Tampereen yliopisto

Pyry-Herkko Saarela

TOIMINNAN AIKAISEN MELUTASON VAIKUTUS PUHEENEROTETTAVUUTEEN AVOIMESSA OPPIMISYMPÄRISTÖSSÄ

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Pyry-Herkko Saarela: Toiminnan aikaisen melutason vaikutus puheenerotettavuuteen avoimessa oppimisympäristössä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2020

Avoimet oppimisympäristöt ovat yleistyneet uuden vuonna 2016 käyttöön otetun opetussuunnitelman myötä. Avoimien oppimisympäristöjen toimivuuden kannalta keskeinen ongelma on opetusryhmien välisen yksityisyyden vähäisyys sekä äänen vapaa leviäminen yhteisessä tilassa, sillä samassa tilassa työskentelee samanaikaisesti useita ryhmiä, joiden välillä ei ole varsinaista ääneneristystä. Oppimisen kannalta on tärkeää, että puhe on selkeää ja kuuluvaa kohderyhmän alueella, muttei muualla yhteistilassa.

Tässä työssä tutkitaan puheenerotettavuutta sekä äänen leviämistä eräässä avoimessa oppimisympäristössä. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka toiminnan aikainen melu ja peiteääni vaikuttavat puheenerotettavuuteen avoimessa oppimisympäristössä. Tutkimuksen aineisto perustuu A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n eräässä avoimessa oppimisympäristössä mittaamiin taustaäänitasoihin ja toiminnan aikaisiin melutasoihin sekä tilasta Odeon Auditorium –ohjelmalla tehtyyn huoneakustiseen tietokonemalliin, jolla tutkitaan puheenerotettavuutta neljällä eri taustaäänitasolla. Taustaäänitasoina käytetään kolmea toiminnan aikaisen melun kokonaisäänitasoa sekä A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä. Tuloksissa tarkastellaan, kuinka puheensiirtoindeksin tavoitearvot toteutuvat eri taustaäänitasoilla sekä avoimen oppimisympäristön toisistaan poikkeavilla alueilla.

Tulokset osoittavat, että avoimessa oppimisympäristössä on haastavaa saavuttaa samanaikaisesti oppimiselle suotuisia puheenerotettavuuden olosuhteita oppimisryhmäkohtaisesti ja oppimisryhmien välillä. Tällaiset olosuhteet voidaan kuitenkin saavuttaa, kun toiminnan aikaisen melutason keskiäänitaso on noin välillä 40–45 dB ja oppimisryhmät on erotettu toisistaan tilanjakajilla. Toisiinsa nähden avoimilla alueilla vierekkäiset oppimisryhmät häiritsevät lähes poikkeuksetta toisiaan, jolloin äänen leviämistä pitäisi pyrkiä rajoittamaan esimerkiksi liikuteltavilla seinäkkeillä. Tällöin avoimemmat tilat voisivat soveltua pari- ja pienryhmätyöskentelyyn. Yli 45 dB toiminnan aikaisella melutasolla puheenerotettavuuden olosuhteet ovat alueesta riippumatta huonot oppimistyölle.

Avainsanat: Avoin oppimisympäristö, toiminnan aikainen melu, puheenerotettavuus, puheensiirtoindeksi

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
    1.1 Avoimet oppimisympäristöt 1
    1.2 Ääniolosuhteita kuvaavat mittaluvut 3
    1.3 Tutkimuksen tavoite ja toteutus 4
2. AINEISTO JA MENETELMÄT 6
    2.1 Avoimessa oppimisympäristössä tehdyt mittaukset 6
    2.2 Huoneakustinen tietokonemallinnus 7
    2.3 Mallin muokkaaminen mittaustilanteen mukaiseksi 8
    2.4 Toiminnan aikaiset melutasot 14
    2.5 Peiteäänitaso 16
3. TULOKSET 18
    3.1 Puheensiirtoindeksi toiminnan aikaisen melun 50% fraktiililla 18
    3.2 Puheensiirtoindeksi toiminnan aikaisen melun 10% ja 90% fraktiililla 22
    3.3 Puheensiirtoindeksi peiteäänitasolla 26
4. TULOSTEN TARKASTELU 30
    4.1 Puheensiirtoindeksi linjoilla 1–4 31
    4.2 Puheensiirtoindeksi avoimessa oppimisympäristössä 37
    4.3 Epätarkkuustekijät 41
5. YHTEENVETO 42
LÄHTEET 45
LIITE 1: PUHEENSIIRTOINDEKSIN VÄRIKARTAT 47

1. JOHDANTO

1.1 Avoimet oppimisympäristöt

Avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteisiin liittyen ei ole tehty kovin laajaa tutkimusta Suomessa. Tarve oppimisympäristöjen akustiikkaan liittyvästä tutkimuksesta on kuitenkin kasvanut avointen oppimisympäristöjen yleistymisen myötä, kun uusi opetussuunnitelma (POPS 2014) otettiin käyttöön vuonna 2016. Suomessa kouluympäristöjen tilojen akustiseen suunnitteluun on pitkään käytetty standardin SFS 5907 (2004) ohjeellisia arvoja, mutta avoimille oppimisympäristöille on julkaistu vasta hiljattain suunnitteluohjeita (Kylliäinen & Hongisto 2019). Oppimisympäristön tulisi Perusopetuksen opetussuunnitelman mukaan tukea yksilön ja yhteisön kasvua, oppimista ja vuorovaikutusta. Täten oppimisympäristön on hyvä myös akustiikan osalta olla mahdollisimman hyvin oppimista tukeva.

Uudessa Perusopetuksen opetussuunnitelmassa painotetaan joustavaa ja monipuolista oppimisympäristöä, joka antaa mahdollisuuden luoviin ratkaisuihin ja asioiden tutkimiseen eri näkökulmista. Opetuksessa korostetaan vuorovaikusta ja yhteistyötä, joiden kehittyminen mahdollistetaan monipuolisilla työskentelytavoilla ja -ympäristöillä. (POPS 2014) Avoimen oppimisympäristön sanotaan tukevan monipuolisesti erilaisia opetustilanteissa sovellettavia aktiviteetteja ja opetustyylejä, joissa ryhmätyö ja sosiaalisten taitojen kehittäminen on helpompaa (Mealings et al. 2015 [Brogden 1983; Maclure 1984]). Tältä osin avoin oppimisympäristö voi palvella tätä opetussuunnitelmassa kuvailtua tavoitetta.

Avoin oppimisympäristö on luokkahuoneesta poiketen suuri tila, jossa työskentelee samanaikaisesti useita opetusryhmiä (Mealings et al. 2015). Opetusryhmien alueita ei välttämättä ole erotettu toisistaan väliseinärakenteilla, vaan alueet voivat olla toisiinsa nähden avoimia tai erotettu toisistaan tilanjakajilla, kuten ääntä eristävillä verhoilla. Muunneltava ja monikäyttöinen fyysinen ympäristö pystytään toteuttamaan erilaisilla liikuteltavilla kalusteilla, joiden avulla voidaan luoda esimerkiksi ryhmäkohtaisia oppimisalueita tai vaihtoehtoisesti suuremmalle joukolle soveltuva vapaampi ja avoimempi tila. (Kuuskorpi 2012)

Vaikka avoimen oppimisympäristön on tarkoitus tukea uudenlaista monimuotoisempaa oppimistapaa, luo se myös oppimiselle omat uudet haasteensa tilan akustisen toimivuuden osalta. Avoimen oppimisympäristön toimivuuden kannalta keskeiseksi ongelmaksi on osoittautunut opetusryhmien välisen yksityisyyden vähäisyys sekä äänen vapaa leviäminen tilassa (Shield, Greenland & Dockrell 2010). Avoimessa oppimisympäristössä opetusryhmien välillä ei ole kiinteitä ja tiiviitä ääntä eristäviä rakenteita, kuten väliseiniä, jolloin ääni pääsee leviämään opetusryhmien välillä melko vapaasti. Opetusryhmien aktiviteettien ja niistä aiheutuvien äänitasojen poiketessa toisistaan, häiriintyy hiljaisemman aktiviteetin opetusryhmä herkästi yhteisessä tilassa toimivan äänekkäämmän aktiviteetin opetusryhmän aiheuttamasta melusta (Mealings et al. 2015). Merkittävimmäksi keskittymistä häiritseväksi tekijäksi avoimessa oppimisympäristössä on todettu toisen opetusryhmän tai oppilaiden puhe (Shield & Dockrell 2004), jolloin erityisenä haasteena onkin saada samassa tilassa työskentelevien vierekkäisten opetusryhmien väliset ääniolosuhteet oppimiselle suotuisiksi. Tällöin äänen leviämisen tarkastelussa on olennaista tarkastella sitä etäisyyttä puhujasta, jolla ääni ei ole enää niin selkeää ja ymmärrettävää, että se häiritsisi.

Toinen huomionarvoinen ongelma avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteissa on tilassa vallitseva suuri melutaso. Opetustiloissa vallitsevan äänitason on todettu kasvavan luokkakoon kasvaessa (Mealings et al. 2015), mikä korostuu erityisesti avoimissa oppimisympäristöissä, joissa voi työskennellä tavalliseen luokkakokoon nähden moninkertainen määrä oppilaita. Oppimisympäristössä vallitsevalla melutasolla on todettu olevan merkittävä vaikutus tilassa työskenteleviin, niin opettajiin kuin oppilaisiin. Erityisesti oppimisen kannalta olisi tärkeää, että tilassa vallitseva melutaso ei vaikeuttaisi oppimistyötä. Opetustilassa vallitsevan suuren melutason on todettu vaikuttavan muun muassa puheen ymmärrettävyyteen (Crandell & Smaldino 2000) sekä kuullun ja luetun informaation ymmärtämiseen ja sisäistämiseen (Klatte et al. 2010; Maxwell & Evans 2000; Ronsse & Wang 2013). Opetustiloissa vallitsevan melutason haitalliset vaikutukset eivät rajaudu pelkästään oppimisen häiriintymiseen vaan tällaiset olosuhteet voivat aiheuttaa myös terveydellisiä haittoja, kuten stressiä, päänsärkyä ja väsymystä (Mealings et al. 2015). Lisäksi mitä suurempi äänitaso tilassa vallitsee, sitä kovempaa siellä puhuva joutuu puhumaan saadakseen äänensä kuulumaan, ja tällaisissa olosuhteissa työskentelevät – erityisesti opettajat – kärsivätkin todennäköisemmin äänihäiriöistä. (Roy et al. 2004; Sala et al. 2001)

1.2 Ääniolosuhteita kuvaavat mittaluvut

Tilojen akustisia olosuhteita arvioidaan yleensä jälkikaiunta-ajan perusteella. Jälkikaiunta-aika *T* on aika, jonka kuluessa huoneeseen tuotettu äänenpainetaso alenee 60 dB äänilähteen vaiettua. Suurissa tiloissa akustista hyvyyttä ei kuitenkaan voida arvioida pelkästään sen perusteella, kuinka nopeasti ääni vaimenee ajan suhteen, koska tila ei käyttäydy yhtenä kokonaisuutena. Tällöin äänen vaimenemista on tarkasteltava etäisyyden suhteen äänilähteestä. Puheen leviämistä tilassa havainnollistaa leviämisvaimennusaste $D_{2,S}$. Leviämisvaimennusaste kuvaa sitä, kuinka paljon puheen tuottama A-painotettu äänitaso vaimenee etäisyyden kaksinkertaistuessa. Äänen vaimenemiseen vaikuttavat tilan fyysiset ominaisuudet, kuten tilan muoto, huonekalujen sijoittelu, ääntä absorboivien pintojen määrä ja sijainti sekä tilassa olevien seinäkkeiden ja kaapistojen korkeus.

Tilojen akustisia ominaisuuksia voidaan arvioida myös puheenerotettavuuden avulla. Puheenerotettavuus riippuu puheen äänitasosta, jälkikaiunta-ajasta, heijastuksista, etäisyydestä puhujan ja kuulijan välillä sekä taustamelutasosta, ja sitä voidaan mitata puheensiirtoindeksin STI (Speech transmission index) avulla. (SFS 5907:2004) Puheensiirtoindeksi on määritelty standardissa IEC 60268-16 (2011), ja sen lukuarvo vaihtelee välillä 0,00–1,00. Arvo 1,00 kertoo täydellisestä tavuerotettavuudesta, joka voidaan yleensä huonetiloissa saavuttaa vain aivan lähellä puhujaa. Arvon ollessa 0,00 ei yhdestäkään tavusta saa selvää. Tällainen tilanne johtuu yleensä siitä, että tilan taustaäänitaso on puheäänen äänitasoa suurempi. STI mitataan huonetiloissa standardin IEC 60268-16 mukaan.

Avoimissa oppimisympäristöissä puheenerotettavuuden lukuarvo koskee yksittäistä oppimisryhmää. Ympäristöministeriön ohjeen (2019) mukaan oppimisryhmäkohtaisen STI:n ohjearvon tulisi 3 m:n etäisyydellä puhujasta olla vähintään 0,70. Puolestaan oppimisryhmien välillä puheenerotettavuuden tulisi olla mahdollisimman pieni: 8 m:n etäisyydellä puhujasta ohjearvo on enintään 0,50.

Puheensiirtoindeksin perusteella voidaan määrittää puheen häiritsevyys- ja yksityisyyssäteet. Puheen häiritsevyyssäteeksi r_D kutsutaan sitä etäisyyttä puhujasta, jota kauempana STI on pienempi kuin 0,50. Puheen häiritsevyyssäteen määrittäminen korostuu varsinkin avoimissa oppimisympäristöissä, joissa opetusryhmien työskentelyalueiden välillä ei ole varsinaista ääneneristystä. Puheen yksityisyyssäde r_P on puolestaan se etäisyys puhujasta, jolla puheensiirtoindeksin arvo on pienempi kuin 0,20 ja saavutetaan puheyksityisyys. (ISO 3382-3:2012)

Opetustilojen huoneakustisessa suunnittelussa on aiemmin korostettu jälkikaiunta-ajan ja aikaisten heijastusten merkitystä (Kylliäinen & Valovirta 2011), mutta puheenerotettavuuden merkitys avoimen oppimisympäristön toimivuuden kannalta on kuitenkin tunnistettu. Kylliäinen ja Pääkkönen (2017) esittivät Akustiikkapäivillä tutkimushankkeensa avointen oppimisympäristöjen ääniolosuhteista. Tutkimuksen mittaustulokset osoittivat, ettei jälkikaiunta-aika ole riittävä kriteeri avointen oppimisympäristöjen suunnittelussa, vaan suunnittelun tulee perustua puheenerotettavuuteen ja äänen leviämisvaimennukseen. Oppimisympäristön akustisen toimivuuden kannalta on tärkeää, että puhujan ääni kuuluu tilassa selkeästi kohderyhmälle. Tämän lisäksi olisi myös vähintään yhtä tärkeää, että puhe kuuluisi ryhmätasolla mahdollisimman hyvin ryhmän oleskelualueella, mutta ei muualla samassa yhteistilassa. (Pääkkönen et al. 2015)

1.3 Tutkimuksen tavoite ja toteutus

Tässä tutkimuksessa keskitytään erääseen akustisesti paranneltuun avoimeen oppimisympäristöön, jossa on mitattu toiminnan aikaisia melutasoja. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää mittaustulosten ja huoneakustisen mallinnuksen avulla toiminnan aikaisen melun vaikutusta puheenerotettavuuteen avoimessa oppimisympäristössä. Tarkoituksena on myös laskea puheenerotettavuuteen, selvyyteen ja kuuluvuuteen liittyviä mittalukuja avoimessa oppimisympäristössä käyttäen taustaäänitasona mitattuja toiminnan-aikaisia melutasoja. Toiminnan aikaisen melun lisäksi tutkitaan, kuinka A-painotetulta äänenpainetasoltaan 42 dB peiteääni vaikuttaa puheenerotettavuuteen sekä poikkeaa tuloksiltaan toiminnan aikaisen melutason tuloksista.

Tutkimus tehdään huoneakustisen tietokonemallinnusohjelman Odeon Auditoriumin avulla. Tarkasteltavasta avoimesta oppimisympäristöstä on jo ennalta olemassa huoneakustinen malli, joka muokataan mitattujen toiminnan aikaisten melutasojen mittaustilanteen mukaiseksi. Tietokonemallinnuksessa tilan taustaäänitasoina käytetään mitattuja toiminnan aikaisia melutasoja sekä peiteäänitasoa, jonka A-painotettu keskiäänitaso on 42 dB. Toiminnan aikaisten melutasojen vaikutusta tutkitaan kolmella eri toiminnan aikaisen melun keskiäänitasolla.

Työn alussa esitellään, mihin tutkimuksessa käytettävä aineisto perustuu ja käydään tarkemmin läpi avoimessa oppimisympäristössä tehtyjä mittauksia. Mittausten esittelyn jälkeen siirrytään huoneakustisen tietokonemallin pariin. Ensin käydään lyhyesti läpi, mistä huoneakustinen tietokonemallinnus Odeon Auditorium -ohjelmalla koostuu, jonka jälkeen selostetaan huoneakustisen mallin muokkausprosessi tutkimukselle tarkoituksenmukaiseksi ja käydään läpi mallinnuksessa käytettävät taustaäänitasot eri tarkastelutilanteissa.

Tulokset esitetään mallinnuslinjoittain eri taustaäänitasojen tapauksissa. Tulosten tarkastelussa verrataan eri taustaäänitasoilla saatuja tuloksia toisiinsa linjakohtaisesti sekä tarkastellaan puheensiirtoindeksiä koko avoimen oppimisympäristön alueella kaikilla taustaäänitasoilla linjojen 1 ja 4 äänilähteiden osalta.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

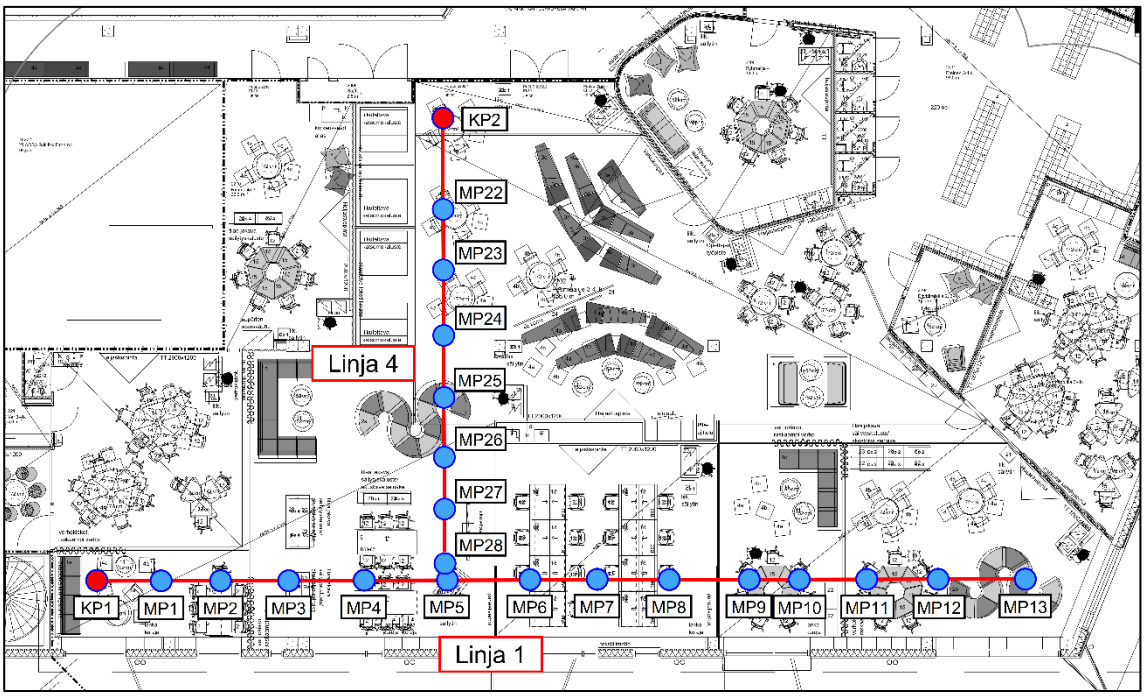
Tutkimuksen aineisto perustuu A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n tekemiin mittauksiin avoimessa oppimisympäristössä (Valjakka et al. 2018). Mittaukset on tehty kahteen otteeseen, joista ensimmäiset mittaukset tehtiin vuonna 2017 ja toiset vuonna 2018. Ensimmäisten mittausten jälkeen avoimeen oppimisympäristöön tehtiin akustisia parannuksia saatujen mittaustulosten perusteella. Toiset mittaukset tehtiin, kun paranneltu tila oli ollut vuoden käytössä. Tehdyt mittaukset koostuvat huoneakustisista mittauksista ja toiminnan aikaisten melutasojen mittauksista. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan paranneltua avointa oppimisympäristöä ja tutkimusaineistona käytetään vuoden 2018 mittaustuloksia.

2.1 Avoimessa oppimisympäristössä tehdyt mittaukset

Toiminnan aikaisen melun mittaukset tehtiin kymmenessä mittauspisteessä ja melutasoja mitattiin normaalin opetustoiminnan aikana klo 8.30–14.00. Saana Romula on tutkinut tarkemmin näitä toiminnan aikaisia melutasoja kandidaatintyössään ”Toiminnan aikaiset melutasot avoimessa oppimisympäristössä” (2020). Avoimen oppimisympäristön pohjapiirustus ja melumittauksissa käytetyt mittauspisteet on esitetty kuvassa 1.

