



ILMANLAATUSELVITYS

**Kasvillisuuden vaikutukset hiukkaspitoisuuksiin
(PM_{10} ja $PM_{2.5}$) moottoritien läheisyydessä**



KIRJALLISUUSSELVITYS

**Kasvillisuuden vaikutukset hiukkaspitoisuuksiin (PM₁₀- ja PM_{2,5})
moottoritien läheisyydessä**

**Mia Aarnio
Antti Hellsten
Katja Lovén
Mari Kauhaniemi**

**Ilmatieteen laitos
Ilmakehän koostumuksen tutkimus
Asiantuntijapalvelut**

Helsinki 7.12.2021

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	4
SUOSITUKSET	4
1 JOHDANTO	5
2 KIRJALLISUUSSELVITYS	6
2.1 KASVILLISUUDEN VAIKUTUKSET PM _{2,5} - JA PM ₁₀ -PITOISUUKSIIN	6
2.2 KASVILLISUUDEN VAIKUTUKSET TIEN VIEREN ILMIÖIHIN	8
2.2.1 Aerodynaamiset vaikutukset.....	8
2.2.2 Hiukkasten depositio	10
2.3 KASVILLISUUDEN OMINAISUUKSIEN VAIKUTUS.....	11
2.3.1 Paksuus.....	11
2.3.2 Korkeus.....	12
2.3.3 Aukottomuus.....	12
2.3.4 Peittävyys ja tiheys.....	14
2.4 KASVILLISUUSLAJIVALINNAT	17
2.5 MUUT VAIKUTTAVAT SEIKAT	18
2.6 KASVILLISUUDEN MUUT VAIKUTUKSET.....	18

TIIVISTELMÄ

Kasvillisuuden avulla voidaan parantaa ilmanlaatua pienentämällä hiukkaspitoisuuksia moottoriteiden vierellä tietyissä olosuhteissa, parhaissa tapauksissa noin 50 %. Puut vähentävät tehokkaammin suurempikokoisia, hengitettäviä hiukkasia kuin pienhiukkasia. Joidenkin tutkimusten mukaan tien vierustan kasvillisuus voi myös huonontaa lähialueen ilmanlaatua.

Kasvillisuus vaikuttaa tieltä peräisin oleviin hiukkaspitoisuuksiin muuttamalla ilman liikettä ja tarjoamalla hiukkasille pintoja, joihin ne voivat tarttua. Ilman liike muuttuu sekä paikallisten tuuliolojen että turbulenssin eli pyörteisyyden osalta. Tuulen suuntautuminen osittain kasvillisuuden yli saa sen taakse aikaan ns. katvealueen, jossa ilmanlaatu on parempaa, hiukkaspitoisuuksien ollessa matalampia kuin teiden varsilla. Tätä voidaan käyttää hyväksi esim. pyöräteiden ja jalankulkuväylien sijoittamiseksi.

Kasvillisuuden vaikutukset kaupunkialueella riippuvat voimakkaasti rakennetun ympäristön geometriasta. Avoimen tien ollessa kyseessä hiukkaspitoisuuksien väheneminen riippuu kasvillisuusalueen geometrian lisäksi sen peittävydestä, huokoisuudesta, ja valitun kasvilajin lehtien koosta, tahmeudesta ja karvaisuudesta. Kasvillisuusalueen geometriaa kuvaavia merkittäviä käsitteitä ovat kasvillisuusalueen paksuus, korkeus, aukotomuus ja etäisyys tiestä.

Kasvillisuuden lajivalinnoilla voidaan vaikuttaa ilmanlaadun paranemiseen. Lehtipuista koostuva kasvillisuus ei vähennä hiukkaspitoisuuksia talvella; ainavihantien puiden ja pensaiden vaikutus on ympärivuotinen. Kasvillisuus vaikuttaa ilmanlaadun lisäksi myös melutasoihin sekä lämpötiloihin kaupunkirakenteen sisällä. Kasvillisuudella on havaittu olevan myönteisiä vaikutuksia kaupunkilaisten terveyteen. Kasvillisuudesta voi olla myös haittoja, kuten siitä aiheutuvat näköesteet ja mahdolliset siitepölyhaitat.

SUOSITUKSET

Ainavihannat kasvilajit, käytännössä Suomessa havupuut, voivat pienentää hiukkaspitoisuuksia tien vierustalla ympäri vuoden, lehtipuut vain silloin, kun puussa on lehtiä. Kasvillisuuden lisääminen sinänsä ei välttämättä pienennä hiukkaspitoisuuksia, vaan sen vaikutukset riippuvat useista seikoista.

Kasvillisuuden latvuston peittävyys (**Kuva 5**) eli lehtien alapuolelle jäävän maa-alan osuus koko kasvillisuusalueen alla olevasta maa-alasta (vertikaalinen) on optimissa 70–85 %, eikä yli 85 %. Kasvillisuuden huokoisuus eli lehtien ei-peittämän alan osuus aidan pystysuorasta pitkittäisleikkauksesta on hiukkaspitoisuuksien minimoinnin kannalta optimissa 80–90 %, eikä sen pidä alittaa 60 %. Kasvillisuudessa ei pitäisi olla monia katkoja tai aukkoja muuten kuin tarvittaessa tien viertä pitkin edettäessä, ja lehtiä pitäisi olla koko pituudelta maasta latvaan, jolloin muodostuu ehyempi lehtivalli eikä suoria läpikulkuja ilman virtaukselle (**Kuva 4**). Kasvillisuuden paksuuden tieltä pois päin tarkasteltaessa tulisi olla vähintään 5 metriä. Optimi kasvillisuusvyöhykkeen paksuudelle on 10 metriä.

1 JOHDANTO

Tässä kirjallisuuskatsaustyössä tarkasteltiin kasvillisuuden vaikutuksia hiukkaspitoisuuksiin tien läheisyydessä. Selvityksessä on keskitytty hengitettäviin (PM_{10}) ja pienhiukkasiin ($PM_{2.5}$), kokonaishiukkasleijumaa (TSP) ja hiukkasten lukumäärä-kokojakaumia on käsitelty vähemmän, ilmiöiden luonnetta täydentäen.

Liikenteen hiukkaspäästöjä syntyy mm. pakokaasupäästöistä sekä renkaista ja tienpinnasta kulumisen seurauksena. Liikenne sekä tuuli myös nostavat ilmaan tienpinnalle kerääntyneitä hiukkasia ja pölyä. Hiukkaset ovat terveyden kannalta haitallisimpia ilman epäpuhtauksia. Liikenteen pakokaasupäästöistä syntyy pääosin pienhiukkasia ($PM_{2.5}$), jotka ovat terveydelle haitallisempia kuin tien pinnasta irtaava katupöly, joka koostuu pääasiassa suuremmista hengitettävistä hiukkasista (PM_{10}).

Etenkin keväisin katupölyaikaan hengitettävien hiukkasten (PM_{10}) pitoisuudet nousevat korkeiksi laajoilla kaupunkialueilla sekä suurten väylien läheisyydessä. Sääolosuhteilla on liikenteen lisäksi merkittävä vaikutus hiukkaspäästön muodostumiseen ja sen aiheuttamaan ilmanlaadun heikkenemiseen. Hiukkaspäästöön ja pitoisuuksiin voidaan vaikuttaa tehokkaasti katujen kunnossapidolla, puhdistuksella sekä pölynsidonnalla.

Pyrkimyksenä oli alkutilanteessa painottaa suomalaisia ja pohjoismaisia tutkimusartikkeleita. Tämä ei kuitenkaan osoittautunut mahdolliseksi, sillä soveltuvaa aineistoa löytyi liian vähän. Sen vuoksi on pyritty valitsemaan mukaan mahdollisimman paljon eurooppalaisia kasvillisuusympäristöjä tutkineita mittausartikkeleita. Työssä hyödynnettiin myös laaja-alaisesti Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden ja asiantuntijoiden kokemusta sekä asiantuntemusta aihepiiriin liittyvistä tutkimushankkeista sekä katupölyn muodostumiseen ja virtausmallintamiseen liittyen.

Kirjallisuusselvityksen tulokset ja niiden perusteella tehdyt johtopäätökset on esitelty työn tilaajalle palaverissa sekä tässä raportissa.

Ilmanlaatuselvityksen tilasi Kuopion kaupungin kaupunkiympäristön palvelualue. Ilmanlaatuvarvion tekemiseen osallistui tutkijoita ja asiantuntijoita Ilmatieteen laitoksen Asiantuntijapalvelut- sekä Ilmakehän koostumuksen tutkimus -yksiköistä.

