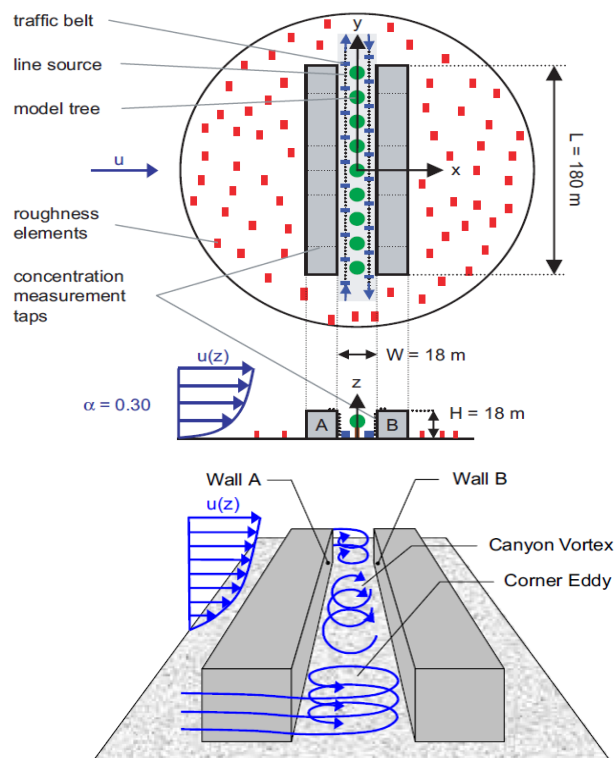
NO<sub>2</sub>-pitoisuuksien havaittiin olevan kaikilla mittausjaksoilla keskimäärin noin 7 % pienempiä puuston keskellä kuin ulkopuolella. O<sub>3</sub>-pitoisuuksiin puustolla ei havaittu mittauksissa olevan tilastollisesti merkittävää vaikutusta.

## 4. Katukuilut ja kasvillisuus

Katukuilurakenne muodostuu rakennusten seinien väliin tai suhteessa ympäristöön voimakkaasti madalletulle tielle. Kadun molemmilla puolilla olevat kerrostalorivistöt heikentävät ilmavirtauksia, mikä estää liikenneperäisten epäpuhtauksien leviämistä ja laimenemista. Keinoja vaikuttaa katukuilujen ilmanlaatuun on haettu mm. tutkimalla kasvillisuuden osuutta ilman epäpuhtauspitoisuuksien leviämiseen.

### 4.1 Mallinnukset ja tuulitunnelikokeet

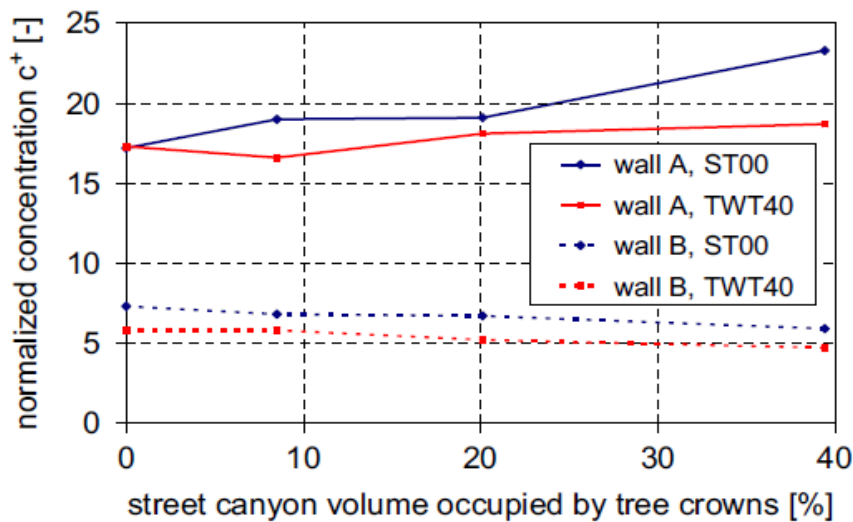
Tuulitunnelien käyttäminen ilmiöiden mallintamisessa on katukuiluissa lähtökohtaisesti helpompaa kuin avoimessa ympäristössä. Ilmiöt tapahtuvat rajoitetulla alueella, jossa muuttujien hallinta on ainakin ideaalitulanteessa mahdollista. Gromke ja Ruck (2007) tutkivat tuulitunnelissa keskellä katukuilua olevan puurivistön vaikutusta merkkiaineen leviämisprofiiliin (kuva 27). Liikenteen aiheuttamaa päästöä simuloi katukuilun pohjalla oleva pitkittäinen päästölähde. Liikenteen aiheuttama ilmavirtauksen turbulentsisuus toteutettiin liikkuvilla levyillä. Kokeessa vallitseva tuuli puhalsi kohtisuorasti kuiluun nähden ja puurivistön ominaisuuksia muuteltiin erilaisten tilanteiden aikaansaamiseksi. Lisäksi tutkittiin liikkuvan ja seisovan liikenteen vaikutusta pitoisuuksien jakautumiseen. Merkkiaineen pitoisuuksia mitattiin kuilun seinämältä.



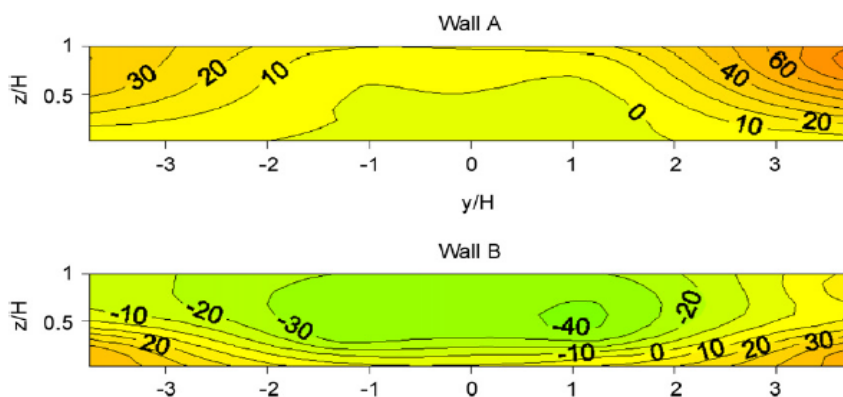
Kuva 27. Tuulitunnelikokeissa käytetty katukuilumalli (skaala 1:150) ja yleiset virtausprofiilit. Gromke ja Ruck (2007).