Kuva 1: *Avoimen oppimimisympäristön toiminnan aikaisten melutasojen mittauksissa käytetyt mittauspisteet (Valjakka et al. 2018).*

Avoimessa oppimisympäristössä tehdyt huoneakustiset mittaukset koostuivat puheen leviämisvaimennuksen ja puheyksityisyyden mittauksista. Mittaukset tehtiin kuvassa 2 esitetyillä kahdella mittauslinjalla, joilla sijaitsi useampia mittauspisteitä. Mittauksissa käytetty äänilähteen korkeus oli 1,5 m, mikä vastaa seisovaa puhujaa. Mikrofonipaikan korkeus oli 1,2 m, mikä puolestaan kuvaa istuvaa kuuntelijaa. (Valjakka et al. 2018)



Kuva 2: *Avoimen oppimimisympäristön huoneakustisissa mittauksissa käytetyt mittauslinjat. Lyhenne KP tarkoittaa kaiutinpaikkaa (äänilähteen paikka) ja MP mittauspistettä (mikrofonin paikka).*

Leviämisvaimennuksen mittauksessa äänilähteenä käytettiin pallokaiutinta, johon oli kytketty vaaleanpunaista kohinaa tuottava kohinageneraattori. Mittaus tehtiin mittaamalla kohinan aiheuttama äänenpainetaso oktaavikaistoittain äänilähdettä vastaavan mittauslinjan mittauspisteillä. Jokaisella mittauspisteellä mitattiin myös tilan taustaäänenpainetaso ja mittauspisteen etäisyys äänilähteestä. (Valjakka et al. 2018)

Puheyksityisyyden mittauksilla selvitettiin mittauslinjojen häiritsevyyssäde r_D ja yksityisyyssäde r_P. Mittaukset tehtiin huoneakustiikan mallinnus- ja mittausohjelmistolla Odeon 14.01. Mittauksissa määritettiin kaiuttimen ja mittauspisteen välinen puheensiirtoindeksi STI, taustaäänenpainetaso $L_{p,B}$ ja etäisyys äänilähteeseen r. Taustaäänenpainetasot mitattiin äänitasomittarilla oktaavikaistoittain. (Valjakka et al. 2018)

2.2 Huoneakustinen tietokonemallinnus

Huoneakustisen tietokonemallin avulla voidaan tutkia tilan huoneakustisia mittalukuja ja tarkastella, kuinka äänikenttä käyttäytyy suljetussa tilassa. Huoneakustisen tietokone-

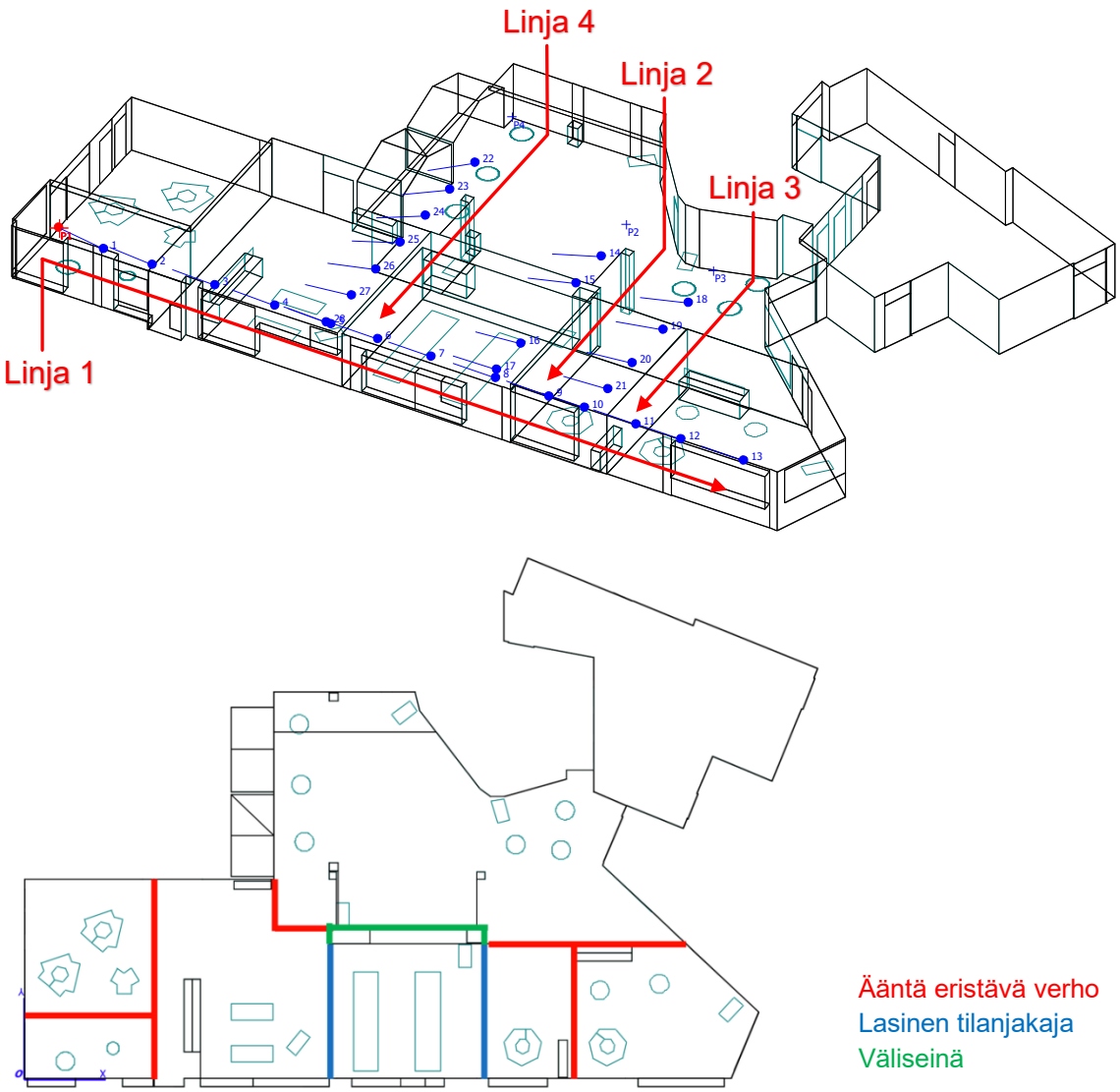
mallin teko koostuu tiivistettynä tarkasteltavan tilan geometrian mallintamisesta, tilan pintojen materiaaliparametrien määrittämisestä ja tilaan sijoitettavien äänilähteiden ja vastaanottopisteiden lisäämisestä sekä niiden ominaisuuksien määrittämisestä. Tässä tutkimuksessa huoneakustinen tietokonemallinnus tehdään Odeon Auditorium -ohjelmalla. Odeonilla mallinnettaessa tarkasteltavasta tilasta tehdään ensin tilamalli Sketchup-ohjelmalla, joka sisältää tiedot tilan geometriasta. Kun tilan geometria on mallinnettu, se tuodaan Odeoniin, jossa sen jokaiselle pinnalle määritetään absorptiokertoimet α. Absorptiokerroin kuvaa materiaalin kykyä absorboida äänienergiaa. Jos kertoimen arvo on 1, pinta on kokonaan absorboiva ja jos se on 0, pinta heijastaa kaiken siihen kohdistuvan äänienergian. Koska mallinnuksen laskenta tapahtuu oktaavikaistoittain taajuusalueella 63–8000 Hz, tulee materiaalien absorptiokertoimetkin määrittää tällä taajuusalueella. Absorptiokertoimen lisäksi materiaaleille määritetään sirontakertoimet, jonka arvo riippuu materiaalin tai pinnan karheudesta. (Niemi 2014)

Kun mallin geometria ja materiaaliparametrit on määritetty, määritetään malliin ääntä tuottavat lähdepisteet sekä ääntä vastaanottavat kuuntelupisteet. Äänilähteelle valitaan mallinnuksessa sen sijainti, suuntaavuus ja ääniteho. Suuntaavuudella tarkoitetaan sitä, mihin suuntaan äänilähde osoittaa ja millä intensiteetillä se säteilee ääntä eri suuntiin. Huoneakustisten parametrien mallinnuksessa käytetään ISO 3382-1 mukaisesti suuntaamatonta ja ympärisäteilevää lähdettä, joka on asetettu 1,5 m korkeudelle lattiapinnasta sellaiseen pisteeseen, jossa äänilähde normaalisti tilassa olisi (ISO 3382-1 2009). Vastaanottopisteet määritetään sellaisille pisteille, joissa vastaanottaja normaalisti sijaitsisi ja niiden orientaatiot asetetaan laskentavaiheessa osoittavan äänilähdettä kohti. Istuvaa kuulijaa vastaava vastaanottopiste suositellaan mallinnettavan 1,2 m korkeudelle.

2.3 Mallin muokkaaminen mittaustilanteen mukaiseksi

Tässä tutkimuksessa mallilla tarkastellaan, kuinka erilaiset taustaäänitasot vaikuttavat puheensiirtoindeksiin tarkasteltavassa avoimessa oppimisympäristössä. Jotta mallilla voidaan tutkia luotettavasti tilan ääniolosuhteita, tulee malli ensin sovittaa mahdollisimman hyvin vastaamaan tarkasteltavaa tilaa ja mittaustilannetta. Sovitus tehdään asettamalla mallinnuksen taustaäänitasoksi toiminnan aikaisten melutasojen mittaustilanteessa mitattu taustaäänitaso ja muokkaamalla sitten tilan materiaaliparametreja siten, että mittaus- ja mallinnustulokset ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Kun malli on saatu muokattua mittaustilanteen mukaiseksi, sillä voidaan tutkia melko luotettavasti tilan huoneakustisia mittalukuja.

Tässä tutkimuksessa mallin muokkaaminen aloitettiin asettamalla malliin lähde- ja vastaanottopisteet mittaustilanteen mukaisesti. Kuvassa 3 on esitetty avoimen oppimisympäristön huoneakustinen malli, johon lähde- ja vastaanottopisteet on sijoitettu. Mallissa näkyvät siniset pisteet ovat vastaanottopisteitä, jotka vastaavat mittaustilanteessa mikrofonipaikkoja. Punainen piste P1 mallin sisällä on tarkasteltavan linjan – tässä tapauksessa linjan 1 – äänilähde. Sinisillä risteillä esiintyvät pisteet P2, P3 ja P4 ovat puolestaan linjojen 2–4 äänilähteitä, jotka eivät kuvan mukaisella hetkellä ole aktiivisia. Tässä kappaleessa tarkastellaan linjoja 1 ja 4, jotka toimivat mittauslinjoina avoimessa oppimisympäristössä tehdyissä mittauksissa. Linjat 2 ja 3 ovat tutkimuksessa käytettäviä mallinnuslinjoja, joiden avulla voidaan tarkastella monipuolisemmin puheenerotettavuutta avoimessa oppimisympäristössä. Linjoilla sijaitsevat tilanjakajat on esitetty kuvan 3 pohjakuvassa.



Kuva 3. *Avoimen oppimisympäristön huoneakustinen tietokonemalli ja mallin pohjakuva. Pohjakuvassa on esitetty linjoilla sijaitsevat tilanjakajat.*

Lähde- ja vastaanottopisteiden lisäämisen jälkeen mallin taustaäänitasoksi asetettiin avoimessa oppimisympäristössä mitattu taustaäänitaso. Taustaäänitasot mitattiin huoneakustisten mittausten yhteydessä 20:ssä mittauspisteessä ja saaduista mittaustuloksista on laskettu avoimessa oppimisympäristössä vallitseva keskiäänitaso $L_{B,eq}$. Keskiäänitaso on laskettu mittaustulosten energeettisenä summana oktaavikaistoittain 63–8000 Hz taajuusalueella, jolloin painottamaton keskiäänitaso $L_{B,eq}$ on 44,5 dB ja A-painotettu keskiäänitaso $L_{A,B,eq}$ 29,2 dB. Mallinnuksessa oletetaan, että tilassa vallitsee kaikkialla sama taustaäänitaso. Käytetyn taustaäänitason $L_{B,eq}$ arvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: *Avoimessa oppimisympäristössä mitattujen taustaäänitasojen keskiäänitaso $L_{B,eq}$ (44,5 dB) oktaavikaistoittain taajuusalueella 63–8000 Hz.*

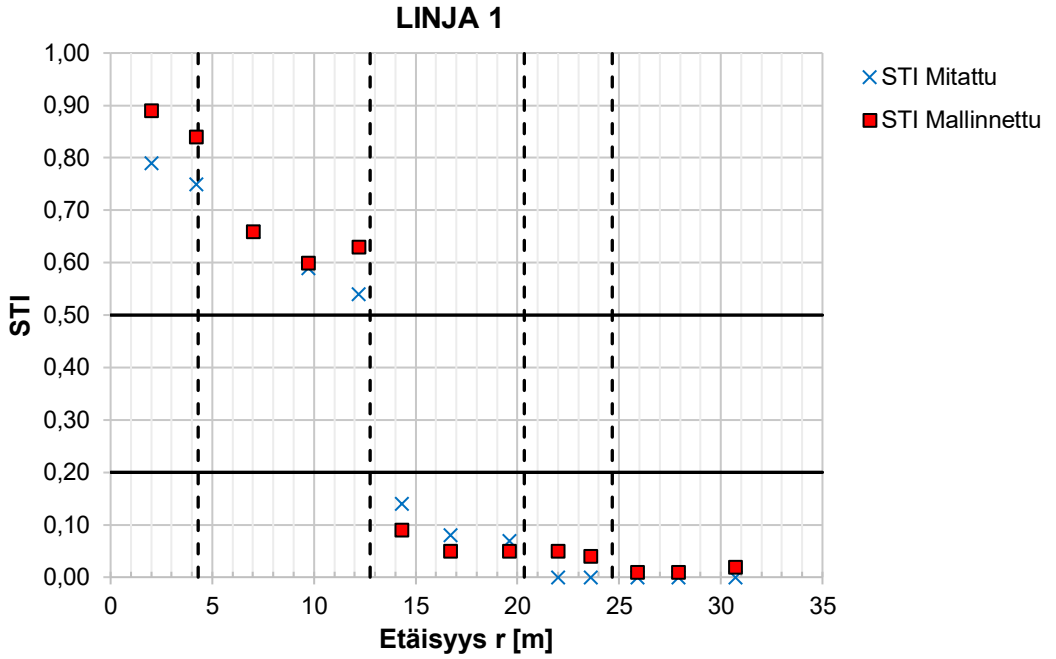
Taajuus	**63 Hz**	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**	**8000 Hz**
$L_{B,eq}$ [dB]	41,9	40,5	31,3	23,6	21,6	15,6	12,6	11,8

Taustaäänitason asettamisen jälkeen mittauslinjoilla sijaitsevien tilanjakajien materiaaliparametreja muokattiin siten, että mitatut ja mallinnetut puheensiirtoindeksin ja leviämisvaimennusasteen arvot vastasivat mahdollisimman tarkasti tosiaan. Mallin sovitusvaiheessa tarkasteltiin puheensiirtoindeksin lisäksi puheen leviämisvaimennusastetta, jotta mallinnus- ja mittaustilanteiden vastaavuus ei perustuisi pelkästään puheensiirtoindeksin arvoon. Taulukossa 2 on esitetty puheensiirtoindeksin mitatut ja mallinnetut tulokset linjalla 1. Kuvassa 4 on esitetty taulukon 2 arvot linjalla 1 etäisyyden suhteen. Kuvassa 5 on esitetty A-painotetun äänenpainetason mittaus- ja mallinnustulokset linjalla 1.

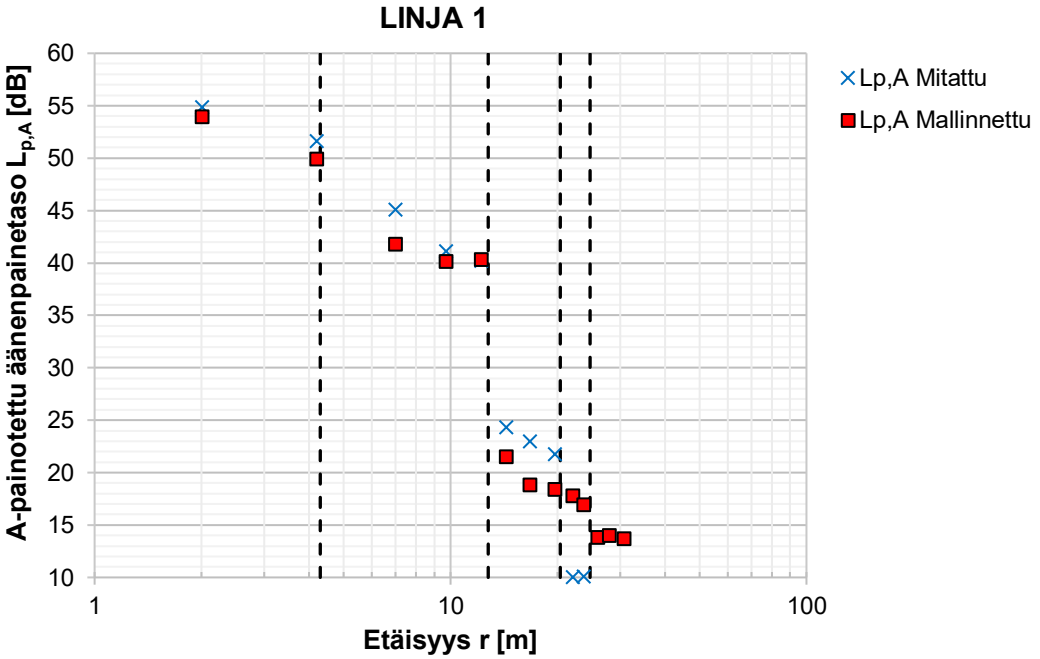
Taulukko 2. *Mitatut ja mallinnetut puheensiirtoindeksin arvot linjalla 1 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mittaus- ja mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 1	**MP1** (2,0 m)	**MP2** (4,2 m)	**MP3** (7,0 m)	**MP4** (9,7 m)	**MP5** (12,2 m)	**MP6** (14,3 m)	**MP7** (16,7 m)
STI mitattu	0,79	0,75	0,66	0,59	0,54	0,14	0,08
STI mallinnettu	0,89	0,84	0,66	0,60	0,63	0,09	0,05

Linja 1	**MP8** (19,6 m)	**MP9** (22,0 m)	**MP10** (23,6 m)	**MP11** (25,9 m)	**MP12** (27,9 m)	**MP13** (30,7 m)
STI mitattu	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
STI mallinnettu	0,05	0,05	0,04	0,01	0,01	0,02



Kuva 4. *Puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulokset linjalla 1 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB). Tilanjakajien paikat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*



Kuva 5. *A-painotetun äänenpainetason $L_{p,A}$ mittaus- ja mallinnustulokset linjalla 1. Tilanjakajien paikat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*

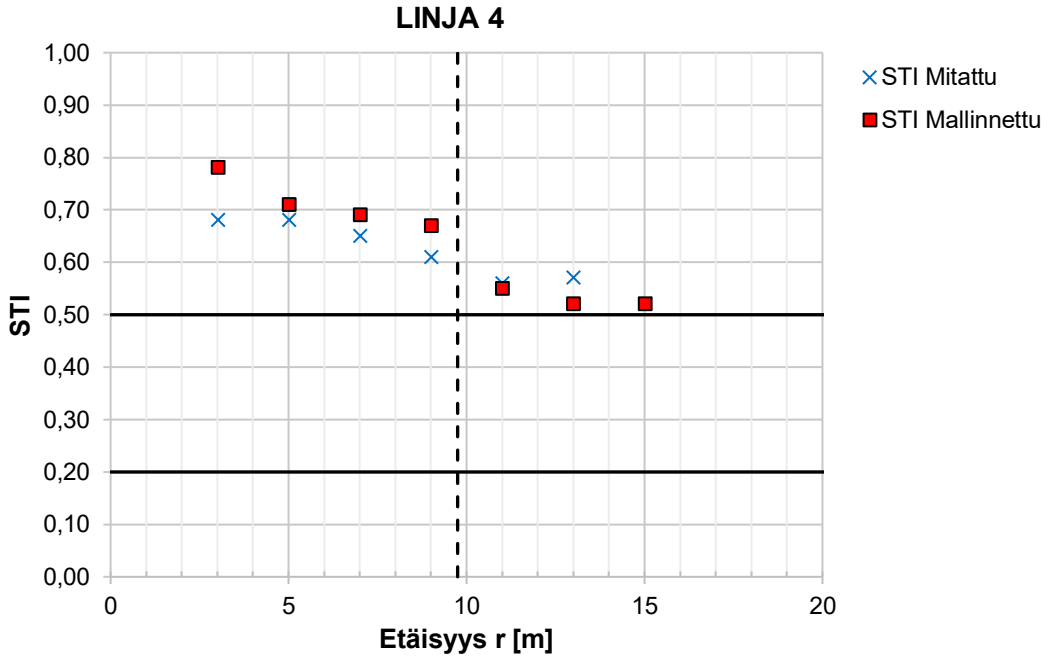
Puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulokset vastaavat melko tarkasti toisiaan, joskin lähimpänä äänilähdettä olevien pisteiden 1 ja 2 osalta arvoissa on hieman poikkeavuutta, mikä tulee ottaa huomioon tuloksia tarkastellessa. Arvoissa on myös hieman

eroavaisuutta toisen tilanjakajan jälkeen, joka tässä tapauksessa on avattava lasinen tilanjakaja. Lasisen tilanjakajan materiaaliparametrit on vaikea määrittää mittaustilanteen mukaiseksi, sillä lasiseinäelementtien välisien rakojen suuruutta ei tiedetä. Äänenpainetason mitattujen ja mallinnettujen arvojen välillä ei ole havaittavissa merkittäviä eroavaisuuksia, paitsi linjan loppupäässä. Tämä ei kuitenkaan ole tutkimuksen kannalta kiinnostavaa aluetta linjalla 1, joten linjan loppupäässä poikkeamat eivät haittaa.

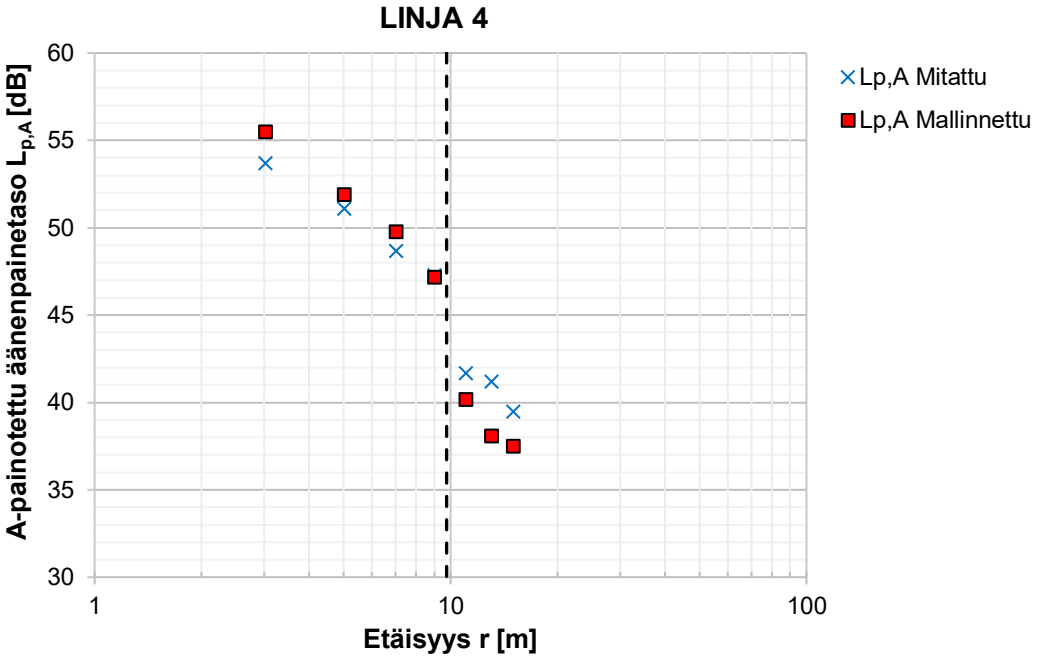
Taulukossa 3 on esitetty mitatut ja mallinnetut puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4. Kuvassa 6 on esitetty taulukon 3 arvot etäisyyden suhteen. Kuvassa 7 on esitetty A-painotetun äänenpainetason mitatut ja mallinnetut arvot etäisyyden suhteen linjalla 4.