2 KIRJALLISUUSSELVITYS

Tätä kirjallisuusselvitystä varten on käyty läpi 68 artikkelia, joista on valikoitu 35 artikkelia lähempään tarkasteluun. Valintakriteerinä on käytetty seuraavia hakusanoja: PM (particulate matter; hiukkasmassa), vegetation (kasvillisuus), trees (puut), roadside (tien vierusta), ja urban (kaupunkimainen). Pyrkimyksenä oli alkutilanteessa painottaa suomalaisia ja pohjoismaisia tutkimusartikkeleita. Tämä ei kuitenkaan osoittautunut mahdolliseksi, sillä soveltuvaa aineistoa löytyi liian vähän. Sen vuoksi on pyritty valitsemaan mukaan mahdollisimman paljon eurooppalaisia kasvillisuussympäristöjä tutkineita mitausartikkeleita.

Selvityksessä on tarkasteltu vain sellaisia tutkimuksia, joissa tuulella on merkittävä riskittäinen nopeuskomponentti tien suuntaan nähden. Tien suuntaisen tuulen skenaarioita ei ole tarkasteltu kirjallisuudessa juurikaan puiden vaikutusten kannalta.

Selvityksessä ei ole tarkasteltu kanjonityyppisiä tien vierustan geometrioita, eli katukuiluja talojen välissä. Näistä ympäristöistä löytyy paljon sekä mittaus-, tuulitunneli, että mallitustutkimusta (esim. *Karttunen et al, 2020*). Mukaan on valittu muutama artikkeli, jossa on tutkittu tien vieressä kasvavien puiden vaikutusta ympäröivän kaupunkialueen hiukkaspitoisuuksiin muutaman korttelin alueella, mutta varsinaisia katukuiluja ei ole sisällytetty. Selvityksessä ei ole huomioitu sellaisia tutkimusartikkeleita, joissa kasvillisuuslajit ovat selvästi Suomen oloissa menestymättömiä. Selvityksessä on keskitytty hengitettäviin (PM_{10}) ja pienhiukkasiin ($PM_{2.5}$), kokonaishiukkasleyjumaan (TSP) ja hiukkasten lukumäärä-kokojakaumia on käsitelty vähemmän, ilmiöiden luonnetta täydentäen.

2.1 Kasvillisuuden vaikutukset $PM_{2.5}$ - ja PM_{10} -pitoisuuksiin

- Kasvillisuuden avulla voidaan parantaa ilmanlaatua pienentämällä hiukkaspitoisuuksia moottoriteiden vierellä tietyissä olosuhteissa.
- Parhaissa tapauksissa hiukkaspitoisuuksia ($PM_{2.5}$ - ja PM_{10}) voidaan vähentää tien vierustalta noin 50 %.
- Puut vähentävät tehokkaammin suurempikokoisia, hengitettäviä hiukkasia kuin pienhiukkasia.
- Joidenkin tutkimusten mukaan tien vierustan kasvillisuus voi myös heikentää ilmanlaatua.

Kasvillisuuden vaikutusta hiukkasten pitoisuuksiin tien vierustoilla on tutkittu kirjallisuusaineistossa sekä mittauskampanjojen (in situ ja tuulitunnelimittaukset) että matemaattisen mallituksen keinoin. Suurin osa tien vierustojen hiukkaspitoisuuksien tutkimuksista on ollut mittauskampanjoita, toisin kuin katukuilututkimuksissa (*Al-Dabbous and Kumar, 2014; Brantley et al., 2014; Chen et al., 2015, 2016; Hagler et al., 2012; Islam et al., 2012; Lin et al., 2016; Shan et al., 2007; Tiwary et al., 2008; Tong et al., 2016, 2015*). Mittauskampanjoissa ilman hiukkastaustapitoisuus on yleensä mukana ilmoitetuissa pitoisuuksissa, kun taas laskennallisen tai tuulitunnelimallinnuksen tuloksissa taustapitoisuuksia ei ole (*Abhijith et al., 2016*).

Tiheän kasvillisuuden on havaittu pienentävän hiukkaspitoisuuksia moottoriteiden vierellä tuulen alapuolella suurimmassa osassa läpi käytyjä lähdeartikkeleita (*Al-Dabbous ja Kumar, 2014; Brantley et al., 2014; Gromke et al., 2016; Hagler et al., 2012; Lin et al., 2016; Tong et al., 2016; Chen et al., 2015; Islam et al., 2012; Shan et al., 2007; Tiwary et al., 2008; Tong et al., 2016*),). *Abhijith et al. (2016)* kirjallisuusselvityksen mukaan kasvillisuuden avulla saavutettavissa oleva hiukkasmassan väheneminen tien vierustalla on välillä 15–60 %. *Cowherd et al. (2006)* mukaan $PM_{2.5}$ - ja PM_{10} -pitoisuuksia voidaan parhaissa tapauksissa vähentää tien vierustalta noin 50 %. Puiden havaittiin pienentävän PM_{10} -pitoisuuksia tehokkaammin kuin $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia.

Joissakin tutkimuksissa kasvillisuudella ei havaittu olevan vaikutusta hiukkaspitoisuuksiin tai vaikutuksen kerrottiin olevan epämääräinen (esim. *Chen et al., 2016; Hagler et al., 2012; Brantley et al. (2014)*), mittauskampanjan lähistöllä oli tieliikenteen lisäksi muita voimakkaita hiukkaslähteitä ja lisäksi tuulen nopeudet mittauksien aikana olivat hyvin matalia (alle 0,5 m/s), mikä kirjoittajien mukaan sotki tuloksia. Ikävä kyllä, kolmessa kotimaisessa aihepiiriä tutkineessa artikkelissa (*Setälä et al., 2013; Viippola et al., 2018; ja Yli-Pelkonen et al., 2017*) oli käytetty täysin eri metodologiaa kuin kaikissa muissa tässä tarkastelluissa ilmanlaatumittauksissa ja -mallituksissa, mm. mittauspaikan sijoittelun (keskellä kasvillisuusalueetta vs. sen takana), sekä mitattujen ja käytettyjen suureiden valinnan kohdalla (tutkittu vain ylhäältä kasvillisuuden keskelle maahan päätyneiden hiukkasten määriä ja kasvillisuutta kuvattu vain vertikaalisesti latvuston peittävytyden kautta). Tämän vuoksi *Setälän, Viippolan ja Yli-Pelkosen* em. artikkeleita ei tämän enempää tässä kirjallisuusselvityksessä käsitellä.

Löytyi myös tutkimuksia, joiden mukaan tien vierustan kasvillisuus voi myös huonontaa ilmanlaatua olosuhteiden tai kasvillisuuden ominaisuuksien ollessa sopivat. Näistä *Mao (2013)* artikkelissa tutkimusjärjestelyn kasvillisuusalue tien vieressä oli liian ohut, jolloin PM_{10} -pitoisuudet nousivat kasvillisuusalueen takana. *Morakinyo et al. (2016)* lyhyen mittauskampanjan ja laskennallisen mallitustutkimuksen tuloksissa painotettiin sitä, että vaikka kasvillisuusvyöhyke tien vieressä pienentääkin hiukkasten pitoisuuksia vyöhykkeen takana ja korkeintaan 1,4 m maan pinnan tasosta, tätä ylempänä pitoisuudet kuitenkin nousevat ja vaikuttavat huonontavasti ilmanlaatuun kauempana tiestä. *Tong et al. (2015)* lyhyiden mittauskampanjojen mukaan puut voivat tasoittaa ja harventaa tieltä peräisin olevia $PM_{2.5}$ -pitoisuuspiikkejä, mutta yleisesti puut kasvattavat $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia tuulen alapuolella. *Al-Dabbous ja Kumar (2014)* mukaan tiheä kasvillisuus voi nostaa hiukkaspitoisuuksia tien tuulen puolen vierustalla, mikäli lähistöllä on sopivasti sijoituneita muita lähteitä.

2.2 Kasvillisuuden vaikutukset tien vieren ilmiöihin

- Kasvillisuus vaikuttaa ilmanlaatuun muuttamalla ilman virtausta ja tarjoamalla hiukkasille pintoja, joihin ne tarttuvat.
- Tuulen suuntautuminen osittain kasvillisuuden yli saa sen taakse aikaan ns. katvealueen, jossa hiukkaspitoisuudet ovat matalampia kuin teiden varsilla.