Katukuilussa ylöspäin suuntautuva ilmavirtaus on tärkein tekijä ilman epäpuhtauspitoisuuksien laimenemisessa. Kuiluun muodostuva pyörre johtaa pitoisuuksien keskittymiseen tuulen suuntaa lähempänä olevalle seinustalle. Esimerkiksi kuvassa 27 seinän A pitoisuus on noin 2,5-kertainen toiseen seinustaan nähden. Kaikki nostavaa virtausta tai virtausprofiileja muuttavat tekijät vaikuttavat pitoisuuksiin katukuilussa. Gromken ja Ruckn (2007) **tutkimuksen keskeinen tulos on, että tuulen suunnassa jäljempänä ts. tuulen puoleisella seinustalla** (kuvassa 27 seinä B) **havaitaan pienempiä pitoisuuksia kun kasvillisuuspeittoa kasvatetaan kuilun keskellä. Samalla pitoisuudet kasvavat tuulen suuntaa lähempänä olevalle ts. suojan puoleisella seinustalla** (kuvassa 27 seinä A). Tutkimuksessa esitetään kasvillisuuspeiton ja epäpuhtauspitoisuuksien välinen yhteys (kuva 28). Puiden rungon korkeudella ei ole merkittävää vaikutusta, paitsi tilanteessa, jossa puut yltyvät kuilun reunojen yli. Tällöin ilman virtaus kuiluun ja pois kuilusta muuttuu merkittävästi. Huomioitavaa on, että kasvillisuuden aiheuttama pitoisuuksien kasvu ei esiinny jalankulkijoiden tasossa vaan hieman ylempänä (kuva 29). Vaikka katukuilun keskellä mitattiin kaikissa tilanteissa suurimmat pitoisuudet, niin kasvillisuuden vaikutus nostaa suhteellisesti eniten pitoisuuksia kuilun päätepisteiden lähellä sekä seinustalla A että B. Kaikki ilmiöt korostuvat päästölähteen ollessa paikallaan. Tällöin autojen liikkeen tuoma turbulenssi vähenee eikä auta epäpuhtauksien leviämisessä.



Kuva 28. Kasvillisuuspeitteen osuuden ja epäpuhtauspitoisuuksien suhde seinustoilla A ja B seisovassa liikenteessä (ST) sekä kahden suuntaisessa liikkuvassa liikenteessä 40 km/h (TWT). Gromke ja Ruck (2007).

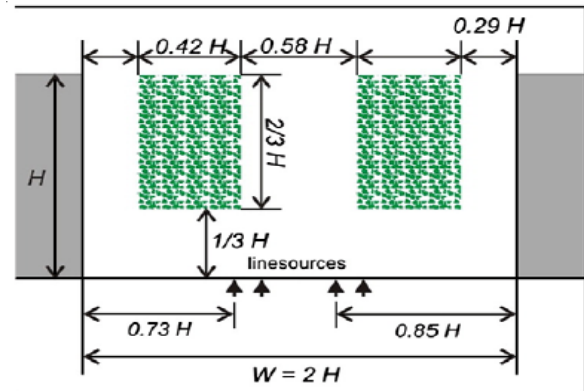
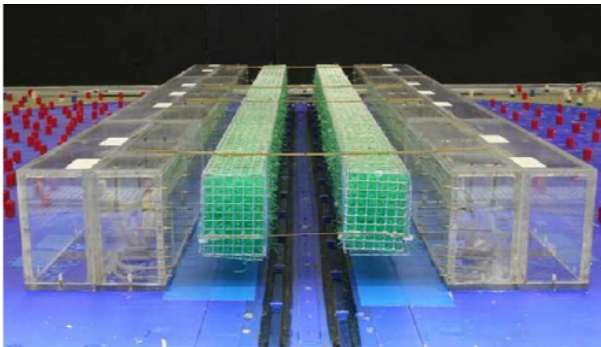


Kuva 29. Pitoisuuksien suhteellinen muutos katukuilun seinustoilla A ja B verrattaessa tilanteita ilman kasvillisuutta ja kasvillisuuden kanssa. Puuston peitto 8,5 % kuilusta, latvusten halkaisijoiden ollessa 15 m. Gromke ja Ruck (2007).

Gromke ym. (2008) jatkoi puuston vaikutuksen tutkimista katukuilujen ilmalaatuun tuulitunnelikokeilla, joiden ensisijainen tarkoitus oli selvittää latvuston huokoisuuden vaikutusta sekä sovittaa saatuja tuloksia CFD (Computational Fluid Dynamics) malliin.

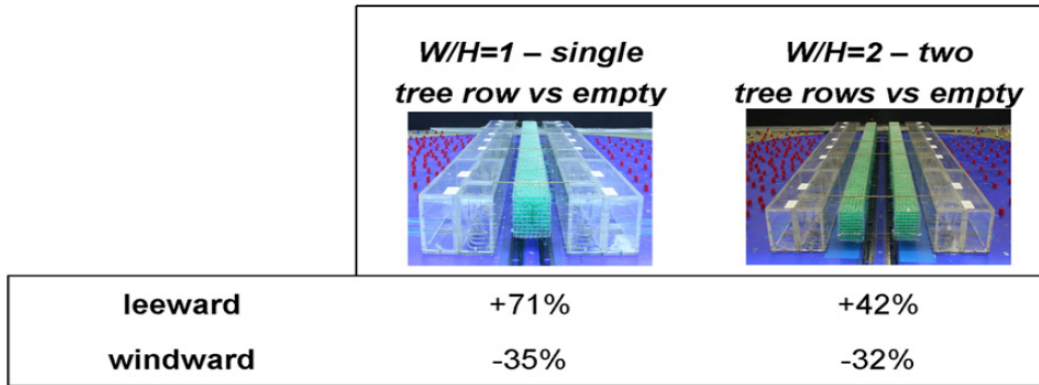
Aikaisempien tutkimustulosten mukaisesti tässäkin tutkimuksessa vahvistetaan virtausprofiilien merkittävä muuttuminen katukuilussa, kun sen keskiosassa on puustorivi. Tuulen puoleisen seinämän pitoisuudet pysyvät samalla tasolla tai laskevat hieman. Suojan puoleisella seinustalla pitoisuudet nousevat kuilun sisäisen pyörteisyyden heikentyessä ja uuden, kuilun ulkopuolisen virtauksen estyessä. **Tutkimuksessa todetaan, että kokonaispitoisuudet ovat katukuilussa hieman suuremmat puustotilanteessa kuin avoimessa tilanteessa.** Puupeatteen huokoisuudella ei tehdyssä tutkimuksessa havaittu olevan merkittävää vaikutusta epäpuhtauspitoisuuksien profiileihin. Virtauslaskennan todetaan tarjoavan varteenotettavan, joskaan ei valmiin vaihtoehdon katukuilumaisen rakenteen virtausprofiilien mallintamiseen.

Buccolierin ym. (2009) tuulitunnelikokeissa katukuiluun sijoitettiin kaksi puuriviä yhden sijaan kuvan 30 mukaisesti. Keskeinen osa tutkimusta oli selvittää puiden rakenteellisten ja fyysisten tekijöiden sekä sijoittumisen vaikutusta jalankulkijatason epäpuhtauspitoisuuksiin.



Kuva 30. Tutkimuksissa käytetty tuulitunneliasetus kahdella puurivillä. Buccolieri ym. (2009).

Tutkimuksessa vahvistetaan käsitys siitä, että puusto nostaa katukuilun ilman epäpuhtauspitoisuuksia verrattuna avoimeen tilanteeseen. Puuston latvuston huokoisuudella ja runkojen etäisyydellä ei tietyin raja-arvon jälkeen ole merkittävää vaikutusta pitoisuuksien kasvuun. Maksimipitoisuuksiin kuilun keskellä puusto ei vaikuta. **Huomioitavaa on myös, että katukuilun leveys/korkeus-suhde vaikuttaa enemmän kuin puusto.** Kuvassa 31 esitetään suhteelliset pitoisuusmuutokset katukuilussa kahdessa ei leveys/korkeus-tilanteessa.