Taulukko 3. *Mitatut ja mallinnetut puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mittaus- ja mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 4	**MP22** (3,0 m)	**MP23** (5,0 m)	**MP24** (7,0 m)	**MP25** (9,0 m)	**MP26** (11,0 m)	**MP27** (13,0 m)	**MP28** (15,0 m)
STI mitattu	0,68	0,68	0,65	0,61	0,56	0,57	0,52
STI mallinnettu	0,78	0,71	0,69	0,67	0,55	0,52	0,52



Kuva 6. *Puheensiirtoindeksin mittaus- ja mallinnustulokset linjalla 4 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*



Kuva 7. *A-painotetun äänenpainetason mittaus- ja mallinnustulokset linjalla 4. Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Puheensiirtoindeksin arvoissa on havaittavissa poikkeavuutta äänilähteen lähietäisyyksillä mitattujen ja mallinnettujen arvojen välillä kuten linjalla 1. Erityisesti ensimmäisen mittaus- ja mallinnuspisteen arvot poikkeavat toisistaan. Tulosten tarkastelussa on huomioitava, että puheensiirtoindeksi on äänilähteen lähellä todellisuudessa mallinnettua lukuarvoa pienempi. Äänilähteestä kauempana olevien mittauspisteiden mitatut ja mallinnetut tulokset vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Mitatut arvot tosin ovat hieman mallinnettuja pienemmät ennen tilanjakajaa.

Taulukossa 4 on esitetty linjalla 1 mitatut ja mallinnetut puheen leviämisvaimennusaste, häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde. Taulukossa 5 on esitetty vastaavat mittaluvut linjalla 4. Taulukoissa esitetyt mittaluvut on määritetty standardin ISO 3382-3 (2012) mukaisesti lineaarisen regression avulla.

Taulukko 4. *Mitatut ja mallinnetut puheen leviämisvaimennusaste, häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde linjalla 1 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB).*

Linja 1	Puheen leviämis-vaimennusaste $D_{2,S}$	Häiritsevyyssäde r_D	Yksityisyyssäde r_P
Mitattu	8,8 dB	10,5 m	16,6 m
Mallinnettu	8,9 dB	10,9 m	19,6 m

Taulukko 5. *Mitatut ja mallinnetut puheen leviämisvaimennusaste, häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde linjalla 4 taustaäänitasolla $L_{B,eq}$ (44,5 dB).*

Linja 4	Puheen leviämis-vaimennusaste $D_{2,S}$	Häiritsevyyssäde r_D	Yksityisyyssäde r_P
Mitattu	6,3 dB	16,7 m	31,6 m
Mallinnettu	8,3 dB	14,8 m	27,9 m

Mallin sovituksessa on kuitenkin parempi tarkastella mittauspistekohtaisia puheensiirtoindeksin ja äänenpainetason arvoja, sillä lineaarisen regression avulla lasketut yksilukuarvot eivät kuvaa tilannetta todenmukaisesti varsinkaan tilanjakajien kohdalla.

2.4 Toiminnan aikaiset melutasot

Toiminnan aikaisia melutasoja mitattiin 10:ssä eri mittauspisteessä. Mittaustuloksista on määritetty jokaisen mittauspisteen melutasojen fraktiilit, jotka rajaavat tietyn prosenttimäärän havaintoarvoja alapuolelleen. Fraktiiliarvot on saatu Saana Romulan kandidaatintyöstä (2020), jossa tutkitaan tarkemmin näitä mitattuja toiminnan aikaisia melutasoja avoimessa oppimisympäristössä. Taulukossa 6 on esitetty jokaista mittauspistettä vastaavat fraktiilien arvot. Alaindeksissä on ilmoitettu prosenttiarvo, jonka mittaustulokset ylittävät. Esimerkiksi $L_{p,0.10}$ vastaa melutasoa, jonka 10 % mittaustuloksista ylittää ja vastaavasti $L_{p,0.90}$ melutasoa, jonka 90 % mittaustuloksista ylittää.

Taulukko 6: *Mitattujen melutasojen fraktiilit mittauspisteissä 1–10.*

Fraktiili	**MP1** [dB]	**MP2** [dB]	**MP3** [dB]	**MP4** [dB]	**MP5** [dB]	**MP6** [dB]	**MP7** [dB]	**MP8** [dB]	**MP9** [dB]	**MP10** [dB]
$L_{p,0.10}$	65,0	63,5	42,0	62,0	63,0	68,5	68,0	64,5	65,5	68,0
$L_{p,0.30}$	56,0	55,0	36,0	53,5	54,5	61,5	60,5	58,0	57,0	59,0
$L_{p,0.50}$	44,5	46,5	35,0	42,0	42,0	46,5	49,5	48,5	47,5	46,5
$L_{p,0.70}$	36,0	38,0	34,5	36,0	36,0	39,0	41,5	41,0	38,5	41,0
$L_{p,0.90}$	34,5	36,5	34,5	33,0	34,0	36,0	33,5	36,0	36,0	35,0

Tässä tutkimuksessa toiminnan aikaisen melutason vaikutusta puheenerotettavuuteen tarkastellaan kolmella toiminnan aikaisen melun äänitasolla. Ensin tarkastellaan tilannetta, jossa taustaäänitasona käytetään fraktiilien mediaaniarvoja $L_{p,0.50}$. Tämän jälkeen tarkastellaan tilanteita fraktiilien $L_{p,0.10}$ ja $L_{p,0.90}$ arvoilla. Taulukon 6 fraktiiliarvot on ilmoitettu mittauspistekohtaisina arvoina. Mallinnusta varten näistä arvoista on laskettava

avoimessa oppimisympäristössä vallitseva keskiäänitaso L_{eq}, jonka spektri sovitetaan vastaamaan standardin ISO 3382-3 mukaista normaalin puheen äänitehotason spektriä. Keskiäänitason yksilukuarvo lasketaan fraktiilikohtaisesti mittauspisteiden keskiäänitasojen aritmeettisena keskiarvona. Taulukossa 7 on esitetty fraktiilien mittauspistekohtaisista arvoista lasketut keskiäänitasot $L_{eq,0.10}$, $L_{eq,0.50}$ ja $L_{eq,0.90}$ sekä keskiäänitasojen A-painotetut arvot. Keskiäänitasojen yksilukuarvot on pyöristetty yhden desimaalin tarkkuuteen.

Taulukko 7. *Toiminnan aikaisen melun fraktiilikohtaiset painottamattomat ja A-painotetut keskiäänitasot avoimessa oppimisympäristössä.*

Toiminnan aikaiset melutasot		**A-painotettu arvo**
$L_{eq,0.10}$	63,0 dB	59,6 dB
$L_{eq,0.50}$	44,9 dB	41,5 dB
$L_{eq,0.90}$	34,9 dB	31,7 dB

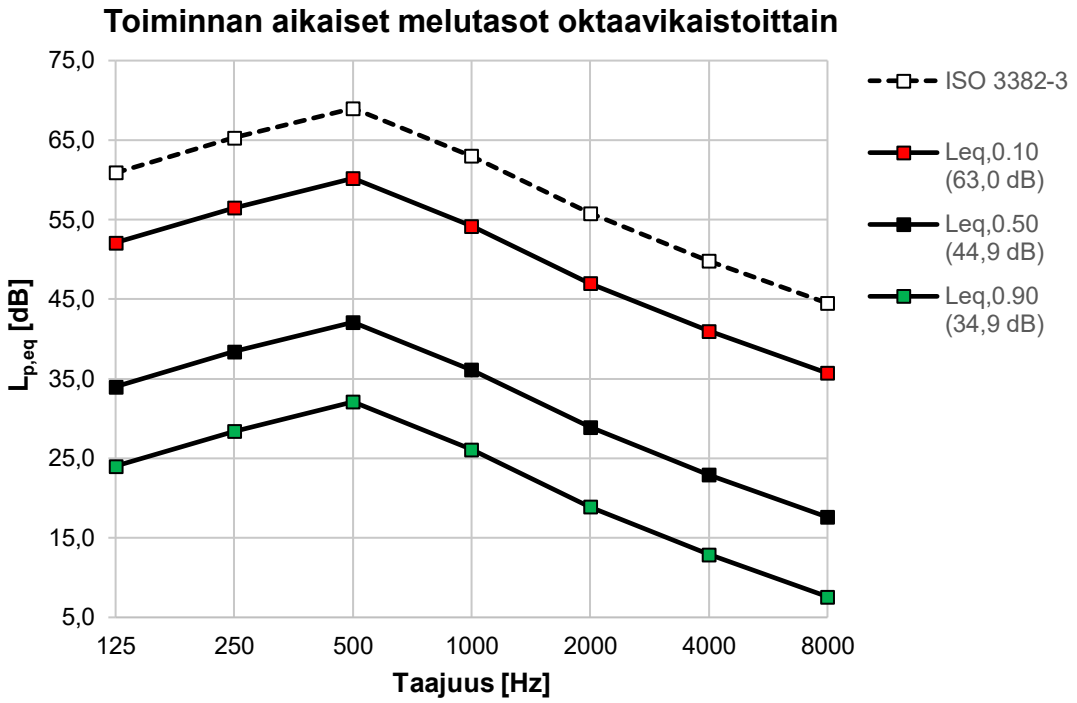
Fraktiilkohtaiset keskiäänitasot muutetaan mallinnusta varten 63–8000 Hz taajuuskaistaiseksi taustaäänitasoksi siten, että keskiäänitason spektri vastaa ISO 3382-3 -standardissa määritetyn normaalin puheen äänitehotason spektriä. Normaalin puheen äänitehotason spektri skaalataan lineaarisen spektrin muotoa muuttamatta siten, että sen oktaavikaista-arvojen keskiäänitaso vastaa taulukossa 7 esitettyjä keskiäänitason arvoja. Todellista puheen äänispektriä ei ollut saatavilla, joten tässä tapauksessa parhaiten tilannetta kuvaa standardisoitu puheen äänitehotason spektri. Todellisuudessa toiminnan aikainen melu ei kuitenkaan välttämättä vastaa tätä spektrin muotoa.

Taulukossa 8 on esitetty ISO 3382-3 mukainen normaalin puheen äänitehotaso sekä taulukon 7 keskiäänitasojen perusteella skaalatut fraktiilien arvot oktaavikaistoittain. Taulukossa 8 esitettyjä fraktiilien $L_{eq,0.10}$, $L_{eq,0.50}$ ja $L_{eq,0.90}$ oktaavikaista-arvoja käytetään tutkimuksessa mallin taustaäänitasoina.

Taulukko 8. *Normaalin puheen äänitehotaso oktaavikaistoittain sekä sen perusteella skaalatut fraktiilien $L_{eq,0.10}$ (63,0 dB), $L_{eq,0.50}$ (44,9 dB) ja $L_{eq,0.90}$ (34,9 dB) oktaavikaistaiset äänenpainetasot.*

Taajuus	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**	**8000 Hz**
ISO 3382-3	60,9	65,3	69,0	63,0	55,8	49,8	44,5
$L_{eq,0.10}$	52,1	56,5	60,2	54,2	47,0	41,0	35,7
$L_{eq,0.50}$	34,0	38,4	42,1	36,1	28,9	22,9	17,6
$L_{eq,0.90}$	24,0	28,4	32,1	26,1	18,9	17,6	7,6

Kuvassa 8 on esitetty taulukon 8 arvot taajuuden suhteen. Oktaavikaistoittain määritetyt toiminnan aikaisten melutasojen keskiäänitasot noudattavat standardoidun normaalin puheen äänitehotason spektriä, joka on esitetty kuvassa katkoviivalla.



Kuva 8. *Mallinnuksessa käytettävät toiminnan aikaisten melutasojen oktaavikaistaiset arvot. Selitteessä on esitetty suluissa toiminnan aikaisten melutasojen keskiäänitasot.*

2.5 Peiteäänitaso

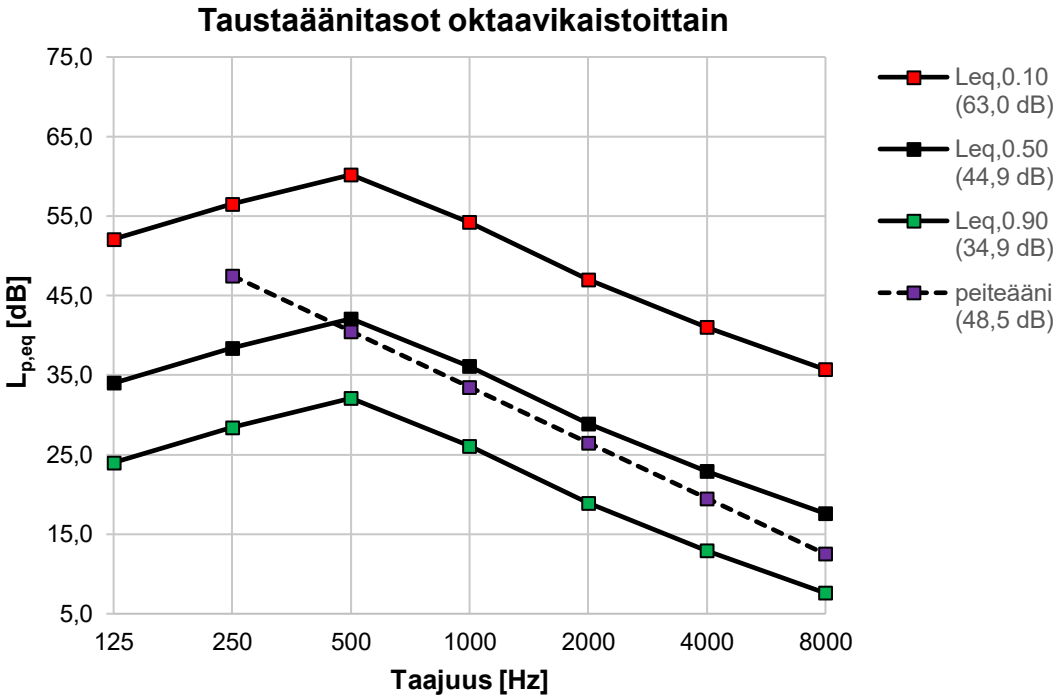
Puheenerotettavuutta tutkitaan myös tilanteessa, jossa taustaäänitasona on puheenpeittoääni. Ympäristöministeriön julkaisussa 2019:28 ”Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus” (Kylliäinen & Hongisto 2019) avoimessa oppimisympäristössä suositellaan käytettävän peiteääntä, jonka A-painotettu keskiäänitaso on välillä 35–40 dB sekä taajuusjakaumaa, jonka äänenpainetaso pienenee 7 dB taajuuden kaksinkertaistuessa. Suositellun peiteäänen spektri saa arvoja oktaavikaistoittain taajuusalueella 250–8000 Hz. Taajuuskaistalle 125 Hz ei ole annettu arvoa ohjeen suosituksessa, koska puhe ei sisällä voimakkaita äänikomponentteja 125 Hz:n taajuuskaistalla tai tämän alapuolella. Tässä tutkimuksessa mallissa käytetään suositusarvoista poiketen taustaäänitasona peiteääntä, jonka A-painotettu keskiäänitaso on 42 dB. Peiteäänen keskiäänitasona käytetään tätä arvoa, jotta sen A-painotettu keskiäänitaso vastaisi toiminnan aikaisen melutason $L_{eq,0.50}$ A-painotettua keskiäänitasoa (41,5 dB). Tällöin voidaan vertailla toiminnan aikaisen melutason $L_{eq,0.50}$ ja peiteäänen toisistaan poikkeavien taajuuskaistaspektrien

vaikutusta puheenerotettavuuteen. Peiteäänitason oktaavikaista-arvot valitaan noudattavan Ympäristöministeriön ohjeessa peiteäänelle suositeltua spektriä. Taulukossa 9 on esitetty mallinnuksessa käytettävä peiteäänen äänitaso oktaavikaistoittain, jossa äänenpainetaso pienenee 7 dB oktaavikaistoittain taajuudesta 250 Hz lähtien. Taulukon 9 arvot on skaalattu siten, että arvojen A-painotettu keskiäänitaso on 42 dB. Tällöin painottamaton keskiäänitaso on yhden desimaalin tarkkuuteen pyöristettynä 48,5 dB.

Taulukko 9. *Mallinnuksessa käytettävän peiteäänen arvot oktaavikaistoittain.*

Taajuus	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**	**8000 Hz**
Peiteääni [dB]	-	47,5	40,5	33,5	26,5	19,5	12,5

Kuvassa 9 on esitetty peiteäänen oktaavikaistaiset äänenpainetason arvot toiminnan aikaisten melujen oktaavikaista-arvojen kanssa. Kuvassa 9 esitettyjä oktaavikaistaisia arvoja käytetään tutkimuksessa avoimen oppimisympäristössä vallitsevina taustaäänitasoina.



Kuva 9. *Tutkimuksessa käytettävien taustaäänitasojen arvot oktaavikaistoittain. Selitteessä on esitetty suluissa taustaäänitasojen keskiäänitasot.*

3. TULOKSET

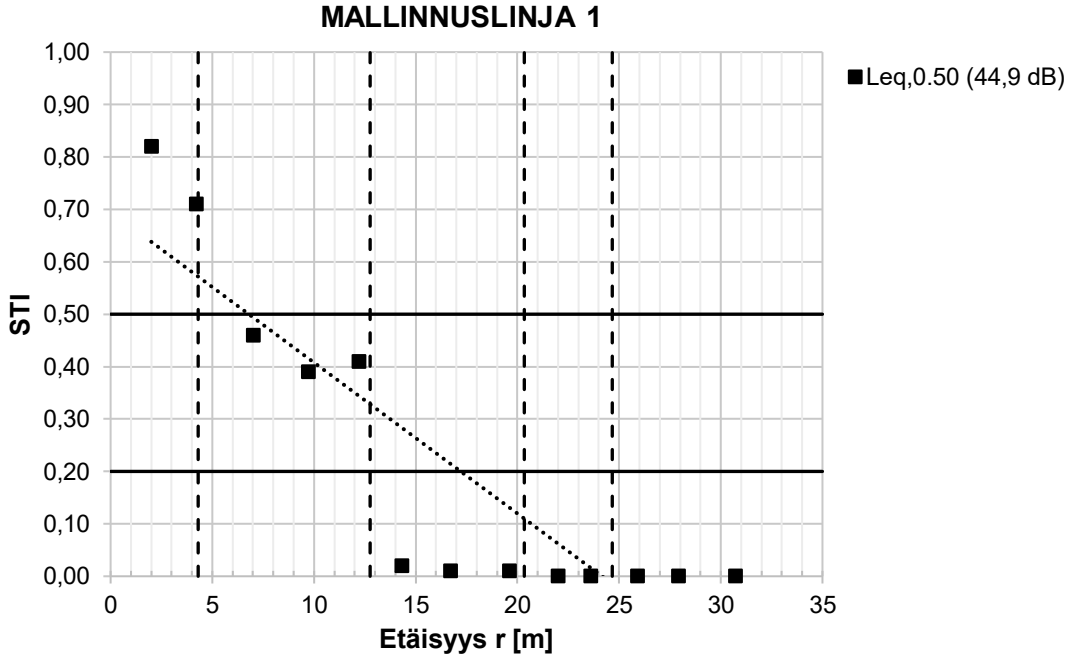
3.1 Puheensiirtoindeksi toiminnan aikaisen melun 50% fraktiililla

Taulukoissa 10–13 on esitetty linjojen 1–4 mallintamalla saadut tulokset, kun taustaäänitasona on käytetty toiminnan aikaisen melun 50 % fraktiilia $L_{eq,0.50}$ (44,9 dB). Taulukossa 10 on esitetty linjan 1 tulokset. Kuvassa 10 on esitetty taulukon 10 puheensiirtoindeksin arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 10. *Puheensiirtoindeksi linjalla 1, kun taustaäänitasona on käytetty $L_{eq.0,50}$ (44,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 1	**MP1** (2,0 m)	**MP2** (4,2 m)	**MP3** (7,0 m)	**MP4** (9,7 m)	**MP5** (12,2 m)	**MP6** (14,3 m)	**MP7** (16,7 m)
STI $L_{eq,0.50}$	0,82	0,71	0,46	0,39	0,41	0,02	0,01

Linja 1	**MP8** (19,6 m)	**MP9** (22,0 m)	**MP10** (23,6 m)	**MP11** (25,9 m)	**MP12** (27,9 m)	**MP13** (30,7 m)
STI $L_{eq,0.50}$	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

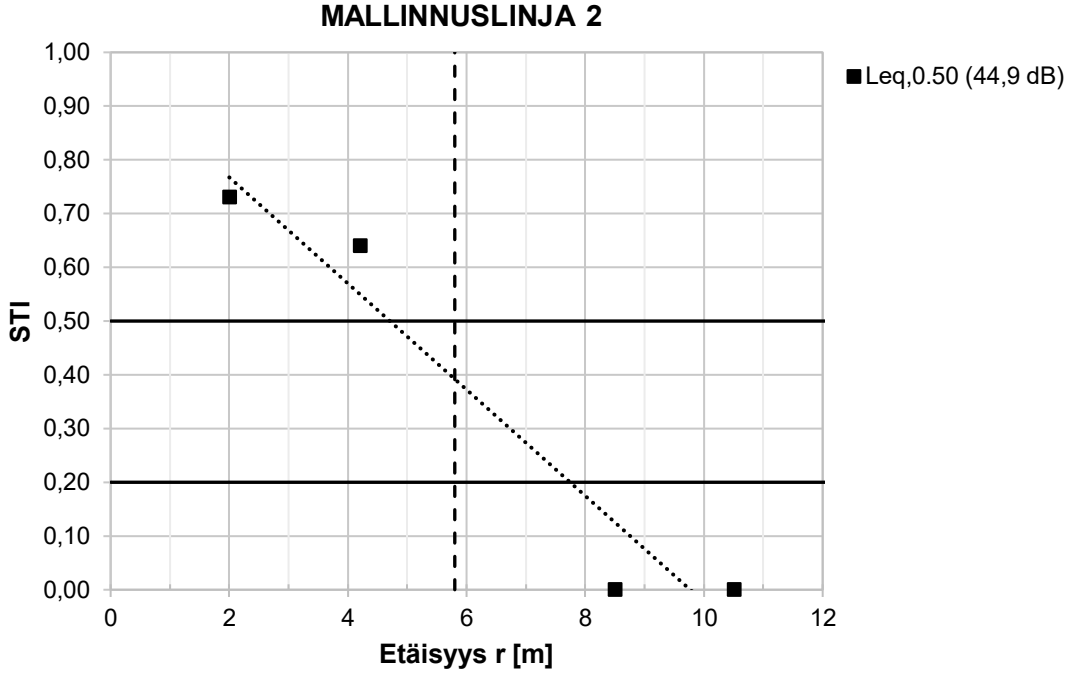


Kuva 10. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 1 taustaäänitasolla $L_{eq.0.50}$ (44,9 dB). Tilanjakajien paikat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*

