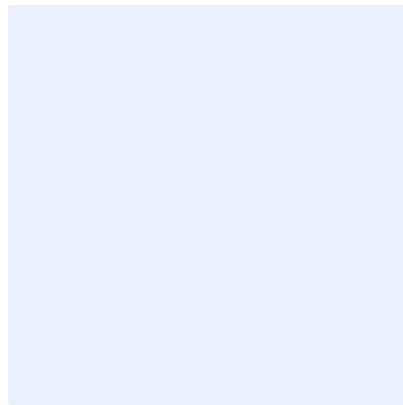


KUOPION KAUPUNKI

# KASVILLISUUDEN VAIKUTUS ÄÄNEN ETENEMISEEN JA MELUN KOKEMISEEN SELVITYS

8.9.2021



315009



## Sisällysluettelo

<b>1.</b>	<b>Johdanto.....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Kasvillisuuden vaikutukset äänen etenemiseen .....</b>	<b>3</b>
2.1.	Kasvillisuusvaikutusten mekanismit .....	3
2.2.	Maan pinnan yläpuolisen kasvillisuuden vaikutukset.....	4
2.3.	Puusto- ja metsävyöhykkeet melun vaimentajina.....	8
2.4.	Maan pinnan ominaisuuksien vaikutus äänen etenemiseen.....	12
<b>3.</b>	<b>Kasvillisuuden vaikutus melun kokemiseen .....</b>	<b>15</b>
3.1.	Melun häiritsevyys ja kiusallisuus .....	15
3.2.	Melun taajuusjakauman muutoksen vaikutukset melun kokemiseen.....	15
3.3.	Halutut ja ei-halutut äänet äänimaisemassa .....	16
3.4.	Audio-visuaaliset kytkennät .....	16
<b>4.</b>	<b>Yleiset johtopäätökset.....</b>	<b>20</b>
<b>5.</b>	<b>Kirjallisuusluettelo.....</b>	<b>21</b>

## 1. Johdanto

WSP Finland Oy on laatinut tämän katsauksen kasvillisuuden vaikutuksesta äänen etenemiseen ja melun kokemiseen. Selvityksessä on koottu tutkimustietoa aiheeseen liittyen ja pohdittu asiaa myös käytännön kannalta.

Selvityksessä on tarkasteltu kasvillisuuden vaikutuksia äänen etenemisreitillä, kasvillisuuden visuaalisia vaikutuksia melun kokemiseen sekä kasvillisuuden tuottamien äänien peittovaikutuksia. Selvityksen on laatinut Ilkka Niskanen WSP:stä. Raportin on tarkistanut Sirpa Lappalainen.

## 2. Kasvillisuuden vaikutukset äänen etenemiseen

### 2.1. Kasvillisuusvaikutusten mekanismit

Maan pinnan yläpuolinen kasvillisuus vaikuttaa äänen etenemiseen seuraavien mekanismien kautta:

- estevaikutus,
  - vaikutus on verrannollinen kasvinosien (materiaalin) ääntä eristäviin ominaisuuksiin sekä estävän kasvin osien (materiaalin) paksuuteen, peittävyteen / aukkoisuuteen melulähteen ja kuuntelupaikan välillä sekä kasvinosien fyysisiin mittoihin (kasvillisuusvyöhykkeen korkeus ja leveys)
- äänen absorptio,
  - äänen imeytymisen (absorption) määrään ja äänen vaimentumiseen vaikuttavat kasvinosien akustiset ominaisuudet, peittävyys / aukkoisuus melulähteen ja kuuntelupaikan välillä sekä kasvillisuuden vyöhykkeen fyysiset mitat (kasvillisuusvyöhykkeen korkeus ja leveys)
- äänen siroutuminen
  - äänen imeytymisen (absorption) määrään ja äänen vaimentumiseen vaikuttavat kasvinosien akustiset ominaisuudet, peittävyys / aukkoisuus melulähteen ja kuuntelupaikan välillä sekä kasvillisuuden vyöhykkeen fyysiset mitat (kasvillisuusvyöhykkeen korkeus ja leveys).

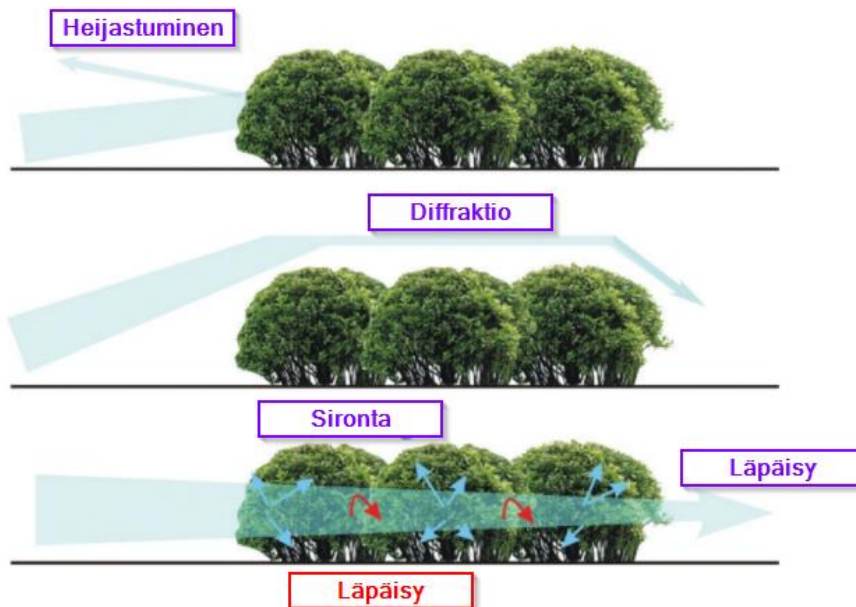
Kasvillisuus- ja puustovyöhykkeet voivat vaikuttaa äänen etenemiseen myös epäsuorien vaikutusten kautta. Epäsuorat vaikutukset syntyvät kasvillisuuden vaikutuksesta sääolosuhteisiin sekä kasvillisuuden vaikutuksesta maaperään.

Tässä selvityksessä ei käsitellä kasvillisuuden vaikutuksia sääolosuhteisiin. Kasvillisuuden vaikutuksia maaperään sekä maaperän vaikutuksia äänen etenemiseen käsitellään kappaleessa 2.4.

## 2.2. Maan pinnan yläpuolisen kasvillisuuden vaikutukset

### 2.2.1. Kasvillisuuden suorat vaikutukset äänen etenemiseen

Äänen absorboituminen tarkoittaa äänienergia siirtymistä absorboivaan materiaaliin. Kasvillisuuden aikaan saaman absorptioon katsotaan yleisesti olevan merkittävämpi melua vaimentava tekijä kuin kasvillisuuden muodostavan heijastuksen tai sironnan aiheuttamien vaikutusten (Van Renterghem et al. 2015).



Kuva 1. Kasvillisuusvyöhykkeet suorat vaikutukset äänen etenemiseen (kuva artikkelista Van Renterghem et al. 2015).

Vain kasvien osien absorptio voi aikaan saada merkittävää äänienergian vaimentumista. Myös sironta voi yksittäisten paikkojen vaimentumisen osalta merkittävä melua vaimentava tekijä. Heijastusten ja diffraktion vaikutukset liikennemelun vaimentajina ovat vähäisempiä (Van Renterghem et al. 2015).

### 2.2.2. Kasvillisuuden aiheuttama absorptio

#### Absorptioon teoriaa

Kasvillisuuden aiheuttama äänen absorptio tapahtuu materiaalin pienissä dimensioissa, joissa äänienergia muuttuu lämmöksi. Absorptiossa ääniaalto törmää materiaaliin ja se kimpoaa takaisin heikompana eli osa ääniaallista imeytyy materiaaliin ja saa materiaalin hiukkaset värähtelemään. Materiaalin kykyä absorboida äänitehoa kuvaa absorptiosuhde  $\alpha$ , joka on materiaalin pinnasta heijastumatta jääneen äänitehon  $W_1 - W_2$  ja pinnan kohdanneen äänitehon  $W_1$  suhde (Kylliäinen 2006):

$$\alpha = \frac{W_1 - W_2}{W_1}$$

8.9.2021

Absorptiosuhde eli absorptiokerroin  $\alpha$  on positiivinen luku, jonka arvo vaihtelee välillä 0 - 1. Absorptiosuhteen ollessa 0 äänitehotaso ei alene lainkaan, vaan heijastus on täydellinen. Kunkin materiaalin absorptiosuhteen arvo ei ole vakio, vaan se riippuu taajuudesta. Materiaalien absorptiokertoimet mitataan yleensä oktaavikaistoittain 125–4000 Hz keskitajuuksilla (Kylliäinen, M. 2006).

Ääni on ilmamolekyylien tihentymiä ja harventumia, joten äänen absorboituminen edellyttää, että ilma pääsee kulkeutumaan absorboivan materiaalin sisään. Tämän vuoksi huokoiset materiaalit toimivat hyvin äänen absorptiossa. Ääniaaltojen kulkiessa absorboivan materiaalin sisällä niiden ja materiaalin välinen kitka aiheuttaa äänienergian siirtymisen materiaaliin ja äänen absorption. Absorptioon vaikuttaa siten myös materiaalin ilman viraukseen vaikuttavat ominaisuudet (viskositeetti). Äänen absorption määrään vaikuttaa luonnollisesti myös ääniaallon etenemismatka absorboivassa materiaalissa, absorptio on sitä suurempi mitä pidemmän matkan ääni etenee materiaalissa.

#### Kasvien lehdet äänen absorboijana

Kasvien lehvästössä äänen absorptio tapahtuu edellä esitetyn termo – viskositeetti-ilmion seurauksena sekä äänienergian muuttuessa liike-energiaksi. Viimeksi mainitussa tilanteessa ääniaallot saavat mm. lehdet värähtelemään törmäyksen seurauksena. Värähtelyn seurauksena syntyy mahdollisesti uudenlaista ääntä. Ääniaallon muuttumista liike-energiaksi ei pystytä määrittelemään laboratoriomittakaavassa, joten ilmion vaikutusta kokonaisabsorptioon ei voida tarkasti määrittää.

Kasvien osat absorboivat eniten korkeita äänen taajuuksia ja matalilla taajuuksilla kasvillisuuden vaikutus absorptioon on lähes nolla.

Eri kasvien lehdillä on hyvin erilaisia absorptio ominaisuuksia. Impedanssiputkessa tehdyissä tutkimuksissa mm. murattin lehtien absorptio on todettu vähäiseksi (absorptiosuhde 200 – 1600 Hz taajuusalueella 0,02 – 0,15), kun sen sijaan kääpiöesikon lehtien absorption merkittäväksi (absorptiosuhde 200 – 1600 Hz taajuusalueella 0,3 – 0,7).

Äänen absorboitumisen lehtiin vaikuttavat lehvästön tiheys (lehtien kokonaispinta-ala suhteessa kasvin tilavuuteen). Tiheä lehvästö toisaalta lisää sen läpi kulkeutuvan ääniaaltojen vastusta, toisaalta virtauksen vastusta tarvitaan äänienergian absorboitumiseen. Lehtien vallitseva asento suhteessa ääniaaltoon vaikuttaa siihen kuinka paljon etenevä ääniaalto joutuu mutkittelemaan lehvästössä. Ääniaallon ja lehvästön optimaalinen kohtaamiskulma lisäävät melun absorboitumista lehvästöön. Kasvillisuuden aikaan saama äänen absorptio riippuu kolmesta tekijästä: kasvillisuuden korkeus, lehvästön tiheys (leaf area density LAD) sekä lehtien vallitseva suuntautuminen äänen etenemissuuntaan nähden (Horoshenkov et al. 2015).

Äänen absorptio, jossa energian muuttuu lehtin liikkeeksi, vaikuttaa korkeilla taajuusalueilla, 4 kHz – 5 kHz. Tämän ilmiön esiintyminen riippuu suuresti lehtien koosta. Mitä pienemmät lehdet ovat sitä korkeammalla taajuusalueella absorptiota muodostuu.

#### Johtopäätöksiä:

- *Ihmisillä on hyvin yleinen käsitys ja kokemus siitä, että puiden lehdet vaikuttavat äänen etenemiseen. Tälle kokemukselle on tieteellistä näyttöä.*
- *Puiden lehvästö absorboi erityisesti korkeita äänen taajuuksia, jolloin äänen taajuusjakauma muuttuu. Puiden lehvästö ja rungot vaimentavat melua ja*

8.9.2021

vaimennuksen määrä riippuu puuston ja muun kasvillisuuden ominaisuuksista sekä kasvillisuus- tai metsävyöhykkeen leveydestä ja puuston korkeudesta

- *Kuulijan kokemuksen kannalta äänen taajuusjakauman muuttumisella on merkitystä. Korkeita taajuuksia sisältävä melu kuulostaa terävämmältä kuin sama äänisisältö, josta korkeita taajuuksia on seuloutunut pois. Korkeita taajuuksia sisältävä ääni mielletään olevan lähellä kuulijaa tai sen arvioidaan olevan voimakkaampaa kuin äänellä, jossa korkeita taajuuksia ei ole.*

#### Matalan kasvillisuuden lehtien vaikutus äänen absorptioon

Impedanssiputkessa tehtyjen absorptiomittausten perusteella eri kasvilajien välillä on suuria eroja äänen absorptiossa. Horoshenkov et al (2015) tutkimuksessa testattujen kasvien äänen absorptio mitattiin olevan suurin Winter Primula vulgariksella (Talviesikko), jonka lehtien kokonaisala oli tutkituista kasvilajeista suurin. Winter Primula vulgariksen absorptiosuhde oli 60 % taajuusalueella 700 – 900 Hz, 30 – 50 % taajuusalueella 900 – 1600 Hz ja 10 – 50 % taajuusalueella 200 – 700 Hz.