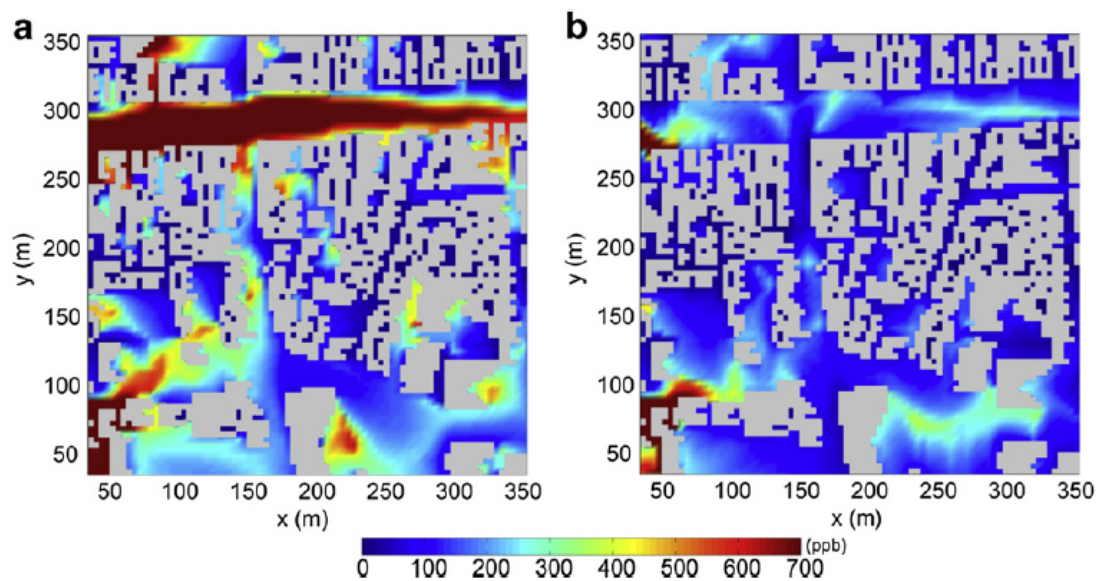
Kuva 31. Suhteellinen kokonaispitoisuuksien muutos seinustoilla kahdessa eri korkeus/leveys-suhteilanteessa. Leeward = suojan puoleinen ts. tuulensuunnassa lähempänä oleva seinusta ja windward = tuulen puoleinen ts. tuulensuunnassa kauempana oleva seinusta. Buccolieri ym.(2009).

Wania ym. (2012) lähestyy kaupunkikasvillisuuden roolia osana urbaania kaupunkirakentamista laajemmin kuin vain katukuiluproblematiikan osalta. Tutkimuksen pääpaino on katukuilurakenteessa, jonka hiukkasten leviämisolosuhteita mallinnettiin kolmiulotteisella mikroilmastomallilla. Päämuuttujina mallissa olivat kuilun leveys/korkeus-suhde, tuulensuunta sekä puuston korkeus- ja sivuttaissuuntainen tiheys.

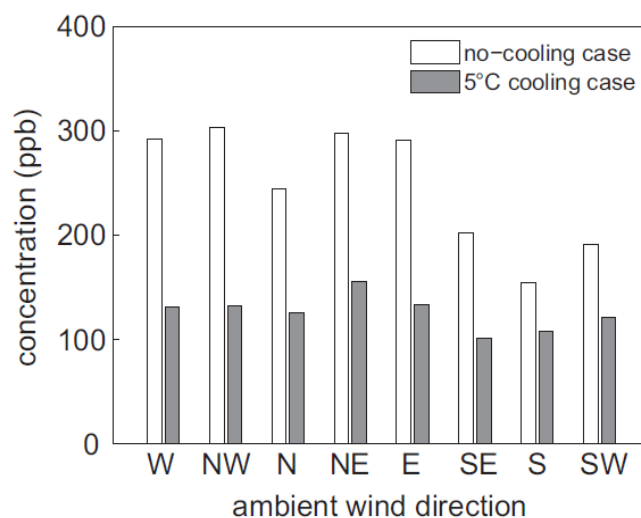
**Tutkimuksessa todetaan katukuilun puuston lähtökohtaisesti lisäävän ilman epäpuhtauspitoisuuksia ts. vähentävän laimenemista** Kuilun leveys/korkeus-suhteella ja tuulensuunnalla todetaan olevan ratkaiseva vaikutus hiukkaspitoisuuksien laimenemiseen. Katukuilun suuntainen tuuli laimentaa pitoisuuksia tehokkaasti. Tehtyyn malliin liitettiin kasvillisuuden kyky sitoa hiukkasia depositiomekanismeilla. **Mallin mukaan katua reunustavat pensasaidanteet, toisin kuin puut, vaikuttavat hiukkaspitoisuuksiin laskevasti. Pensaiden etuna katsotaan olevan niiden puita tehokkaampi kyky poistaa hiukkasia deposition avulla, niiden vähäisempi vaikutus virtausprofiileihin sekä niiden sijainti lähempänä päästölähdettä.**

Viherkattoja on ehdotettu osaksi urbaania kaupunkirakentamista. Näiden rakenteiden vaikutusta katukuilujen ilmanlaatuun on tutkinut Baik ym. (2012). Tutkimuksessa laskennallisella virtausmallilla pyrittiin lisäämään tietoa viherkattojen ilmaa viilentävän vaikutuksen merkityksestä katukuilun ilmankierrossa. Pääasiallisena vaikutusmekanismina esitetään katoilta kuiluun laskeutuvan ilman aikaansaama noste. Noste edistää alhaalla kuilussa olevien epäpuhtauspitoisuuksien leviämistä pois kuilusta.

**Mallin tuloksista huomataan, että viherkaton vaikutukset ilmanlaatuun katukuilujen pohjalla ovat sitä suurempia mitä suurempi on katon viilentävä tekijä.** Mallissa viilentävä vaikutus perustuu Takebayashin ja Moriyaman (2007) tekemiin käytännön tutkimuksiin, joissa lämpövuoto on noin  $70 \text{ W/m}^2$  pienempi viherkatoilta kuin paljailta elementtikatoilta. Vaikutukset muuttuvat vallitsevan tuulensuunnan muuttuessa. Malliin sovitettiin myös todellinen kaupunkirakenne. Korean Souliin sovitetun mallin ilmavirtauksia ja siten yleisiä epäpuhtauspitoisuuksia esitetään kuvassa 32. Kuvassa 33 esitetään mallin tulokset eri tuulensuunnilla. Huomataan, että viherkattojen tapauksessa vallitsevalla tuulella on pienempi merkitys hengityskorkeuden epäpuhtauspitoisuuksiin, kuin tilanteessa ilman viherkattoja. Sovituksen katukuilumallin leveys/korkeus-suhde poikkeaa suuresti Helsingin vastaavasta. Johtopäätösten sovitaminen pohjoisempaan ilmastoon ja matalampiin katukuiluihin on vaikeaa. **Mallin keskeisenä puutteena tuodaan esille se, että se käyttää vain termodynaamista tarkastelua olettaen kaikki epäpuhtauskomponentit passiivisiksi, reagoimattomiksi komponenteiksi.** Mallia tulisi täydentää mm. valokemiallisilla tekijöillä, jolloin ilman epäpuhtaudet saataisiin käyttäytymään kuten ne todellisessa ympäristössä käyttäytyvät.