Taulukossa 11 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 2. Kuvassa 11 on esitetty taulukon 11 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 11. *Puheensiirtoindeksi linjalla 2, kun taustaäänitasona on käytetty* $L_{eq.0.50}$ *(44,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 2	**MP14** (2,0 m)	**MP15** (4,0 m)	**MP16** (8,5 m)	**MP17** (10,5 m)
STI $L_{eq,0.50}$	0,73	0,64	0,00	0,00

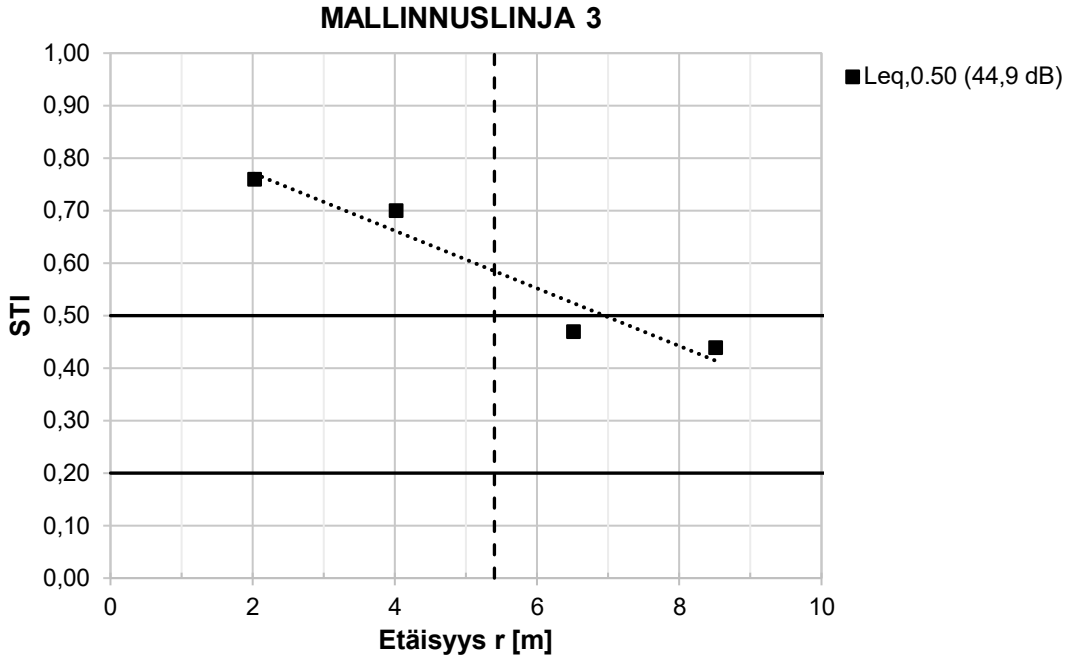


Kuva 11. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 2 taustaäänitasolla* $L_{eq.0.50}$ *(44,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 12 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 3. Kuvassa 12 on esitetty taulukon 12 puheensiirtoindeksin arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 12. *Puheensiirtoindeksi linjalla 3, kun taustaäänitasona on käytetty* $L_{eq,0.50}$ *(44,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 3	**MP18** (2,0 m)	**MP19** (4,0 m)	**MP20** (6,5 m)	**MP21** (8,5 m)
STI $L_{eq,0.50}$	0,76	0,70	0,47	0,44

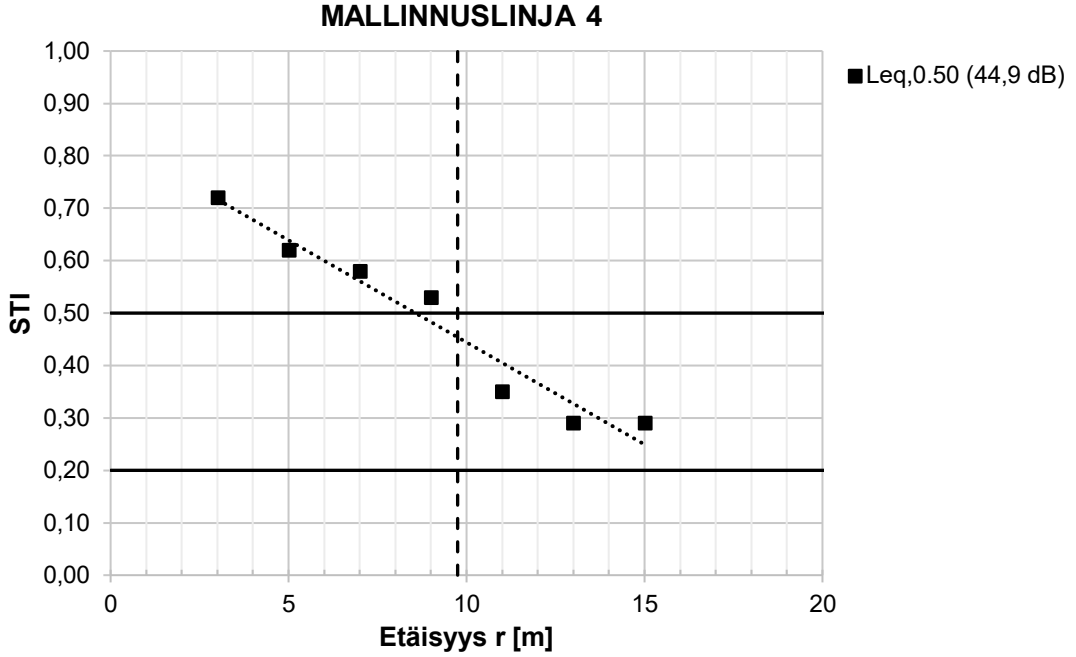


Kuva 12. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 3 taustaäänitasolla* $L_{eq.0.50}$ *(44,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 13 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4. Kuvassa 13 on esitetty taulukon 13 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 13. *Puheensiirtoindeksi linjalla 4, kun taustaäänitasona on* $L_{eq.0.50}$ *(44,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 4	**MP22** (3,0 m)	**MP23** (5,0 m)	**MP24** (7,0 m)	**MP25** (9,0 m)	**MP26** (11,0 m)	**MP27** (13,0 m)	**MP28** (15,0 m)
STI $L_{eq,0.50}$	0,72	0,62	0,58	0,53	0,35	0,29	0,29



Kuva 13. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 4 taustaäänitasolla $L_{eq.0.50}$ (44,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 14 on esitetty puheen häiritsevyys- ja yksityisyyssäde linjoilla 1–4, kun taustaäänitasona on melutaso $L_{eq.0.50}$. Häiritsevyys- ja yksityissäteet on ISO 3382-3 -standardin mukaisesti määritetty kaikki mallinnuspisteet huomioiden lineaarisen regression avulla.

Taulukko 14. *Puheen häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde linjoilla 1–4. *-merkinnän sisältävät arvot ovat mallinnusohjelman laskennallisesti määrittämiä ennustearvoja, joita ei ole mallinnuslinjan alueella voitu määrittää.*

Mallinnuslinja	Häiritsevyyssäde r_D	Yksityisyyssäde r_P
Linja 1	6,8 m	17,2 m
Linja 2	4,7 m	7,7 m
Linja 3	6,9 m	12,3 m*
Linja 4	8,6 m	16,3 m*

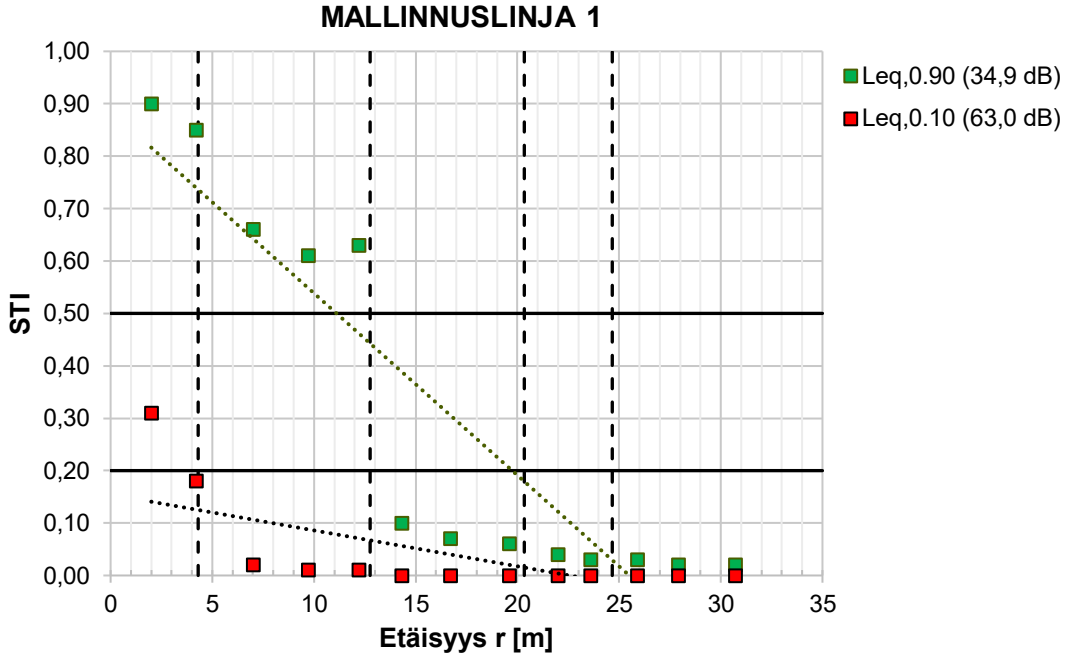
3.2 Puheensiirtoindeksi toiminnan aikaisen melun 10% ja 90% fraktiililla

Taulukoissa 15–18 on esitetty linjojen 1–4 mallintamalla saadut tulokset, kun taustaäänitasoina on käytetty toiminnan aikaisen melun 10 % ja 90 % fraktiileja $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB). Taulukossa 15 on esitetty linjan 1 tulokset. Kuvassa 14 on esitetty taulukon 15 puheensiirtoindeksin arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 15. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 1, kun taustaäänitasoina on käytetty $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 1	**MP1** (2,0 m)	**MP2** (4,2 m)	**MP3** (7,0 m)	**MP4** (9,7 m)	**MP5** (12,2 m)	**MP6** (14,3 m)	**MP7** (16,7 m)
STI $L_{eq.0.10}$	0,31	0,18	0,02	0,01	0,01	0	0
STI $L_{eq.0.90}$	0,9	0,85	0,66	0,61	0,63	0,10	0,07

Linja 1	**MP8** (19,6 m)	**MP9** (22,0 m)	**MP10** (23,6 m)	**MP11** (25,9 m)	**MP12** (27,9 m)	**MP13** (30,7 m)
STI $L_{eq.0.10}$	0	0	0	0	0	0
STI $L_{eq.0.90}$	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02

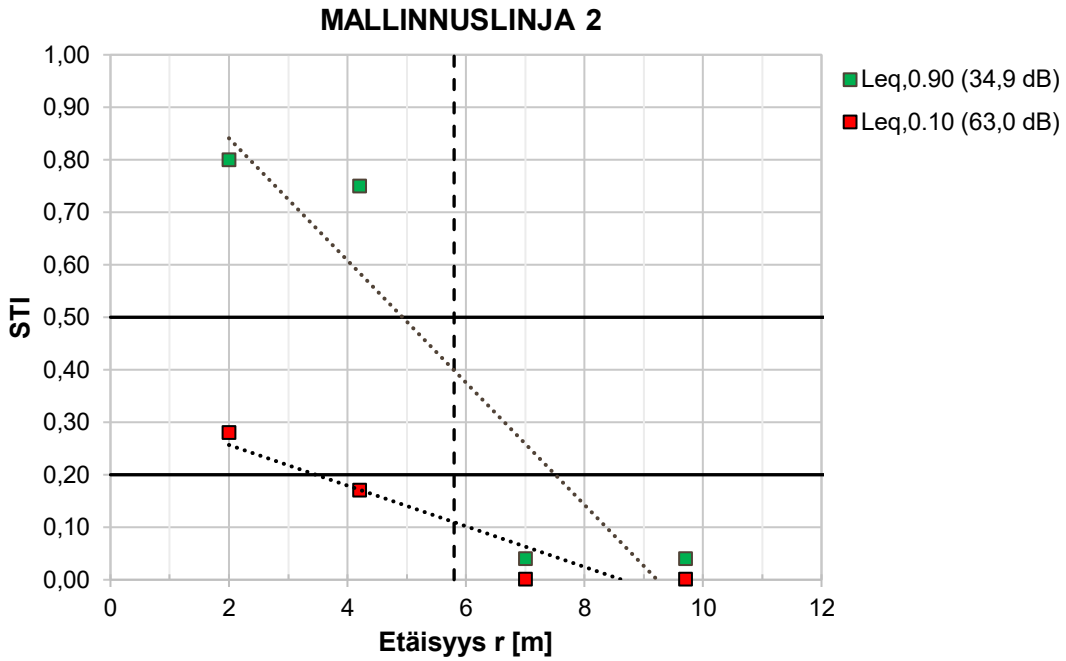


Kuva 14. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 1 taustaäänitasoilla $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB). Tilanjakajien paikat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*

Taulukossa 16 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 2. Kuvassa 15 on esitetty taulukon 16 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 16. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 2, kun taustaäänitasoina on käytetty $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 2	**MP14** (2,0 m)	**MP15** (4,0 m)	**MP16** (8,5 m)	**MP17** (10,5 m)
STI $L_{eq.0.10}$	0,28	0,17	0	0
STI $L_{eq.0.90}$	0,80	0,75	0,04	0,04

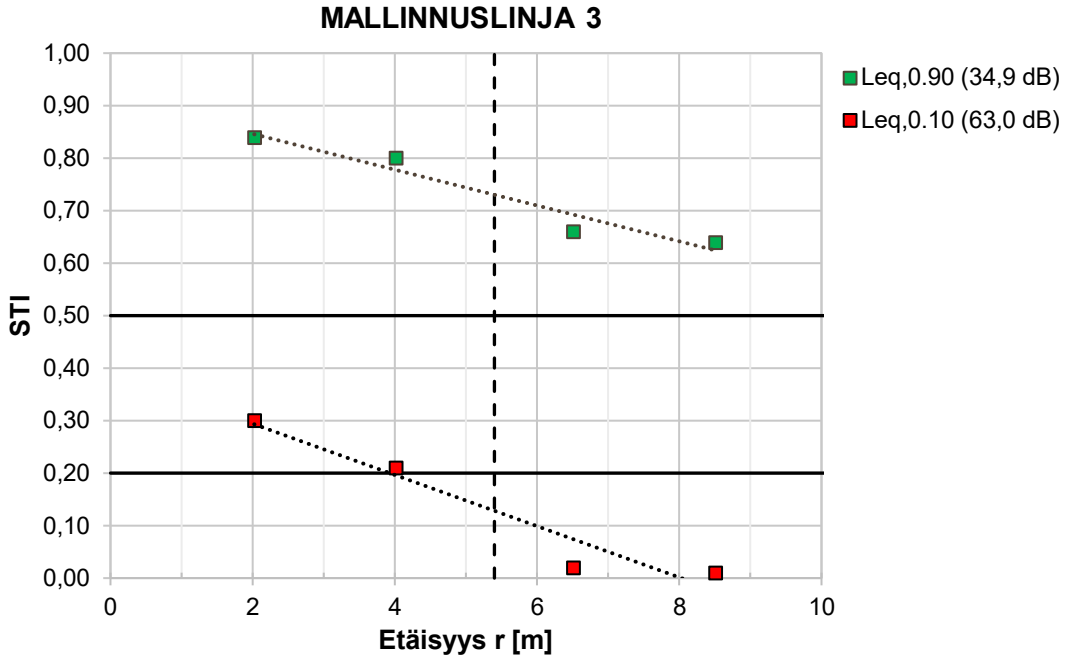


Kuva 15. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 2 taustaäänitasoilla $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 17 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 3. Kuvassa 16 on esitetty taulukon 17 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 17. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 3, kun taustaäänitasoina on käytetty $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 3	**MP18** (2,0 m)	**MP19** (4,0 m)	**MP20** (6,5 m)	**MP21** (8,5 m)
STI $L_{eq.0.10}$	0,30	0,21	0,02	0,01
STI $L_{eq.0.90}$	0,84	0,80	0,66	0,64

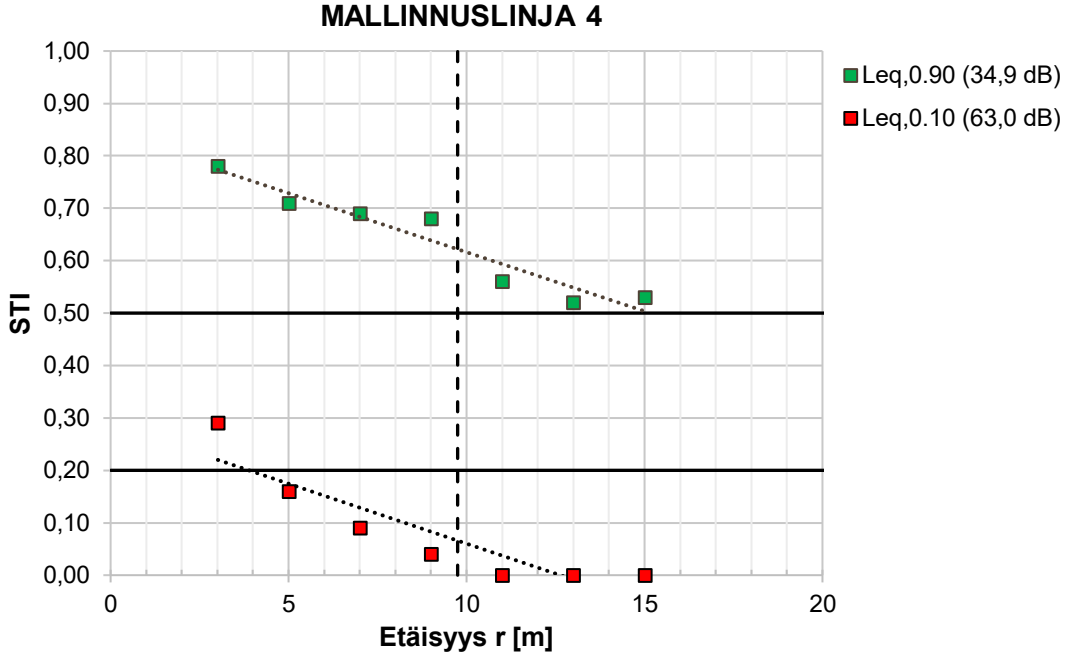


Kuva 16. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 3 taustaäänitasoilla $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 18 on esitetty puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4. Kuvassa 17 on esitetty taulukon 18 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 18. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4, kun taustaäänitasoina on käytetty $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB).* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 4	**MP22** (3,0 m)	**MP23** (5,0 m)	**MP24** (7,0 m)	**MP25** (9,0 m)	**MP26** (11,0 m)	**MP27** (13,0 m)	**MP28** (15,0 m)
STI $L_{eq.0.10}$	0,29	0,16	0,09	0,04	0	0	0
STI $L_{eq.0.90}$	0,78	0,71	0,69	0,68	0,56	0,52	0,53



Kuva 17. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 4 taustaäänitasoilla $L_{eq.0.10}$ (63,0 dB) ja $L_{eq.0.90}$ (34,9 dB). Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 19 on esitetty puheen häiritsevyys- ja yksityisyyssäde mallinnuslinjoilla 1–4, taustaäänitasojen $L_{eq.0.10}$ ja $L_{eq.0.90}$ tilanteissa. Häiritsevyys- ja yksityissäteet ovat standardin ISO 3382-3 mukaisesti määritetty kaikki mallinnuspisteet huomioiden lineaarisen regression avulla.

