

PUHEEN EROTETTAVUUDEN ENNUSTE- JA MITTAUSMENETELMÄT

Petra Larm, Valtteri Hongisto

Turun aluetyöterveyslaitos
Ilmastointi- ja akustiikkalaboratorio
Lemminkäisenkatu 14 – 18 B, 20520 Turku
petra.larm@ttl.fi, valtteri.hongisto@ttl.fi

1 JOHDANTO

Puheen erotettavuuden määrittäminen on erityyppisten työtilojen akustisessa suunnittelussa. Avotoimistoissa puheen erotettavuuden vaatimukset ovat hyvin erilaiset kuin esimerkiksi koululuokissa ja auditorioissa. Puhetiloihin puheen erotettavuuden tulisi olla mahdollisimman hyvä huoneen jokaisessa pisteessä, kun taas avotoimistoissa viereisistä työpisteistä ja käytäviltä kuuluvat puheäänit häiritsevät työntekijän keskittymistä, ja niitä pitäisi pyrkiä vaimentamaan akustisin ratkaisuin tai tilasuunnittelulla.

Puheen erotettavuutta kuvaavia, standardoituja fysikaalisia suureita ovat mm. puheensirtoindeksi STI ja sen yksinkertaistettu muoto RASTI (IEC 60268-16 1998) sekä puheen erotettavuusindeksi SII (ANSI S3.5-1997). Näiden metodien käyttöä akustisessa suunnittelussa tulisi lisätä, koska muut melusuureet eivät ole riittäviä kuvaamaan puheen akustiikkaa. Tämän työn tarkoituksena oli vertailla kokeellisesti STI-, RASTI- ja SII-menetelmiä sekä niiden määrittämiseksi suunniteltuja mittauslaitteita erilaisissa kaiunta- ja taustameluolosuhteissa. Lisäksi tutkittiin, kuinka hyvin puheen erotettavuutta voidaan ennustaa tarkastelupisteen varhaisen jälkikaiun (T₁₀) ja puhekohinasuhteen avulla. Puheen subjektiivisen erotettavuuden riippuvuutta STI-arvoista tutkittiin kuuntelukokeiden avulla.

2 MITATTAVAT SUUREET

Speech Transmission Index eli STI:n määrittäminen perustuu ns. modulaatiosirtofunktion (MTF), joka kuvaa missä määrin puhesignaalin intensiteetin vaihtelut vaimenevat taajuuden funktiona erilaisten häiriöiden kuten kaiun ja taustamelun vaikutuksesta. STI:n laskennassa oktaavikaistoilla 125 Hz – 8000 Hz määritetyt modulaatiosirtofunktiot muutetaan ns. näennäisiksi puhekohinasuhteiksi, ja lopulta yhdeksi puheen erotettavuutta kuvaavaksi tunnusluvuksi painottamalla puheen erotettavuuden kannalta tärkeimpiä taajuuskaistoja. STI saa arvoja väliltä 0 – 1; arvo 1 vastaa täydellistä ja 0 täysin kelvotonta puheen erotettavuutta.

Rapid Speech Transmission Index eli RASTI on yksinkertaistettu muoto STI:stä. RASTI lasketaan vain 500 ja 2000 Hz:n oktaavikaistoja käyttäen.

Speech Intelligibility Index eli SII perustuu myös puhekohinasuhteen määrittämiseen tarkasteltavilla taajuuskaistoilla ja niistä laskettavaan painotettuun tunnuslukuun. SII lasketaan oktaavikaistoja 250 Hz – 8000 Hz käyttäen. Myös SII:n arvot ovat välillä 0 – 1.

Puheen erotettavuutta voidaan mitata myös *subjektiivisten kuuntelukokeiden* avulla. Niissä koehenkilöt kuuntelevat esimerkiksi taustamelulla tai kaiunnalla sotkettua puhemateriaalia ja kirjoittavat ylös kuulemansa. Puheen erotettavuus lasketaan oikein kuultujen osasten eli tavujen, sanojen tai lauseiden prosenttina.

3 KOEJÄRJESTELY

Mittaukset suoritettiin Turun aluetyöterveyslaitoksen akustiikka- ja ilmastointilaboratorion kaiuntahuoneessa ja puolikaiuttomassa huoneessa.

3.1 Objektiiviset mittaukset

Mittauksia tehtiin seitsemällä eri jälkikaiunta-ajalla ja seitsemällä eri puhekohinasuhteen arvolla. Puhekohinasuhde tarkoittaa kaiuntaisen puheen tason ja taustamelun tason erotusta desibeleinä. Kullakin jälkikaiunta-ajan ja puhekohinasuhteen yhdistelmällä määritettiin STI-, RASTI- sekä SII-arvot kokeellisesti. Taulukossa 1 on esitetty mitattuja tilanteita vastaavat jälkikaiunnan ja puhekohinasuhteen yhdistelmät sekä suoritettavat kuuntelukokeet (ks. kappale 3.2). Mittaukset 1 – 6 suoritettiin kaiuntahuoneessa ja mittaus 7 puolikaiuttomassa huoneessa.