Kasvien aikaan saaman äänen absorptio suuruuden arvioitiin riippuvan kasvien lehtien asennosta suhteessa etenevään ääniaaltoon. Kasvien äänen absorptio oli pienempi kasveilla, joiden lehtien ja ääniaallon kohtaamiskulman oli pieni ja vastaavasti suurempi kasveilla joilla kohtaamiskulman oli suurempi.

#### Johtopäätöksiä:

- *Kasvien absorptio-ominaisuudet vaihtelevat lajikohtaisesti. Ääni absorboituu eniten korkeilla taajuusalueilla ja lehtien asento suhteessa etenevään ääneen vaikuttaa merkittävästi äänen absorboitumiseen. Tehokkaimmin äänen absorptiota lisäävät isolehtiset kasvit, joiden lehtien ja ääniaallon kohtaamiskulma ovat mahdollisimman suuret.*

#### 2.2.3. Kasvillisuuden aiheuttama heijastuminen, diffraktio ja sironta

Kasvillisuuden aiheuttamaa äänen heijastumista muodostuu kasvillisuusvyöhykkeen ja ilman kasvillisuutta olevan vyöhykkeen rajalle. Yleensä kasvillisuuden arvioidaan aiheuttavan heijastumista erityisesti puuston runkojen vaikutuksesta. Tieliikennemelun vaikutusalueella tehdyissä mittauksissa metsän reunasta heijastuvan äänen voimakkuudeksi on mitattu yli 10 dB pienempiä melutasoja kuin metsän reunaan kohdistuvasta suorasta melusta (Wunderli and Salomons 2009). Tämä ero suoraan kohteeseen edenneen äänen ja heijastusvan äänen välillä on niin suuri, että heijastuksen aiheuttaman melutason lisäyksen voidaan katsoa olevan merkityksettömän pieni.

Diffraktiolla tarkoitetaan äänen taipumista esteiden taakse. Esimerkkinä diffraktio-ilmioistä on tilanne, jossa kuulija siirtyy rakennuksen kulman taakse siten, että äänilähden häviää näkymästä, mutta ääni on edelleen kuultavissa. Kasvillisuusvyöhykkeen osalta diffraktoituneen äänen osuus kasvaa, mikäli äänilähteen ja metsänreunan sekä metsän reunan ja vastaanottopisteen väliset kulmat ovat pieniä. Puustovyöhykkeen aikaan saama vaimentuminen riippuu siten myös melun aiheuttajan, metsävyöhykkeen ja vastaanottopisteen korkeusasemista sekä metsävyöhykkeen puuston korkeudesta.

Kasvillisuuden aiheuttama sironta on heijastumista, jota tapahtuu useisiin eri suuntiin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kasvillisuusvyöhykkeelle etenevä ääni hajastuu edetessään useisiin eri suuntiin. Kasvillisuusvyöhykkeen toisella puolella (äänilähteen vastakkaisella puolella) äänienergia on pienentynyt sironnan vaikutuksesta ja äänitaso

8.9.2021

vaimentunut. Sironta eroaa absorptiosta siinä mielessä, että äänienergia suuntautuu uudelleen eikä se muutu lämmöksi kuten absorptiossa. Kuulijan kannalta lopputulos on kuitenkin sama eli äänenpainetaso on vaimentunut.

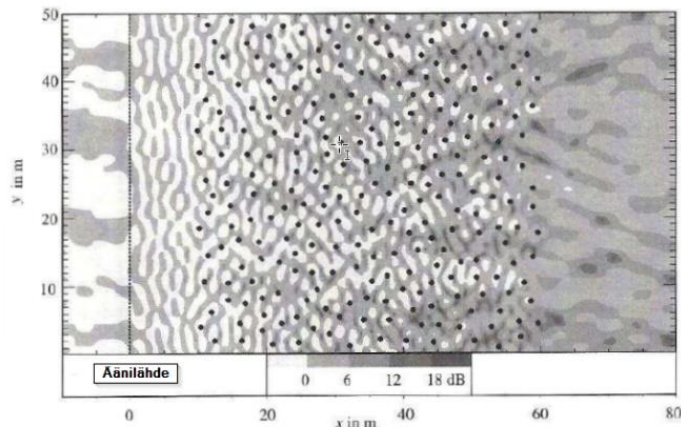
Sironnan vaikutukset korostuvat, kun sirontaa aiheuttavien kohteiden (kasvien lehdet, puiden rungot) ja ääniaaltojen pituudet ovat saman suuruisia. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lehvästön vaikutukset sirontaan tulevat vallitsevaksi yli 2 kHz taajuusalueella. Sironnan aikaan saama vaimennus riippuu luonnollisesti kasvillisuus vyöhykkeen tiheys ja paksuus eli äänen etenemisreitien pituus.

Yksittäisen puun sisällä tapahtuva sironta aiheuttaa tilanteen, jossa ääniaallon eteneminen levästä läpi lisää äänen etenemismatkaa ja -aika. Tämä tarkoittaa myös sitä, että ääni vaimenee absorboitumisen lisäksi myös geometrisen vaimentumisen vaikutuksesta.

Runkojen ja oksien aiheuttama sironta on yksi merkittävä vaimentava tekijä alle 1 kHz taajuusalueella. Runkojen, oksien ja lehvästön vaimennuksen yhteisvaikutuksen on arvioitu olevan lineaarisessa suhteessa taajuuden logaritmiin (Attenborough et al. 2007).

Mitä suurempia kasvin osat ovat fyysisiltä mitoiltaan sitä matalammalle äänen taajuusalueelle kasvien osien aiheuttama äänen sironta vaikuttaa. Sironnan aikaan saama vaimennus jää matalilla taajuuksilla (< 125 Hz) vähäiseksi, koska matalataajuisen äänen aallon pituus on selvästi suurempi kuin puuston osien fyysiset mitat (Bucur V. 2005).

Heimann (2003) selvitti teoreettisesti puiden runkojen vaikutuksia äänen etenemiseen. Laskennallisen tarkastelun perusteella puuston sisälle muodostuu monikertaisten sironnan vaikutuksesta paikkoja, joissa ääni vaimenee merkittävästi ja toisaalta paikkoja, joissa vaimennusta ei ole lainkaan (kuva 2).



Kuva 2. Teoreettinen tarkastelu puiden runkojen vaikutuksesta äänen etenemiseen. Kuvassa äänilähde on katkoviiva kuvan vasemmassa reunassa. Mustat pisteet edustavat puiden runkoja. Taustan tummuusaste esittää äänen vaimentumista (dB). Kuva lähteestä Herman (2003).

Teoreettisten tutkimusten perusteella Heiman (2003) tarkasteli sylinterien halkaisijan ja sylinterijoukon tiheyden vaikutuksia äänen moninkertaiseen heijastumiseen ja vaimentumiseen. Teoreettisessa tarkastelussa sylinterit edustavat pyöreä runkoisia puun runkoja. Tutkimuksessa todettiin, että vaimennus on suoraan riippuvainen runkojen halkaisijan suuruuteen. Renterghem et al. (2012) totesivat teoreettisessa tarkastelussaan, että 3 metrin välein sijaitsevat 0,1 m paksut puut aikaan saavat äänen vaimentumista.

8.9.2021

Chobeau (2014) tarkasteli teoreettisessa tutkimuksessaan moninkertaisen sironnan ja maavaimennuksen vaikutuksia äänen etenemiseen. Teoreettisissa laskennoissa tarkasteltiin sylinterien sijoittumisen (täysin satunnainen, systemaattinen, systemaattisesti limitetty, rykelmiin sijoitettu) sylinterijoukon tiheyden sekä maanpinnan heijastusten vaikutuksia äänen etenemiseen ja vaimentumiseen. Tarkasteluissa sylinterien halkaisijana käytettiin 0,2 m, korkeutena 5 m ja sylinterien pinnat oletettiin täysin heijastaviksi.

Systemaattisesti sijoitetut sylinterit vaimensivat ääntä tietyillä taajuuksilla ja päästivät kaiken läpi tietyillä taajuuksilla. Satunnaisesti sijoitetut sylinterit vaimensivat etenevää ääntä tasaisesti koko taajuusalueella, vaimennuksen vähentyessä korkeammilla taajuuksilla. Sylinterijoukon tiheyden kasvaessa äänen vaimentumisen todettiin lisääntyvän. Lisäksi tuloksista pääteltiin, että tiheyden lisääminen kasvattaa vaimennusta enemmän kuin etenemisen pituuden lisääminen. Tutkimuksen johtopäätöksen Chobeau (2014) toteaa, että kapeaa tiheä metsävyöhyke, jossa puut on sijoitettu sattumanvaraisesti toimii melua vaimentavana esteenä.

Kaupunkiympäristössä rakennusten reunustamaan katutilaan muodostuu heijastuksia, jotka voimistavat ääntä. Katukanjoniin sijoitettavat puut suuntaavat osan äänienergiasta ylöspäin, jolloin kaiunta katutilassa vähenee. Toisaalta katutilassa oleva puusto saattaa lisätä melutasoa alaspäin suuntautuvan sironnan vaikutuksesta, kun kuulijat ja äänilähteet sijaitsevat alhaalla katutilassa. Vastaava ilmiö saattaa lisätä melutasoja myös tilanteessa, jossa meluesteen takana on puustoa. Toisaalta meluesteen taakse sijoittuvan puuston vaikutus tuuleen ja melun etenemiseen on merkittävästi suurempi kuin alaspäin suuntutuvan sironnan vaikutus.

### **Johtopäätöksiä:**

*Kasvillisuuden vaikutukset äänen heijastumiseen ja äänen diffraktioon (taipumiseen) ovat vähäisiä verrattuna kasvillisuuden aikaan saamaan sirontaan ja absorptioon.*

*Kasvillisuuden aikaan saama sironta vaikuttaa korkeilla taajuusalueilla. Sironnan vaikutuksessa äänitaso saattaa vaimentua tai kasvaa tarkastelukohteen sijainnista riippuen.*

*Puiden rungot aikaan saavat metsän sisälle moninkertaisia heijastuksia, jotka vaimentavat metsävyöhykkeen läpi etenevää ääntä. Puiden runkojen aiheuttama sironta vaikuttaa alle 1 kHz taajuusalueella, kun puiden runkojen läpimitta on vähintään 10 cm. Vaimennusta tapahtuu sitä alemmilla taajuuksilla, mitä paksumpia puiden rungot ovat. Puiden runkojen satunnaisella sijoittelulla saavutetaan taajuuden suhteen tasainen vaimennus.*

*Systemaattisesti sijoitetuissa metsiköissä puiden rungot aiheuttavat teoreettisesti voimakasta vaimennusta tietyillä taajuusalueilla ja toisaalta päästävät läpi ääntä tietyillä taajuusalueilla.*

## 2.3. Puusto- ja metsävyöhykkeet melun vaimentajina

### 2.3.1. Metsän aikaan saaman vaimentumisen mittauksia

Metsien vaimennusta koskevat tutkimusartikkelien kirjo on laaja. Artikkeleissa mitatuista vaimennuksista käytetään yleensä nimitystä lisävaimennus (excess attenuation), jolla tarkoitetaan vaimennusta, jota havaitaan äänen geometrisen vaimennuksen ja ilman absorptioon aiheuttaman vaimentumisen lisäksi. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että tässä lisävaimennuksessa on mukana useimmissa tapauksissa myös maanpinnan



8.9.2021

aiheuttaman vaimennuksen osuutta. Mitä lähempänä maan pintaa mittaus tehdään sitä suurempi maan pinnan vaimentava vaikutus lisävaimennuksessa.

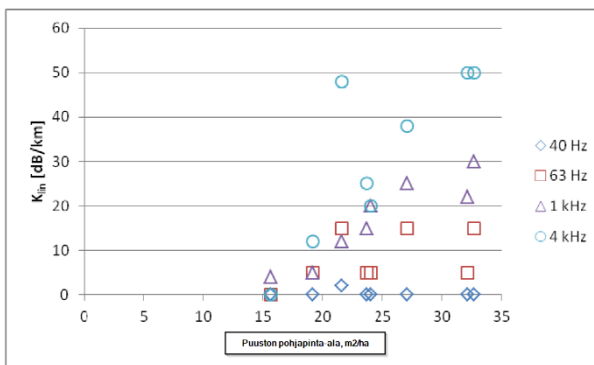
Tutkimusten tulosten vartailukelpoisuutta heikentää lisäksi se, että tutkimuksissa ei välttämättä arvioitu puuston tiheyttä kuvaavia tunnuslukuja tai käytetyt arviointi menetelmät eivät ole yhden mukaisia. Artikkeleista puuttua myös tietoja mittauksissa käytettyjen äänilähteiden taajuusjakaumista.