Taulukko 19. *Puheen häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde linjoilla 1–4. Arvon puuttuessa häiritsevyys- tai yksityissädettä ei ole saavutettu. *-merkinnän sisältävät arvot ovat mallinnusohjelman laskennallisesti määrittämiä ennustearvoja, joita ei ole mallinnuslinjan alueella voitu määrittää.*

Mallinnuslinja		Häiritsevyyssäde r_D	Yksityisyyssäde r_P
Linja 1	$L_{eq.0.10}$	-	-
	$L_{eq.0.90}$	11,2 m	19,8 m
Linja 2	$L_{eq.0.10}$	-	3,6 m
	$L_{eq.0.90}$	5,4 m	8,2 m
Linja 3	$L_{eq.0.10}$	-	3,9 m
	$L_{eq.0.90}$	12,1 m	21,0 m*
Linja 4	$L_{eq.0.10}$	-	3,9 m
	$L_{eq.0.90}$	15,0 m	28,1 m*

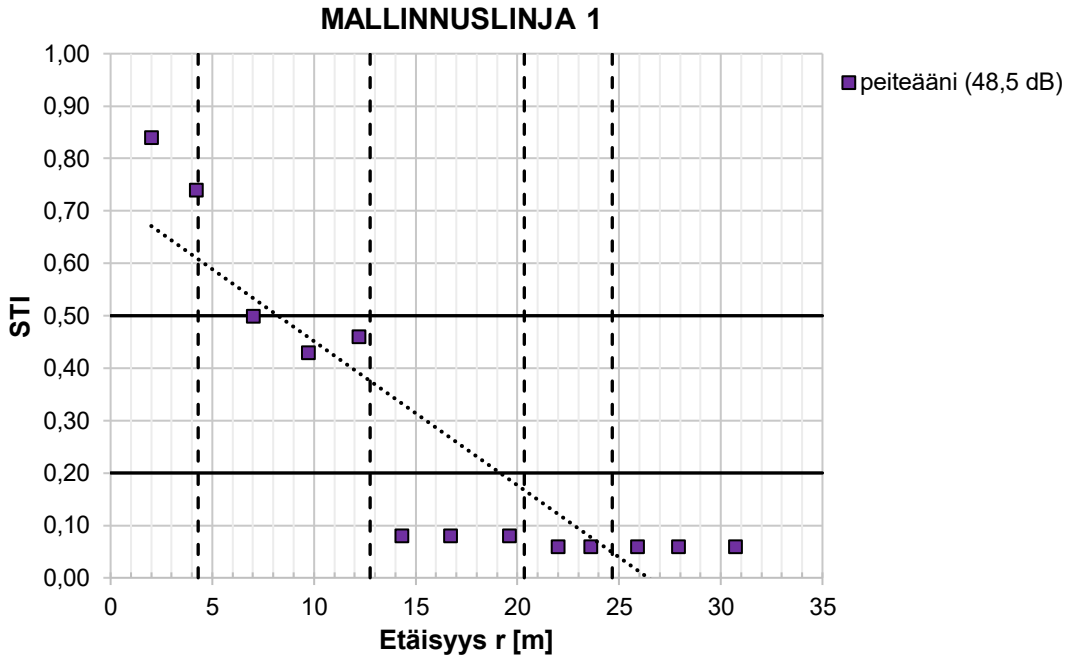
3.3 Puheensiirtoindeksi peiteäänitasolla

Taulukoissa 20–23 on esitetty linjojen 1–4 mallintamalla saadut tulokset, kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä. Taulukossa 20 on esitetty puheensiirtoindeksi mallinnuspistekohtaisesti linjalla 1. Kuvassa 18 on esitetty taulukon 20 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 20. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 1 kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä.* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 1	**MP1** (2,0 m)	**MP2** (4,2 m)	**MP3** (7,0 m)	**MP4** (9,7 m)	**MP5** (12,2 m)	**MP6** (14,3 m)	**MP7** (16,7 m)
STI peiteääni	0,84	0,74	0,5	0,43	0,46	0,08	0,08

Linja 1	**MP8** (19,6 m)	**MP9** (22,0 m)	**MP10** (23,6 m)	**MP11** (25,9 m)	**MP12** (27,9 m)	**MP13** (30,7 m)
STI peiteääni	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

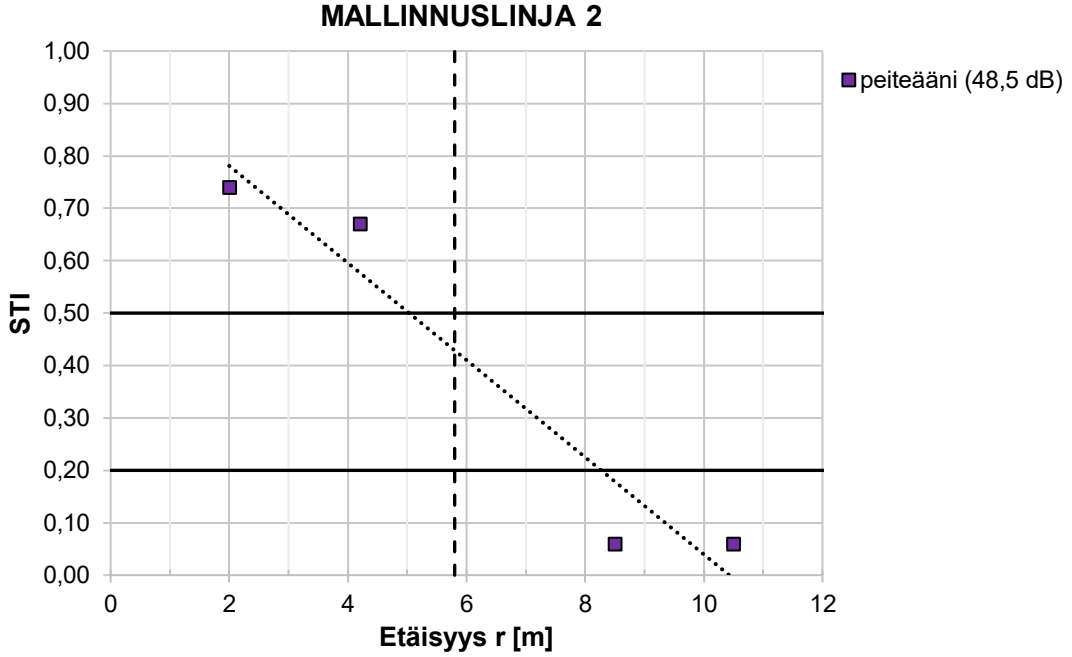


Kuva 18. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 1 A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteäänellä. Tilanjakajien paikat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*

Taulukossa 21 on esitetty puheensiirtoindeksi linjalla 2. Kuvassa 19 on esitetty taulukon 21 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 21. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 2 kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä.* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 2	**MP14** (2,0 m)	**MP15** (4,0 m)	**MP16** (8,5 m)	**MP17** (10,5 m)
STI peiteääni	0,74	0,67	0,06	0,06

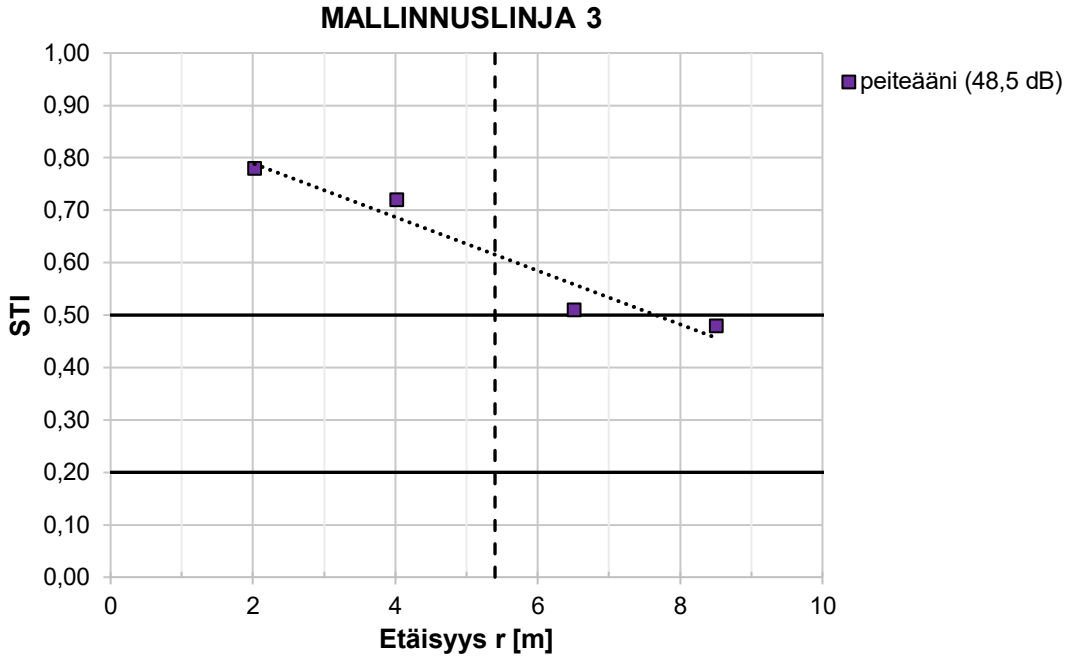


Kuva 19. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 2 A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteäänellä. Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 22 on esitetty puheensiirtoindeksi mallinnuspistekohtaisesti linjalla 3. Kuvassa 20 on esitetty taulukon 22 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 22. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 3 kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä.* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 3	**MP18** (2,0 m)	**MP19** (4,0 m)	**MP20** (6,5 m)	**MP21** (8,5 m)
STI peiteääni	0,78	0,72	0,51	0,48

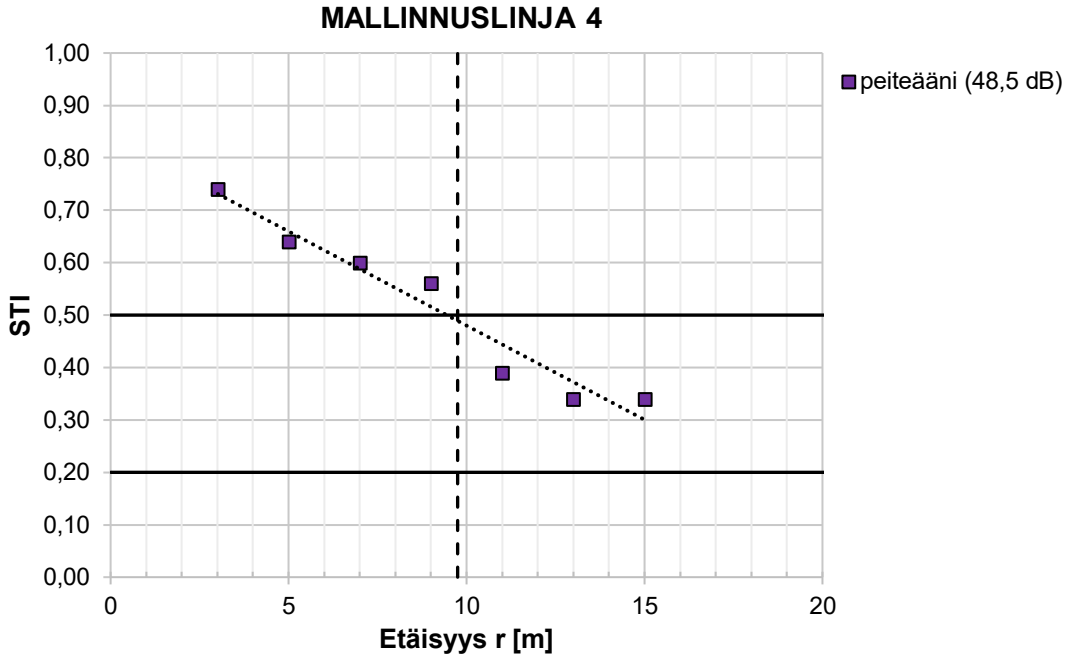


Kuva 20. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 3 A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteäänellä. Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 23 on esitetty puheensiirtoindeksi mallinnuspistekohtaisesti linjalla 4. Kuvassa 21 on esitetty taulukon 23 arvot etäisyyden äänilähteestä suhteen.

Taulukko 23. *Puheensiirtoindeksin arvot linjalla 4 kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä.* Suluissa esitetty arvo kertoo mallinnuspisteen etäisyyden äänilähteeseen.

Linja 4	**MP22** (3,0 m)	**MP23** (5,0 m)	**MP24** (7,0 m)	**MP25** (9,0 m)	**MP26** (11,0 m)	**MP27** (13,0 m)	**MP28** (15,0 m)
STI peiteääni	0,74	0,64	0,60	0,56	0,39	0,34	0,34



Kuva 21. *Puheensiirtoindeksin muutos etäisyyden äänilähteestä suhteen linjalla 4 A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteäänellä. Tilanjakajan paikka on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Taulukossa 24 on esitetty puheen häiritsevyys- ja yksityisyyssäde mallinnuslinjoilla 1–4, kun taustaäänitasona on A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääni. Häiritsevyys- ja yksityissäteet ovat standardin ISO 3382-3 mukaisesti määritetty kaikki mallinnuspisteet huomioiden lineaarisen regression avulla.

Taulukko 24. *Puheen häiritsevyyssäde ja yksityisyyssäde linjoilla 1–4, kun taustaäänitasona on käytetty A-painotetulta keskiäänitasoltaan 42 dB peiteääntä.*

Mallinnuslinja	Häiritsevyyssäde r_D	Yksityisyyssäde r_P
Linja 1	8,2 m	19,1 m
Linja 2	5,0 m	8,3 m
Linja 3	10,9 m	18,5 m*
Linja 4	9,5 m	17,9 m*

4. TULOSTEN TARKASTELU

Tarkasteltavan avoimen oppimisympäristön linjojen olosuhteet poikkeavat huomattavasti toisistaan tilanjakajien ja tilan muodon sekä sijainnin osalta. Tämän vuoksi tuloksia tarkastellaan ensin linjakohtaisesti, minkä jälkeen eri linjojen tuloksia verrataan toisiinsa. Tämän lisäksi puheensiirtoindeksiä tarkastellaan eri taustaäänitasoilla koko avoimen oppimisympäristön alueella linjojen 1 ja 4 äänilähteiden tapauksissa.

Tulosten tarkastelussa kiinnitetään huomiota oppimisryhmäkohtaisen sekä oppimisryhmien välisen puheensiirtoindeksin tavoitearvon toteutumiseen. Linjat 1–4 kulkevat kahden tai useamman työskentelyalueen läpi ja näiden työskentelyalueiden osalta tavoitearvoja tarkastellaan kahdessa asetelmassa. Jotta oppimisympäristö olisi puheenerotettavuuden osalta oppimista tukeva, tulisi puheensiirtoindeksi olla kohderyhmän alueella vähintään 0,70, jotta puhujan puhe olisi selkeää ja kuuluvaa. Kohderyhmän ulkopuolella puheensiirtoindeksin tulisi puolestaan olla alle arvon 0,50, jotta se ei häiritsisi toisia tilassa työskenteleviä. Linjojen tarkastelussa tutkitaan näiden kahden tilanteen toteutumista eli sitä, saavutetaanko tarpeeksi hyvä STI puhujan kohderyhmän alueella ja onko puhe häiritsevää linjan muilla työskentelyalueilla.

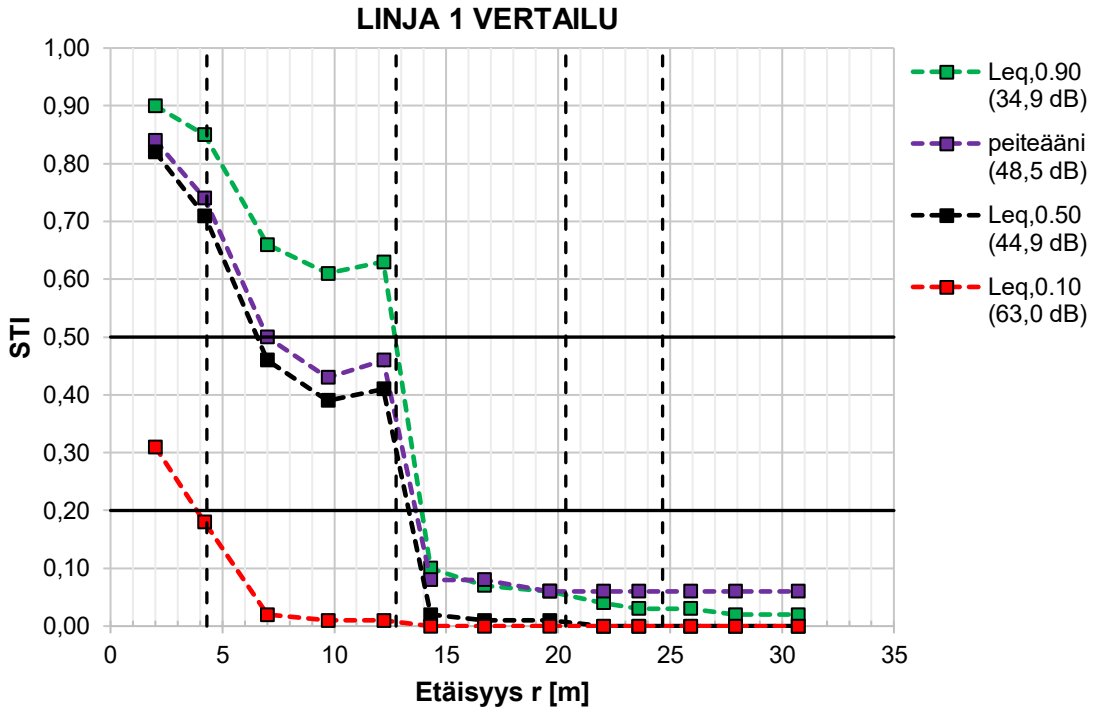
Tilanjakajilla erotettujen alueiden tapauksessa puheensiirtoindeksiä tarkastellaan aluekohtaisesti, jolloin oppimisryhmäkohtaisen puheensiirtoindeksin tavoitearvon toteutumista tarkastellaan kohderyhmän alueella ennen tilanjakajaa ja oppimisryhmien välisen puheensiirtoindeksin tavoitearvon toteutumista puolestaan tilanjakajan takana. Avoimessa tilassa, jossa ryhmien välillä ei ole tilanjakajia, tavoitearvojen toteutumista tarkastellaan etäisyyden suhteen niin, että tavoitellut puheensiirtoindeksin arvot ovat 3 metrin etäisyydellä äänilähteestä vähintään 0,70 ja 8 metrin etäisyydellä alle 0,50. Puheen häiritsevyys- ja yksityisyyssäteitä tarkastellaan tässä tapauksessa lineaarisesti kahden vierekkäisen mallinnuspisteen välillä eikä ISO 3382-3 mukaisesti koko joukon lineaarisena regressiona. Lisäksi tilanjakajien kohdalla voidaan olettaa, ettei STI todellisuudessa muutu lineaarisesti etäisyyden suhteen vaan pääasiallisesti tilanjakajan vaikutuksesta sen kohdalla.

Mallinnuslinjojen keskinäinen erilaisuus mahdollistaa myös erilaisten avoimen oppimisympäristön osien ja työskentelyalueita erottavien tilanjakajien vertailun. Tulosten avulla voidaan tarkastella, millainen fyysinen ympäristö olisi ääniolosuhteiden osalta oppimi-

selle suotuisin sekä millaisilla tilanjakajilla ja sijoitteluilla voidaan saavuttaa puheenerotettavuuden osalta tavoiteltava ryhmien välinen tilanne säilyttäen samalla oppimisympäristön fyysinen avoimuus.

4.1 Puheensiirtoindeksi linjoilla 1–4

Linja 1 on tarkastelluista linjoista pisin ja se kulkee viiden toisistaan tilanjakajilla erotettujen työskentelyalueiden läpi. Kuvassa 22 on esitetty puheensiirtoindeksi linjalla 1 eri toiminnan aikaisilla melutasoilla sekä peiteäänellä.



Kuva 22. *Puheensiirtoindeksin vertailu eri taustaäänitasoilla linjalla 1. Tilanjakajat on esitetty kuvassa pystykatkoviivoilla.*

Ensimmäisellä työskentelyalueella saavutetaan suotuisat puheensiirtoindeksin arvot toiminnan aikaisilla melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänitasolla. Melutasolla $L_{eq.0.90}$ saavutetaan paras oppimisryhmäkohtainen tilanne, jossa STI on yli 0,85 ennen ensimmäistä tilanjakajaa. Melutasolla $L_{eq.0.50}$ sekä peiteäänitasolla STI pysyy tavoiteltavissa arvoissa ja ryhmäkohtainen STI on yli 0,70. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$ ryhmäkohtaista puheensiirtoindeksin tavoitearvoa ei saavuteta ja STI on suurimmillaan 2 metrin etäisyydellä äänilähteestä 0,31, jolloin arvo on jo lähellä puheyksityisyyttä.

Kuvan 22 perusteella puheen häiritsevyyssäde saavutetaan ensimmäisen tilanjakajan jälkeen melutasolla $L_{eq.0.50}$ noin 6,5 metrin ja peiteäänitasolla noin 7 metrin etäisyydellä äänilähteestä. Melutasolla $L_{eq.0.90}$ puheensiirtoindeksi laskee alle arvon 0,50 vasta toisen

tilanjakajan kohdalla 12,8 metrin etäisyydellä äänilähteestä. Melutasolla $L_{eq.0.10}$ puheensiirtoindeksin arvo on alle 0,50 jo äänilähteen lähietäisyydellä eikä häiritsevyyssäde ole tällöin määritettävissä. Puheen yksityisyyssäde saavutetaan melutasolla $L_{eq.0.10}$ noin 4 metrin etäisyydellä äänilähteestä ja muissa tapauksissa toisen tilanjakajan jälkeen.

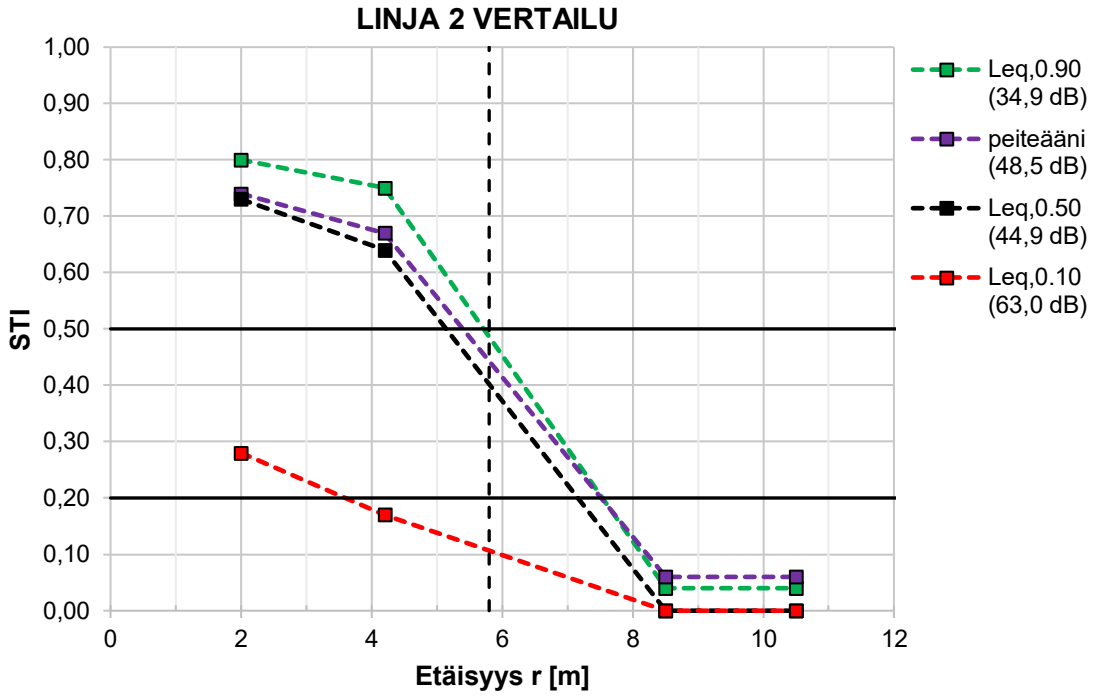
Mallin sovitusvaiheessa ilmeni, että mallinnetut puheensiirtoindeksin arvot ovat äänilähteen läheisyydessä noin 5 metrin etäisyydelle saakka hieman todellisia suurempia. Kun tämä huomioidaan, saattaa STI toiminnan aikaisen melun $L_{eq.0.50}$ tapauksessa olla alle 0,70 ennen ensimmäistä tilanjakajaa.