Kuva 32. Kaupunkiympäristön ilman virtauksen perusteella laskettuja yleisiä epäpuhtauspitoisuuksia 1,5 m korkeudella mallinnettuna Souliin Koreaan a) ilman viherkattoja ja b) viherkattojen kanssa ja 5 °C jäähdytysvaikutuksella. Baik ym. (2012).



Kuva 33. Souliin Koreaan mallinnettu viherkattotarkastelun vaikutus ilman virtauksen perusteella laskettuihin epäpuhtauksiin eri tuulensuunnilla. Baik ym. (2012).

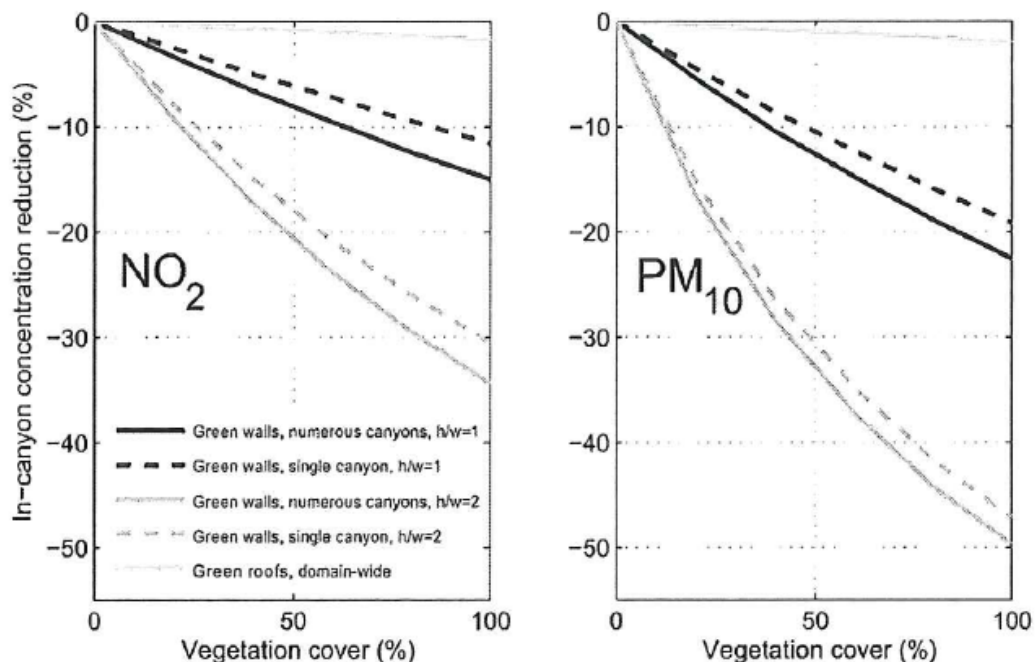
Viherkattojen lisäksi katukuilujen ilmanlaatuongelma-alueiksi on esitetty apukeinoksi viherseinä. Pugh ym. (2012) lähestyy asiaa virtausmallilla, jossa katukuilulle luontaista pyörteistä ilmavirtausta hyödynnetään yhdessä suuren depositiokyvyn omaavien kasvillisuusrakenteiden kanssa. Mallilla tarkastellaan NO<sub>2</sub>- ja PM<sub>10</sub>-pitoisuuksien muutoksia katukuilussa deposition ja virtauksen sekoittumisen myötä.

Mallin tulokset poikkeavat selkeästi vallitsevasta käsityksestä, jonka mukaan kaupunkikasvillisuudella voitaisiin saavuttaa vain vähäisiä parannuksia ilmanlaatuun. **Tutkimuksen keskeinen päätelmä on, että viemällä kasvillisuus lähelle päästölähdettä, saavutetaan huomattavasti suuremmat pitoisuuksien vähenemät kuin perinteisellä kaupunkipuistomallilla.** Depositionopeudet ja lehtialaindeksi ovat mallin keskeiset tekijät määrittäessä NO<sub>2</sub> ja PM<sub>10</sub> poistumaa kasveihin. Mallin lähtötietoina käytetyt depositionopeudet esitetään taulukossa 2. Käytetty lehtialaindeksi oli viherseinälle 1-2 m<sup>2</sup> lehteä/m<sup>2</sup> ja viherkatalle 2-5 m<sup>2</sup> lehteä/m<sup>2</sup>.

Tutkimuksen tuloksena esitetään viherseinän pudottavan 15 % NO<sub>2</sub>-pitoisuuksia ja 23 % PM<sub>10</sub>-pitoisuuksia kun vallitseva tuulenopeus on 1 m/s. Tuulen nopeuden pudotessa pitoisuuksien vähenemän ilmoitetaan olevan suurimmillaan 40-60 %. Suuri ero selittyy kasvillisuuden ja epäpuhtauksien kontaktiajan moninkertaistumisella alhaisilla tuulenopeuksilla. Mallilla lasketut pitoisuusmuutokset esitetään kuvassa 34. Viherseinän vaikutuksen esitetään olevan moninkertainen verrattuna viherkattoihin. Viherkattojen ja viherseinän välinen ero selittyy osin sillä, että mallissa on arvioitu vain deponiomekanismien aikaansaamaa pitoisuusmuutosta. Viherkatot ovat kauempana päästölähteestä ja niille laskeutuvat pitoisuudet ovat seiniin verrattuna huomattavan pieniä.

Taulukko 2. Virtausmallissa käytetyt depositionopeudet. Pugh ym. (2012).

scenario	deposition velocities (cm s <sup>-1</sup> )	
	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
control (brick walls/roofs)	walls: 0.05 roof: 0.05	walls: 0.02 roof: 0.2
green walls (100% coverage)	walls: 0.3 roof: 0.05	walls: 0.64 roof: 0.2
green roof	walls: 0.05 roof: 0.3	walls: 0.02 roof: 0.64



Kuva 34. Mallinnetut pitoisuusvähenemät kasvillisuuspeiton funktiona tuulen ollessa 1 m/s. Pugh ym. (2012).

Viherkattojen vaikutuksia energian säästöön ja rakenteiden kestävyyskäsittelyssä tutkimuksessa Ouldboukhitine ym. (2014) kommentoivat myös katukuilujen ilmanlaatuun liittyvää kysymystä. Koejärjestelyssä rakennettiin 1:10 oleva katukuilu ympäristö, jossa vertailtiin paljaan sementtikaton ja kahdella eri kasvillisuustyypillä rakennetun viherkaton vaikutusta lämpötiloihin katon ulkopuolella ja sisäpuolella. Koeympäristö koostui neljästä katukuilusta, joiden leveys/korkeus suhde oli 1. Kuilut muodostuivat suorakaiteenmuotoisten rakennusten väliin ja niiden pituus oli 4 m.