Herrington ja Brock (1977) mittasivat äänen etenemistä kuusi- ja mäntymetsässä eri korkeuksilla. Mittausten tuloksena he totesivat, että suurimmat vaimennukset todettiin noin 1,5 metrin korkeudella maan pinnasta tehdyistä mittauksista. Metsän aikaan saama lisävaimennus oli sitä vähäisempää, mitä korkeammalta äänenpainetasoja mitattiin. Tutkimuksen tekijät päättelivät 1,5 m esiintyvän voimakkaamman vaimentumisen johtuvan maan pinnan absorptiosta.

Martens totesi koivu- ja saarnimetsissä tekemissään mittauksissa metsän vaimentavan vaikutuksen olevan 10 dB / 100 m mittauskorkeudella 1,2 m ja 5 dB / 100 m mittauskorkeuden ollessa 3,9 m (Martens 1981). Kuusimetsässä mitattiin lähes vastaavat vaimennukset; 10 dB /100 m korkeudelta 1,2 m ja 7 dB /100 m korkeudelta 3,9 m.

Samara ja Tsitsoni (2010) tutkivat mäntymetsävyöhykkeen vaikutuksia melutasoihin. Vertailukohtana käytettiin avointa ruohikkoaluetta. Mäntymetsässä (*Pinus Brutia*) tieliikenteen aiheuttaman melun vaimentuminen oli noin 6 dB suurempaa kuin avoimella ruohikkoalueella. Mittaukset tehtiin 60 metrin etäisyydellä vilkkaasti liikennöidystä kehätiestä. Selvityksessä melutasoa määritettiin vain A-taajuuspainotettuna kokonaistasona ( $L_{Aeq}$ ) eikä tulosten analysoinnissa eroteltu maaperän vaikutuksia melun vaimentumiseen. Tutkimuksessa ei ole myöskään tietoa puuston tiheydestä.

Trimpop ja Mann (2014) mittasivat puuston aikaan saamaa äänen vaimennusta kahdessa mäntymetsässä ja yhdessä tammimetsässä. Mittauksia tehtiin 5 metrin korkeudelta, joten maaperän vaimennuksen osuus tuloksissa on todennäköisesti vähäinen. Tutkimuskohteiden puustoa harvennettiin mittausten välillä, jotta tuloksista voitaisiin selvittää puuston tiheyden vaikutusta äänen vaimentumiseen. Neljännen harvennuksen jälkeen mitattavien metsäalueiden puuston tiheys oli puolta pienempi kuin lähtötilanteessa. Mittausten tulokset osoittivat selkeästi, että puuston harventaminen vähensi lähes lineaarisesti metsän aikaan saamaa vaimennusta 4 kHz ja 1 kHz terssikaistoilla (kuva 3). Tuloksista voi myös päätellä, että tiheydeltään alle 15 m<sup>2</sup>/ha metsällä ei ollut ääntä vaimentavaa vaikutusta.



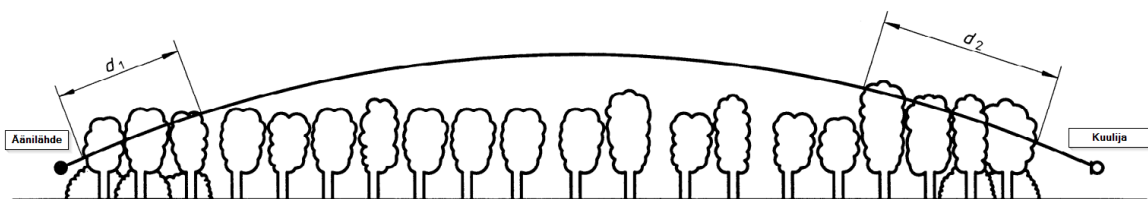
Kuva 3. Puuston tiheyden vaikutus metsälle mitattuun äänen vaimentumiseen. Kuva julkaisusta Trimpop ja Mann 2014.

Trimpopin ja Mannin (2014) tutkimuksessa todettiin myös, että mäntymetsässä matalien taajuuksien vaimentuminen (40 Hz ja 63 Hz) oli suurempaa vanhassa metsässä, jonka rungot olivat paksumpia. Yhdelle metsäkohteelle mitattiin poikkeuksellisen suuria vaimennusarvo 4 kHz taajuusalueella. Tämän poikkeavan havainnon syyksi arvioitiin lähelle maan pintaa ulottuvaa oksistoa.

Haug (2018) mittasi Oslossa metrojunien ja raitiovaunujen aiheuttaman melun vaimentumista talviolosuhteissa. Mittaukset tehtiin 6 – 30 m etäisyydellä lähimmästä raiteesta. Tutkimuksen lopputuloksena Haug arvioi, että 20 m leveän metsäkaistaleen vaimennus taajuusalueella 1 – 20 kHz metron aiheuttamalle melulle oli 0,12 dB / m. Kapean metsäkaistaleen aikaan saama vaimennus raitiovaunuliikenteen melulle arvioitiin merkityksettömän vähäiseksi.

Björk ja Toivonen (2013) arvioivat suomalaisen kuusivaltaisen sekametsän metsän vaimentumisen olevan vähäisempää kuin standardin ISO 9613-2 mukainen vaimentuminen. Tämän arvioitiin johtuvan siitä, että selvityksessä tarkasteltujen metsien tiheys oli pienempi kuin Keski-Euroopassa. Björkin ja Toivosen tutkimuksessa ei ole vertailukelpoista tietoa mitattujen metsien tiheydestä. Toisaalta myös standardissa ISO 9613-2 mainitaan, että vaimennukset pätevät tiheälle metsälle ja jätetään määrittelemättä tiheä metsä.

ISO 9613-2 standardissa kuvataan laskennallinen menettely melun leviämisen arviointiin ja standardin liitteessä A on esitetty menetelmä kasvillisuuden vaikutuksen arviointiin. Standardissa todetaan, että siinä esitetyt vaimennuksien oletetaan tapahtuvat tiheissä kasvillisuusvyöhykkeissä. Kasvillisuuden ääntä vaimentavien vaikutusten arvioinnissa otetaan huomioon äänilähteen ja vastaanottopisteen välinen etäisyys ja niiden korkeusasemat sekä kasvillisuusvyöhykkeen leveys ja korkeus. Tarkastelussa kaareutuvan äänen säteeksi oletetaan 5 km. Kasvillisuusvyöhykkeen vaikutus rajoittuu tarkastelussa siihen äänen etenemistien osuuteen, joka sijoittuu kasvillisuusvyöhykkeen sisään (kuva 4).



Kuva 4. ISO 9613-2 standardin mukaisessa arvioinnissa käytettävä menettely puuston aiheuttaman äänen vaimentumisen arvioinnissa. Kasvillisuusvyöhykkeen vaimentava osuus rajoittuu osuuksien  $d_1$  ja  $d_2$  yhteenlaskettuun pituuteen ( $d_f$ ).

Kasvillisuusvyöhykkeen vaimennus annetaan standardissa oktaavikaistoittain erikseen 10 – 20 m etenemälle sekä pidemmälle (> 20 m) kasvillisuudessa tapahtuvalle etenemiselle (taulukko 1). Standardin mukaan yli 200 metrin etäisyyksille voidaan käyttää etenemispituudelle 20 – 200 esitettyjä vaimennusarvoja.

8.9.2021

Taulukko 1. Standardin ISO 9613-2 mukaiset kasvillisuuden vaimennusarvot oktaavikaistoittain laskennallisessa arvioinnissa.

Etenemisen pituus ( $d_f$ ), m	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
$10 \leq d_f \leq 20$	0 dB	0 dB	1 dB	1 dB	1 dB	1 dB	2 dB	3 dB
$20 < d_f \leq 200$	0,02 dB/m	0,03 dB/m	0,04 dB/m	0,05 dB/m	0,06 dB/m	0,08 dB/m	0,09 dB/m	0,12 dB/m

### **Johtopäätöksiä:**

*Tutkimustulokset metsien ääntä vaimentavasta ominaisuuksista ja vaimennuksen suuruudesta vaihtelevat suuresti. Tähän katsaukseen kirjatusta tutkimuksesta metsävyöhykkeille arvioidut vaimennukset vaihtelevat välillä 0,012 dB/m ... 0,12 dB/m. Tässä vertailussa ei ole mukana Trimpopin ja Mannin mittaustuloksia 63 Hz terssikaistalla. Tutkimuksissa esitetyt vaimennukset ovat suuruusluokaltaan samaa tasoa kuin standardin ISO 9613-2 mukaiset vaimennusarvot.*

*Metsälle esitetyt vaimennusarvot kuulostavat vähäisiltä, mutta metsävyöhykkeen leveydestä riippuen niillä saattaa olla merkittävä vaikutus melun vaimentumisen kannalta. Metsän aikaan saama vaimentuminen edellyttää, että metsä on tiheä. Metsän tiheyttä ei määritellä ISO 9613-2 standardissa eikä useimmissa tutkimusjulkaisuissa.*

### 2.3.2. Esimerkkitarkastelu metsän vaimentavasta vaikutuksesta ISO 9613-2 laskentamallin mukaisella tarkastelulla

Tässä tarkastelussa esitetään kaksi esimerkkiä metsävyöhykkeen vaimentavista vaikutuksista kaupunkiympäristössä. Kohteet on valittu Kuopion keskustan läheisyydessä valtatie 5 liikennemelualueelle sijaitsevilta, Rahusenkaan ja Peipposenrinteen alueelta (alue 1) sekä Niiralan Huuhanmäen alueelta (alue 2). Nämä kohteet sijaitsevat valtatie 5 liikenteen aiheuttaman melun vaikutusalueella ja molemmissa kohteissa on ilmakuvien perusteella suhteellisen laajoja metsävyöhykkeitä.

Melutarkastelu on tehty Cadna A 2017 laskentamalliohjelmiston ISO 9613-2 mukaisella laskentamallilla. Laskenta on tehty kuvassa 3 ja taulukossa 1 esitetyllä menettelyllä ja vaimennusarvoilla. Melutarkastelu on tehty kolmelle puuston korkeudelle; 20 m, 10 m ja 5 m.

Rahusenkaan ja Peipposenrinteen alueiden (alue 1) tarkastelussa valtatie 5 ja asuinalueiden välisen metsävyöhykkeen leveydet vaihtelevat välillä 30 m ... 200 m. Laskennallisen tarkastelun perusteella 20 metriä korkealla tiiviillä puustolla saavutetaan asuinalueiden julkisivuilla suurimmillaan noin 10 dB vaimennus verrattuna tilanteeseen, jossa puustoa ei ole. Puuston aikaan saama vaimennus pienenee merkittävästi puuston madaltuessa, 5 metriä korkealla puustovyöhykkeellä saavutetaan suurimmillaan 3 dB vaimennus lähimpien asuinrakennusten edustalla (liite 1, sivut 1 ja 2).

Toinen tarkastelu on tehty Niiralan Huuhanmäen kohteeseen, jossa valtatie 5 liikenteen melulle altistuvat asuinrakennukset sijaitsevat Huuhanmäen laella valtatie itäpuolelle. Laskennallisessa tarkastelussa, jossa mukana ei ole metsävyöhykettä Huuhanmäen länsirinteellä asuinrakennusten piha-alueille kohdistuu suurimmillaan vähän yli 60 dB päiväaikainen keskiäänitaso. Laskennallisen tarkastelun perusteella korkean (20 m) ja

tiheän puuston vaimentava vaikutus ulottuu Kehäkadun varrella sijaitsevien asuinrakennusten länsirinteen piha-alueille 9 – 10 dB tasoisena (liite 1, sivu 4). Kymmenen metriä korkealla puustolla vaimentava vaikutus on edelleen noin 4 – 6 dB (liite 4, sivu 4). Matalalla puustolla (korkeus 5 m) vaimentavat vaikutus asuinrakennusten piha-alueilla jää suurelta osin noin 1 – 2 dB tasolle, paikoitellen noin 4 dB tasolle (liite 4, sivu 4).

Niiralan Huuhanmäen kohteessa tarkasteltiin meluvyöhykkeen kaventamista ja sijoittumista suhteessa melulähteeseen ja melulle altistuviin kohteisiin. Laskennallisen tarkastelun perusteella esimerkkikohteessa noin 80 metriä leveällä korkealla (20 m) ja tiheällä puustovyöhykkeellä saavutettiin laskennallisesti 4 – 6 dB melutason vaimentuminen puustovyöhykkeen takana. Niiralan Huuhanmäellä melulta suojaava kapea metsävyöhyke toimi laskennallisen tarkastelun perusteella tehokkaammin sen sijaitessa mahdollisimman lähellä melulle altistuvia kohteita (liite 4, sivu 5).

Tuloksia tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon, että puuston vaimentava vaikutus riippuu myös melulähteen ja altistuvan kohteen välisestä korkeusasemasta. Melulähdettä korkeammalla ylärinteessä sijaitsevassa kohteessa metsävyöhyke leikkaa laskennallisessa tarkastelussa kaareutuvaa äänisädettä enemmän kuin matalalla notkossa sijaitseva metsävyöhyke.