Kun tarkastellaan tarkemmin puheensiirtoindeksin muutosta peiteäänitason tilanteessa, huomataan, että arvot eivät käyttäydy samalla tavalla toisen tilanjakajan jälkeen kuin toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$. Peiteäänen tapauksessa puheensiirtoindeksi ei laske nollaan kuten melutasolla $L_{eq.0.50}$, vaan jää arvoon 0,06. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että peiteäänitason arvot ovat yli 250 Hz taajuuksilla hieman toiminnan aikaisen melutason $L_{eq.0.50}$ arvoja alhaisempia. Eroavaisuudesta huolimatta linjan 1 äänilähteen puhe ei ole kuuluvaa toisen tilanjakajan jälkeen millään käytetyistä taustaäänitasoista.

Tuloksia tarkastellessa huomataan myös, että tilanjakajilla on merkittävä vaikutus oppimisryhmien välisen puheenerotettavuuden tavoitearvon toteutumiseen. Linjan tilanjakajista kiinnostavia ovat ensimmäinen ja toinen tilanjakaja, joiden vaikutus puheensiirtoindeksiin on tuloksista nähtävissä. Linjan 1 ensimmäinen tilanjakaja on ääntä eristävä verho ja toinen tilanjakaja puolestaan avattava lasinen tilanjakajia. Kun verrataan puheensiirtoindeksin muutosta ensimmäisen ja toisen tilanjakajan yli huomataan, että toisen tilanjakajan tapauksessa arvo putoaa enemmän. Puheensiirtoindeksin arvo putoaa ensimmäisen tilanjakajan vaikutuksesta keskimäärin noin 0,20 ja toisen tilanjakajan vaikutuksesta noin 0,50. Lasisen tilanjakajan vaikutus puheenerotettavuuteen on yli kaksinkertainen ääntä eristävään verhoon verrattuna.

Lukuun ottamatta melutason $L_{eq.0.10}$ tilannetta, kaikissa tapauksissa tuloksissa esiintyy puheensiirtoindeksin pieni kasvu ennen toista tilanjakajaa. Tällaista ilmiötä ei ole havaittavissa ennen ensimmäistä tilanjakajaa. Toinen tilanjakaja on lasia, joka on akustisesti heijastavaa materiaalia. Puheensiirtoindeksin pieni paraneminen ennen toista tilanjakajaa johtuu lasista heijastuvasta äänestä, jolloin lasin läheisyydessä ääni kuuluu voimakkaammin ja on näin myös selkeämpää.

Linjalla 2 on kaksi työskentelyaluetta, joita erottava tilanjakaja on kevyt väliseinä. Kuvassa 23 on esitetty linjan 2 puheensiirtoindeksin arvot eri taustaäänitasoilla.



Kuva 23. *Puheensiirtoindeksin vertailu eri taustaäänitasoilla linjalla 2. Tilanjakaja on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Äänilähteen läheisyydessä ja kohderyhmän työskentelyalueella puheensiirtoindeksin arvo on toiminnan aikaisen melutasolla $L_{eq.0.90}$ tavoitearvoissa ja STI on 3 metrin etäisyydellä äänilähteestä yli 0,70. Kuvan 23 perusteella toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla STI on 2 metrin etäisyydellä äänilähteestä tavoitearvoissa, mutta laskee noin 3 metrin etäisyydellä noin arvoon 0,70. Kun huomioidaan todellisten STI:n arvojen olevan hieman mallinnettuja arvoja pienempiä äänilähteen lähellä, ei tavoiteltavaa puheensiirtoindeksiä 3 metrin etäisyydellä äänilähteestä saavuteta näillä taustaäänitasoilla. Tavoitearvoa ei myöskään saavuteta toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$, jonka tilanteessa puheenerotettavuus on linjan 1 tavoin koulutyölle kelpaamaton. Melutasolla $L_{eq,0.10}$ puheensiirtoindeksi on parhaimmillaan 2 metrin etäisyydellä 0,28 ja yksityisyyssäde saavutetaan kuvan 23 mukaan noin 3,5 metrin etäisyydellä puhujasta. Muissa tapauksissa STI laskee alle arvon 0,20 tilanjakajan vaikutuksesta, eikä puhe ole väliseinän toisella puolella juuri kuultavissa. Linjalla 2 puheensiirtoindeksin oppimisryhmäkohtaisiin tavoitearvoihin päästään vain toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.90}$. Oppimisryhmien välinen puheensiirtoindeksin tavoitearvo saavutetaan puolestaan taustaäänitasosta riippumatta väliseinän ansiosta.

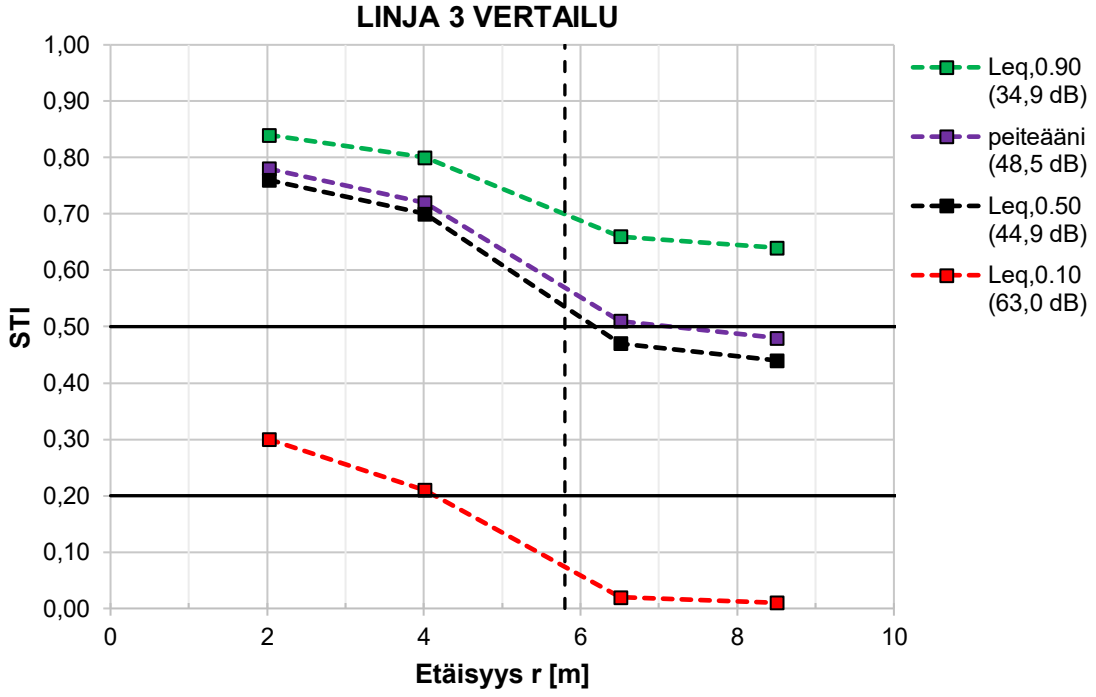
Puheensiirtoindeksi on linjalla 2 kaikissa tapauksissa äänilähteen lähietäisyydellä pienempi kuin linjalla 1. Linjalla 1 puhujan kohderyhmän työskentelyalue sijaitsee avoimen oppimisympäristön suojaisessa nurkassa ja alue on erotettu toisista työskentelyalueista

ääntä eristävillä verhoilla. Linjalla 2 äänilähde sijaitsee puolestaan oppimisympäristön avoimessa tilassa, jossa puhujan sivuilla ei ole ääntä heijastavia pintoja, ja ääni pääsee leviämään vapaammin eri suuntiin. Puheenerotettavuuden osalta linjan 2 tilanne ei ole yhtä hyvä oppimisryhmän alueella kuin linjalla 1, jossa toiminnan aikaisen melulla $L_{eq.0.90}$ STI on 2 metrin etäisyydellä 0,89 kun linjalla 2 samalla etäisyydellä arvo on noin 0,80.

Peiteäänellä puheensiirtoindeksin arvoissa on tilanjakajan jälkeen havaittavissa samanlaista käyttäytymistä kuin linjalla 1, eikä STI laske alle arvon 0,06. Toiminnan aikaisen melulla $L_{eq.0.90}$, jonka kokonaisäänitaso on huomattavasti pienempi kuin peiteäänitasolla, puheensiirtoindeksi laskee tilanjakajan jälkeen arvoon 0,04, vaikka kokonaisäänitason perusteella voisi olettaa, että $L_{eq.0.90}$ tapauksessa puheensiirtoindeksi olisi kaikissa mallinnuspisteissä peiteäänitason tilannetta suurempi.

Linjan 2 tilanne vastaa tarkastelluista mallinnuslinjoista eniten luokkahuoneiden välistä tilannetta, jossa kahden oppimisryhmän välillä on väliseinä. Tuloksista huomataan, että väliseinällä on merkittävä vaikutus puheensiirtoindeksiin, joka tippuu keskimäärin noin 0,65 väliseinän vaikutuksesta. Väliseinän vaikutus puheenerotettavuuteen on niin merkittävä, että kahden työskentelyalueen välillä on mahdollista saavuttaa puheyksityisyys silloinkin, kun oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksi on 0,85.

Linjalla 3 on kaksi työskentelyaluetta, joita erottava tilanjakaja on ääntä eristävä verho. Kuvassa 24 on esitetty linjan 3 puheensiirtoindeksin tulokset eri taustaäänitasoilla.



Kuva 24. *Puheensiirtoindeksin vertailu eri taustaäänitasoilla linjalla 3. Tilanjakaja on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

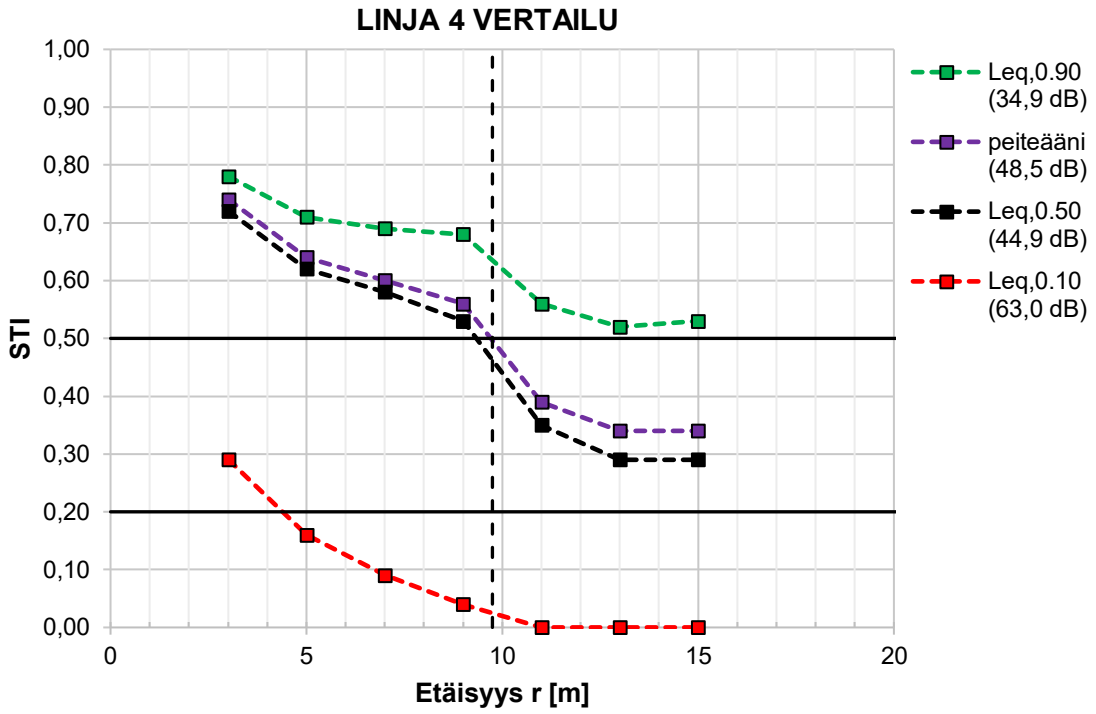
Toiminnan aikaisilla melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänellä oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksi on tavoiteltavissa arvoissa ja 3 metrin etäisyydellä puhujasta yli 0,70. Häiritsevyyssäde saavutetaan melutasolla $L_{eq.0.50}$ tilanjakajan kohdalla ja peiteäänitasolla hieman tilanjakajan jälkeen. Molemmissa tapauksissa puheensiirtoindeksi on alle arvon 0,50 8 metrin etäisyydellä. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.90}$ puheensiirtoindeksi ei laske mittauslinjalla alle arvon 0,50 eikä häiritsevyyssädettä saavuteta. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$ puheensiirtoindeksi on linjojen 1 ja 2 tavoin jo puhujan lähietäisyydellä alle häiritsevän arvon ja oppimistyölle kelvoton. Melutasolla $L_{eq.0.10}$ puheensiirtoindeksi on suurimmillaan 2 metrin etäisyydellä äänilähteestä 0,30 ja puheyksityisyys saavutetaan noin 4 metrin etäisyydellä.

Linjan 3 äänilähde sijaitsee linjan 2 tavoin avoimen oppimisympäristön suuressa ja avoimessa tilassa. Linjalla 3 äänilähde on kuitenkin hieman suojaisemmassa paikassa, jossa puhujan ympärillä on enemmän heijastavaa seinäpintaa eikä ääni pääse leviämään yhtä laajalle alueelle kuin linjan 2 tilanteessa. Äänilähteen sijainnin ja ympäröivän seinäpinnan vaikutus näkyy myös tuloksissa. Puheensiirtoindeksin arvo on 2 metrin etäisyydellä äänilähteestä kaikilla taustaäänitasoilla hieman suurempi linjalla 3 kuin linjalla 2, mikä riittää siihen, että melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla saavutetaan oppimisryhmäkohtainen STI:n tavoitearvo.

Linjalla 3 työskentelyalueita erottavan ääntä eristävän verhon vaikutus puheensiirtoindeksiin on toiminnan aikaisen melutasolla $L_{eq.0.90}$ noin 0,15 ja muilla taustaäänitasoilla noin 0,20. Tässä tapauksessa oppimiselle suotuisat puheenerotettavuuden olosuhteet voidaan saavuttaa ääntä eristävän verhon sekä oikeanlaisen taustaäänitason avulla, joka tässä tapauksessa vastaa käytettyä melutasoa $L_{eq.0.50}$ sekä peiteäänitasoa. Verhon vaikutus puheensiirtoindeksiin vastaa linjalla 1 tarkastellun verhon tuloksia ja molempien linjojen tapauksissa verho alentaa puheensiirtoindeksiä noin 0,20.

Linjalla 3 peiteäänitasolla ei ole havaittavissa kuvaajan muodon poikkeamaa toiminnan aikaisten melutasojen kuvaajiin verrattuna, kuten linjoilla 1 ja 2. Linjalla 3 puheensiirtoindeksin arvo ei kuitenkaan laske yhtä pieneksi kuin linjoilla 1 ja 2, joten kyseinen ilmiö saattaa ilmetä vain puheensiirtoindeksin pienillä arvoilla, eikä linja 3 ole linjojen 1 ja 2 tässä tilanteessa täysin vertailukelpoinen.

Linjan 4 äänilähde sijaitsee avoimen oppimisympäristön avoimen tilan laidalla. Linjalla 4 on yksi tilanjakaja, joka erottaa avoimen tilan ja linjan päässä sijaitsevan työskentelyalueen toisistaan. Tiloja erottava tilanjakaja on ääntä eristävä verho. Kuvassa 25 on esitetty puheensiirtoindeksi linjalla 4 eri taustaäänitasoilla.



Kuva 25. *Puheensiirtoindeksin vertailu eri taustaäänitasoilla linjalla 4. Tilanjakaja on esitetty kuvassa pystykatkoviivalla.*

Kuvan 25 perusteella puheensiirtoindeksin oppimisryhmäkohtainen tavoitearvo saavutetaan toiminnan aikaisilla melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänellä. Kun huomioidaan mallinnustulosten olevan hieman todellisia arvoja suurempia äänilähteen lähietäisyydellä, ei oppimisryhmäkohtaista puheenerotettavuutta saavuteta todennäköisesti kuin melutasolla $L_{eq.0.90}$, jolla STI on 3 metrin etäisyydellä äänilähteestä 0,78. Toiminnan aikaisen melutason $L_{eq.0.10}$ tilanne vastaa linjojen 1–3 tilanteita eikä oppimiselle suotuisia oppimisryhmäkohtaisia puheenerotettavuuden olosuhteita saavuteta tässäkään tapauksessa. Melutasolla $L_{eq.0.10}$ puheensiirtoindeksi on suurimmillaan 3 metrin etäisyydellä äänilähteestä 0,29 ja puheyksityisyys saavutetaan 4,5 metrin etäisyydellä äänilähteestä.

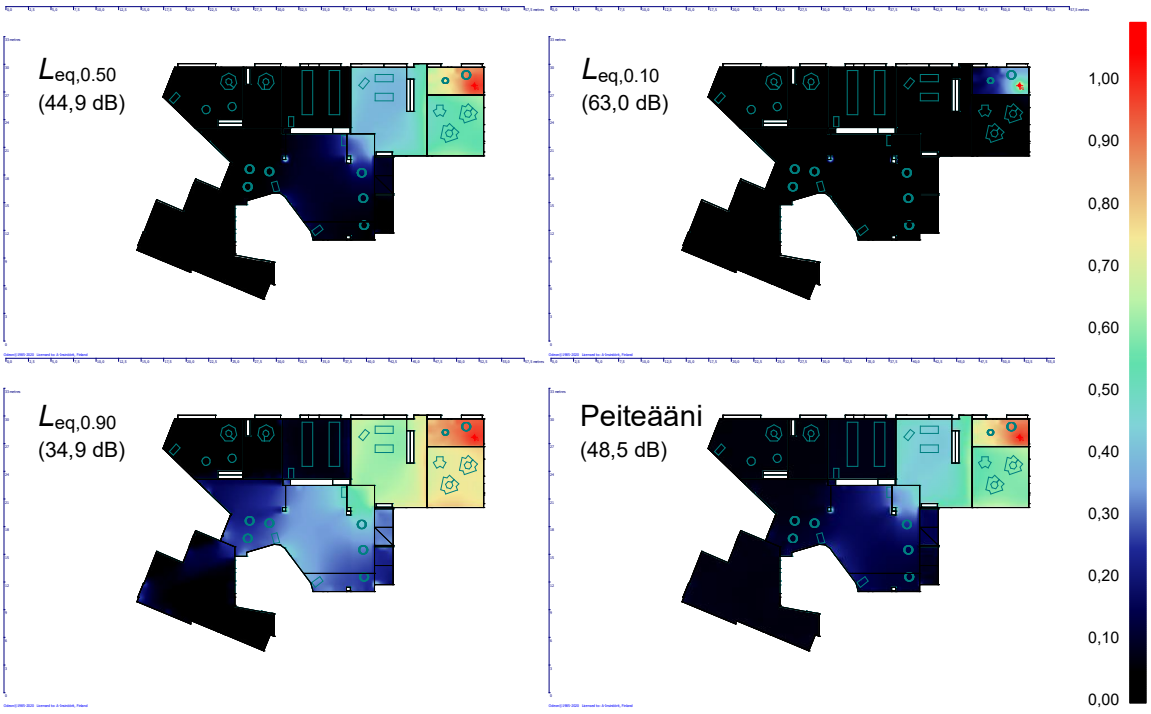
Linjan 4 tilanteessa puheensiirtoindeksi pienenee etäisyyden suhteen tilanjakajaan saakka, joka sijaitsee noin 10 metrin etäisyydellä äänilähteestä. Mittaustulosten perusteella STI ei kuitenkaan pienene lineaarisesti tällä matkalla vaan ensimmäisen ja toisen mallinnuspisteen välissä tapahtuu merkittävästi suurempi pudotus kuin seuraavien pisteiden välillä. Tuloksista on havaittavissa äänilähteen fyysisen ympäristön vaikutus, sillä äänilähteen ympärillä ei ole samalla tavalla heijastavaa pintaa kuin esimerkiksi linjan 1 äänilähteen. Avoimen tilan vuoksi ääni leviää laajemmalle alueelle kuin linjan 1 tapauksessa eikä kohdistu pelkästään oppimisryhmälle. Tuloksista nähdään, ettei puheensiirtoindeksi laske melutason $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänen tapauksessa alle arvon 0,50 ennen 10 metrin päässä sijaitsevaa tilanjakajaa ja melutasolla $L_{eq.0.90}$ puheensiirtoindeksi ei laske

tämän arvon alle koko linjan alueella. Avoimen tilan alueella ei siis saavuteta oppimisryhmien välistä puheensiirtoindeksin tavoitearvoa melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänitasolla. Ainoat oppimisryhmien väliset puheensiirtoindeksin tavoitearvot saavutetaan melutason $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänen tilanteissa tilanjakajan jälkeen. Puheensiirtoindeksi putoaa tilanjakajana toimivan ääntä eristävän verhon yli melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla noin 0,15. Melutason $L_{eq.0.90}$ tilanteessa muutos on noin 0,10.

Melutasolla $L_{eq.0.90}$ puheensiirtoindeksin arvossa havaitaan kasvua linjan loppupäässä, jossa mallinnuspisteen 28 arvo on suurempi kuin mallinnuspisteen 27 arvo. Tämä johtuu luultavimmin linjan takaseinästä heijastuvasta äänestä, jolloin puheen äänenpainetaso on seinän läheisyydessä suurempi kuin muutaman metrin päässä olevan mallinnuspisteen 27 kohdalla ja puhe on tällöin hieman selkeämpää. Samaa ilmiötä ei esiinny muiden taustaäänitasojen yhteydessä todennäköisesti siksi, että niiden tapauksissa taustaäänitaso peittää alleen heijastuvan äänen.

4.2 Puheensiirtoindeksi avoimessa oppimisympäristössä

Käytetyistä mallinnuslinjoista linjat 1 ja 4 edustavat avoimen oppimisympäristön kahta erilaista tapausta. Linjalla 1 äänilähde on muista työskentelyalueista tilanjakajilla erotetulla alueella, joka sijaintinsa puolesta melko hyvin suojassa muiden alueiden toiminnalta. Linjan 4 äänilähde on puolestaan oppimisympäristön avoimessa tilassa, jossa työskentelevien ryhmien välillä ei ole ääntä eristäviä rakenteita. Kuvassa 26 on esitetty linjan 1 äänilähteen puheenerotettavuuden muutos avoimen oppimisympäristön alueella tarkastelluilla taustaäänitasoilla.