Tien vieren kasvillisuudella on hiukkasten kulkeutumiseen karkeasti tarkastellen kahden tyyppisiä vaikutuksia: aerodynaamisia eli vaikutuksia ilman paikalliseen liikkeeseen, ja depositiovaikutuksia siihen miten kasvillisuus muuttaa hiukkasten laskeutumista pinnoille tarkastellulla alueella. Vaikutukset voivat olla lyhytaikaisia, kuten kasvillisuuden pinnoille tarttuneiden hiukkasten irrotessa uudelleen ilmaan tuulenpuuskan mukana, tai pysyviä esimerkiksi, kun kasvillisuuden yläpuolella liikkuva hiukkaspitoinen ilma laimeenee ja kulkeutuu pois alueelta tuulen mukana.

2.2.1 Aerodynaamiset vaikutukset

Verrattuna esteettömään avoimeen tienvierustaan, tien läheisyydessä kasvava kasvillisuus voi saada aikaan useita ilmiöitä ja niiden yhdistelmiä. Aerodynaamiset ilmiöt vaikuttavat kahdella mekanismilla hiukkasten pitoisuuksiin, riippuen ympäristöstä ja meteorologisista olosuhteista: vaikuttamalla paikallisiin tuuliolosuhteisiin sekä turbulenssin muuttumisen kautta.

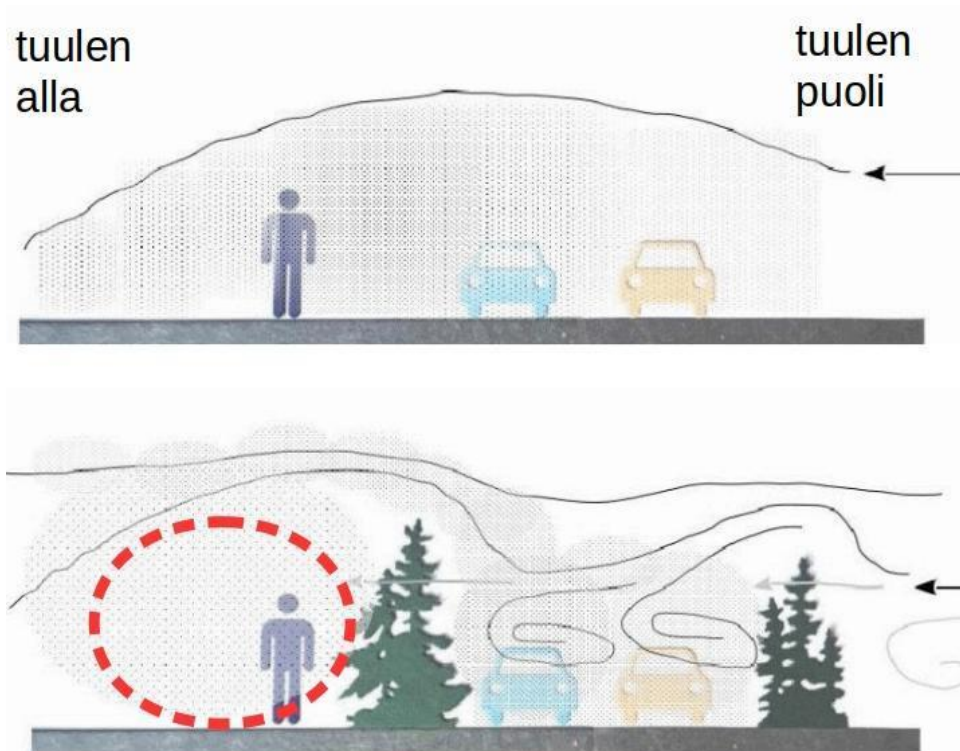
Latvustot toimivat tien sivuilla esteinä tuulen etenemiselle, mikä hidastaa keskituulta tien päällä ja kasvillisuuden takana tien vierustalla (tuulen alapuolella). Keskituulen hidastuminen tien päällä ja kasvillisuuden takana heikentää hiukkasten laimenemista ja tuulen aiheuttamaa hiukkasten resuspensiota eli hiukkasten nousemista maan pinnasta tuulen nostamana. Tuulen yläpuolella olevalla tienvierustalla (ennen kasvillisuutta), kasvillisuus saa aikaan ilman virtauksen ylöspäin.

Keskituulen heikkeneminen vähentää turbulenttia massan ja liikemäärän vaihtoa kasvillisuuden ja sen yläpuolella olevan ilmatilan välillä (*Abjihith et al., 2017*), mikä vaikuttaa tieltä peräisin olevan ilman laimenemiseen heikentävästi.

Toisaalta latvusto voi saada aikaan tuulen suunnan muutoksia myös latvuston itsensä alapuolella ja sisällä, ja riippuen lehvästön muodosta ja jakautumisesta, tuulen suunnan muutokset toimivat siellä turbulenssilähteenä lisäten hiukkasten laimenemista (*Di Sabatino et al., 2015*).

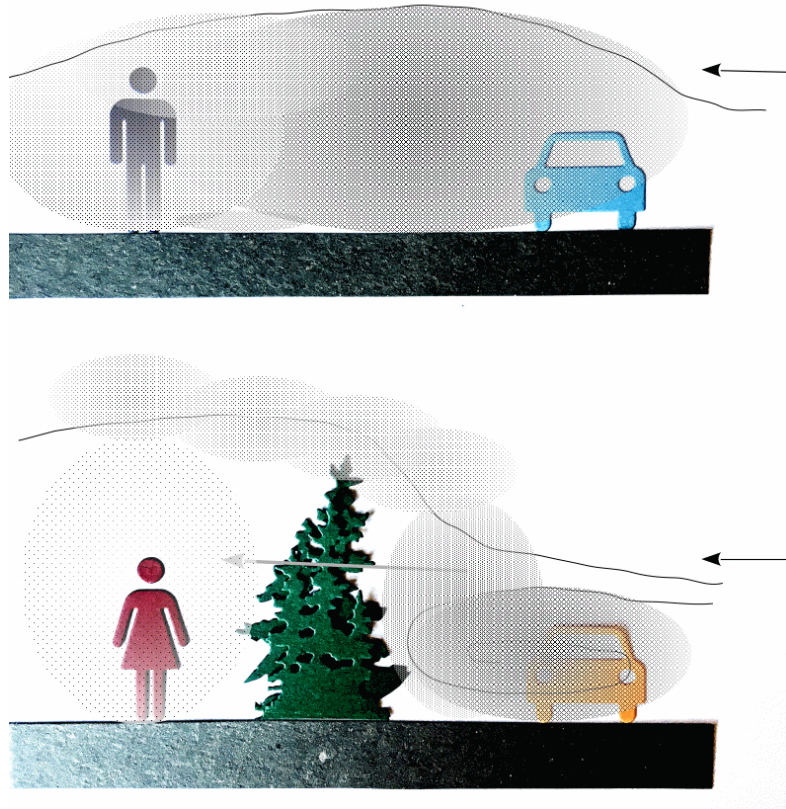
Lisäksi kasvillisuus saa tien sivulta tulevan tuulen tapauksissa aikaan ajokaistojen päälle myös kvasistationäärisiä pyörteitä, jotka pitävät hiukkasia kaistan päällä ja heikentävät niiden kulkeutumista pois tieltä. Tällöin hiukkasia saattaa rikastua tien yläpuolella pyörivään ilmaan, ja tuulen suunnan muuttuessa tai ajoneuvon aiheuttaessa muutoksen pyörteeseen tieltä voi kulkeutua tätä rikastunutta ilmaa ympäristöön sykäyksenomaisesti.

Keskituulen suuntautuminen kasvillisuuden yli saa aikaan ns. katvealueen sen takana ks. **Kuva 1**. Katvealueessa maanpinnan lähellä ilman liike on hidasta tieltä kasvillisuuden yli saapuvan tuulen kulkiessa katvealueen yli, mikä vaikuttaa kasvillisuuden läpi päässeiden hiukkasten depositioon voimistavasti, sitä voimakkaammin mitä isommista hiukkasista on kyse (ks seuraava kappale: Hiukkasten kuiva- ja märkädepositio). Tällöin pitoisuudet pienenevät, kun etäisyys tiestä kasvaa. Katvealueen syntyminen ja laajeneminen riippuu tuulen nopeudesta ja suunnasta, kasvillisuuden paikasta tiehen nähden, kasvillisuuden ominaisuuksista (ks. kappale ”Kasvillisuuden ominaisuuksien vaikutus”) ja ympäristön lämpötilasta ja ilmankosteudesta (Baldauf, 2017).