Taulukko 1: Mitattuja tilanteita vastaavat jälkikaiunnan ja puhekohinasuhteen S/N yhdistelmät sekä suoritettavat kuuntelukokeet (X).

Mittaus	EDT 500 Hz(s)	S/N (dB)						
		-15	-10	-5	0	5	10	15
1	3.1					X		
2	2.2							X
3	1.2			X				
4	0.9				X			
5	0.4		X				X	
6	0.3							
7	0.1							

Kaiuntahuoneen jälkikaiunta-aikojen säätämiseksi käytettiin absorptiomateriaalina eri kokoisia ja paksuisia lasivillalevyjä. Absorptiomateriaali pyrittiin asettelemaan tasaisesti, jotta jälkikaiunnasta tulisi mahdollisimman ideaalinen.

Taustameluolosuhteita muuteltiin soittamalla kaiuttimella taajuussuodatettua vaaleanpunaista peittokohinaa. Oikean puhekohinasuhteen säätämiseksi oli tarpeellista mitata puheen tasot oktaaveittain kullakin eri jälkikaiunta-ajalla, sillä huoneen kaiunta vahvistaa puhetta. Peittokohinan spektri säädettiin vastaamaan mitattua puheen spektriä. Näin puhekohinasuhde saatiin kaikilla taajuuskaistoilla samaksi.

Tilavuudeltaan 113 m³ olevan kaiuntahuoneen seinät, katto ja lattia ovat kovia. Diffuusin kentän aikaansaamiseksi huoneeseen oli asennettu kolme diffuusorilevyä. Puolikaiuton huone on tilavuudeltaan 77 m³. Sen seinät ja ovet on päällystetty 300 mm paksulla lasivillalla ja kattoon asennettu ääntä hyvin absorboivat akustiikkalevyt. Mikrofonit ja testisignaalikaiutit asetettiin molemmissa huoneissa 1.2 metrin korkeudelle ja 2.4 metrin etäisyydelle toisistaan siten, että kaiutin oli huoneen nurkassa ja mikrofoni keskemällä huonetta. Peittokohinakaiutin sijoitettiin lattialle.

STI- ja RASTI-arvot mitattiin MLS-menetelmällä WinMLS 2000 Pro/Room Acoustics -ohjelmistolla ilman peittokohinaa. STI-arvot taulukossa 1 olevilla puhekohinasuhteen arvoilla WinMLS määrittää laskennallisesti. Ohjelmiston lähettämä MLS-signaali soitettiin Genelec 1029A -aktiivikaiuttimella, ja vaste mitattiin reaaliaika-analysaattoriin (Norsonic Real-Time

Analyser RTA 840) yhdistetyllä ½”-n mikrofoniilla (Brüel&Kjær malli 4190). Analysaattorilta saatiin vahvistettu mikrofonisignaali takaisin pc:lle. WinMLS:llä mitattiin myös T₁₀-arvot.

RASTI-arvot mitattiin myös Brüel&Kjærin Speech Transmission Meter Type 3361 -laitteistolla, joka koostuu intensiteettimoduloidun kohinasignaalin lähetinosasta ja vastaanottimesta. Laitteisto määrittää RASTI-arvon mittaamalla kaiun ja taustamelun aiheuttaman testisignaalin intensiteetin modulaatioiden vaimentumisen. Kullakin jälkikaiun ja puhekohinasuhteen yhdistelmällä RASTI-arvo saatiin neljän mittauksen keskiarvona kokonaismittausajan ollessa 128 sekuntia.

SII-arvot määritettiin STI:n laskennassa saatujen näennäisten puhekohinasuhteiden avulla, jolloin myös kaiun vaikutus puheen erotettavuuteen saadaan huomioitua. Lisäksi laskentaa varten piti määrittää pelkän peittokohinan sekä yhdistetyn puheen ja peittokohinan tasot oktaavikaistoittain. Laskentaprosessi on kuvattu tarkemmin ANSI S3.5-1997 -standardissa.