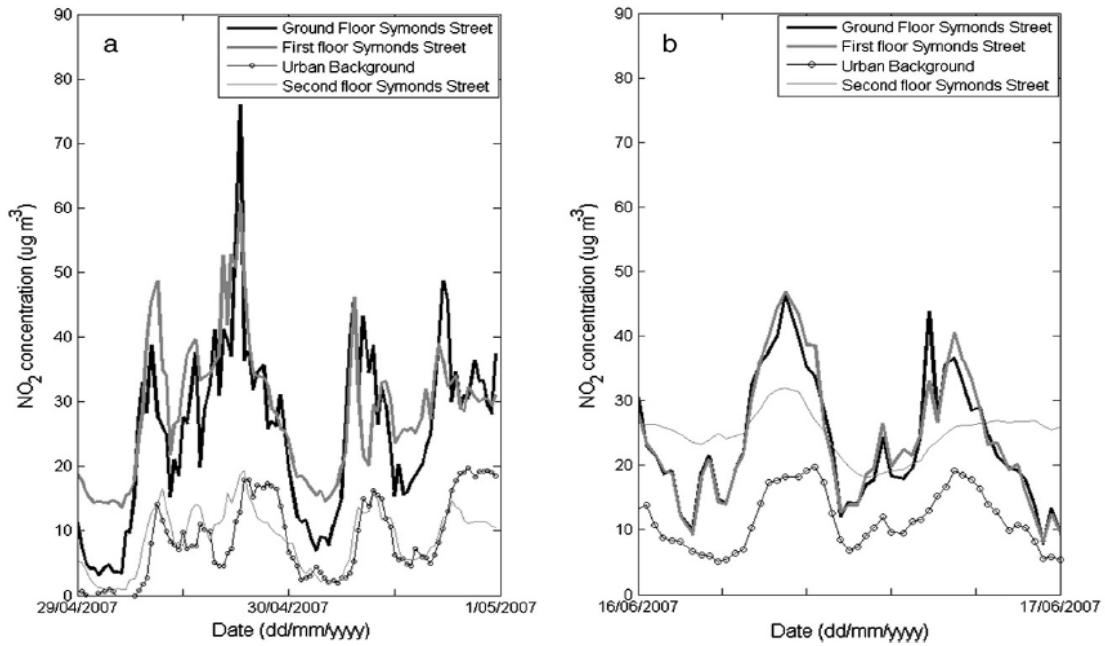
Viherkattojen esitetään tutkimuksessa vaikuttavan katukuilujen ilmanlaatuun lämpötilan muutoksen perusteella. Tehdyissä mittauksissa havaittiin, että viherkattojen vieressä olevien katukuilujen lämpötila laski keskimäärin 0,8 °C verrattuna paljaiden kattojen tilanteeseen. Tällä esitetään olevan katukuilujen ilmanlaatua parantava vaikutus.

## 4.2 Kenttämittaukset

Salmond ym. (2013) tutkivat kenttämittauksilla katukuilussa olevien lehtipuiden vaikutusta kuilun NO- ja NO<sub>2</sub>-pitoisuuksiin. Tutkimus tehtiin Aucklandissa, Uudessa Seelannissa. Mittauksia tehtiin sekä lehtipeitteen aikaan että lehdettömänä aikana. Mittaukset tehtiin kemiluminisenssimenetelmällä kolmella samanaikaisella mittauspisteellä. Mittauspisteinä olivat kuilun seinusta 2 ja 6 m korkeudella sekä taustan mittausta varten mittauspiste 31 m korkeudella.

***Mittaukset vahvistavat tuulitunnelikokeiden tuloksia siitä, että katukuilussa oleva puusto nostaa epäpuhtauspitoisuuksia katukuilussa suhteessa kuiluun, jossa ei ole puustoa.*** Puiden lehtipeitteellä on vaikutusta siihen, kuinka paljon katukuilun pitoisuudet poikkeavat taustapitoisuudesta. Aikana, jolloin puissa ei ole lehtiä, NO<sub>2</sub>-pitoisuudet ovat 190 % taustapitoisuudesta ja lehtipeitteen aikaan 213 %. NO mittauksissa havaitaan, kuinka puusto estää primääripäästön leviämisen pois katukuilusta. Lehdettömään aikaan katukuilun NO-pitoisuudet ovat 373 % ja lehtipeitteen aikaan 471 % taustapitoisuudesta. Lehtipeitteen havaitaan tasoittavan tuulen ja suojan puoleisen seinustan pitoisuuksia. Kuten malleissa niin myös mittauksissa havaitaan pitoisuuksien nousu suojan puoleisella seinustalla. Kuvassa 35 esitetään mitattuja NO<sub>2</sub>-pitoisuuksia eri korkeuksilta katukuilusta.





Kuva 35. NO<sub>2</sub>-pitoisuuksien muutos eri korkeudella a) lehtipeitteen aikaan ja b) ilman lehtipeitettä. Salmond ym. (2013) .

Jin ym. (2014) Shanghaissa tehdyissä katukuilumittauksissa osoitettiin hiukkaspitoisuuksien (PM<sub>2,5</sub>) olevan korkeampia kuiluissa, joissa on puita verrattaessa kuiluun, jossa ei ole puita. Työssä esitetään mallinnuksen ja mittaustulosten perusteella määritetty optimaalinen latvatiheys (*Canopy Density*) ja lehtialaindeksi, joilla hiukkaspitoisuuksien kertyminen katukuiluun on mahdollisimman vähäinen samalla säilyttäen puuston positiiviseksi koettu viihtyisyysvaikutus. Korkearunkoiset lehtipuut, joita hoidetaan runsaalla karsimisella, nähdään hyvänä ratkaisuna. Ehdotettu latvatiheys on 50-60 % ja ehdotettu lehtialaindeksi on 1,5-2,0.

## 5. Yhteenveto ja johtopäätöksiä

Melusteet ovat kiinteä osa kaupunki- ja taajamainfrastruktuuria. Niiden avulla voidaan laskea melutasoa liikenneväylien lähetyvillä ja saattaa alue melutasoltaan sellaiseksi, että sille voidaan kaavoittaa asumista tai muuta toimintaa. Melusteina voidaan käyttää seinämätyyppistä rakennetta tai valleja. Myös kasvillisuutta voidaan käyttää täydentävänä tekijänä melun vaimentamisessa.

Kasvillisuudella on kaupunkiympäristössä monia positiivisia vaikutuksia. Hulevesien hallinta, biodiversiteetti, kaupunkikulttuuri ja esteettisyys ovat tekijöitä, joihin kaupunkikasvillisuudella, niin puistoilla kuin puutarhapalstoillakin, on kiinteä ja osoitettu yhteys. Kun tarkastellaan kasvillisuuden vaikutusta tieliikenteen ilmaan aiheuttamiin epäpuhtauksiin välittömästi teiden lähetyvillä, pitää tarkastelu erottaa esim. laajempien metsäalueiden ilmanlaatu- ja ilmastovaikutuksista. Malleja ja kenttätutkimuksia ei voida soveltaa täysin toisenlaisiin ympäristöihin kuin ne on alun perin tehty.

Melusteiden ja tienvarsikasvillisuuden on esitetty tarjoavan keinon autoliikenteen ilmanlaatua heikentävien vaikutusten vähentämiseen. On esitetty, että tien varrella oleva virtauseste, meluste tai kasvillisuusvyöhyke, vähentäisi tieltä kulkeutuvien epäpuhtauksien pitoisuuksia esteen takana olevalla alueella. Pääasiallisena vaikutusmekanismina pidetään ilmavirtauksen kohoamista esteen yläpuolelle, sekoittumisen lisääntymistä turbulenssin kasvaessa sekä tehostunutta depositiota eli pidättymistä pinnoille.