Kuva 1. Kasvillisuuden tien ympäristössä aikaan saamat aerodynaamiset muutokset. Katvealue on merkitty punaisella katkoviivalla. Kuvan lähde: M. Aarnio.

Turbulenssi on kaasun (tai nesteen) liikkeen nopeaa nopeuden ja suunnan muutosta ajan suhteen eli näiden heilahduksia. Heilahdukset ovat kolmiulotteisia ja lisäävät aineen sisäistä sekoittumista, jolloin muun muassa hiukkaspitoisuuksien laimeneminen tehostuu huomattavasti. Kasvillisuuden aikaan saama voimakas tuulen nopeuden pienentäminen saa kasvillisuuden yläpuolella aikaan turbulenssia, joka puolestaan laimentaa hiukkasten pitoisuutta yläpuolella olevan pienemmän pitoisuuden ilman sekoittuessa tieltä peräisin olevaan ilmaan. Turbulenssin lisääntyminen kasvillisuuden takana voimistaa myös hiukkaspitoisen ilman laimenemista.



Kuva 2. Kasvillisuuden vaikutus hiukkasten kulkeutumiseen liikenneympäristössä. Kuvan lähde: M. Aarnio.

2.2.2 Hiukkasten depositio

Hiukkasten depositiolla tarkoitetaan ilman mukana liikkuvien ja ilmassa leijuvien hiukkasten tarttumista erilaisiin pintoihin hiukkasten tullessa pinnan lähelle tai osuessa pintaan. Tieltä peräisin olevat hiukkaset voivat depositioitua mm. ajokaistojen ja tietä ympäröivän kasvillisuuden pinnoille. Keskituulen hidastuminen vahvistaa hiukkasten depositiota. Tämän vuoksi tapahtuu voimistunutta hiukkasten depositiota kasvillisuuden taakse, jopa katvealueelle, jos hiukkasia pääsee kulkeutumaan kasvillisuuden läpi.

Mitä isompi hiukkanen yleisesti tarkastellen, sitä nopeampaa sen depositio on. Ns. ultrapienet hiukkaset (läpimitta alle $0,1 \mu\text{m}$) käyttäytyvät lähes kaasumolekyylien tavoin ja niiden depositio tapahtuu diffuusion kautta ollen siksi hidasta. $1\text{--}10 \mu\text{m}$ läpimittaiset hiukkaset törmäävät ja tarttuvat pintoihin, jotka pakottavat ilman virtauksen kääntymään, kun taas yli $10 \mu\text{m}$ hiukkaset putoavat maahan myös sedimentaation kautta (Janhäll, 2015).

Kasvillisuuden lehtien pinnoille törmätessään ja tarttuessaan hiukkaset poistuvat ilmasta joko pysyvästi tai väliaikaisesti. Lehtien pinnoilta hiukkaset voivat päätyä sateen mukana tai lehden pudotessa maahan kasvillisuusalueen sisälle, mutta resuspensio uudelleen

ilmaan on epätodennäköisempää kasvillisuuden ilman liikettä hidastavan ja estävän vaikutuksen vuoksi.

Maahan törmätessään tai sadepisaroiden mukana tullessaan hiukkaset muodostavat pintaan pölykerroksen. Pölykerroksen hiukkasia voi siirtyä resuspension kautta uudelleen ilmaan tien pinnalta, tai voimakkaampi sade voi huuhtoa hiukkasia pois tieltä sen välittömään läheisyyteen (*Baldauf, R., 2017*).

Leicesterin kaupungissa tehdyssä mallitustutkimuksessa kesäaikaan puiden aerodynaamiset vaikutukset vähensivät $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia 9,0 %. Samassa tutkimuksessa puiden aikaan saama depositio vähensi $PM_{2.5}$ -pitoisuuksia 2,8 % (ja ruohoalueiden aikaansaama vähennys oli 0,6 % (*Jeanjean et al, 2016*).

Aikaisempien laskennallista virtausmekaniikkaa hyödyntäneiden tutkimusten (*Jeanjean et al., 2016; Santiago et al., 2017*) mukaan kuivadeposition vaikutus hiukkasten vähentämiseen kasvillisuuden läsnäollessa on pieni verrattuna aerodynaamisiin vaikutuksiin.

Karttunen et al. 2020 mukaan käytössä olevista laskennallisen virtausmekaniikan malleista vain suurten pyörteiden mallitusmetodi (LES) voi sisällyttää malliin kasvillisuuden vaikutukset realistisesti, ja tällä hetkellä vain kaksi mallia, CTAG (*Wang and Zhang, 2012; Wang et al., 2013; Tong et al.2016*) ja PALM (*Kurppa et al., 2019; Maronga et al., 2019*), pystyvät ottamaan huomioon aerosolidynamiikan (depositio) kasvillisuuden pinnoilla. Suurin osa julkaistusta mallitusaineistosta käsittelee kuitenkin ns. RANS-mallitettua dataa, jossa turbulenssin kuvaus on tehty parametrisoidusti kaikille pituusskaaloille eikä kasvillisuuden geometrian tai aerosolidynamiikan vaikutuksia voida huomioida.

2.3 Kasvillisuuden ominaisuuksien vaikutus

- Kasvillisuuden vaikutukset kaupunkialueella riippuvat voimakkaasti rakennetun ympäristön geometriasta.
- Avoimen tien ollessa kyseessä hiukkaspitoisuuksien väheneminen riippuu kasvillisuuden geometrian lisäksi sen peittävydestä ja huokoisuudesta.
- Kasvillisuusblokin geometriaa kuvaavia merkittäviä käsitteitä ovat kasvillisuusalueen paksuus, korkeus, aukottomuus ja etäisyys tiestä.

2.3.1 Paksuus

Tien suuntaa vasten kohtisuoraan mitattu kasvillisuusalueen paksuus vaikuttaa siihen, kuinka kauan hiukkasia sisältävä ilma kulkee läpi eli hiukkasten residenssiaikaan kasvillisuusalueen sisällä. Residenssiajan kasvua lisää turbulenssin voimakkuuden ja tuulen nopeuden väheneminen, mikä lisää hiukkasten depositiota lehtien pinnoille ja maahan kasvillisuuden sisällä. Kasvillisuuden paksuus pakottaa myös tuulen mukana kasvillisuuden yli kulkeutuvan hiukkaspitoisen ilman kulkemaan siellä pidemmän matkan

mahdollistaen enemmän laimenemista ennen kasvillisuuden taakse päätymistä. Tarvit-tavan paksuuden määrää kasvillisuuden huokoisuus (Baldauf, 2017). Abhijith at al. (2017) mukaan suositeltava kasvillisuuden vähimmäispaksuus on 5 m, jolloin hiukkasten kokonaisleijuman (TSP) saavutettavissa oleva vähennys olisi 50 %, ja 10 metrin paksui-nen kasvillisuus vähentäisi 20 nm läpimittaisia hiukkasia samoin 50 %. Abhijith at al. (2017) katsoi 10 metrin paksuuden olevan optimi.

2.3.2 Korkeus

Janhall (2015) mukaan pensasaitatyypinen kasvillisuus voi suodattaa hiukkasia sijai- tessaan lähellä tietä, kun taas korkeampi, metsätyypinen kasvillisuus saattaa vähentää sekoittumista ja turbulenssia ja siten saada aikaan hiukkaspitoisuuksien nousua lähellä maan pintaa tien päällä. Janhall (2015) viitataan mittaukseen, jossa kasvillisuuden kor- keuden 20-kertaistaminen nosti hiukkaspitoisuudet sen takana korkeammiksi kuin mitä ne olivat täysin ilman kasvillisuutta (Ning et al., 2010). Gromke et al. (2016) tutkimuk- sessa 1,5–2,25 m korkea pensasaita, jossa oli aukkoja, nosti hiukkaspitoisuuksia 3–19 %, kun taas aukoton jatkuva pensasaita laski niitä 18–60 %.

Baldauf (2017) mukaan avoimen tien tapauksissa kasvillisuuden takana mitattuja hiuk- kaspitoisuuksia tutkineissa asetelmissa kasvillisuuden korkeus on ollut tyypillisesti 4–5 metriä tai korkeampi (Al-Dabbous and Kumar, 2014; Brantley et al., 2014; Steffens et al., 2012). Tällöin kasvillisuuden muodostaman esteen korkeus on hiukkaspäästöjen emis- siokorkeuden yläpuolella, mikä pakottaa hiukkasia sisältävän pluumin joko kasvillisuu- den ylitse tai tunkeutumaan sen lävitse. Alle neljän metrin korkuinen kasvillisuus pääs- täisi emissiot kulkeutumaan suoraan tuulen mukana, ja toisaalta kiinteiden meluseinien tutkimukset suosittelivat myös vähintään neljää metriä meluseinän korkeudeksi ilman- laadun parantamiseksi teiden lähellä (Baldauf et al., 2008).