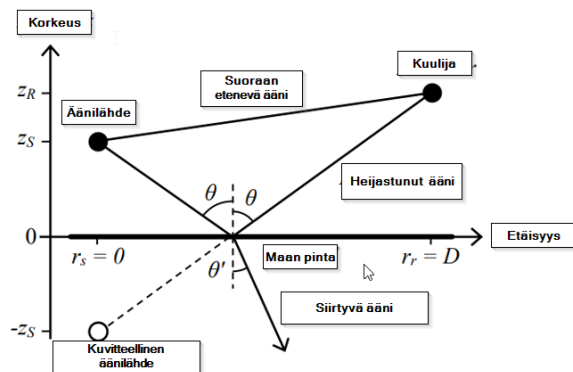
### **Johtopäätöksiä:**

*ISO 9613-2 standardiin mukaisen laskennallisen tarkastelun perusteella metsävyöhykkeillä voi olla merkittäviä vaikutuksia melulle altistuvan kohteen melutasoihin, mikäli melulähteen ja altistuvan kohteen väliin jäävä metsävyöhyke on riittävän leveä. Laskennallisen tarkastelun perusteella tiheällä ja korkealla 80 metriä leveällä metsävyöhykkeellä voidaan saavuttaa merkittävää melun vaimentumista.*

## 2.4. Maan pinnan ominaisuuksien vaikutus äänen etenemiseen

### 2.4.1. Vaakapinnan ominaisuuksien vaikutus äänen etenemiseen

Maanpinnan yläpuolella sijaitsevan äänilähteen aiheuttamat ääniaallot etenevät tarkastelupistettä (kuulija) kohti suoraan ilman kautta etenevänä äänenä sekä maanpinnan kautta heijastuva äänenä (kuva 4).



Kuva 4. Havainnekuva äänen etenemisessä ja maanpinna heijastuksesta. Maanpintaa absorboituvan energian määrä riippuu maanpinnan heijastustekijästä sekä ääniaallon ja maanpinnan kohtaamiskulmasta (kuva lähteestä Gronberg A. 2015).

8.9.2021

Vaakapintojen ominaisuuksilla (maan pinta, vesistön pinta, rakennetun ympäristön pinta) on suuri merkitys äänen ja melun etenemiseen. Akustiikan kannalta maan pinta voidaan luokitella absorptio suhteen vastaavalla tavalla kuin muutkin ääniaallon kohtaamat pinnat. Pinnan absorptioarvo 1 edustaa tilannetta, jossa äänienergia absorboituu täydellisesti pintaan johon ääniaalto törmää. Vastaavasti absorptioarvo 0 tarkoittaa pintaa, joka on täysin heijastava eli äänienergian absorptiota ei tapahdu lainkaan. Akustisesti kovana pintana voidaan pitää mm. vesipintoja, kovia kivi, asfaltti ja betonipintoja.

#### 2.4.2. Maaperän akustiset ominaisuudet

Maanpinnan absorboivat ominaisuudet riippuvat erityisesti maaperän huokoisuudesta eli käytännössä sen sisältämän ilman määrästä. Mitä huokoisempaa maan pinta on sitä suuremmaksi äänen absorptio muodostuu. Maanpinnan absorptiokykyä määritetään mittaamalla sen ilman virtaus vastusta (flow resistivity). Mitä pienempi maalajin / materiaalin virtausvastus on sitä suurempi on sen äänen absorptio.

Taulukko 2. Erialaisten maaperätyyppien virtausvastuksia. Mitä pienempi virtausvastus maaperällä / aineksella on sitä suurempi on sen äänen absorptio (Gronberg 2015).

Maaperä	Tehollinen virtaus vastus (kPa x s/m <sup>2</sup> )
Sekapuustoinen lehtipuumetsä, karikkekerros 0,01 – 0,05 m	30 ± 31
Märkä turve	24 ± 5
Koivumetsä, karikkekerros 0,04 – 0,08 m	22 ± 13
Mäntymetsä, karikerros 0,06 – 0,07 m	9 ± 5
Lumi (uusi)	4,73
Lumi (vanha)	16,4

Kasvillisuus vaikuttaa maaperän ominaisuuksiin lisäten maaperän huokoisuutta ja siten myös sen kykyä absorboida melua. Kasvillisuutta voidaan suunnitella siten, että se lisää myös maaperän absorptiokykyä. Kasvillisuuden vaikutukset äänen absorptioon riippuvat lehvästön pinta-alasta ja tiheydestä, maaperän huokoisuudesta, huokosten koosta sekä maaperän kosteudesta (Horoshenkov et al.2015). Maaperän osalta vaikuttavat tekijät ovat huokoisuus, huokosten koko ja vesisisältö, jotka vaikuttavat ilmavirtauksen vastukseen.

Horoshenkov et al (2015) tutkimuksessa huokoisen kevyen maa-aineksen (paksuus 70 mm) absorptiosuhde yli 400 Hz taajuusalueella vaihteli välillä 75 % - 100 %. Tämä vastaa lasivillalla aikaan saatavaa eristävyttä. Kasvillisuus huokoisen maa-aineksen päällä ei lisännyt tutkimuksen mukaan merkittävästi maakerroksen ja kasvillisuuden yhdessä aikaan saamaa äänen absorptiota. Tiivimmässä saviperäisessä maa-aineksessa maakerroksen absorptiosuhde olin suurimmillaan 30 % yli 400 Hz taajuusalueella. Kasvillisuuden lisääminen tiiviiseen maa-ainekseen lisäsi tutkimuksessa merkittävästi maakerroksen ja kasvillisuuden yhdessä aikaan saamaa äänen absorptiota. Eniten absorptiota lisäävät isolehtiset kasvit, pienilehtisten kasvien vaikutus äänen absorptioon on vähäinen.

8.9.2021

### Maa-aineksen vesisisällön vaikutus äänen absorptioon

Maaperän ylimmät kerrokset kostuvat ensimmäisenä ja normaalissa olosuhteissa absorptioon vaikuttavat muutokset tapahtuvat tässä kerroksessa.

Keinotekoisessa kasvualustassa maaperän huokoisuutta voidaan kasvattaa lisäämällä maa-ainekseen mm. perliittiä, huokoista vulkaanista lasia, kookoksen kuituja, hydrofiilistä polymeeriä. Keinotekoiset maa-ainekset ovat tiheydeltään kevyitä ja ne pystyvät pidättämään vettä kolme kertaa oman painonsa verran.

Maa-aineksen huokosominaisuus vaikuttaa myös äänen absorption taajuusjakaumaan. Tiivis pieniä huokosia sisältä maa-aineksissa veden lisääntyminen vähentää maa-aineksen absorptiota koko taajuusalueelta (100 – 1500 Hz) merkittävästi. Kevyessä keinotekoisessa maa-aineksessa vesipitoisuuden lisääntymisen vaikutus on monimutkaisempi prosessi ja vaikutus näyttäisi rajautuvan maa-aineksen ymlempään kerrokseen.

Maa-aineksen huokoisuuden vaikutusta äänen absorptioon voidaan tarkastella mallintamalla luotettavasti, mikäli maa-aineksen huokosten jakauma on tasainen koko maa-aineksen kerroksessa. Esimerkiksi savella vesipitoisuuden vaikutus maa-aineksen absorption kykyyn voidaan mallintaa luotettavasti. Pieniä huokosia sisältävä maa-aines toimii kapillaarisesti ja maa-ainekseen tuleva vesi jakaantuu tasaisesti koko maakerrokseen.

Maa-aineksen valinnalla ja muokkauksella voidaan vaikuttaa maanpinnan aikaansaamaan melun vaimentumisen ja sitä voidaan käyttää hyväksi myös liikennemelun vaimentajana (Attenborough et al. 2015a). Maan huokoisuuden lisäksi virtausvastus on merkittävä maan akustisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä. Maan huokoisuutta arvioidaan sen virtausvastuksen perusteella, joka ilmaisee maa-aineksen aikaan saamaa paine-eroa ilmavirtauksen läpäistessä maakerroksen.

Erilaisten ruohikkomaidenkin välillä on merkittäviä eroja virtausvastuksen sekä äänen absorption osalta (Attenborough et al. 2011). Laskennallisten tarkastelujen perusteella erilaisilla ruohomailla arvioitiin olevan yli 3 dB erot niiden aikaansaamassa vaimennuksessa 50 metrin tarkasteluetaisytydellä. Kovaan maanpintaan verrattuna erilaisilla ruohikkomailla arvioitiin saavutettavan 6 – 10 dB vaimennus 1,5 metrin korkeudella maan pinnan tasosta (Attenborough et. al 2015). Maa-aineksen tiivistymisen arvioitiin lisäävän maa-aineksen virtausvastusta ja samalla vähentävän sen absorptiokykyä.

Metsämaan virtausvastuksen arvioidaan olevan vähäinen sillä maanpinnan ylin kerros muodostuu maatumasta kasviainekisesta. Björkin ja Toivosen (2013) mukaan paksu osittain maatumaton karikekerros muodostaa huokoiseen kerroksen, jonka virtausvastus on alhainen. Tällöin metsämaan aikaan saama vaimennuksen oletetaan sijoittuvan alle 1 kHz taajuusalueelle. Björk ja Toivonen (2013) vertasivat kuusimetsässä tehtyjen mittausten perusteella määritettyjä metsävaimennuksia standardissa ISO 9613-2 (ISO 9613-2:) esitettyihin kasvillisuudelle annettuihin vaimennuksiin. He totesivat metsämaan aikaan saaman maavaimennuksen sijoittuvan 40 Hz – 500 Hz taajuusalueelle, mikä on matalammalla taajuusalueella kuin ISO 9613-2 standardin mukainen maavaimennus (200 Hz – 500 Hz taajuusalueella).

### Johtopäätökset:

- *Maa-aineksella voi olla erittäin korkea absorptiosuhde, joka voi olla vastaavaa tasoa kuin akustiikka materiaaleilla saavutettava absorptiosuhde.*
- *Maa-aineksen vesisisältö vaikuttaa merkittävästi tiiviin maa-aineksen aikaan saamaan äänen absorptioon koko taajuusalueella.*
- *Löyhässä maa-aineksen veden lisääntyminen vaikuttaa sen kykyyn absorboida korkeilla taajuuksilla esiintyvää ääntä.*
- *Maanpinnan absorptiota voidaan lisätä matalalla kasvillisuudella. Absorptio lisääntyy eniten iso lehtisillä kasveilla sekä kasveilla, joiden lehtien ja ääiaaltojen kohtaamikulmat ovat suuria.*

## 3. Kasvillisuuden vaikutus melun kokemiseen

### 3.1. Melun häiritsevyys ja kiusallisuus

Meluntorjunnan tavoitteena on vähentää melusta aiheutuvaa kiusaantuneisuutta ja häiritsevyyttä

Kiusallisuus määritellään jonkin ärsykkeen aiheuttamaksi kielteiseksi elämykselliseksi kokemukseksi (engl. annoyance). Monissa suomalaisissa julkaisuissa käsite häiritsevyys tarkoittaa tai kattaa myös merkityksen kiusallisuus. (Pesonen K. 2014). Melun häiritsevyys määritellään vaikutuksena erilaisiin toimintoihin ja edellytyksiin suoritua niistä. Eli häiritsevä melu vaikuttaa toimintaan, kuten puhutun äänen ymmärtämiseen tai henkilön keskittymiskykyyn ja keskittymistä edellyttävän toiminnan suorittamiseen.

Melun voimakkuus selittää kyselytutkimusten mukaan vain 20 ... 40 % kiusallisuuden voimakkuuden vaihtelusta eli muut seikat selittävät vaihtelusta melun voimakkuutta suuremman osuuden. Kiusallisuuden kokemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. koetut vaikutusmahdollisuudet, kielteiset asenteet melulähteeseen, huoli melun terveysvaikutuksista, huoli omaisuuden arvon alenemisesta, kielteiset odotuksen melukehityksestä (Pesonen 2014).

### 3.2. Melun taajuusjakauman muutoksen vaikutukset melun kokemiseen

Meluntorjunnan tehokkuutta arvioidaan tyypillisesti melun vaimentumisena, jota kuvataan A-taajuuspainotetun kokonaismelutason pienentymisenä. Useimmat meluntorjuntatoimet eivät pelkästään vaimenna kokonaismelutasoa vaan vaikuttavat myös muilla tavoin ääneen. Esimerkiksi meluesteet vaimentavat melun korkeita taajuuksia enemmän kuin matalia taajuuksia, jolloin kuultavan äänen taajuusjakauma muuttuu. Meluesteet vaikuttavat myös siihen, että yksittäisten melutapahtumien aiheuttama melutasojen vaihtelu pienenee. Edellä esitetyt muutokset saattavat vähentää melusta aiheutuvaa kiusallisuuden kokemusta (Nilsson et al. 2015).

A-taajuuspainotetun kokonaistason käyttäminen melutason indikaattorina yliarvio melun vaimentumisesta koettavan muutoksen suuruutta. Melun vaimentumisen kokemukseen vaikuttaa erityisesti melun matalien taajuuksien vaimentuminen, mitä A-taajuuspainotettu kokonaistaso aliarvio.