Tuulitunnelikokeet ja matemaattiset mallinnukset ovat esittäneet, että epäpuhtauspitoisuudet ovat esteen tai kasvillisuuden takana ns. katvealueella sekä kasvillisuuden keskellä, huomattavasti pienempiä verrattaessa avoimeen ympäristöön (ks. liitteestä koostetut taulukot). Katvealueen laajuus riippuu virtausesteen korkeudesta ja ulottuu tyypillisesti noin 5-15 kertaa esteen korkeuden etäisyydelle. Estekorkeuden kasvattaminen tehostaa pitoisuuslaskua ja epäpuhtaudet vähenevät eniten välittömästi esteen takana (noin 15-90 % tuulitunneli- ja mallinnustutkimuksissa). Pitoisuusvähennykset saavutetaan kun tuulensuunta on tieltä kohti meluestettä tai kasvillisuusvyöhykettä. Tuulensuunta ja voimakkuus vaikuttavat ratkaisevasti siihen millaisiksi lopulliset epäpuhtauspitoisuudet katvealueella muodostuvat. Bowker ym. (2007) mallin mukaan katvealue päättyy esteen takana noin 10 kertaa esteen korkeuden etäisyydellä. Tällöin päästöviuhka laskeutuu maantasolle ja nostaa epäpuhtauspitoisuudet korkeammiksi, kuin mitä ne olisivat vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä. Muissa malleissa ja tuulitunnelikokeissa vastaavaa ilmiötä ei ole havaittu, vaan pitoisuuksien on esitetty pysyvän avointa ympäristöä alemmalla tasolla.

Kenttämittaukset ovat varmistaneet katvealueen olemassaolon, mutta kenttämittauksissa havaittu pitoisuuslasku esteen takana ei ole ollut yhtä voimakas kuin mallinus- ja tuulitunnelitutkimuksissa. Yhdessä tutkimuksessa on mittauksin havaittu katvealueen jälkeinen avointa ympäristöä korkeamman pitoisuuden alue (Ning ym. 2010). Muissa kenttämittauksissa pitoisuuksien kohoamista ei ole havaittu.

Esteen edessä tien puolella epäpuhtauspitoisuudet voivat olla huomattavasti korkeampia avoimeen ympäristöön verrattuna. Virtausesteen vaakasuuntaisissa päädyissä virtaukset sieppaavat esteen edestä korkeamman epäpuhtauspitoisuuden ilmaa esteen taakse. Esteen takana noin 40-50 metriä esteen päädyistä on sekä mallinnuksissa, että kenttämittauksissa havaittu korkeampia epäpuhtauspitoisuuksia kuin katvealueella muuten. Pitoisuudet ovat kuitenkin esteen päätyjenkin takana pienempi kuin vastaavalla etäisyydellä avoimessa ympäristössä.

Katvealueella vallitsevat heikot ilmavirtaukset johtavat siihen, että tällä alueella syntyvien päästöjen laimeneminen heikentyy. Tämän vuoksi katvealueella sijaitsevan pienenkin kadun liikenteen päästöt heikentävät ilmanlaatua enemmän suhteessa avoimeen ympäristöön.

Tienvarsien puusto-pensasvyöhyke ei ole vain virtauseste, vaan se läpäisee osan virtauksesta, lisäten sekoittumista ja tarjoten depositiopintaa. Kenttämittausten perusteella tienvarsikasvillisuuden on esitetty vähentävän hiukkaspitoisuuksia. Ultrapienten hiukkasten lukumääräpitoisuuksien ja mustan hiilen massapitoisuuden on mittauksissa havaittu laskevan virtauksen kulkiessa kapeankin kasvillisuuskaistaleen läpi ja yli. Tuloksista puuttuu kuitenkin selkeää säännönmukaisuus ja ilmiöiden ennustettavuus on vaikeaa. Mallinnusten ja mittausten perusteella rakennetun meluesteen ja kasvillisuusvyöhykkeen yhteisvaikutus on ilmanlaadun kannalta hyvä ratkaisu. Myös suojametsävyöhyke laskee liikenteen hiukkaspitoisuuksia sekä vyöhykkeen sisällä että takana. Yksityiskohtaisia tehokkaasti ilmanlaatua parantavan kasvillisuusvyöhykkeen ohjeistuksia ei ole saatavilla, mutta joitakin suuntaviivoja suojametsävyöhykkeen osalta on esitelty HSY:n (entinen YTV) aikaisemmassa kirjallisuuskatsauksessa (Niemi 2002). Typenoksideihin tienvarsi-kasvillisuudella ei ole osoitettu olevan kovin selkeää vaikutusta.

Korkeiden ja yhtenäisten rakennusten reunustamat kadut eli katukuilut muodostavat haasteen kaupunki-ilmanlaadulle, koska liikenteen päästöt kertyvät niihin korkeina pitoisuuksina. Kasvillisuuden vaikutusta katukuilujen ilmanlaatuun on tutkittu erityisesti virtausmallien ja tuulitunnelikokeiden avulla, mutta myös kenttämittauksilla. Tutkimusten mukaan katukuilussa olevat virtausesteet, kuten puut, nostavat kuilujen epäpuhtauspitoisuuksia. Puusto rajoittaa ilmanvaihtoa ja siten epäpuhtauspitoisuuksien kulkeutumista pois katukuilusta. Kenttämittausten perusteella tätä haittavaikutusta voidaan vähentää rajoittamalla puiden latvusten kokoa ja kokonaispeittoa. Yksittäisenä tekijänä katukuilun pienen leveys/korkeus-suhteen on osoitettu vaikuttavan epäpuhtauspitoisuuksien kertymiseen puustoa enemmän.

Siinä missä puiden on osoitettu nostavan katukuilun epäpuhtauspitoisuuksia, on tien sivuun sijoitetun matalamman pensasaidanteen esitetty vähentävän erityisesti hiukkaspitoisuuksia. Hiukkasten poisto perustuu lähellä päästölähdettä olevaan depositiopintaan, joka kohtaa katukuilun pohjalla olevan pyörteen, mutta ei estä virtausta ylöspäin ja pois kuilusta. Samaan vaikutusmekanismiin perustuu mallinnus, jossa seinustojen peittona olevan kasvillisuuden esitetään poistavan merkittävästi typpidioksidia ja hengitettäviä hiukkasia (PM<sub>10</sub>). Pensasaidanteiden tai köynnösseinämien ilmanlaatua parantavan vaikutuksen voimakkuutta ei ole kuitenkaan selvitetty kenttämittauksilla, joten niiden todellista tehokkuutta ei tunneta. Esimerkiksi Suomessa kesävihannat pensaat ja köynnökset ovat lehdettämiä suurimman osan vuodesta, minkä vuoksi niiden vaikutus ilmanlaatuun jäänee vähäiseksi vuositasona.

Viherkatot ovat monesta lähtökohdasta esille nostettu kaupunkiympäristön elävöittäjä. Viherkattojen katsotaan edistävän myös monia positiivisia ympäristövaikutuksia, joista yksi on kesäinen viilennysvaikutus. Mallien perusteella viilennysvaikutuksella esitetään olevan merkitystä katukuilujen ilmanlaatuun. Viileämpi ilma laskeutuu alas kuiluun lisäten siellä olevan likaisemman ilman virtausta ylös kuilusta. Mallien tulosten perusteella ilmanlaadullinen vaikutus on huomioimisen arvoinen, mutta asiaa ei ole tutkittu kenttämittauksilla.

Yhteenvedon voidaan todeta, että olemassa olevan tiedon perusteella puu- ja pensasvyöhykkeet sekä meluesteet laskevat hieman tieliikenteen aiheuttamia hiukkaspitoisuuksia tien läheisyydessä esteen tai kasvillisuuden takana ns. katvealueella. Typenoksidipitoisuuksiin esteillä on vaikutusta silloin, kun ne ohjaavat virtauksen pois maan tasolta. Tuloksiin liittyy kuitenkin merkittävää epävarmuutta. Erityisesti päästöviuhkan käyttäytyminen katvealueen jälkeen tunnetaan huonosti. Virtausesteiden avulla ei pystytä tarjoamaan nykytiedon valossa kovin suurta tai hallittua ratkaisukeinoa tienvarsien ilmanlaatuksymyksiin. Suunniteltaessa asuinalueita vilkasliikenteisten teiden läheisyyteen on meluesteet ja kasvillisuus hyvä huomioida mm. kevyen liikenteen väylien ja sivuteiden sijoittelussa. Katukuiluissa kasvillisuuden huolellinen suunnittelu on myös tärkeää, sillä sopivalla kasvillisuudella voidaan ilmanlaatua hieman parantaa, mutta liian massiivinen puusto voi heikentää merkittävästi ilmanlaatua.

Yleisenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että kasvillisuudella ja meluesteillä voidaan parantaa hieman ilmanlaatua ja saavuttaa monia muita myönteisiä vaikutuksia kaupunkiympäristössä, mutta liikenteen

aiheuttamien ilmanlaatuongelmien ratkaisukeinona kasvillisuudella ja melusteillä on vain pieni rooli. Liikenteen päästöjen vähentäminen ja erilaisten toimintojen sijoittaminen ovat avainasemassa suunniteltaessa turvallista, terveellistä ja viihtyisää kaupunkiympäristöä.

## 6. Lähdeluettelo

- Al-Dabbous, A, Kumar, P. 2014. The influence of roadside vegetation barriers on airborne nanoparticles and pedestrians exposure under varying wind conditions. *Atmospheric Environment* 90: 113-124.
- Baik, J-J, Kwak, K-H, Park, S-B, Ryu, Y-H. 2012. Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmospheric Environment* 61: 48-55.
- Baldauf, R, Thoma, E, Khlystov, a, Isakov, V, Bowker, G, Long, T, Snow, R. 2008. Impacts of noise barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment* 42: 7502-7507.
- Baldauf, R, Heist, D, Isakov, V, Perry, S, Hagler, G, Kimbrough, S, Shores, R, Black, K, Brixey, L. 2013. Air quality variability near a highway in a complex urban environment. *Atmospheric Environment* 64: 169-178.
- Bowker, G, Baldauf, R, Isakov, V, Khlystov, A, Petersen, W. 2007. The effects of roadside structures on the transport and dispersion of ultrafine particles from highways. *Atmospheric Environment* 41: 8128-8139.
- Brantley, H, Hagler, G, Deshmukh, P, Baldauf, R. 2014. Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. *Science of Total Environment* 468 – 469: 120-129.
- Buccolieri, R, Gromke, C, Di Sabatino, S, Ruck, B. 2009. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. *Science of Total Environment* 407: 5247-5256.
- Gromke, C, Ruck, B. 2007. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment* 40: 3287-3302.
- Gromke, C, Buccolieri, R, Di Sabatino, S, Ruck, B. 2008. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment* 42: 8640-8650.
- Grundström, M ja Pleijel, H. 2014. Limited effect of urban tree vegetation on NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations near a traffic route. *Environmental Pollution* 189: 73-76.
- Hagemann, R, Corsmeier, U, Kottmeier, C, Rinke, R, Wieser, A, Vogel, B. 2014. Spatial variability of particle number concentrations and NO<sub>x</sub> in the Karlsruhe (Germany) area obtained with the mobile laboratory "AERO-TRAM". *Atmospheric Environment* 94: 341-352.
- Hagler, G, Thoma, E, Baldauf, R. 2010. High-Resolution Mobile Monitoring of Carbon Monoxide and Ultrafine Particle Concentrations in a Near-Road Environment. *Journal of the Air & Waste Management Association* 60: 328-336.
- Hagler, G, Lin, M-Y, Khlystov, A, Baldauf, R, Isakov, V, Faircloth, J, Jackson, L. 2012. Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions. *Science of the Total Environment* 419: 7-15.
- Hagler, G, Tang, W, Freeman, M, Heist, D, Perry, S, Vette, A. 2011. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment* 45: 2522-2530.

- Heist, D.K, Perry, S.G, Brixey, L.A. 2009. A wind tunnel study of the effect of roadway configurations on the dispersion of traffic-related pollution. *Atmospheric Environment* 43: 5101-5111.
- Hooghwerff, J, Tollenaar, C.C, van der Heijden, W.J. 2010. In-situ air quality measurements on existing and innovative noise barriers. In: Brebbia, C.A., Longhurst, J.W.S. *Air Pollution XVIII*. WIT Press, Kos, Greece, pp. 129-139.
- Jin, S, Guo, J, Wheeler, S, Kan, L, Che, S. 2014. Evaluation of impacts of trees on PM<sub>2.5</sub> dispersion in urban streets. *Atmospheric Environment* 99: 277-287.
- Ning, Z, Hudda, N, Daher, N, Kam, W, Herner, H, Kozawa, K, Mara, S, Sioutas, C. 2010. Impact of roadside noise barriers on particle size distributions and pollutants concentrations near freeways. *Atmospheric Environment* 44: 3118-3127.
- Ouldboukhitine, S-E, Belarbi, R, Sailor, D. 2014. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy* 114: 273-282.
- Petroff, A, Zhang, L. 2010. Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for applications in aerosol transport models. *Geoscientific Model Development Discussion* 3: 1317-1357.
- Pugh, T, MacKenzie, A, Whyatt, J, Hewitt, N. 2012. Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environmental Science & Technology* 46: 7692-7699.
- Salmond, J.A, Williams, D, Laing, G, Kingham, S, Dirks, K, Longley, I, Henshaw, G. 2013. The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of the Total Environment* 443: 287-298.
- Schulte, N, Snyder, M, Isakov, V, Heist, D, Venkatram, A. 2014. Effects of solid barriers on dispersion of roadway emissions. *Atmospheric Environment* 97: 286-295.
- Setälä, H, Viippola, V, Rantalainen, A-L, Pennanen, A, Yli-Pelkonen, V. 2013. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? *Environmental Pollution* 183: 104-112.
- Steffens, J, Wang, Y, Zhang, K. 2012. Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment* 50: 120-128.
- Steffens, J, Heist, D, Perry, S, Isakov, V, Baldauf, R, Zhang, K. 2014. Effects of roadway configurations on near-road air quality and the implications on roadway designs. *Atmospheric Environment* 94: 74-85.
- Takebayashi, H, Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42: 2971-2979.
- Viippola, V, Yli-Pelkonen, V, Setälä, H. 2014. *Julkaisematton*.
- Wania, A, Bruse, M, Blond, M, Weber, C. 2012. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management* 94: 91-101.
- Zhang, L.M, Gong, S.L, Padro, J, Barrie, L. 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment* 35: 549-560.
- Zhu, Y, Shu, S, Yang, P. 2014. Correlation of noise levels and particulate matter concentrations near two major freeways in Los Angeles, California. *Environmental Pollution* 193: 130-137.