Baldauf (2017) kiinnittää huomiota kuitenkin siihen, että kiinteän seinän ja kasvillisuus- alueen muodostaman esteen toiminta eroaa toisistaan niin periaatteellisesti, ettei melu- seinien korkeussuosituksia voida soveltaa suoraan kasvillisuuden korkeuden määäämi- seen, ja jos kasvillisuuden latvuston peittävyys on liian suuri, se toimii kuin kiinteä seinä ja kasvillisuusalueen sisällä tapahtuvien ilmiöiden tuottama etu menetetään. Lisäksi Bal- dauf huomauttaa, että kasvillisuuden korkeuden vaikutusta ei ole juurikaan tutkittu.

2.3.3 Aukottomuus

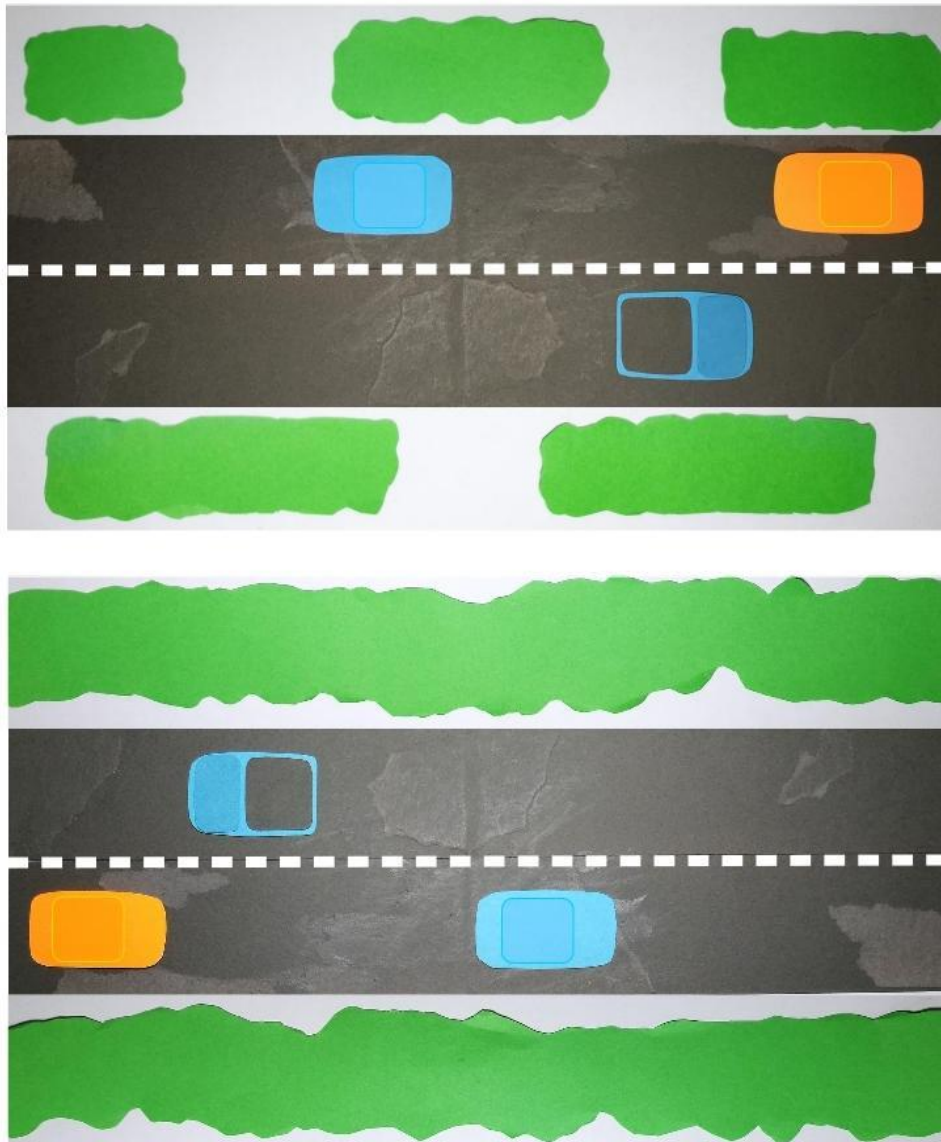
Baldauf (2017) mukaan kasvillisuusalueiden tehokkuus ilmansaasteiden vähentämi- sessä kaupunkimaisissa ympäristöissä riippuu suurelta osin siitä, että kasvillisuuden leh- västö ulottuu maan pinnasta latvaan asti aukottomana (Kuva 3.).



Kuva 3. Tienvierustan kasvillisuutta, jossa on korkeussuuntaisia aukkoja. Kuvan lähde: *Baldauf, R., 2017.*

Suuret latvuksen alapuolella olevat lehvättömät pituudet puiden rungoissa päästävät hiukkaspitoisen ilman läpi sitä suodattamatta samalla kun tuuli hidastuu kasvillisuusalueen sisällä, mikä voi johtaa tuulen alapuolella korkeampiin pitoisuuksiin kuten *Tong et al (2015)* tutkimusasetelmassa. Aukkoja voivat saada aikaan paitsi valitun kasvillisuuslajin luontainen kasvutapa (huokoisuus), myös kuolleet tai kitukasvuiset yksilöt. Aukkoja voidaan pyrkiä estämään syntymästä paitsi lajivalinnoilla, myös istuttamalla erityyppisiä kasveja samaan kasvillisuusalueeseen (puita, joiden alle pensaita yms), sekä kasvillisuuden huoltamisella ja hoidolla.

Varsinaisten aukkojen lisäksi hiukkaspitoinen ilma voi myös päästä kulkeutumaan kasvillisuusgeometriassa olevien isompien aukkojen kautta (ks. **Kuva 4.**), sekä kiertää esim. pientaloalueen, päiväkodin yms. suojaksi jätetyn/istutetun kasvillisuusalueen reunan ympäri sen loppuessa, kun on siirrytty pientaloalueen ohi. Tämän vuoksi kasvillisuusalueen pitäisi jatkua aukottomana riittävän pitkälle suojattavan alueen ohi molemmista suunnista ainakin 50 m, tai jos se ei ole mahdollista, kääntyä ympäröimään sitä (*Baldauf et al., 2008, 2016, Li et al., 2016; Brantley et al., 2014*). Tämä kasvillisuusgeometria saattaa kuitenkin johtaa hiukkasten kertymiseen suojattavalle alueelle, mikäli tuulen puolella tiestä sijaitsee muita hiukkaslähteitä.