Raitiovaunun melun häiritsevyyttä arvioitiin 4 m ja 7 m etäisyydellä raitiotielinjauksesta, joista toinen oli asfalttipintainen ja toinen nurmipintainen. Lähellä raitiolinjausta (4 m etäisyys) raitiovaunujen aiheuttamassa melussa ei todettu merkittävää eroa, mutta 7 metrin etäisyydellä nurmiradalla mitatut raitiovaunujen ohitusten aiheuttamat melutasot olivat noin 3 dB pienemmät kuin asfalttipintaisella radalla. Raitiovaunujen aiheuttaman melun häiritsevyydessä todettiin suurempi ero nurmi- ja asfalttiradan välillä kuin A-taajuuspainotetun kokonaismelutason perusteella olisi voinut arvioida. Kuulijoiden haastattelujen perusteella tämä muutos kokemuksessa johtui korkeiden äänien vaimentumisesta nurmiradalla verrattuna asfalttirataan (Nilsson et al. 2015).

### 3.3. Halutut ja ei-halutut äänet äänimaisemassa

Äänimaisema sisältää haluttuja, ei haluttuja ja neutraaleja ääniä. Onnistunut meluntorjunta kasvattaa haluttujen ja ei-haluttujen äänien suhdetta. Tämä muutos ei aiheudu pelkästään melutason pienentymisestä vaan myös siitä, että halutut äänet tulevat kuultaviksi. Haluttujen ja ei-haluttujen äänien suhteiden vaikutuksia tarkasteltaessa on syytä ottaa huomioon seuraavat tekijät:

- Vain kuultavat ja havaitut äänet voivat aiheuttaa kiusaantumista ja hyvinvointia.
- Havaittava melutapahtuma aiheuttaa huomion kiinnittymisen ääneen. Tämä tapahtuu tilanteessa, jossa melutapahtuman aiheuttama äänenpainetaso ylittää taustäänitason tai tilanteessa, jossa taustäänitaso pienenee tai kuulija haluaa keskittyä äänen kuunteluun yms.

Teoriassa äänimaisemaa voidaan parantaa lisäämällä siihen haluttuja ääniä. Tällöin halutut äänet voivat peittää ei-haluttuja ääniä sekä kääntää huomion pois ei-halutuista äänistä. Tämä muutoksen aikaan saaminen ei kuitenkaan ole helppoa, koska

- Ei-haluttujen äänien taajuussisältö sisältää yleensä enemmän matalataajuisia ääntä, joka peittää energeettisesti halutut korkeammalla taajuudella esiintyvät äänet.
- Peittoäänien ja ei-halutun äänen äänitasojen vaihtelu saattaa vähentää peittoäänien vaikutusta. Peittoäänellä voidaan peittää ei-haluttu ääniä vain ajoittain.
- Äänilähteiden (peittoääni ja ei-haluttu ääni) sijoittuminen eri suuntiin kuulijaan nähden saattaa jopa voimistaa ei-halutun äänen kuuluvuutta. Tämän vuoksi peittoääni tulisi sijoittaa samaan suuntaan kuin ei-haluttu ääni.

Haluttujen äänien vaikutus voi olla merkittävä, vaikka halutut äänet eivät peittäisikään ei-haluttuja ääniä energiatasolla. Hetkelliset, ei-halutuista äänistä erottuvat haluttujen äänien meluhuiput, kiinnittävät huomioon haluttuisiin ääniin, jolloin äänienergiaaltaan dominoiva ei-haluttu ääni jää kuulijan mielessä taka-alalle.

Ei haluttujen äänin peittäminen halutuilla äänillä on vaikeaa, useimmissa tapauksissa ei toivotut äänet pilaavat ääniympäristöä enemmän kuin toivotut äänet pystyvät sitä parantamaan. Tällöin toimenpiteet on syytä ensin tehdä ei toivottujen äänien vaimentamiseksi.

### 3.4. Audio-visuaaliset kytkennät

Visuaalisten muutokset vaikuttavat äänen kokemiseen jossain määrin, mutta silmien sulkeminen ei kuitenkaan muuta äänellistä kokemusta tilasta. Esteettiset tekijät ovat



8.9.2021

erityisen tärkeitä ulkotuloissa. Runsaasti vihreää kasvillisuutta yhdistetään hiljaisiin äänitasoihin. Meluntorjuntaratkaisut, jotka lisäävät kasvillisuuden tuomaan vihreyttä korostavat kokemus hiljaisemmasta ja rauhallisemmasta ympäristöstä.

Visuaaliset ärsykkeet vaikuttavat merkittävästi kokemuksiin äänistä. Tutkimuksissa on todettu että näkymä rakennettuihin alueisiin tai näkymässä oleviin tuulivoimaloihin pahentaa melusta koettua häiritsevyyttä (Ren and Kang 2015, Pedersen and Larsman 2008). Useissa tutkimuksissa näkymässä olevan kasvillisuuden on todettu vähentävän koetun melun häiritsevyyttä (Kastka and Noak 1987, Gidlöf-Gunnarsson and Öhrström 2007, Li et al. 2010, Ulrich et al. 1991).

Kyselytutkimuksen mukaan katutilan visuaalista kokemusta voidaan parantaa tuomalla vihreää kasvillisuutta, puita ja pensaita. Vesiaiheiden lisäämisellä ei saavutettu yhtä suurta visuaalista kokemusta parantavaa vaikutusta kuin vihreän kasvillisuuden lisäyksellä. Koetilanteessa lintujen äänten todettiin parantavan kokemusta kaupunkitilasta verrattuna vesiaiheisiin ääniin. Vesiaiheisten äänien arvioitiin jopa huonontavan testaajien kokemusta ääniympäristöstä (Hong & Jeon. 2013a:).

Toisessa vastaavassa kokeellisessa laboratoriossa tehdyssä tutkimuksessa (Hong & Jeon 2013b) koehenkilöt kokivat vihreällä kasvillisuudella peitetyjen melusteiden toimivan akustisesti paremmin kuin ilman kasvillisuutta olleiden melusteiden. Kasvillisuuden peittämät melusteet arvioitiin myös audio-visuaalisessa kokonaisarvioinnissa suositummaksi vaihtoehdoksi kuin paljaat melusterakenteet ilman kasvillisuutta.

Haapakankaan et al. (Haapakangas et al. 2020) kokeellisessa tutkimuksessa selvitettiin audio-visuaalista kytkentää melutason ja äänilähteen visuaalisen peittämisen välillä. Koetilanteessa melua aiheuttava teollisuuslaitos peitettiin näkymästä kasvillisuudella (0 %, 30 %, 60 % ja 90 % peittävyys) ja toistettiin teollisuuslaitoksen toimintojen aiheuttamaa melua videllä eri keskiääntiasolla. Koehenkilöiltä tiedusteltiin maiseman miellyttävyyttä ja melun häiritsevyyttä 11 portaisella asteikolla. Tutkimuksen lopputuloksena todettiin, että äänilähteen peittäminen ei vaikuttanut melun aiheuttamaan koettuun kiusallisuuteen. Sen sijaan melutasot kytkeytyivät kokemukseen maiseman miellyttävyydestä, kokemus maiseman miellyttävyydestä väheni äänitason kasvaessa.

Watt et al. (2009) päätyivät edellisen kappaleen esimerkkiin verrattuna toisenlaiseen tuloksen tutkimuksessaan. Tutkimuksessa toistettiin testitilanteessa liikenteen melua näkymissä, joissa melun aiheuttaja oli osittain peitettynä. Tulosten perusteella melu koettiin sitä äänekkäämmäksi, mitä enemmän melulähde oli näkyvissä. Tutkimuksessa kasvillisuuden näkymän peittäjänä ei todettu kuitenkaan vähentävän meluherkkyyttä.

Audio-visuaalinen kytkentä liittyy myös hiljaisuuden kokemiseen, jossa kasvillisuudella on merkittävä vaikutus. Watts (2017) on tutkimuksissaan selvittänyt rauhallisuuden / hiljaisuuden (engl. tranquility) kokemiseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksissa selvitetty vihreän kasvillisuuden vaikutuksia ympäristön rauhoittaviin, hyvinvointia edistäviin ja parantaviin ominaisuuksiin. Selvityksen pohjalta on muodostettu arviointimenetelmä (TRAPT, rauhoittavan ympäristön arviointi työkalu), jota on käytetty mm. kaupunkipuistojen ja aukioiden, maaseutupuistojen ja nummien rauhallisuuden arvioinnissa.

TRAPT- menetelmässä potentiaalisia hiljaisia / rauhallisia paikkoja arvioidaan kvantitatiivisesti asteikolla 0 – 10. Hiljaisuutta kuvaava tunnusluku muodostetaan kohteessa vallitsevan melutason ja kohteen visuaalisen näkymän sisältämän luonnonelementtien perusteella. Nämä tekijät ovat hiljaisuuden kokemisen kannalta yhtä

8.9.2021

merkittäviä (Pheasant et al. 2015). Tutkimuksessa osoitetaan selkeä yhteys rauhallisuuden kokemuksen ja melutason sekä rauhallisuuden kokemuksen ja näkymän sisältämän kasvillisuuden määrän välillä. Ongelman asettelu tutkimuksessa oli seuraava: miten melutaso vaikuttaa rauhallisuuden kokemukseen, miten vihreän kasvillisuuden osuus näkymässä vaikuttaa rauhallisuuden kokemukseen. Tutkimuksessa ei ole arvioitu miten kasvillisuus vaikuttaa kokemukseen melusta vaan miten näkyvä kasvillisuus vaikuttaa kokemukseen rauhallisesta ympäristöstä.

Kasvillisuuden peittovaikutus (melulähteen peittyminen näkymästä) ei selitä Van Renterghemin (2019b) mukaan tutkimuksissa todettuja havaintoja melun kokemisen muutoksista. Artikkelissa todetaan johtopäätöksenä, että näkyvällä kasvillisuudella itsellään on dominoiva vaikutus melun kokemiseen.

Renterghem (2019a) nostaa review-artikkelissaan esille kolme eri mekanismia kasvillisuuden vaikutuksille melun kokemiseen. 1) Kasvillisuus vaikuttaa äänilähteen näkymiseen ja vaikuttaa siten melun koettuun häiritsevyyteen. Tämä ilmiö on toimii Renterghemin mukaan korkeilla melun altistumistasoilla. 2) Pienemmillä melutasoilla kasvillisuuden aiheuttamat äänet saavat kuulijan huomion keskittymään luonnon aiheuttamiin ääniin, jolloin kokemus häiritsevystä melusta vähenee. 3) Näkyvän kasvillisuuden voimaannuttava vaikutus vähentää kuulijan kokemaa melun häiritsevyyttä, vaikka kasvillisuus ei peittäisikään melun aiheuttajaa.

Tutkimuksissa on arvioitu kokemuksen muutosta vastaa melutason muutosta. Van Renterghem et al. (2016) ja Leung et al. (2017) päätyivät tutkimuksissaan hyvin samansuuruisiin arvioihin kasvillisuutta sisältämän näkymän vaikutuksista melun häiritsevyyden kokemiseen. Näissä tutkimuksissa vihreän kasvillisuuden lisääminen näkymään vähensi melun häiritsevyyttä keskiäänitasona arvoituna 10 dB ... 11 dB (Renterghem 2019).

Leung et al. (2016) selvittivät kyselytutkimuksella ihmisten kokemuksia melusta. Kyselytutkimuksessa tehtiin asukkaille, joilla kodista avautuvat näkymät olivat erilaisia; joki, meri, kasvillisuus, meluseinä (kasvillisuuden peittämiä), katutila, rakennuksia. Haastateltujen henkilöiden asuntoihin kohdistuvia tieliikenteen aiheuttamia melutasoja arvioitiin laskennallisesti ja mittauksilla. Kyselyn tulokset analysoitiin multivariaattianalyysillä. Tulosten analyysissä asuntoon arvioidun melutasojen ja koetun häiritsevyyden välillä todettiin vain suuntaa-antava korrelaatio. Tutkimuksen lopputuloksena arvioitiin, että kasvillisuus asunnosta avautuvassa näkymässä vähentää melun häiritsevyyden kokemusta enemmän kuin vesiaiheinen näkymä (joki / meri). Meluseinät näkymässä lisäsivät melun häiritsevyyden kokemusta.

Luonnon elementtejä sisältävän näkymän vaikutus melun häiritsevyyden kokemiseen selitetään perustuvan näkymän aikaan saamaan korjaavaan voimaan, voimaannuttavaan vaikutukseen. Mitä suurempi ärsykkeen voimaannuttava vaikutus on sitä suurempi on sen kyky vähentää saman aikaista negatiivista kokemusta (Leung et al. 2016).