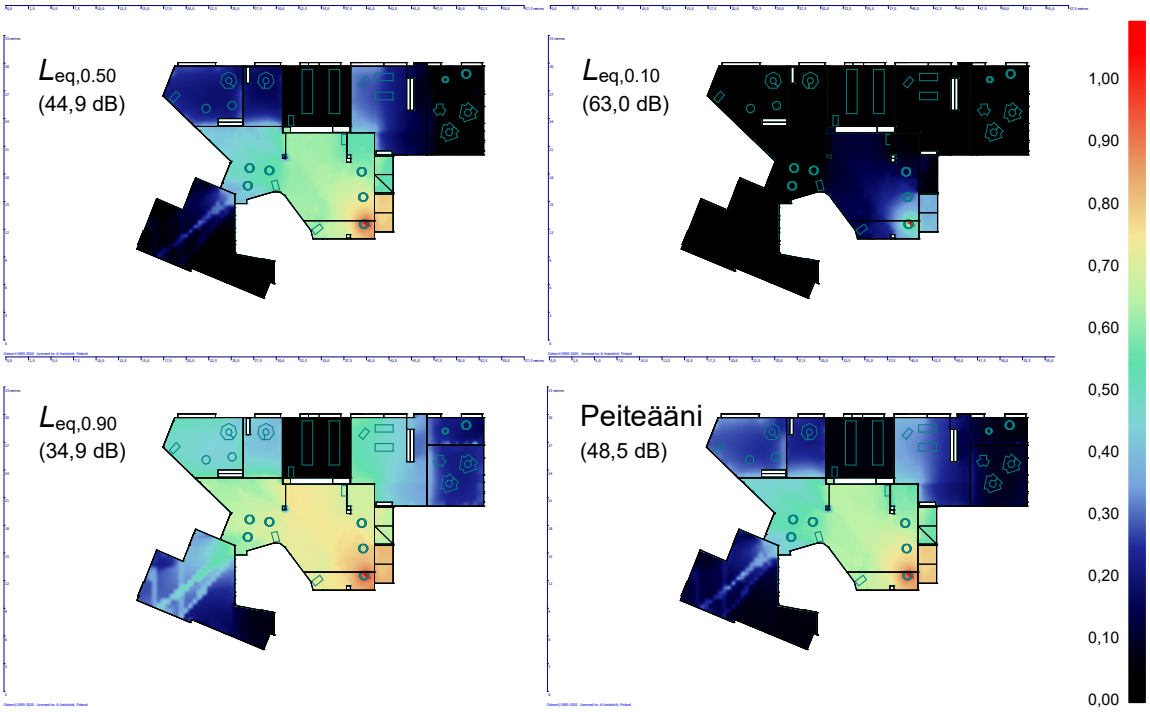
Kuva 26. *Linjan 1 äänilähteen puheenerotettavuus avoimessa oppimisympäristössä. Äänilähde sijaitsee pohjakuviin nähden oikeassa ylänurkassa.*

Kuvan 26 tulokset tukevat linjakohtaisen tarkastelun tuloksia. Värikarttoja tarkastellessa huomataan, että toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$ puhe on selkeää ainoastaan äänilähteen kohdalla ja jo alle 3 metrin etäisyydellä STI laskee arvoon 0,00. Värikartta on muilla työskentelyalueilla musta, jolloin STI on näillä alueilla 0,00. Toiminnan aikaisen melun $L_{eq.0.90}$ tapauksessa värikartasta nähdään, että STI on kohderyhmän työskentelyalueella yli 0,80 ja viereisillä työskentelyalueilla välillä 0,60–0,70. Oppimisympäristön avoimella alueella STI on suurimmillaan välillä 0,60–0,70 ja lähes koko alueella yli arvon 0,20. Toiminnan aikaisen melun $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänen tilanteet vastaavat kuvan 26 perusteella melko paljon toisiaan, mutta peiteäänellä puheen vaikutusalue ulottuu hieman kauemmaksi. Molemmissa tapauksissa huomataan, että STI on kohderyhmän alueella yli 0,70 ja laskee tavoiteltavaan arvoon (alle 0,50) viereisellä vasemmanpuoleisella työskentelyalueella. Molemmissa tilanteissa huomataan kuitenkin, että kuvassa 26 kohderyhmän alapuolella olevalla työskentelyalueella STI on yli 0,50, jolloin puhe on häiritsevää. Nämä työskentelyalueet on erotettu toisistaan ääntä eristävällä verholla.

Kuvasta 26 nähdään myös, että lasisen tilanjakajan takana olevalla työskentelyalueella STI on kaikkien taustaäänitasojen tapauksessa 0,00. Puolestaan ääntä eristävällä verholla ei ole näin suurta vaikutusta puheensiirtoindeksin arvoon. Toiminnan aikaisen melun $L_{eq.0.90}$ tapauksessa huomataan, että puhe on avoimella alueella kahden verhon jälkeenkin vielä häiritsevää: 15 metrin etäisyydellä lähes 0,70.

Oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksin tavoitearvo saavutetaan toiminnan aikaisilla melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänitasolla. Tavoitellut työskentelyalueiden väliset puheensiirtoindeksin arvot saavutetaan toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$ sekä peiteäänellä, mutta ainoastaan kohderyhmän vasemmalla puolella olevalla työskentelyalueella. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$ ei saavuteta puheensiirtoindeksin osalta suotuisia arvoja.

Kuvassa 27 on esitetty puolestaan linjan 4 äänilähteen puheenerotettavuuden muutos avoimen oppimisympäristön alueella eri taustaäänitasoilla.



Kuva 27. *Linjan 4 äänilähteen puheenerotettavuus avoimessa oppimisympäristössä. Äänilähde sijaitsee pohjakuviin nähden oikeassa alanurkassa.*

Kuvan 27 tulokset poikkeavat tarkastelutavasta riippuen hieman linjan 4 mallinnuspisteiden tuloksista. Kuvan 27 tulosten perusteella oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksin tavoitearvo äänilähteen ympärillä saavutetaan toiminnan aikaisilla melutasoilla $L_{eq.0.50}$ ja $L_{eq.0.90}$ sekä peiteäänitasolla. Melutason $L_{eq.0.90}$ tilanteessa STI on kohderyhmän alueella noin 0,80. Melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla oppimisryhmäkohtainen STI hieman yli 0,70. Kuvan 27 perusteella on kuitenkin tulkinnan varaista, saavutetaanko tavoitearvoa 0,70 3 metrin etäisyydellä vai onko arvo tällä etäisyydellä jo alle 0,70.

Tuloksia tarkastellessa huomataan myös, että äänilähteen vaikutusalue on laajempi, kuin linjan 1 äänilähteen tilanteessa. Puheen vaikutusalue ulottuu toiminnan aikaisen melutason $L_{eq.0.50}$ sekä peiteäänen tilanteissa avoimesta tilasta yhdellä verholla erotetuille työskentelyalueille, mutta kahden verhon takana olevilla alueilla puhe on yksityistä.

Yhden verhon takana olevilla työskentelyalueilla STI vaihtelee välillä 0,25–0,35, jolloin puhe ei häiritse näillä alueilla työskenteleviä oppimisryhmiä. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.90}$ yhden verhon takana olevilla työskentelyalueilla STI on lähellä arvoa 0,50, ja puhe saattaa joillakin alueilla olla häiritsevää. Melutasolla $L_{eq.0.90}$ puheen vaikutusalue ulottuu myös kahden verhon takana oleville työskentelyalueille, mutta näillä alueilla puhe ei enää ole häiritsevää ja STI on noin 0,25. Muista avoimen oppimisympäristön alueista väliseinällä ja lasisilla tilanjakajilla erotetulla työskentelyalueella puhe ei ole millään taustaäänitasolla kuultavissa ja STI on 0,00.

Avoimessa tilassa – jossa äänilähde sijaitsee – oppimisryhmien välillä ei ole tilanjakajia. Kuvasta 27 nähdään, että ääni pääsee leviämään vapaasti avoimen tilan alueella ja puheensiirtoindeksin arvo pienenee tilan alueella etäisyyden suhteen melko vähän, mutta tasaisesti. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla STI on avoimessa tilassa pienimmillään noin 0,50 ja melutason $L_{eq.0.90}$ tilanteessa STI on koko avoimen tilan alueella yli 0,60. Kaikissa näissä tilanteissa puhe on toisten avoimessa tilassa työskentelevien oppimisryhmien alueella häiritsevää eikä oppimisryhmien välistä puheensiirtoindeksin tavoitearvoa saavuteta. Toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.10}$ tulokset vastaavat linjan 1 äänilähteen tilannetta. Tilassa vallitseva taustaäänitaso niin suuri, ettei oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksin tavoitearvo toteudu millään avoimen oppimisympäristön alueella.

Oppimisryhmien välistä puheensiirtoindeksin tavoitearvoa tarkastellessa kuvan 27 tilanteet eri taustaäänitasoilla vastaavat linjakohtaisen tarkastelun tuloksia. Avoimessa tilassa STI:n arvo ei pienene etäisyyden suhteen tarpeeksi, että oppimisryhmien välillä saavutettaisiin tavoiteltavat puheenerotettavuuden olosuhteet. Avoimesta tilasta tilanjakajilla erotetuilla työskentelyalueilla nämä arvot saavutetaan melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla. Kuvan 27 perusteella oppimistyölle suotuisimmat olosuhteet saavutetaan toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$, jolla toisten avoimessa tilassa työskentelevien oppimisryhmien alueella STI on lähimpänä arvoa 0,50 samalla kun oppimisryhmäkohtainen STI:n tavoitearvo toteutuu. Oppimisryhmäkohtainen STI:n arvo on tässä tilanteessa kuitenkin juuri ja juuri tavoitearvoissa, joten tilanne ei ole kovin optimaalinen.

Kuvien 26 ja 27 tuloksia vertaillessa voidaan todeta, että tilanjakajilla erotetuilla työskentelyalueilla sekä tavoiteltavat oppimisryhmäkohtaiset että oppimisryhmien väliset STI:n tavoitearvot toteutuvat paremmin. Kuvan 27 tilanteessa puheensiirtoindeksi äänilähteen lähietäisyydellä on selkeästi pienempi kuin kuvan 26 tilanteessa. Kuvan 26 tilanteessa puheensiirtoindeksin arvo pienenee myös tehokkaammin työskentelyalueiden välillä tilanjakajien ansiosta ja puheenerotettavuuden olosuhteet ovat oppimisryhmien välillä pa-

remmin oppimistyölle soveltuvat. Tuloksista huomataan, että äänilähteen sijainti ja fyysinen ympäristö vaikuttavat olennaisesti siihen, saavutetaanko tavoiteltavat puheenerotettavuuden olosuhteet oppimisympäristön alueella.

Molempien äänilähteiden tilanteissa toiminnan aikaisella melutasolla $L_{eq.0.50}$ ja peiteäänitasolla saavutetaan kokonaisuudeltaan oppimisympäristölle soveltuvimmat puheensiirtoindeksin olosuhteet. Kuvan 26 tilanteessa, jossa äänilähteenä toimii linjan 1 äänilähde, näillä taustaäänitasoilla saavutetaan toimivat ja oppimistyötä tukevat olosuhteet. Toimivien olosuhteiden toteutumiseen vaikuttaa olennaisesti työskentelyalueiden väliset tilanjakajat sekä alueiden suojainen sijainti.

4.3 Epätarkkuustekijät

Tulosten tarkastelussa huomioitavia epätarkkuustekijöitä ovat muun muassa lähtötietojen ja laskentaohjelman epätarkkuus, laskennan yksinkertaistamisen vuoksi tehdyt oletukset sekä käytettyjen laskentamenetelmien todenmukaisuus.

Epätarkkuutta on voinut syntyä jo mittaustilanteessa, kun tutkimuksen aineistona käytettäviä äänitasoja ja huoneakustisia mittalukuja on mitattu. Mittaustilanteen epätarkkuuksiin kuuluu mitattujen äänitasojen ja huoneakustisten mittalukujen lisäksi muun muassa mittauspisteiden sijainnit. Myös oletus, että toiminnan aikainen melutaso noudattaa spektriltään standardissa ISO 3382-3 määritettyä normaalin puheen äänitehotason spektriä lisää tulosten epävarmuutta. Todellisuudessa toiminnan aikainen melu ei välttämättä vastaa oktaavikaista-arvoiltaan tätä käytettyä spektriä, sillä lasten tuottama ääni on todennäköisesti hieman korkeataajuisempaa, kuin käytetty normaalin puheen äänitehotaso.

Huoneakustisen tietokonemallinnuksen epätarkkuutta lisää puolestaan mallin sovitusvaiheessa määritetyt materiaaliparametrien arvot sekä laskennan yksinkertaistamiseksi tehty oletus, että tilassa vallitseva taustaäänitaso on koko avoimen oppimisympäristön alueella yhtä suuri. Tämä ei vastaa täysin todellista tilannetta, jossa taustaäänitaso saattaa vaihdella oppimisympäristön alueella siellä työskentelevien ryhmien aktiviteettien mukaan. Esimerkiksi hiljaisten ryhmien alueella taustaäänitaso ei ole yhtä suuri kuin kovaäänisempien ryhmien alueella. Mallinnustuloksiin vaikuttaa myös laskenta-asetusten tarkkuus, esimerkiksi laskennassa seurattujen äänisäteiden määrä, jonka arvo määritetään ennen laskentaa. Myös mittaus- ja mallinnustilanteiden poikkeavuus toisistaan lisää tulosten epätarkkuutta.

5. YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella puheenerotettavuutta toiminnan aikaisen melutason sekä peiteäänitason tilanteissa erilaisilla avoimen oppimisympäristön alueilla. Erityisenä tarkastelun kohteena oli oppimisryhmäkohtaisen ja oppimisryhmien välisen puheensiirtoindeksin tavoitearvojen toteutuminen eri taustaäänitasoilla. Tulosten avulla oli tarkoitus tarkastella, toteutuuko oppimistyölle suotuisat puheenerotettavuuden tavoitearvot näissä tilanteissa sekä määrittää, millaisella taustaäänitasolla ja tilaratkaisuilla voidaan saavuttaa oppimistyölle suotuisat puheenerotettavuuden olosuhteet. Tarkasteltujen toiminnan aikaisten melutasojen tilanteet kuvaavat kolmea toisistaan poikkeavaa tilannetta avoimessa oppimisympäristössä. Avoimessa oppimisympäristössä työskentelevistä oppimisryhmistä ja niiden aktiviteeteista riippuen toiminnan aikainen melu voi olla vaihdella tarkasteltujen tilanteiden välillä. Toiminnan aikaisten melutasojen lisäksi taustaäänitasona käytettiin A-painotetulta keskiäänitasoltaan toiminnan aikaisen melutason mediaaniarvon kanssa vertailukelpoista peiteäänitasoa.

Avoimessa oppimisympäristössä puheenerotettavuutta tulee tarkastella sekä oppimisryhmän alueella että oppimisryhmien välillä. Puheen tulisi olla oppimisryhmän alueella selkeää ja kuuluvaa, mutta se ei saisi olla viereisten oppimisryhmien alueilla oppimistyötä häiritsevää. Näiden kahden tilanteen saavuttaminen samanaikaisesti osoittautui tilanjakajilla erotettujen työskentelyalueiden välillä haasteelliseksi ja avoimen oppimisympäristön avoimessa tilassa käytännössä mahdottomaksi.

Tuloksista oli nähtävissä, että avoimessa tilassa puhe leviää paljon vapaammin toisten oppimisryhmien työskentelyalueelle kuin tilanjakajilla erotettujen alueiden tapauksessa. Sen lisäksi puheenerotettavuuden havaittiin olevan avoimessa tilassa selkeästi huonompi puhujan lähietäisyydellä kuin tilanjakajilla erotetuilla työskentelyalueilla. Jotta avoimessa tilassa saavutettaisiin oppimista tukeva oppimisryhmäkohtainen puheenerotettavuus, tulisi toiminnan aikaisen melun olla keskiäänitasoltaan pienempi kuin 45 dB. Tällä toiminnan aikaisella melutasolla puheen havaittiin kuitenkin olevan häiritsevää lähes koko avoimen tilan alueella, jonka perusteella voidaan todeta, että avoimessa oppimisympäristössä ei voida saavuttaa oppimiselle suotuisia puheenerotettavuuden arvoja ilman työskentelyalueita erottavia tilanjakajia.

Siirrettävien huonekalujen ja tilanjakajien avulla avoimessa tilassa työskentelevien oppimisryhmien välillä voitaisiin mahdollisesti saavuttaa joiltakin osin oppimiselle suotuisat olosuhteet puheenerotettavuuden osalta. Tällöin tilassa vallitsevan taustaäänitason tulisi

olla sellainen, että oppimisryhmäkohtainen puheensiirtoindeksin tavoitearvo saavutetaan juuri ja juuri. Siirrettävillä tilanjakajilla voitaisiin pyrkiä hallitsemaan puhujan äänen leviämistä toisten ryhmien työskentelyalueelle sen verran, ettei se olisi häiritsevää. Tältä osin avoin tila soveltuisi lähinnä sellaisiin työskentelytapoihin, joissa samanaikaisesti puhuvia on yksi. Avoin tila voisi myös sopia tilanteeseen, jossa toimittaisiin tiiviissä 2–3 hengen ryhmissä, jolloin voisi riittää, että puheenerotettavuuden tavoitearvo 0,70 saavutetaan noin 2 metrin etäisyydellä puhujasta. Tällöin toiminnan aikainen melutaso voisi olla suurempi kuin 45 dB ja puheen häiritsevyyssäde voitaisiin mahdollisesti saavuttaa ennen muiden samassa tilassa työskentelevien työskentelyalueita. Tämä tilanne vaatisi myös todennäköisesti siirreltäviä, tilanjakajina toimivia huonekaluja.

Tilanjakajilla erotettujen työskentelyalueiden välillä voidaan tulosten perusteella saavuttaa puheenerotettavuuden osalta tavoiteltavat tilanteen niin oppimisryhmäkohtaisesti kuin oppimisryhmien välillä. Avoimen tilan tavoin myös muualla avoimen oppimisympäristön alueella tarkasteltu toiminnan aikaisten melutasojen mediaaniarvo $L_{eq,0.50}$ osoittautui ikään kuin rajapinnaksi, jota suuremmalla keskiäänitasolla ei saavuteta oppimistyölle suotuisia puheenerotettavuuden oppimisryhmäkohtaisia arvoja. Toiminnan aikaisen melutason tulee siis olla keskiäänitasoltaan alle 45 dB, jotta olosuhteet olisivat puheenerotettavuuden osalta oppimistyölle sopivat ja puheensiirtoindeksin tavoitearvo 0,70 saavutetaan oppimisryhmän alueella.

Tavoiteltava oppimisryhmien välinen puheenerotettavuus voidaan tulosten perusteella saavuttaa, kun tilassa vallitsevan taustaäänitason ja tiloja erottavan tilanjakajan yhteisvaikutus puheensiirtoindeksin arvoon on riittävä. Ääntä eristävällä verholla puheensiirtoindeksin arvo putosi noin 0,20 työskentelyalueiden välillä ja taustaäänitasosta riippuen puheensiirtoindeksi putoaa myös etäisyyden suhteen. Jos oppimisryhmien välillä käytettävä tilanjakaja on ääntä eristävä verho, tulee toiminnan aikaisen melun olla välillä 40–45 dB, jotta tavoitellut olosuhteet saavutetaan. Keskiäänitasoltaan 35 dB toiminnan aikaisen melun tapauksessa havaittiin, että ääntä eristävällä verholla toisistaan erotetut oppimisryhmät häiritsevät toisiaan. Tällöin keskiäänitasoltaan noin alle 40 dB toiminnan aikaisella melulla oppimisryhmien välistä puheenerotettavuuden tavoitearvoa ei välttämättä saavuteta. Ääntä eristävän verhon tapauksessa ryhmien välinen puheenerotettavuuden tavoitearvo toteutuu varmemmin silloin, kun oppimisryhmät eivät työskentele aivan tilanjakajan lähietäisyydellä. Tällöin työskentelyalueiden tulisi olla sen verran suuria, että niillä työskentelevien ei tarvitse olla tilanjakajien välittömässä läheisyydessä. Parhain tilanjakajilla erotettujen työskentelyalueiden tilanne saavutettiin, kun tilanjakaja oli avattava lasinen tilanjakaja. Lasisella tilanjakajalla erotettujen työskentelyalueiden välillä

puheensiirtoindeksin havaittiin putoavan tilanjakajan yli noin 0,50, jolloin puheenerotettavuuden tavoitearvo saavutetaan jo pelkästään tilanjakajan vaikutuksesta.

A-painotetulla keskiäänitasoltaan 42 dB peiteäänellä saavutettiin hyvin samankaltaiset olosuhteet kuin toiminnan aikaisen melun mediaaniarvolla, jonka A-painotettu keskiäänitaso on 41,5 dB. Peiteäänellä saavutettiin tavoiteltava oppimisryhmäkohtainen puheenerotettavuus ja puhe oli kaikkien mallinnuksessa käytettyjen äänilähteiden tilanteessa selkeää 3 metrin etäisyydellä. Tulosten perusteella oppimisryhmien välillä tavoiteltu puheenerotettavuus voidaan saavuttaa myös peiteäänen tapauksessa tilanjakajien avulla. Ympäristöministeriön ohjeessa (2019) ehdotettu peiteäänitaso avoimeen oppimisympäristöön on A-painotetulta keskiäänitasoltaan välillä 35–40 dB. Tässä tapauksessa käytettyä 42 dB peiteääntä pienemmällä peiteäänitasolla voisi olla vaikeaa saavuttaa oppimisryhmien välistä tavoitearvoa, sillä peiteäänen havaittiin vaikuttavan vähemmän puheensiirtoindeksiin kuin toiminnan aikaisen melun. Näin myöskään ehdotetulla 35–40 dB peiteäänitasolla ei välttämättä saavuteta tavoiteltavaa oppimisryhmien välistä tilannetta puheensiirtoindeksin osalta. Jos tilassa vallitseva taustaäänitaso muodostuu pelkästään peiteäänestä, työskentelyalueiden välille tarvittaisiin todennäköisesti ääntä eristävää verhoa ääneneristävyydeltään parempi tilanjakaja. On kuitenkin huomioitava, että avoimessa oppimisympäristössä vallitseva taustaäänitaso koostuisi todellisuudessa myös siellä työskentelevien aiheuttamasta toiminnan aikaisesta melusta eikä pelkästään käytettävästä peiteäänitasosta. Tällöin tilassa vallitseva taustaääni on peiteäänitasoa suurempi, ja puheensiirtoindeksin tavoitearvot voidaan mahdollisesti saavuttaa, kun alueet on erotettu toisistaan tilanjakajilla. Avoimessa tilassa on myös peiteäänen tapauksessa vaikeaa saada oppimisryhmien välille toimivia olosuhteita.