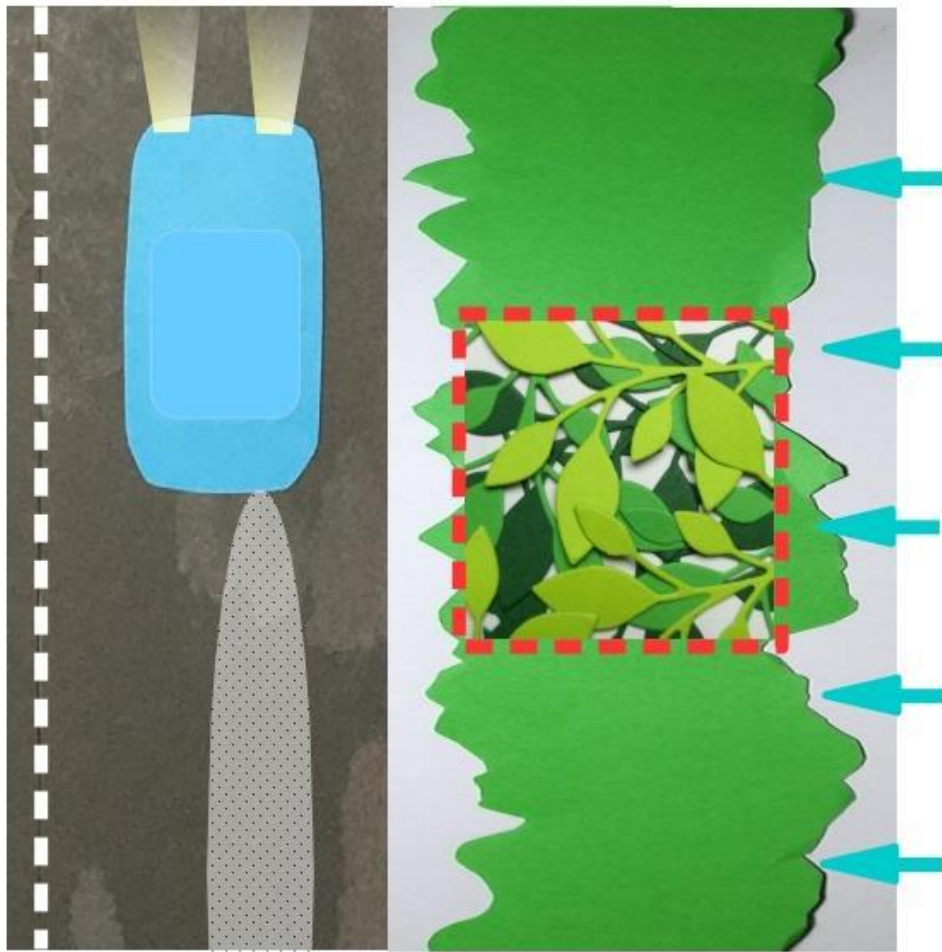


Kuva 4. Ylempi kuva: Kasvillisuusgeometriassa olevat aukot kuolleiden kasviyksilöiden tai liittyvien teiden kohdalla. Alempi kuva: yhtenäinen, aukoton kasvillisuusgeometria. Kuvan lähde: M. Aarnio.

2.3.4 Peittävyys ja tiheys

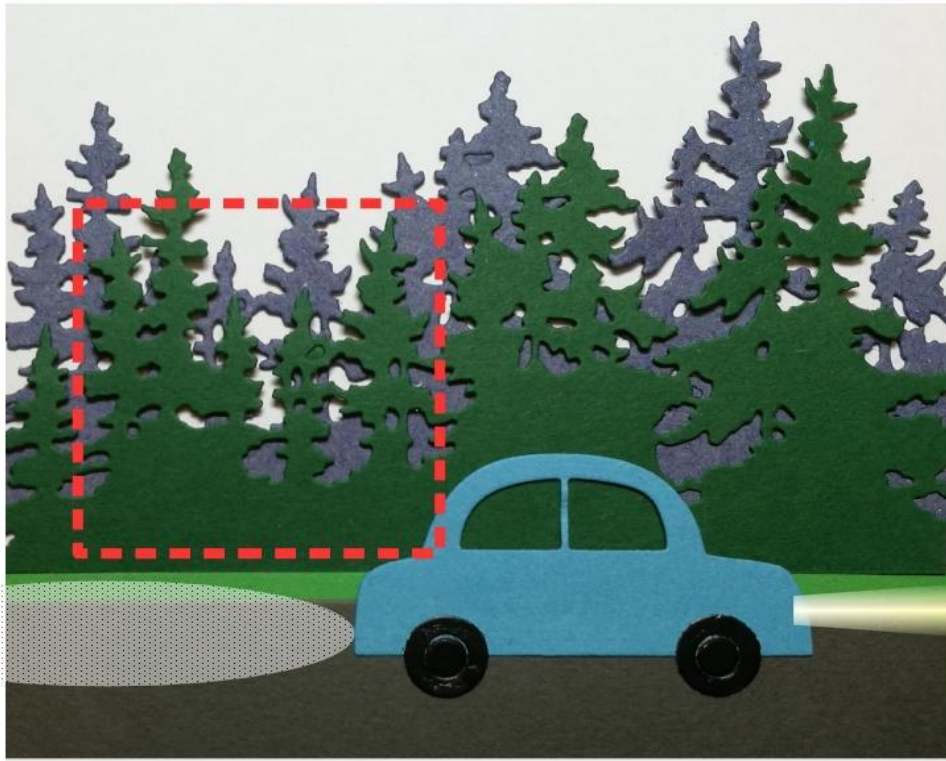
Kasvillisuutta kuvataan yllä olevien suureiden lisäksi myös suureilla, joilla pyritään antamaan käsitys sen läpäisevyydestä, eli siitä kuinka hyvin tuuli ja sen mukana kulkeutuvat hiukkaset voivat tunkeutua kasvillisuustilavuuden sisälle ja sen läpi. Näitä suureita oli tarkastellussa aineistossa karkeasti luokitellen kolmen tyyppisiä riippuen tarkastelun suunnasta (Abhijith et al., 2017, Brantley et al., 2014; Hagler et al., 2012; Islam et al., 2012; Lin et al., 2016; Shan et al., 2007):

1. Latvuston peittävyttä pystysuunnassa kuvaavat Leaf area index, LAI eli lehtipinta-ala maanpintayksikön yläpuolella sekä ns. crown density eli lehtien alapuolella olevan maa-alan osuus koko latvuksen alla olevasta maa-alasta (pystysuorassa, yksikötön, ks. **Kuva 5.**):



Kuva 5. Latvuston peittävyys (pystysuora tarkastelu). Kuvan lähde: M. Aarnio.

2. Latvuston lehtien pinta-alaa tilavuusyksikössä kuvaavat Leaf area density, LAD eli lehtien yhdeltä puolelta mitattu yhteispinta-ala tilavuusyksikköä kohti, sekä packing density, joka on lehtien yhteistilavuus jaettuna koko latvuksen tilavuudella.
3. Kasvillisuuden latvuston huokoisuutta kuvaamaan pyrkivä shelterbelt-huokoisuus eli lehtien peittämän alan osuus koko latvuston pinta-alasta tuulen suuntaan (sivuttain, kasvillisuuden läpi tuulen suunnassa, ks. **Kuva 6.**) jota käyttäen voidaan arvioida latvuston aikaansaamaa painegradienttia tai ilman liikettä hidastavaa voimaa. Tässä tarkastelussa on käytetty tästä ominaisuudesta suureena latvuston tiheyttä, joka on arvoltaan huokoisuudelle käänteinen eli $(1 - \text{huokoisuus}) \%$.



Kuva 6. Latvuston tiheys: lehtien peittämä pinta-ala/koko latvuksen pinta-ala, tarkastelu sivusuunnassa kasvillisuusalueen lävitse. Kuvan lähde: M. Aarnio.

Tong et al., (2016), *Steffens et al.*, (2012), sekä *Lin ja Khlystov* (2012) viittaavat siihen, että kasvillisuuden paksuuden ja latvuston tiheyden kasvaessa hiukkaspitoisuudet laskevat sen toisella puolella. *Janhäll* (2015), *Baldauf et al.* (2008), *Brantley et al.* (2014), sekä *Tong et al.* (2016) mukaan kasvillisuuden tiheyden ollessa korkea, se vaikuttaa ilman virtauksiin kuin kiinteä seinä, joka pakottaa ilman virtaamaan ylöspäin ja ylitseen; matalan tiheyden kasvillisuus päästää ilman kulkemaan lävitseen. Kasvillisuuden tiheys kuitenkin riippuu myös tuulen nopeudesta (*Gromke ja Ruck*, 2009).

Abhijith et al. (2017) ja *Tong et al.*, (2016) mukaan hiukkasten pitoisuudet vähenevät, kun kasvillisuuden latvuston peittävyys kasvaa, ja toisaalta hiukkaspitoisuudet ovat korkeampia, kun kasvillisuuden latvuston tiheys vähenee, mutta riippuvuus latvuston tiheyden ja hiukkaspitoisuuksien välillä ei ole lineaarinen.

Abhijith et al. (2017) ja *Shan et al.* (2007) suosittelevat latvuston peittävyydelle optimiksi 70–85 %, jolla saavutettaisiin 50 % tai jopa sitä suurempi hiukkasten kokonaisleijuman (TSP) vähenemä. Latvuston huokoisuudelle kirjallisuudessa ehdotettu optimi oli 20–40 % kokonaisleijuman (TSP) vähentämisen ollessa kyseessä, ja 10–20 % tarkasteltaessa PM₁₀-pitoisuuksien pienentämistä (*Chen et al.*, 2016; *Islam et al.*, 2012). *Shan et al.* (2007) mukaan latvuston huokoisuuden optimi oli jonkin verran tätä suurempi, 25–33 % pyrittäessä 50 TSP:n vähenemään. Latvuston peittävyyden ylittäessä 85 % ja sen tiheyden ylittäessä 60 % kasvillisuus ei enää toimi läpäisevänä rakenteena, vaan alkaa muistuttaa toiminnaltaan ja vaikutuksiltaan kiinteää seinää (*Islam et al.*, 2012; *Shan et al.*, 2007).