Useissa tutkimuksissa asuinympäristön vihreys ja esteettisesti laadukas asuinympäristö vähentää asukkaiden kokemusta melun häiritsevyydestä. Näissä tutkimuksissa on tulkittu, että miellyttävä visuaalinen ympäristö aikaan saa tämän voimaannuttavan melun häiritsevyyttä vähentävän reaktion. Näissä tutkimuksissa ei ole kuitenkaan selvitetty asuinympäristön muiden tekijöiden vaikutusta meluhäiriöiden sietokyvyn paranemiseen. Visuaalisesti vihreä asuin ympäristö tarjoaa todennäköisesti myös rauhallisen paikan, johon voi paeta melua ja kaupungin kiihkeää sykettä. Myös tämä voimaannuttava

8.9.2021

kokemus voi muokata kokemusta melusta (Gidlöf-Gunnarsson & Öhström 2010). Tutkimuksen johtopäätöksenä todetaan, että hiljaisen piha-alueen fyysiset ominaisuudet vaikuttavat ihmisten kokemukseen piha-alueen melun häiritsevyydestä. Laadukkaalla piha-alueella melu koetaan vähemmän häiritseväksi. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että melusta häiriintyvien osuus oli merkittävästi vähäisempi vastaajilla, joiden piha-alueet oli arvioitu fyysisesti laadukkaiksi. Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan, että laadukas visuaalisesti houkutteleva pihaympäristö, jossa on luonnon elementtejä, ohjaa melulle altistuvan asukkaan kohdistamaan huomionsa meluhäiriön aiheuttajan (liikenteen melu) sijaan pihaympäristön rauhallisuuteen ja positiiviseen tunnelmaan. Puhtaan visuaalisen vaikutuksen lisäksi piha-alueella tehtävät aktiviteetit vaikuttavat mahdollisesti vähentäen melun häiritsevyyden kokemusta.

Melun aiheuttama ulkoaktiviteeteihin kohdistuvat häiriöt olivat myös vähäisempiä fyysisesti laadukkaissa pihaympäristöissä. Laadukkaissa pihaympäristöissä kuului lintujen laulua, lasten ääniä ja ihmisten puhetta enemmän kuin heikkolaatuisissa pihossa.

### **Johtopäätökset:**

*Melun kokemisen kannalta A-taajuuspainotettu äänenpainetaso ei ole välttämättä hyvä äänen kuulemista ja kokemista kuvaava indikaattori. Tutkimusten mukaan melun kuuluvuus (engl. loudness) olisi parempi tunnusluku.*

*Kuulijan kokemukseen melusta vaikuttaa melun kokonaistason lisäksi sen taajuusjakauma. Vähemmän korkeita taajuuksia sisältävät äänet koetaan miellyttävämmäksi kuin korkeita ääniä sisältävä melu, vaikka melun kokonaistasot olisivat saman suuruiset.*

*Vihreän kasvillisuuden tuominen katutilaan ja melusteisiin parantaa tutkimusten mukaan audio-visuaalista kokemusta katutilasta. Melusteissä kasvillisuus lisää esteiden absorptiokykyä, jonka seurauksena saavutetaan todellista korkeiden äänen taajuuksien absorptiota. Meluesteen vihreys todennäköisesti myös parantaa tätä akustista kokemusta, sillä vihreä kasvillisuuden peittämä ympäristö mielletään rauhallisemmaksi ympäristöksi.*

*Näköhavainnot vaikuttavat siihen, miten melu koetaan. Melu koetaan häiritsevämmäksi tilanteessa, jossa melun aiheuttaja on myös kuulijalle näkyvässä. Hyvin yleisesti asukkaat kokevat melutilanteen huonontuneen liikenneväylien läheisyydessä tehtävien metsän hoidollisten toimenpiteiden seurauksena. Teoreettisesti tarkasteltuna puuston maltillisella harventamisella ja matalan aluspuuston ja -kasvillisuuden raivauksella ei ole useinkaan oleellista merkitystä melun kokonaistasoihin, mutta asukkaiden kokemukset tästä vaikutuksesta voivat olla hyvin erilaisia.*

*Näkemykset kasvillisuuden erilaisesta vaimennuksesta saattavat johtua kahdesta tekijästä:*

- *Kasvillisuus peittää osaltaan melua aiheuttavat lähteet (katu, rautatie, tuulivoimala). Kun melulähde ei ole näkyvässä sen aiheuttamaa melua ei koeta yhtä suureksi tilanteessa, jossa melulähde on saman aikaisesti kuultavissa ja nähtävissä.*
- *Kasvillisuus muuttaa kuultavan melun taajuusjakaumaan, vaikka melun kokonaistasossa ei tapahdu merkittävää muutosta puuston tai kasvillisuuden poistamisen seurauksena. Kasvillisuus absorboi erityisesti äänien korkeista taajuuksia. Korkeiden taajuuksien osuus kasvaa tilanteessa, jossa korkeita*

*taajuuksia absorboiva kasvillisuus on poistettu. Korkeiden äänten kuuleminen aiheuttaa kokemuksen melun terävyydestä ja melulähteen läheisestä sijainnista.*

- *Kasvillisuus aiheuttaa itsessään ääniä, jotka mielletään yleisesti miellyttäväiksi ääniksi. Kasvillisuuden äänet voivat osaltaan peittää haitalliseksi koettuja ääniä sekä toisaalta kiinnittää kuulijan huomion positiiviseen ääneen. Nämä molemmat tekijät vähentävät melun häiritsevyyden kokemusta.*
- *Kasvillisuus vaikuttaa merkittävästi ihmisen kokemukseen voimaannuttavasta ympäristöstä. Mitä suurempi ärsykkeen voimaannuttava vaikutus on sitä suurempi on sen kyky vähentää saman aikaista negatiivista kokemusta. Toisin sanoen voimaannuttava kokemus vähentää melusta koettavaa kiusaantuneisuutta.*
- *Melun kokemiseen vaikuttavat psykologiset tekijät tulisi ottaa huomioon meluntorjunnan ja asuinympäristöjen suunnittelussa sekä alueiden hoidossa.*

## 4. Yleiset johtopäätökset

Kasvillisuudella on ääntä vaimentavia ominaisuuksia, joita voidaan käyttää hyväksi maan käyttöä suunniteltaessa sekä suunniteltaessa melua vaimentavia ratkaisuja. Kasvillisuuden vaimentavat vaikutukset muodostuvat maan päällisten kasvien osien ja maaperän aikaan saamista vaimennuksista.

Kasvillisuusvyöhyke muodostaa monimutkaisen akustisen ympäristön, jossa äänen etenemiseen vaikuttavien tekijöiden joukko on moninainen. Kasvillisuusvyöhykkeen sisällä äänen etenemiseen vaikuttavat kasvualustan (maaperä) ominaisuudet, kasvillisuuden lehvästön tiheys ja lehtien asento suhteessa etenevään äänen, kasvien oksien ja runkojen paksuus ja puuvartisten kasvien tiheys. Nämä tekijät muodostavat ympäristön, jossa ääni edetessään absorboituu, heijastuu ja siroutuu. Näiden ilmiöiden seurauksena ääni myös vaimenee edetessään.

Suuressa mittakaavassa kasvillisuuden vaimentavan vaikutuksen suuruus riippuu kasvillisuusvyöhykkeen fyysisistä mitoista, laajuudesta ja korkeudesta. Pieni alaisella matalalla kasvillisuudella voidaan saavuttaa vain pienialaisia vaikutuksia, jotka voidaan havaita muutoksia äänen taajuusjakaumassa kasvillisuusvyöhykkeen läheisyydessä. Pienialaisen kasvillisuuden ääntä vaimentava vaikutus muodostuu suurelta osin kasvillisuuden vaatiman pehmeän kasvualustan vaikutuksesta.

ISO 9613-2 standardiin perustuvan laskennallisen tarkastelun perusteella kasvillisuuden vaikutus äänen vaimentamiseen on merkittävää, kun äänen etenemistiellä on leveä ja korkea kasvillisuusvyöhyke. Standardin mukaisten vaimennuskertoimien käytön perusteena on, että kasvillisuusvyöhyke on tiheä sisältäen paksurunkoista puustoa, jolloin vaimentamista tapahtuu myös alle 1000 Hz taajuusalueilla.

Monikerroksinen leveä metsävyöhyke, jossa on yhtenäinen varvusto- ja sammalpeite, tiheä aluspuusto sekä varttunutta paksurunkoista puustoa, muodostaa melua vaimentavan vyöhykkeen. Metsävyöhykkeelle arvioidut vaimennukset ovat desibelin kymmenes- tai sadasosan luokkaa metriä kohti. Vaimennuksista muodostuu merkittäviä (kokonaisvaimennus > 3 dB), kun metsävyöhykkeiden leveydet ovat noin 50 metriä tai sitä leveämpiä. Havaittavia muutoksia ääniympäristössä syntyy jo kapeammilla metsävyöhykkeillä.

Metsän ja kasvillisuuden vaikutuksia ympäristön melutasoihin ei yleensä oteta huomioon laskennallisissa meluselvityksissä. Tämä johtuu siitä, että meluselvityksiä tehtäessä ei voida olla varmoja tuleeko selvitysalueella sijaitseva puusto säilymään tulevaisuudessa. Toisaalta kyse on myös siitä, että maankäytön suunnittelussa käytettävät pohjoismaiset tie- ja raideliikennemelun sekä teollisuusmelun laskentamallit eivät sisällä puuston vaikutusta huomioon ottavia laskentamenetelmiä. Aiheeseen liittyvä tutkimustiedon hajanaisuus ja tutkimustulosten tulkintaan liittyvä epävarmuus eivät myöskään edistä kasvillisuuden huomioon ottamista laskennallisissa melutarkasteluissa.

Ääntä vaimentavien ominaisuuksien lisäksi kasvillisuus vaikuttaa äänen kokemiseen. Kasvillisuus tuottaa omalta osaltaan ääniä äänimaisemaan. Tietyissä olosuhteissa kasvillisuuden tuottamilla äänillä voi olla häiritsevää ääntä peittävä vaikutus. Kasvillisuuden äänet voivat toisaalta aiheuttaa kuulijassa myös huomion kiinnittymisen kasvillisuuden ääneen, jolloin saman aikaisesti esiintyvä häiritsevä melu jää kuulijan kokemuksessa taustalle.

Äänen kokemiseen vaikuttavat myös kuulijasta sekä kuunteluympäristöstä riippuvat tekijät. Kasvillisuus voi visuaalisesti peittää melulähteen kuulijan näkymästä, jolloin kokemus äänilähteen aiheuttaman melun häiritsevyydestä saattaa vähentyä. Kasvillisuuden peittämä näkymä vaikuttaa myös kuulijan kokemukseen ympäristön rauhallisuudesta ja hiljaisuudesta. Tämä kokemus osaltaan voi vähentää melusta koettavaa häiritsevyyttä.

Kasvillisuus vaikuttaa äänen etenemiseen ja melun kokemiseen useilla erilaisilla tavoilla, jotka vähentävät melusta koettua häiritsevyyttä. Kasvillisuus melun häiritsevyyttä vähentävänä tekijä tulisi ottaa huomioon maankäytön suunnittelussa, puisto- ja metsäalueiden hoidon suunnittelussa sekä meluntorjunnan suunnittelussa.

## 5. Kirjallisuusluettelo

Attenborough K., Li K.M. and Horoshnekov K. 2007: Propagation through trees and tall vegetation In Predicting Outdoor Sound, Taylor & Francis 2007, Oxon, 290 – 296.

Attenborough, K., I. Bashir, and S. Taherzadeh. 2011. Outdoor ground impedance models. The Journal of the Acoustical Society of America 129 (5): 2806–2819.

Attenborough K., Taherzadeh, S., Bashir I., Forssen J., Van der Aa B, Männel M. 2015: Porous ground, crops and buried resonators - Environmental Methods for Transport Noise Reduction, pp. 153 – 176.

Björk E. & Toivonen T 2013: Äänen vaimeneminen metsämaastossa; [https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/03\\_Bjork.pdf](https://www.akustinenseura.fi/wp-content/uploads/2013/08/03_Bjork.pdf)

Bucur V. 2005: Urban forset acoustics. – TecniAcustica, Terrassa, 2005.

Chobeau, P. 2014: Modeling of sound propagation in forests using the transmission line matrix method : study of multiple scattering and ground effects related to forests. Acoustics [physics.class-ph]. Universit'e du Maine, 2014. English. ; NNT : 2014LEMA1016 ;

Gidlöf-Gunnarsson, A., and Öhrström, E. (2007). "Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas," Landscape Urban Plann. 83, 115–126.

---

Gidlöf-Gunnarsson, A., & Öhström, E. 2010: Attractive "Quiet" Courtyards: A Potential Modifier of Urban Residents' Responses to Road Traffic Noise? - [Int J Environ Res Public Health](#). 2010 Sep; 7(9): 3359–3375.

Gronberg A. 2015: Sound propagation through Australian forrest land - Division of Machine Design, Department of Design Sciences, Faculty of Engineering LTH, Lund University, 2015.

Haapakangas A., Hongisto V. & Oliva D. 2020: Audio-visual interaction in perception of industrial plants – Effects of sound level and the degree of visual masking by vegetation – *Applied Acoustics*, vol 160, March 2020, 107121.

Haug, D. S. 2018: Forest Attenuation of Noise from Trams and Metros – A case study of the Oslo Tramways and metros. NTNU Norwegian University of Science and Technology.

Heimann, D. 2003: Numerical simulation of wind and sound propagation through an idealised stand of trees, *Acta Acustica*, vol. 89, pp. 779–788, 2003.

Herrington, L.P. & Brock, C. 1977: Propagation of Noise over and through a Forest Stand.

Hong, J. Y., and J. Y. Jeon. 2013a: Designing sound and visual components for enhancement of urban soundscapes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 134(3): 2026–2036.

Hong, J. Y., and J. Y. Jeon. 2013b. The effects of audio–visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance. *Landscape and Urban Planning* 125: 28–37.2013.