# Liite: Melusteiden ja puustokaistojen vaikutusarviot

Lähdeviite	Pitoisuusmuutos tien ja esteen välissä	Este	Esteen korkeus (m)	H Käivalueen laajuus	Merkkiaineen/mallituksen pitoisuusmuutos esteen takana (%)	Pitoisuusmuutos ultrapienet hiukkaset			Pitoisuusmuutos esteen takana (%)	Pitoisuusmuutos PM <sub>10</sub>	Pitoisuusmuutos katvealueen jälkeen suhteessa avoimeen ympäristöön	Melusteiden päätyjen vaikutusalue		Muita huomioita
						PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub>				Katvealueen laajuus	Muita huomioita	
MALJUNUKSET:														
Bowker ym. (2007)	ei tutkittu		meluste 6m	40-50m		-95 %	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu	noin 30 % korkeampia	Kohonneita pitoisuuksia pääte pisteissä ja noin 20-30 m pois päältä tiestä	Pitoisuudet avoimta ympäristöä korkeammalla noin 400 m etäisyydelle asti		
Bowker ym. (2007)	ei tutkittu		Meluste 6 m + puustoa ja yksittäisiä taloja	80-100m		-40 % ja -60 % välillä	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi	Matalampi	Pitoisuudet ovat avoimta ympäristöä alhaisemmalle tasolle tutkittu la painn tiestä (400 m)			
Hagler ym. (2011)	+2-30 %		meluste 18m	50-150m	-61 % ja -37 %				Matalampi	Matalampi	Kohonneita pitoisuuksia pääte pisteissä ja noin 40 m matkalla esteen suuntaisesti	Pienen pääsidiähteen esim. sivutien sijainti katvealueella nostaa pitoisuuksia huomattavasti		
Hagler ym. (2011)	+10 %		meluste 3m	20-50m	-16 % ja -15 %				Matalampi	Matalampi	Kohonneita pitoisuuksia pääte pisteissä ja noin 40 m matkalla esteen suuntaisesti			
Steffens ym. (2012)	ei tutkittu		kavillisuus, 6-8m	ei tutkittu		-50 % ja -60 % välillä	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu				
TUULIUNNELIMITTAUKSET:														
Steffens ym. (2014)	+ 200-300 %		meluste 6m	60-90m	-76 % ja -50 %				Matalampi	Matalampi	Kohonneita pitoisuuksia pääte pisteissä ja noin 50 m matkalla esteen takana	meluste pienentää pitoisuuksia katvealueella sitä enemmän mitä lähempänä tieta este sijaitsee		
Schulte ym. (2014)	ei tutkittu		12 m	12-240m	-90 % ja -60 %				Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
Schulte ym. (2014)	ei tutkittu		6 m	6-90 m	-85 % ja -60 %				Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
Schulte ym. (2014)	ei tutkittu		3 m	6-90 m	-78 % ja -40 %				Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
Schulte ym. (2014)	ei tutkittu		2 m	6-60 m	-70 % ja -40 %				Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
Schulte ym. (2014)	ei tutkittu		1 m	1-10 m	-60 % ja -40 %				Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
KENTTÄMITTAUKSET:														
Baidauf ym. (2008)	ei tutkittu		Meluste 6 m + puustoa ja yksittäisiä taloja	50-100m		-30 % ja -50 % välillä	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi	Matalampi	ei tutkittu			
Baidauf ym. (2008)	ei tutkittu		meluste 6m	noin 50m		-15 % ja -25 % välillä	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi	Matalampi	Kohonneita pitoisuuksia pääte pisteissä ja noin 40 m matkalla esteen takana			
Hooghwerff ym. (2010)	ei tutkittu		meluste 7m	28,5 m		ei tutkittu	ei tutkittu	noin -40 %	ei tutkittu	ei tutkittu		NO <sub>x</sub> ja NO <sub>2</sub> vähenemät noin 14- 20 %		
Hooghwerff ym. (2010)	ei tutkittu		meluste 4m	28,5 m		ei tutkittu	ei tutkittu	noin -30 %	ei tutkittu	ei tutkittu				
Ning ym. (2010)	ei tutkittu		meluste 3,7 m	noin 30m		-50 %	ei tutkittu	ei tutkittu	Selvästi korkeampi	Selvästi korkeampi	Pitoisuudet eivät laskeudu avoimen ympäristön tasolle mitatulla alueella (400 m)			
Ning ym. (2010)	ei tutkittu		meluste 5,2 m	noin 20m		-40 %	ei tutkittu	ei tutkittu	Selvästi korkeampi	Selvästi korkeampi				
Hagler ym. (2010)	ei tutkittu		puustokaistale	50-100m		-60 %	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi	Matalampi				
Hagler ym. (2010)	ei tutkittu		Meluste 5m	50-100m		-30 %	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi	Matalampi	Pitoisuudet hieman koholla melusteeseen päätyä lähempänä olevalla tutkimusalueella			
Hagler ym. (2012)	ei tutkittu		alle 10 m puustokaistoja	ei havaittu		ei vaikutusta	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu			
Hagler ym. (2012)	ei tutkittu		meluste 6 m	< 10m		noin -50 %	ei tutkittu	ei tutkittu	Matalampi tai samalla tasolla	Matalampi tai samalla tasolla	ei tutkittu			
Steffens ym. (2012)	ei tutkittu		kavillisuus, 6-8m	ei tutkittu		Noin -60 %	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu	ei tutkittu				
Brantley ym. (2014)	ei tutkittu		10 m korkeaa ja 5-78 m leveää metsävyöhykettä	ei havaittu		ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	ei vaikutusta	musta hiili väheni max 10-20%

**HSY:n julkaisuja | HRM:s publikationer 4/2015**

**ISSN-L** 1798-6087

**ISSN** 1798-6095 (pdf)

**ISBN** 978-952-6604-91-6 (pdf)

**Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä**

PL 100, 00066 HSY, Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki

Puh. 09 156 11, Fax 09 1561 2011, [www.hsy.fi](http://www.hsy.fi)

**Samkommunen Helsingforsregionens miljötjänster**

PB 100, 00066 HRM, Semaforbron 6 A, 00520 Helsingfors

Tfn. 09 156 11, Fax 09 1561 2011, [www.hsy.fi](http://www.hsy.fi)

**Helsinki Region Environmental Services Authority**

P.O. Box 100, FI-00066 HSY, Opastinsilta 6 A, 00520 Helsinki

Tel. +358 9 15611, Fax +358 9 1561 2011, [www.hsy.fi](http://www.hsy.fi)