Kovan tuulen nopeuden olosuhteissa leveälehtisten puiden tiheys laskee, kun taas havupuiden tiheys samalla nousee (*Tiwary et al., 2005*).

2.4 Kasvillisuuslajivalinnat

- Kasvillisuuden lajivalinnoilla voidaan vaikuttaa ilmanlaadun paranemiseen.
- Pienilehtinen kasvillisuus on tehokas laskemaan hiukkasten pitoisuuksia.
- Lehtien tahmeus, vahapintaisuus ja karvaisuus estävät lehtiin tarttuneita hiukkasia vapautumasta ilmaan uudelleen.
- Lehtipuista koostuva kasvillisuus ei vähennä hiukkaspitoisuuksia talvella; ainavihantien puiden ja pensaiden vaikutus on ympärivuotinen.

Kasvillisuuden lajivalinnoilla voidaan vaikuttaa tien vierustan kasvillisuusalueiden latvuksen tiheyteen, peittävyYTEEN ja aukottomuuteen. Latvuksen tiheys ja peittävyys riippuvat kasvilajin lehtien koosta, kasvutavasta, sekä siitä onko kyseessä lehtipuu vai havupuu (ks edellisen kappaleen loppu). *Tong et al., (2016)* ja *Baldauf et al., (2017)* mukaan pienet lehdet ovat tehokkaampia laskemaan hiukkasten pitoisuuksia, koska näin latvuston lehtipinta-ala depositiota varten on suurempi.

Kasvien lehtien tahmeus, vahapintaisuus tai karvaisuus vaikuttavat hiukkasten depositioon lehtien pinnoille sekä resuspensioon takaisin ilmapirtaan, ollen depositiota tukevia ominaisuuksia. Tahmeus, vahapintaisuus ja karvaisuus estävät hiukkasten resuspensiota lehtien pinnoilta (*Janhäll, 2015*) takaisin ilmaan.

On huomioitava myös valittavien lajien ilmansaasteiden ja esim. suolauksen ja raskasmetallien kestävyys, jolla on merkitystä latvuston huokoisuuteen ja aukottomuuteen. Joissakin ympäristöissä (esim. kasvillisuuteen rajautuva leikkipuisto tai päiväkotit) on syytä kiinnittää myös huomiota myrkyttömien lajien valintaan (mukaan lukien myös fototoksisuus).

Lehtipuista koostuva kasvillisuus ei vähennä hiukkaspitoisuuksia talvella, koska ilman virtaukseen ja hiukkasten depositioon vaikuttavat oleellisesti lehtipuiden lehdet, jotka putoavat puista alas syksyllä (*Hagler et al., 2012; Lin et al., 2016*). *Baldauf et al. (2013)*, *Islam et al. (2012)* ja *Shan et al. (2007)* mukaan ainavihantien puiden ja pensaiden hiukkaspitoisuuksia vähentävä vaikutus säilyy myös talvella. *Tiwary et al., (2005)* mukaan 2 metriä korkea alue marjakuusta poistaa 3 % ja orapihlaja 27 % 15 µm hiukkasista.

Kirjallisuuden mukaan lämpimillä ilmastovyöhykkeillä (Kiina, Bangladesh, Italia) kasvillisuuden käytöllä voidaan saada aikaan merkittäviä vähennyksiä liikenteen hiukkaspäästöjen aiheuttamiin pitoisuuksiin (*Chen et al., 2015, 2016; Islam et al., 2012*). *Janhäll (2015)* ja *Viippola et al., (2018)* mukaan viileämissä ilmastoissa kuten Ruotsissa ja Suomessa kasvillisuuden vaikutus olisi rajallisempi ja havupuiden vaikutus

PM_{2.5} kohdalla jopa pitoisuuksia nostava, mutta ko. artikkeleissa ei esitetä tälle mitään syytä.

2.5 Muut vaikuttavat seikat

Abhijith et al. (2017) kirjallisuusanalyysin mukaan meteorologisista olosuhteista tärkein PM₁₀ -pitoisuuksien pienenemisen kannalta on ilmankosteus (RH, korkealla ilmankosteudella yhteys hiukkaspitoisuuksien laskuun), tuulen nopeus ja varsinkin ilman lämpötila vaikuttavat sitä vähemmän (*Chen et al., 2015*).

Brantley et al., (2014) mittauksissa tuulen nopeuden ollessa alle 1 m/s kasvillisuuden havaittiin lisäävän pitoisuuksia kaistojen päällä ja lisäksi depositio kasvillisuuden sisään oli heikkoa, minkä johdosta hiukkaslukumäärät (PN_{2,0–10}) eivät muuttuneet kasvillisuuden takana.

Tuulen nopeuden ollessa 2–4,6 m/s kasvillisuus madaltaa hiukkaspitoisuuksia ja depositio sen sisälle on tehokkaampaa (*Jeanjean et al., 2016*).

Tuulen suunnan vaikutusta ei ole tässä kirjallisuustyössä varsinaisesti huomioitu muuten kuin keskittymällä tutkimuksiin joissa on tarkasteltu hiukkaspitoisuuksia tuulen alapuolella tietä vastaan kohtisuoran tuulen tapauksissa, jolloin hiukkasten väheneminen kasvillisuuden vaikutuksesta on voimakkainta (*Brantley et al., 2014*).

2.6 Kasvillisuuden muut vaikutukset

- Kasvillisuus vaikuttaa ilmanlaadun lisäksi myös melutasoihin sekä lämpötiloihin kaupunkirakenteen sisällä.
- Kasvillisuudella on havaittu olevan myönteisiä vaikutuksia kaupunkilaisten terveyteen.
- Kasvillisuudesta voi olla myös haittoja, kuten siitä aiheutuvat näköesteet ja mahdolliset siitepölyhaitat.

Ilman hiukkaspitoisuuksien alentamisen lisäksi kasvillisuudella voi olla muitakin hyödyllisiä vaikutuksia. Kaupunkialueella kasvillisuudella voidaan vähentää ns. urbaani lämpösaareke -ilmiötä*), vähentää energiankulutusta, pienentää melutasoja ja vähentää kuumuutta, sekä vähentää tulvimista (*Abhijith et al., 2017*). Lisäksi kasvillisuuden ja vihreän infrastruktuurin on osoitettu vaikuttavan myönteisesti ihmisten terveyteen mm. lisäämällä fyysistä aktiivisuutta, vähentäen ylipainoa, parantaen mielenterveyttä ja

vähentäen sydän -ja verisuonitautien määrää sekä kuolleisuutta (*James et al., 2015, 2016*).

Kasvillisuudella voi kuitenkin olla tien vierustoilla myös epätoivottuja vaikutuksia. Kasvillisuus voi olla näköeste ajoneuvon kuljettajalle, tuottaa roskaa tielle (lehdet ja oksat, kaatuneet rungot), mahdollistaa tulipalojen etenemistä, ja toimia kulkureitteinä ja turvapaikkoina haittaeläimille ja -kasveille.

Kasvillisuus saattaa myös tuottaa allergisoivaa siitepölyä ja haihtuvia hiilivety-yhdisteitä (terpeenit, pineeni) jotka voivat osallistua ns. sekundaaristen hiukkasten syntyyn ja dynamiikkaan, sekä otsonin muodostumiseen maanpinnan lähelle ihmisten hengityskorkeudelle (*Baldauf et al., 2017*).