Horoshenkov K., Kahn A., Benkreira H., Mandon A. and Rohr R. 2015: Acoustic performance of vegetation and soil substratum in an urban context - *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*, pp. 47 – 78.

ISO 9613-2:1996 Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoor, Part 2: General method of calculation.

Kastka, J., and Noak, R. (1987). "On the interaction of sensory experience, causal attributive cognitions and visual context parameters in noise annoyance Environmental annoyance: Characterization, measurement, and control - Proceedings of the International AN," Ministry of Communications, Republic of China).

Kylliäinen, M. 2006: Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti. 137 s.

Leung T., Xu J., Chau C., Tang S., Pun-Cheng L. The effects of neighborhood views containing multiple environmental features on road traffic noise perception at dwellings. *J. Acoust. Soc. Am.* 141, 2399-2407 (2017).

Li, H. N., Chau, C. K., and Tang, S. K. (2010). "Can surrounding greenery reduce noise annoyance at home?," *Sci. Total Environ.* 408, 4376–4384.

Martens MJM (1981) Noise abatement in plant monocultures and plant communities. *Appl. Acoustics* 14:167 – 189

Nilsson M.E., Botteldooren D., Joen J.Y., Rådsten-Ekman M., De Coensel B., Hong Y.J., Maillard J. and Vincent B. 2015: Perceptual effects of noise mitigation - Environmental Methods for Transport Noise Reduction, pp. 195 – 220.

Pedersen, E., and Larsman, P. (2008). "The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines," J. Environ. Psychol. 28, 379–389.

Pesonen K. 2014: Ympäristömelun vaikutuksista sekä vaikutusten arvioinnista ja hallinnasta – Ympäristöministeriön raportteja 4 / 2014. [YMrä\\_4\\_2014.pdf \(helsinki.fi\)](#).

Pheasant, R.J., Horoshenkov, K.V. & Watts, G. 2015: Tranquillity rating prediction tool (TRAPT) – Acoustics Bulletin November 2010

Ren, X., and Kang, J. (2015). "Effects of the visual landscape factors of an ecological waterscape on acoustic comfort," Appl. Acoust. 96, 171–179.

Trimpop, M. & Mann, P. 2014: Determination of noise damping by forests -Internoise 2014, presentation 499.

Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., and Zelson, M. (1991). "Stress recovery during exposure to natural and urban environments," J. Environ. Psychol. 11, 201–230.

Van Renterghem, T, Botteldooren, D. and Verheyen, K. 2012: Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth," J. Sound Vib., vol. 331, pp. 2404–2425, 2012.

Van Renterghem T., Botteldooren J.K., Horoshenkov K. & Yang H-S 2015: Acoustical characteristics of trees, shrubs, and hedges. - Environmental Methods for Transport Noise Reduction, pp. 79 – 90.

Van Renterghem 2019a: Using vegetation to tackle environmental noise problem – combining exposure level reduction and noise perception improvement – Internoise 2019 June 16-19- Noise control for better environment.

Van Renterghem 2019b: Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise – Urban Forestry & Urban Greening – 40 133-144.

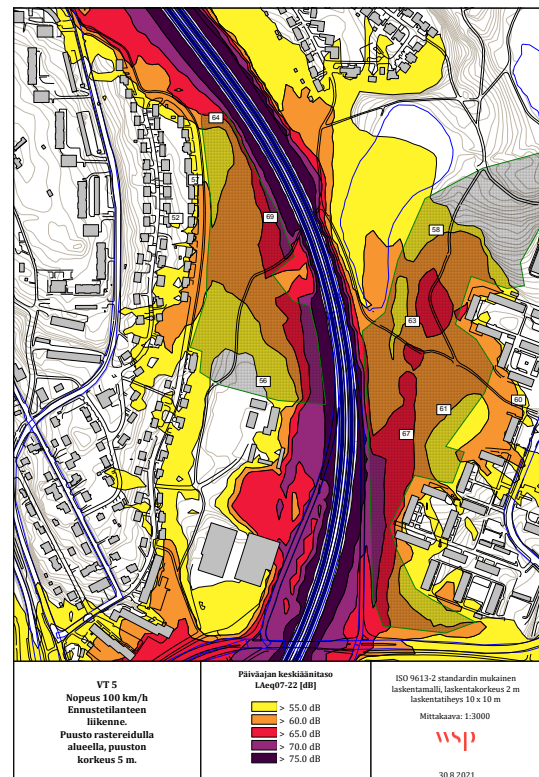
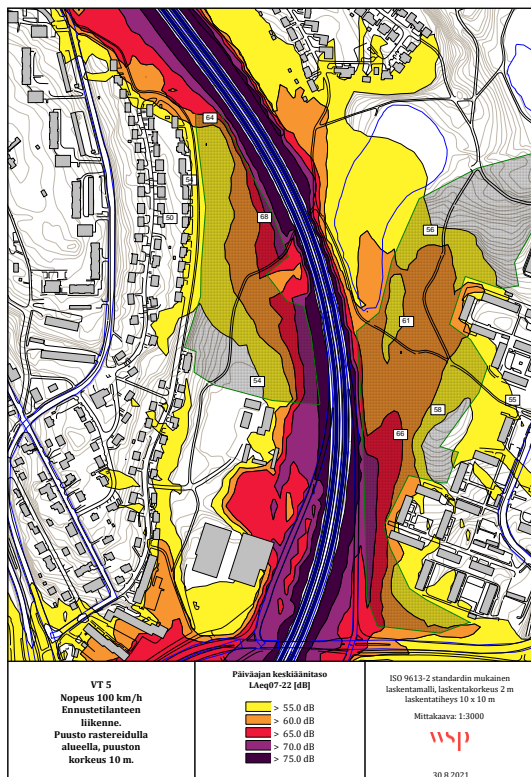
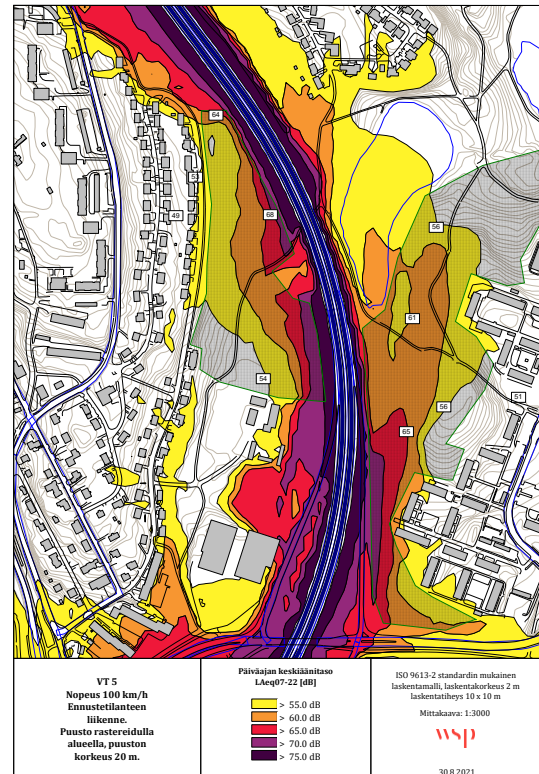
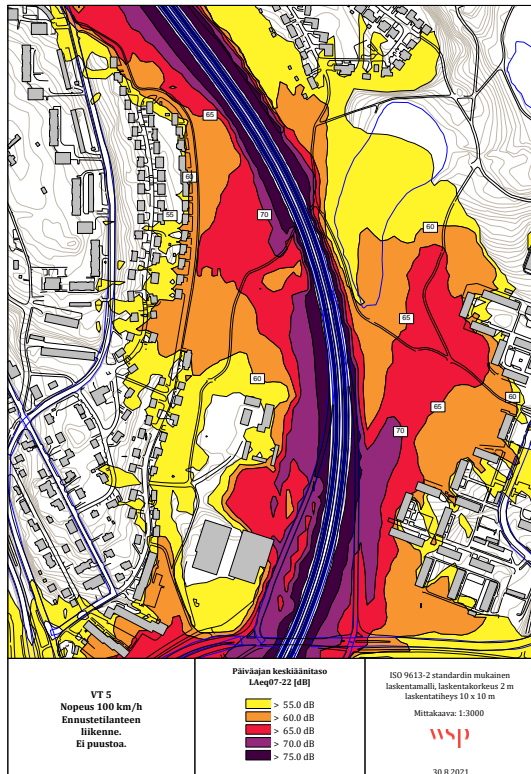
Van Renterghem, T. Botteldooren, D. 2016: View on outdoor vegetation reduces noise annoyance for dwellers near busy roads – Land. Urban Pland. 148, 203 – 215.

Watts, G., Chinn, L. & Godfrey, N. 1999: The effects of vegetation on the perception of traffic noise – Applied acoustics 56 (1999), 39-56.

Watts, G. 2017: The effects of "greening" urban areas on the perception of tranquility – Urban Forestry & Urban Greening, 26: 11-17.

Wunderli and Salomons 2009: A model to predict the sound reflection from forests. Acta Acustica United with Acustica 95(1): 76–85.

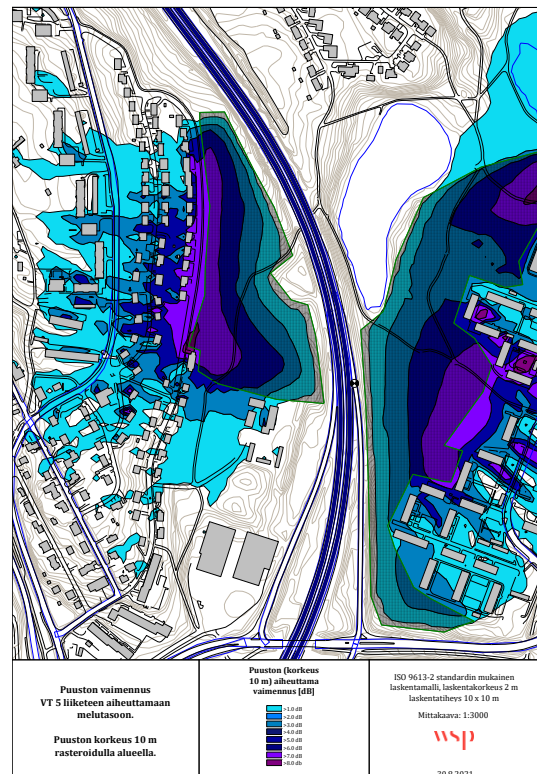
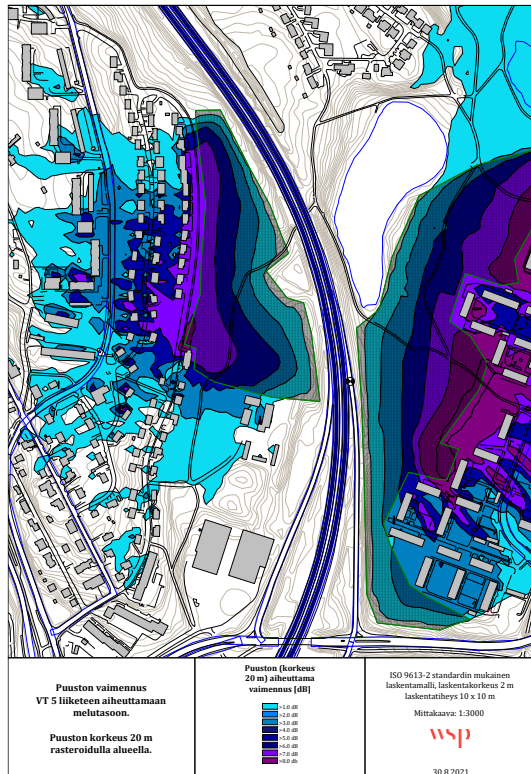
## Liite 1. Laskennalliset tarkastelut puuston vaimentavasta vaikutuksesta



Kuvat 1 – 4. Tieliikenteen aiheuttamat päiväaikaiset keskiäänitasot ( $L_{Aeq\ 7-22}$ ) ennustetilanteen liikennemäärillä Rahusenkankaan ja Peipposenrinteen alueilla: vas. yläkulma: ei puustoa, oikea yläkulma: 20 m korkea puusto, vas. alakulma: 10 m korkea puusto, oikea alakulma: 5 m korkea puusto.