Tuloksista havaittiin myös, että taustaäänitason lisäksi puhujan sijainnilla ja fyysisellä ympäristöllä on vaikutus siihen, kuinka hyvä oppimisryhmäkohtainen puheenerotettavuus saavutetaan. Puheenerotettavuuden havaittiin olevan puhujan lähietäisyydellä parhaimmillaan silloin, kun puhujan sivuilla oli heijastavia pintoja. Huonoimmassa tilanteessa puhujan sivuilla ja takana ei ollut mitään heijastavaa pintaa. Heijastavan pinnan sijoittelu on kuitenkin tällaisessa ympäristössä haastavaa, sillä tilassa vallitsevaa melutasoa pitäisi pyrkiä pienentämään lisäämällä absorboivaa pintaa. Varsinkin avoimemmissa tiloissa, joissa työskentelee kerrallaan enemmän oppilaita, tulisi ääntä absorboivaa pintaa olla mahdollisimman paljon. Tältä osin avoimet tilat soveltuvatkin ehkä paremmin pari- ja pienryhmätyöskentelyyn kuin frontaaliopetukseen, jossa puhujan täytyisi tavoittaa puheellaan kerrallaan suurempi joukko.

LÄHTEET

Brogden, M. (1983). Open plan primary schools: Rhetoric and reality. School Organisation, 3(1), 27-41.

IEC, I. (2011). IEC 60268-16: International Standard: Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.

Klatte, M., Lachmann, T., & Meis, M. (2010). Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. Noise and Health, 12(49), 270. Saatavissa: (viitattu 2.11.2020) https://www.noiseandhealth.org/text.asp?2010/12/49/270/70506

Kuuskorpi, M. (2012). Tulevaisuuden fyysinen oppimisympäristö. Käyttäjälähtöinen muunneltava ja joustava opetustila. Saatavissa: (viitattu 22.11.2020) https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/76724/vaitoskirja2012Kuuskorpi.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Kylliäinen, M. & Valovirta, I. (2011). Opetustilojen huoneakustiikka – paluu juurille, Akustiikkapäivät 2011, Tampere, 11.–12.5., 2011.

Kylliäinen, M. & Pääkkönen, R. (2017). Ääniolosuhteet avoimissa oppimisympäristöissä. Akustiikkapäivät 2017. Espoo, 24.–25.8., Akustinen Seura ry, s. 21–26.

Kylliäinen, M. & Hongisto, V. (2019). Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. Ympäristöministeriö, s. 50.

Maclure, S. (1984). Educational development and school building: aspects of public policy, 1945-73. Longman Publishing Group.

Maxwell, L. E., & Evans, G. W. (2000). The effects of noise on pre-school children's pre-reading skills. Journal of environmental Psychology, 20(1), 91-97.

Mealings, K. T., Buchholz, J. M., Demuth, K. & Dillon, H. (2015). Investigating the acoustics of a sample of open plan and enclosed Kindergarten classrooms in Australia. Applied Acoustics, 100, 95–105.

Niemi, H. (2014). Helsingin kadonneiden 1800-luvun konserttitilojen mallinnus ja auralisointi (diplomityö). Saatavissa: (viitattu 11.9.2020) http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201412011559

Opetushallitus, O. P. H. (2016). Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014. Helsinki: Opetushallitus. Helsinki: Edita, 14–26. Saatavissa: (viitattu 11.9.2020) https://www.oph.fi/sites/default/files/documents/perusopetuksen_opetussuunnitelman_perusteet_2014.pdf

Pääkkönen, R., Vehviläinen, T., Jokitulppo, J., Niemi, O., Nenonen, S. & Vinha, J. (2015). Acoustics and new learning environment–A case study. Applied Acoustics, 100, 74–78.

Romula, S. (2020). Toiminnan aikaiset melutasot avoimessa oppimisympäristössä (kandidaatintyö). Saatavissa: (viitattu 11.9.2020) https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122402/SaanaRomula.pdf?sequence=2

Ronsse, L. M., & Wang, L. M. (2013). Relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement measured in eastern Nebraska. The Journal of the Acoustical Society of America, 133(3), 1480-1495.

Roy, N., Merrill, R. M., Thibeault, S., Gray, S. D., & Smith, E. M. (2004). Voice disorders in teachers and the general population. Journal of Speech, Language, and Hearing Research.

Sala, E., Laine, A., Simberg, S., Pentti, J., & Suonpää, J. (2001). The prevalence of voice disorders among day care center teachers compared with nurses: a questionnaire and clinical study. Journal of Voice, 15(3), 413-423.

Shield, B. & Dockrell, J. E. (2004). External and internal noise surveys of London primary schools. The Journal of the Acoustical Society of America, 115(2), 730–738.

Shield, B., Greenland, E. & Dockrell, J. (2010). Noise in open plan classrooms in primary schools: A review. Noise and Health, 12(49), 225.

SFS 5907 (2004). Rakennusten akustinen luokitus. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 36 s.

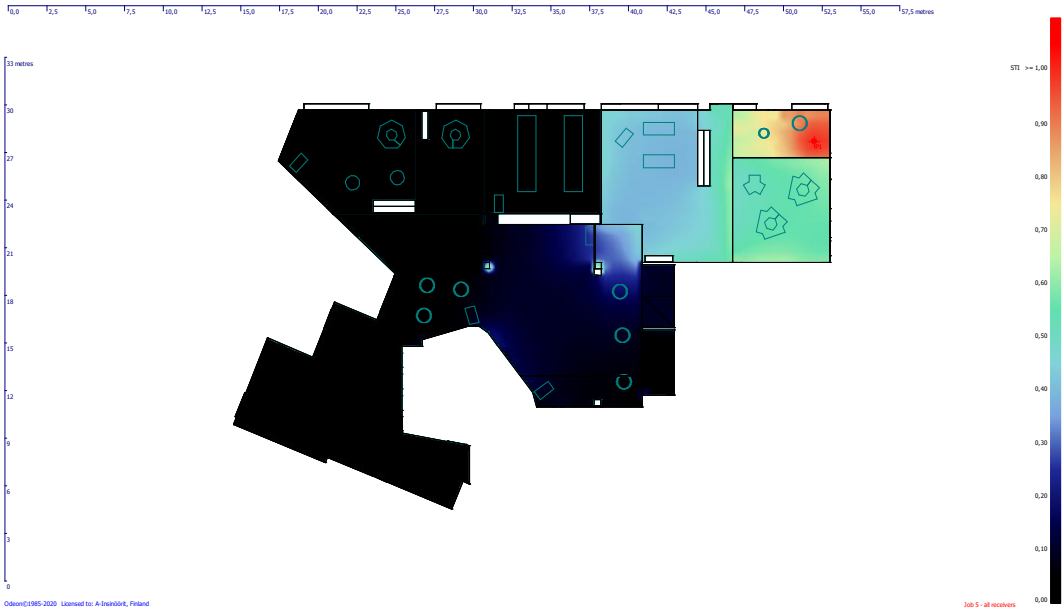
SFS-EN ISO 3382-1 (2009). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 15 s.

SFS-EN ISO 3382-3 (2012). Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki, 15 s.

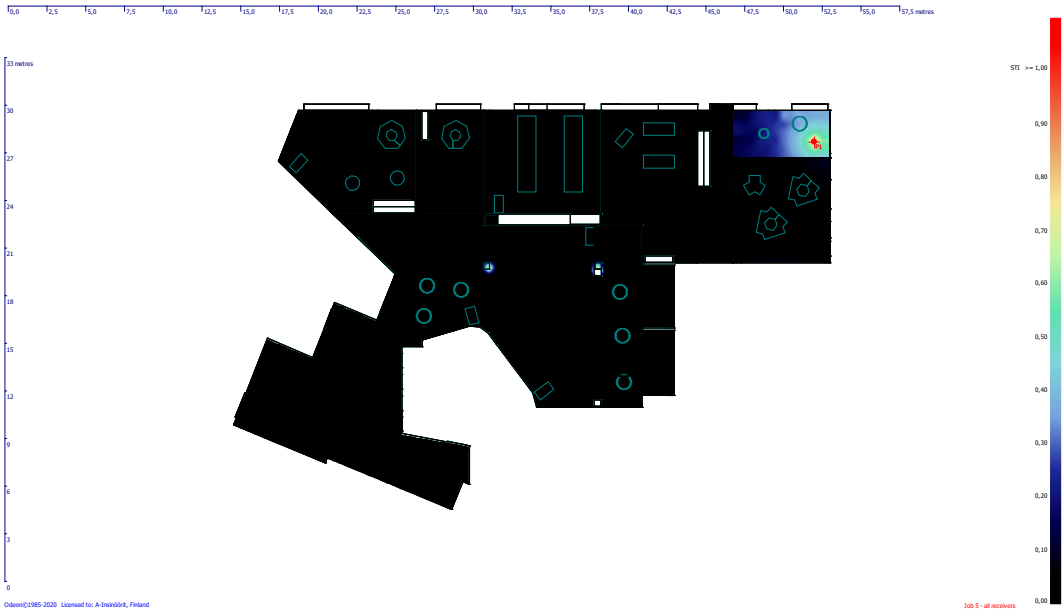
Valjakka, S., Latvanne, P. & Jokitulppo, J. (2018). 1610584.15 Oulun Hiukkavaaran monitoimitalo Mallitilan huoneakustiikka, mittausraportti. A-insinöörit.

LIITE 1: PUHEENSIIRTOINDEKSIN VÄRIKARTAT

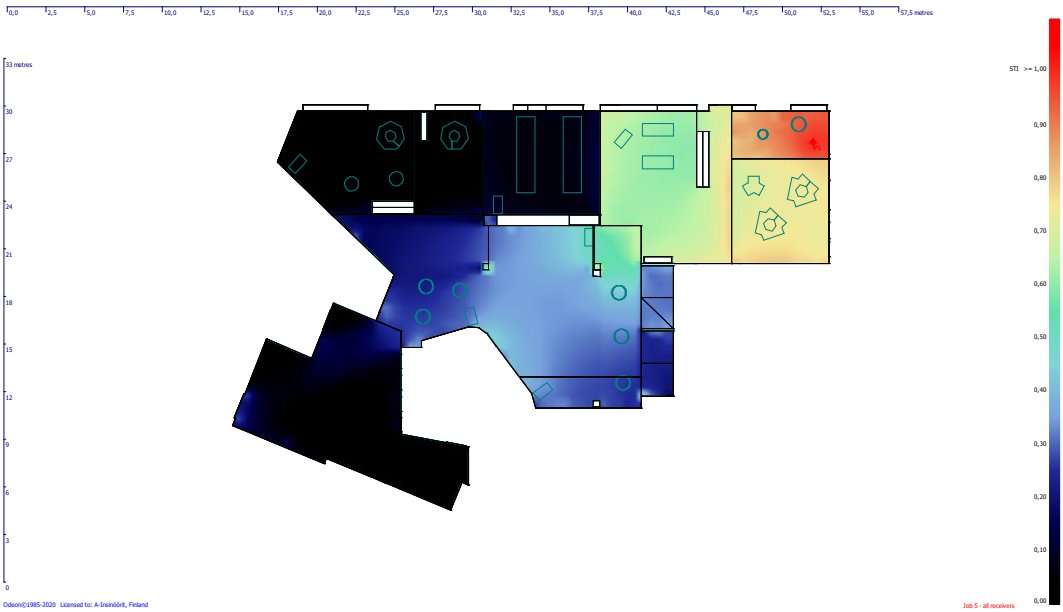
$L_{eq,0.50}$ (44,9 dB)



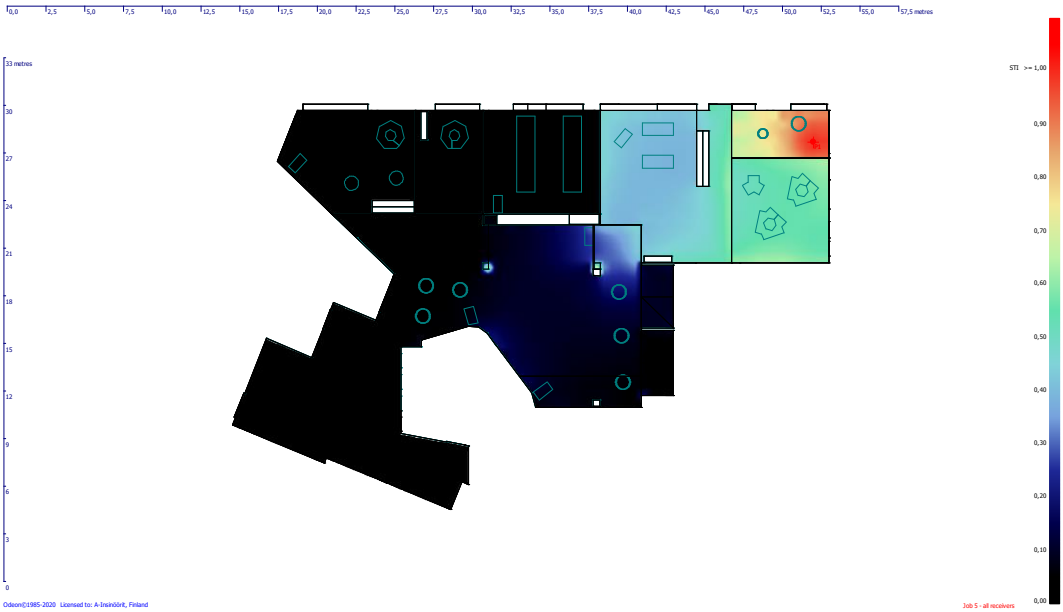
$L_{eq,0.10}$ (63,0 dB)



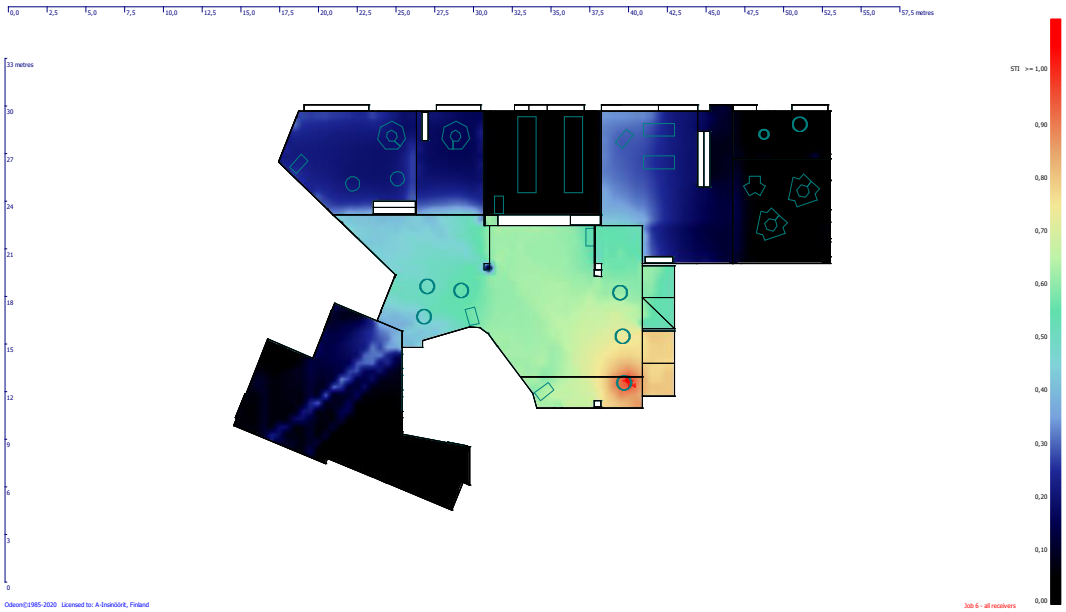
$L_{eq,0.90}$ (34,9 dB)



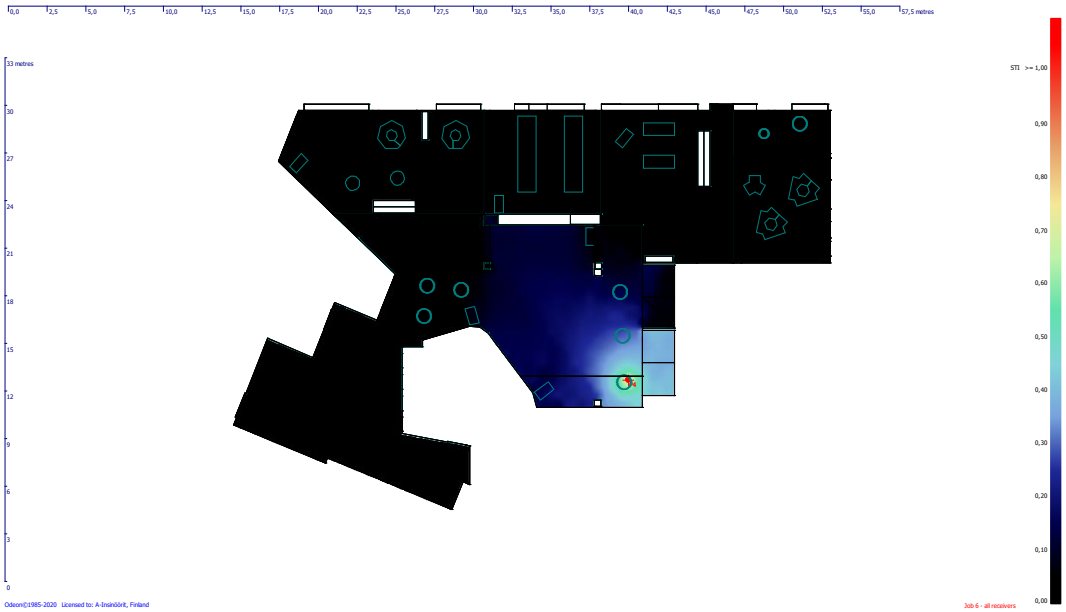
Peiteääni (48,5 dB)



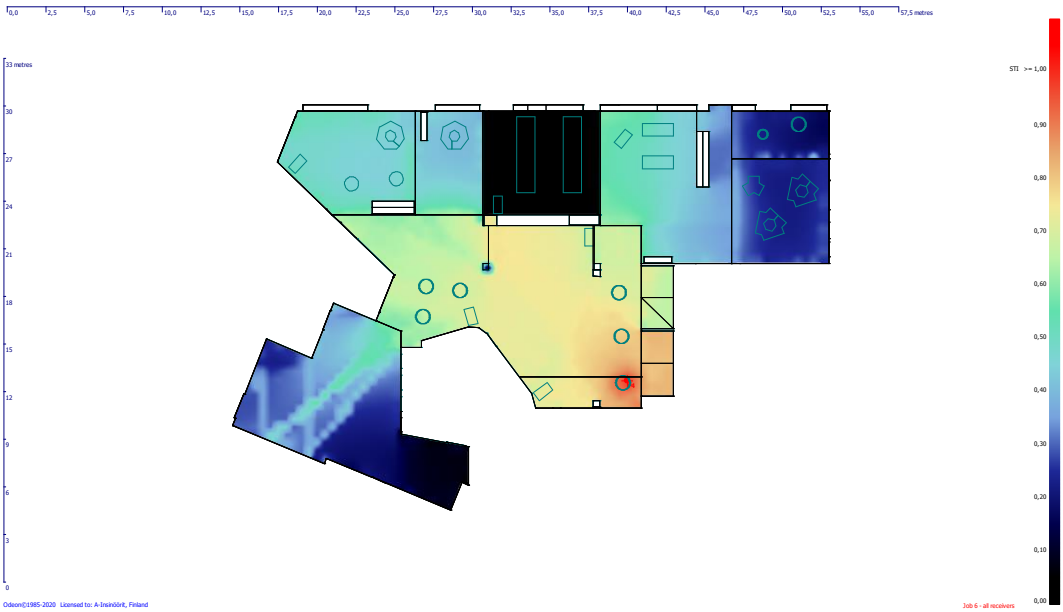
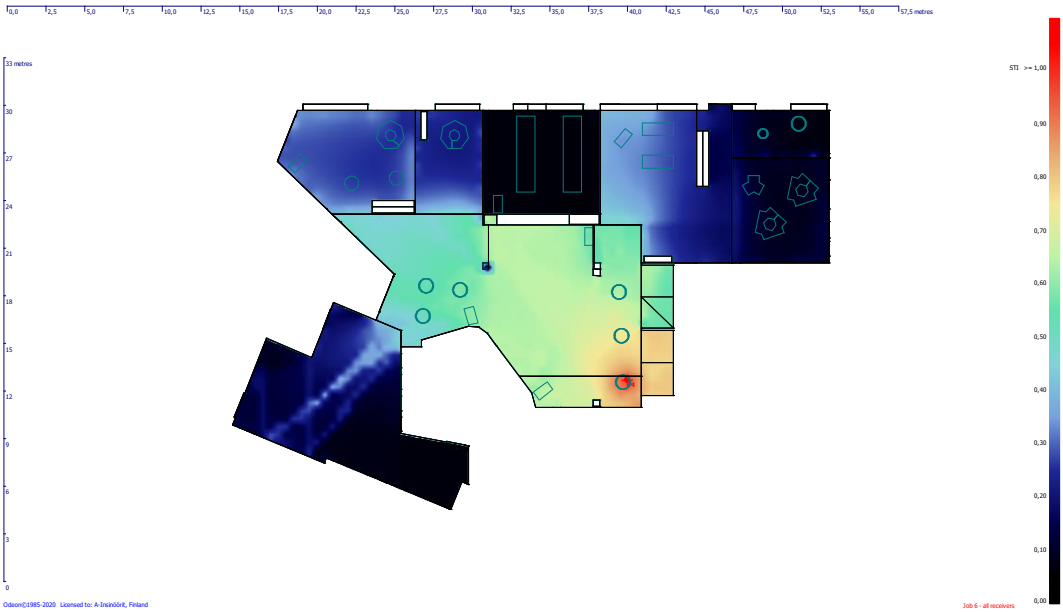
$L_{eq,0.50}$ (44,9 dB)



$L_{eq,0.10}$ (63,0 dB)



$L_{eq,0.90}$ (34,9 dB)



Peiteääni (48,5 dB)