**) Urbaani lämpösaareke on ilmiö, jossa kaupunkialue on ihmistoiminnan vuoksi selvästi lämpimämpi kuin sitä ympäröivä ei-kaupunkimainen alue. Lämpötilaero on yleensä suurempi öisin kuin päivällä, ja selkein matalan tuulen nopeuden tilanteissa. Se on myös selkeämmin havaittavissa kesällä ja talvella. Urbanin lämpösaarekeilmiön tärkein syy on ihmisten aikaansaama maanpintojen modifikaatio, ja lisäksi kaupunkialueen hukkalämpö voimistaa ilmiötä. Lämpösaarekeilmiöllä on vaikutusta mm. sademääriin, kasvukauden pituuteen, ilmansaasteisiin ja vedenlaatuun alueella.*

VIITELUETTELO

ABHIJITH, K.V., KUMAR, P., GALLAGHER, J., MCNABOLA, A., BALDAUF, R., PILLA, F., BRODERICK, B., DI SABATINO, S., PULVIRENTI, B., 2017. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments - A review. *Atmospheric Environment* 162, 71-86.
doi:10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

BALDAUF, R., THOMA, E., KHLYSTOV, A., ISAKOV, V., BOWKER, G., LONG, T., SNOW, R., 2008. Impacts of noise barriers on near-road air quality. *Atmos. Environ.* 42, 7502-7507.
doi: /10.1016/j.atmosenv.2008.05.051

BRANTLEY, H.L., HAGLER, G.S.W., DESHMUKH, P.J., BALDAUF, R.W., 2014. Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. *Science of the Total Environment* 468-469, 120-129.
doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.001

BALDAUF, R., 2017. Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality. *Transportation Research Part D* 52, 354-361.
doi:10.1016/j.trd.2017.03.013

CHEN, L., LIU, C., ZOU, R., YANG, M., ZHANG, Z., 2016. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution Volume 208, Part A, January 2016*, 198-208.
doi: /10.1016/j.envpol.2015.09.006

CHEN, X., PEI, T., ZHOU, Z., TENG, M., HE, L., LUO, M., LIU, X., 2015. Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM₁₀): A street scale investigation in Wuhan, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 2, 354-360.
doi: /10.1016/j.ufug.2015.02.013

GALLAGHER, J., BALDAUF, M. R., FULLER, C.H., KUMAR, P., GILL, L.W., MCNABOLA, A., 2015. Passive methods for improving air quality in the built environment: A review of porous and solid barriers. *Atmospheric Environment* 120, 61-70.
doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.075

GROMKE, C., JAMARKATTEL, N., RUCK, B., 2016. Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. *Atmos. Environ.* 139, 75-86.
doi: /10.1016/j.atmosenv.2016.05.014

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.,
doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.019

GROMKE, C., RUCK, B., 2009. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons. *Boundary-Layer Meteorol* 131, 19-34.
doi:10.1007/s10546-008-9301-2.

HARRISON, R.M., 2020. Airborne particulate matter. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378: 20190319.
doi: /10.1098/rsta.2019.0319

HAGLER, G.A., LIN, M.-E., KHLYSTOV, A., BALDAUF, R.W., ISAKOV, V., FAIRCLOTH, J., JACKSON, L.E., 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.
doi:10.1016/j.scitotenv.2011.12.002

ISLAM, M.N., RAHMAN, K.-S., BAHAR, M.M., HABIB, M.A., ANDO, K., HATTORI, N., 2012. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11, 4, 460-464.
doi: /10.1016/j.ufug.2012.06.004

JAMES, P., BANAY, R.F., HART, J.E., LADEN, F., 2015. A review of the health benefits of greenness. *Current Epidemiology Reports*, 2, 131–142.
DOI 10.1007/s40471-015-0043-7

JAMES, P., HART, J.E., BANAY, R.F., LADEN, F., 2016. Exposure to greenness and mortality in a Nationwide Prospective Cohort Study of Women. *Environ. Health Perspect.* 124, 9, 1344-52.
doi: /10.1289/ehp.1510363.

JANHÄLL, S., 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment* 105, 130-137.
doi:10.1016/j.atmosenv.2015.01.052

JEANJEAN, A.P.R., MONKS, P.S., LEIGH, R.J., 2016. Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric Environment* 147, 1-10.
doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.033

KARTTUNEN, S., KURPPA, M., AUVINEN, M., HELLSTEN, A., JÄRVI, L., 2020. Large-eddy simulation of the optimal street-tree layout for pedestrian-level aerosol particle concentrations – A case study from a city-boulevard. *Atmospheric Environment: X* 6, 100073.
doi:10.1016/j.aeaoa.2020.100073

LIN, M.Y., HAGLER, G., BALDAUF, R., ISAKOV, V., LIN, H.Y., KHLYSTOV, A., 2016. The effects of vegetation barriers on near-road ultrafine particle number and carbon monoxide concentrations. *Sci. Total Environ.* 553, 372-379.
doi: /10.1016/j.scitotenv.2016.02.035

LIN, M.Y., KHLYSTOV, A., 2012. Investigation of ultrafine particle deposition to vegetation branches in a wind tunnel. *Aerosol Sci. Technol.* 46, 4, 465–472.
doi: /10.1080/02786826.2011.638346

MAO, Y., WILSON, J.D., KORT, J., 2013. Effects of a shelterbelt on road dust dispersion. *Atmospheric Environment* 79, 590-598.
doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.015

MORAKINYO, T.E., LAM, Y.F., HAO, S., 2016. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of Environmental Management* 182, 595-605.
doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077

NING, Z., HUDDA, N., DAHER, N., KAM, W., HERNER, J., KOZAWA, K., MARA, S., SIOUTAS, C., 2010. Impact of roadside noise barriers on particle size distributions and pollutants concentrations near freeways. *Atmos. Environ.* 44, 3118-3127.
doi: /10.1016/j.atmosenv.2010.05.033

RANASINGHE, D., LEE, E.S., ZHU, Y., FRAUSTO-VICENCIO, I., CHOI, W., SUN, W., MARA, S., SEIBT, U., PAULSON, S.E., 2018. Effectiveness of vegetation and sound wall-vegetation combination barriers on pollution dispersion from freeways under early morning conditions. *Science of The Total Environment*, 658.

doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.159

DI SABATINO, S., BUCCOLIERI, R., PAPPACCOGLI, G., LEO, L.S., 2015. The effects of trees on micrometeorology in a real street canyon: consequences for local air quality. *Int. J. Environ. Pollut.* 58, 100.
doi: /10.1504/IJEP.2015.076587.

SANTIAGO, J.-L., RIVAS, E., SANCHEZ, B., BUCCOLIERI, R., MARTIN, F., 2017. The Impact of Planting Trees on NO_x Concentrations: The Case of the Plaza de la Cruz Neighborhood in Pamplona (Spain). *Atmosphere*, 8, 131.
doi:10.3390/atmos8070131

SETÄLÄ, H., VILJAMI VIIPPOLA, V., RANTALAINEN, A.L., PENNANEN, A., VESA YLI-PELKONEN, V., 2013. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? *Environmental Pollution* 183, 104-112.
doi:10.1016/j.envpol.2012.11.010

SHAN, Y., JINGPING, C., LIPING, C., ZHEMIN, S., XIAODONG, Z., DAN, W., WENHUA, W., 2007. Effects of vegetation status in urban green spaces on particle removal in a street canyon atmosphere. *Acta Ecologica Sinica* 27, 11, 4590-4595.
doi:/10.1016/S1872-2032(08)60007-4

STEFFENS, J.T., YAN JASON WANG, Y.J., ZHANG, K.M., 2012. Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment* 50, 120- 128.
doi:10.1016/j.atmosenv.2011.12.051

TIWARY, A., REFF, A., COLLS., J.J., 2008. Collection of ambient particulate matter by porous vegetation barriers: Sampling and characterization methods. *Journal of Aerosol Science* 39, 40 – 47.
doi:10.1016/j.jaerosci.2007.09.011

TIWARY, A., MORVAN, H.P., COLLS, J.J., 2006. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *J. Aerosol Sci.* 37, 990-1015.
doi: /10.1016/j.jaerosci.2005.07.004

TONG, Z., WHITLOW, T.H., MACRAE, P.M., LANDERS, A.J., HARADA, Y., 2015. Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns. *Environmental Pollution* 201, 141-149.
doi: 10.1016/j.envpol.2015.02.026

TONG, Z., BALDAUF, R.W., ISAKOV, V., DESHMUKH, P., ZHANG, K.M., 2016. Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Sci. Total Environ.* 541, 920–927.
doi:/10.1016/j.scitotenv.2015.09.067.

VIIPPOLA, V., WHITLOW, T.H., ZHAO, W., YLI-PELKONEN, V., MIKOLA, J., POUYAT, R., SETÄLÄ, H., 2018. The effects of trees on air pollutant levels in peri-urban near-road environments. *Urban Forestry & Urban Greening* 30, 62–71.

YLI-PELKONEN, V., SETÄLÄ, H., VIIPPOLA, V., 2017. Urban forests near roads do not reduce gaseous air pollutant concentrations but have an impact on particles levels. *Landscape and Urban Planning* 158, 39-47.
doi:10.1016/j.landurbplan.2016.09.014



ILMATIETEEN LAITOS

ILMATIETEEN LAITOS

puh. 029 539 1000

Ilmanlaatu ja energia

ilmanlaatupalvelut@fmi.fi

www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmanlaatupalvelut

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI