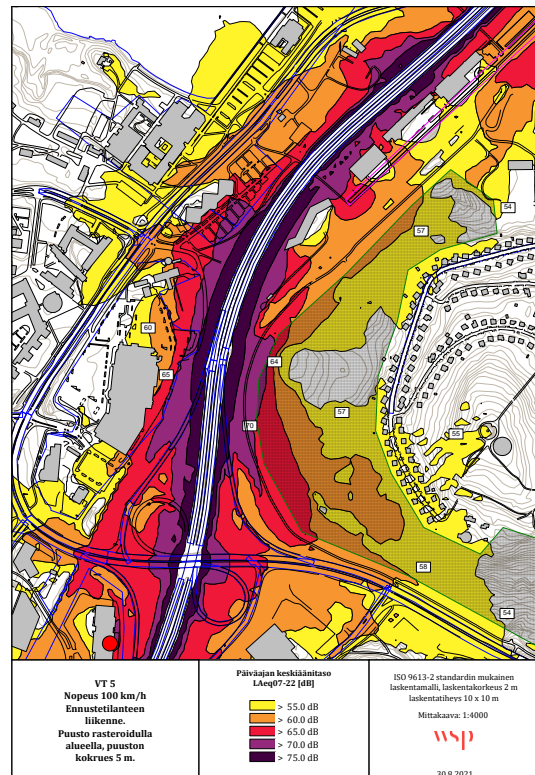
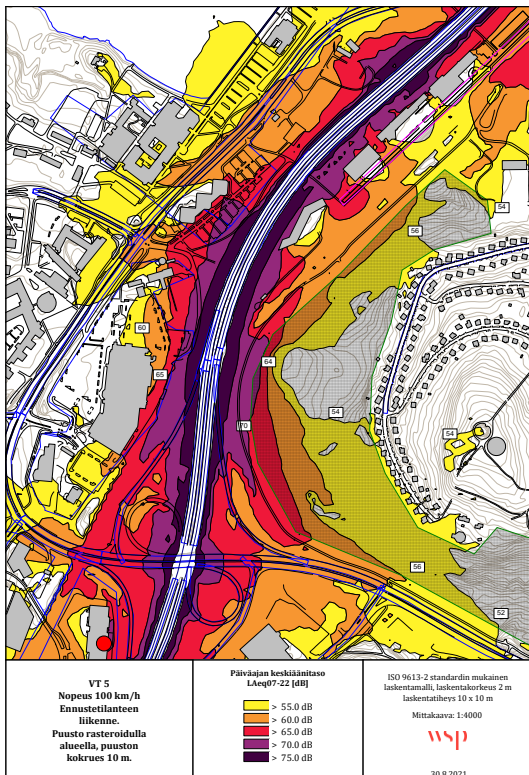
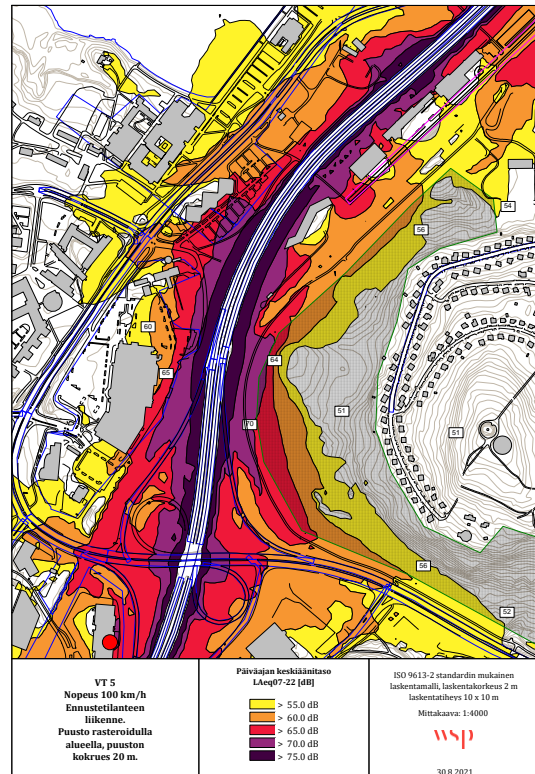
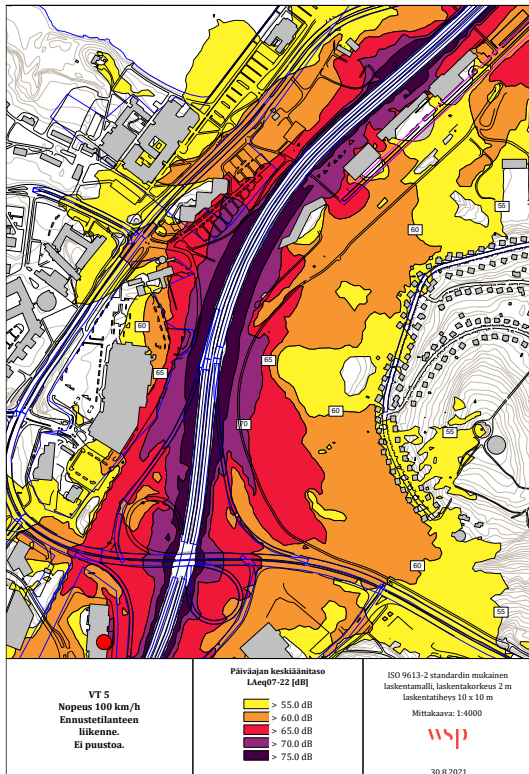


## Liite 1. Laskennalliset tarkastelut puuston vaimentavasta vaikutuksesta



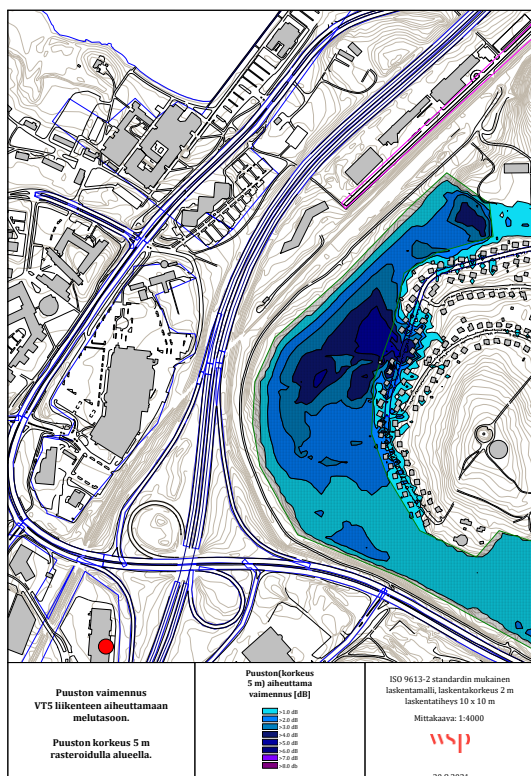
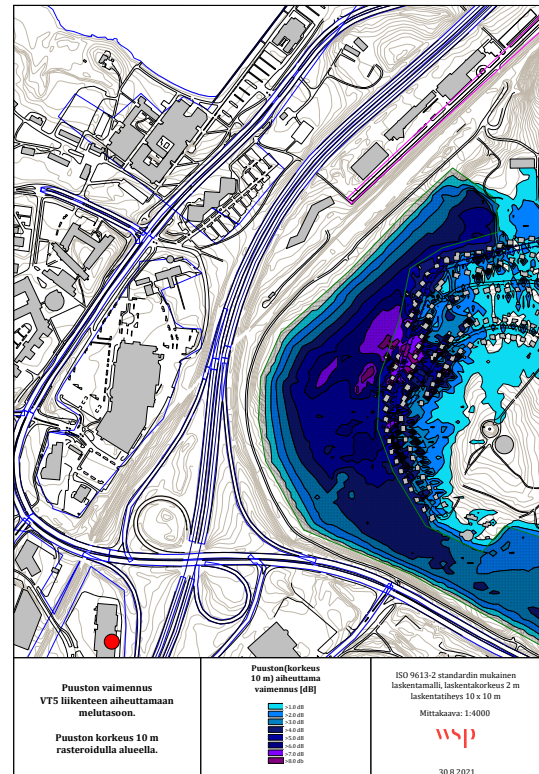
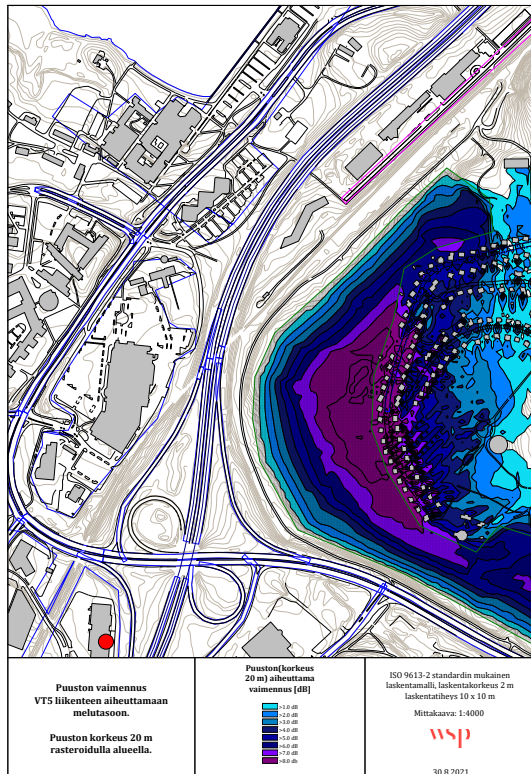
Kuvat 5 – 7. Puuston aikaan saamat vaimennukset tieliikenteen aiheuttamaan melutasoon Rahusenkaan ja Peipposenrinteen alueilla: vas. yläkulma: 20 m korkean puuston vaikutus, oikea yläkulma: 10 m korkean puusto vaikutus, vasen alakulma: 5 m korkean puuston vaikutus.

## Liite 1. Laskennalliset tarkastelut puuston vaimentavasta vaikutuksesta



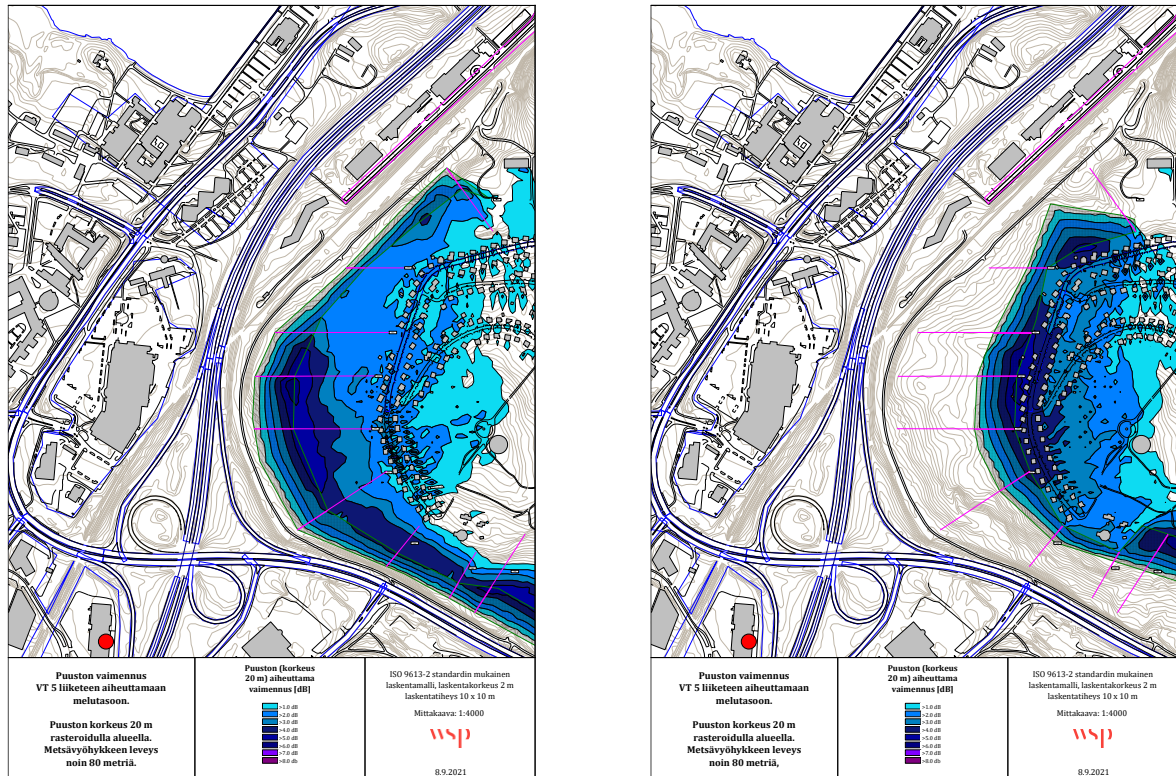
Kuvat 8 – 11. Tieliikenteen aiheuttamat päiväaikaiset keskiäänitasot ( $L_{Aeq\ 7-22}$ ) ennustetilanteen liikennemäärillä Niiralan Huuhanmäen alueella: vas. yläkulma: ei puustoa, oikea yläkulma: 20 m korkea puusto, vas.alakulma: 10 m korkea puusto, oikea alakulma: 5 m korkea puusto.

## Liite 1. Laskennalliset tarkastelut puuston vaimentavasta vaikutuksesta



Kuvat 12 – 14. Puuston aikaan saamat vaimennukset tieliikenteen aiheuttamaa melutasoon Niiralan Huuhanmäen alueella: vas. yläkulma: 20 m korkean puuston vaikutus, oikea yläkulma: 10 m korkean puusto vaikutus, vasen alakulma: 5 m korkean puuston vaikutus.

## Liite 1. Laskennalliset tarkastelut puuston vaimentavasta vaikutuksesta



Kuvat 15 ja 16. Puuston aikaan saamat vaimennukset tieliikenteen aiheuttamaa melutasoon Niiralan Huhhanmäen alueella: vasemman puoleinen kuva: 20 m korkean puuston, metsävyöhykkeen leveys 80 metriä, metsävyöhyke rinteän alaosassa. Oikea puoleinen kuva: 20 m korkean puuston, metsävyöhykkeen leveys 80 metriä, metsävyöhyke rinteän yläosassa.