3.2 Subjektiiviset kuuntelukokeet

Fysikaalisten kokeiden lisäksi suoritettiin kuuntelukoe, jossa mitattiin subjektiivinen puheen erotettavuus kuudella eri jälkikaiun ja peittokohinan yhdistelmällä (ks. taulukko 1). Kuuntelukokeessa käytetty puhemateriaali äänitettiin samoissa tilanteissa kuin fysikaalisetkin mittaukset tehtiin. Testimateriaalina käytettiin tavulistoja, jotka koostuivat 44:stä cvc- eli konsonanti-vokaali-konsonanti-tavusta. Tavulistat saatiin muodostamalla satunnaisia alkukonsonantin, vokaalin ja loppukonsonantin yhdistelmiä siten, että listassa esiintyy kuta kuinkin tasaisesti suomen kielen foneemeja. Kukin tavu esitettiin lauseen sisässä, jotta kaiun vaikutus tulisi esiin. Viittä erilaista lausetta käytettiin satunnaisessa järjestyksessä. Lauseita olivat esimerkiksi

- ”Kirjoita tavu met ylös.”
- ”Näyte los on seuraava tavu.”

Tavut tallennettiin lähes kaiuttomassa ja taustameluttomassa tilassa, jotta tavulistaa luettaessa puheen tason pitäminen vakiona olisi helpompaa. Naispuolisen puhujan etäisyys mikrofoniin oli noin kaksikymmentä senttimetriä. Lukunopeus oli noin yksi tavu neljässä sekunnissa.

Tallennetut tavulistat toistettiin kaiuntahuoneessa Genelec-kaiuttimen avulla. Kuuntelukokeen tavumateriaalin äänitys tapahtui binauraalisesti keinopään avulla (Brüel&Kjær malli 4100) DAT-nauhurille, jolta ne siirrettiin pc:lle äänenkäsittelyohjelman (Brüel&Kjær Sound Quality 7698) muokattavaksi. Keinopää oli sijoitettu siten, että sen pään keskipiste oli muissa mittauksissa käytetyn mikrofoniinmittauspisteen kohdalla. Äänenkäsittelyohjelman avulla lisättiin kaikuhuoneessa äänitettyyn tavumateriaaliin peittokohina, jonka spektri oli muokattu tietokoneella fysikaalisissa mittauksissa ollutta peittoa vastaavaksi. Peittokohina lisättiin ohjelmallisesti, koska näin se saatiin kuulumaan tasaisesti määräämättömästä suunnasta.

Kuuntelukokeisiin osallistui seitsemän normaalikuuloista henkilöä, joiden iät vaihtelivat 23 – 47 vuoden välillä. Kaiun ja taustamelua sisältävät tavulistat soitettiin kuulokkeiden avulla, ja kuuntelijoiden tehtävänä oli kirjoittaa ylös kuulemansa tavut. Kunkin tavulistan kokonaistasoksi säädettiin 59 dB(A). Kuuntelijoilla ei ollut aiempaa kokemusta vastaavista kuuntelukokeista. Heitä harjoitettiin 20 tavua sisältävän tavulistan kanssa ennen varsinaista

kuuntelukoetta. Kuuntelukokeet järjestettiin häiriöttömässä ja hiljaisessa huoneessa. Tavulistat soitettiin STI-arvojen mukaisessa järjestyksessä aloittaen suurinta STI-arvoa vastaavasta tavulistasta edeten pienintä STI-arvoa vastaavaan listaan.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

Kuvan 1 mukaan kaiuntahuoneen ollessa tyhjä (mittaus 1) varhaisten jälkikaiunta-aikojen erot olivat suuria eri taajuuskaistojen välillä. Absorptiomateriaalin lisääminen tasoitti jälkikaiunta-aikoja. Puolikaiuttomassa huoneessa (mittaus 7) kaiunta oli erittäin vähäistä.

Kuvassa 2 on esitetty WinMLS:llä mitatut STI- ja RASTI-arvot puhekohinasuhteen funktiona kullakin mittauksella. Eroa STI- ja RASTI-arvojen välillä esiintyy selvimmin suurilla puhekohinasuhteilla. Erot ovat suurimpia mittauksissa 1 ja 2, joissa varhaiset jälkikaiunta-ajat vaihtelivat selvästi eri taajuuskaistojen välillä. Muissa mittauksissa erot taajuuskaistojen jälkikaiunta-aikojen välillä olivat pienempiä, jolloin RASTI- ja STI-arvot olivat lähempänä toisiaan.

Kuvassa 3 nähdään WinMLS:llä mitattu STI-arvon käyttäytyminen mittauspisteen varhaisen jälkikaiunta-ajan funktiona eri puhekohinasuhteilla 500 Hz:n taajuuskaistalla. Mikäli huoneen jälkikaiunta on suhteellisen tasainen eri taajuuskaistojen välillä, voidaan tämän käyrästä avulla helposti arvioida tilan puheen erotettavuutta erilaisilla puhekohinasuhteilla, kun huoneen varhainen jälkikaiunta-aika kuuntelijan kohdalla tunnetaan.

RASTI-mittarilla ja WinMLS:llä mitatut RASTI-arvot vastasivat melko hyvin toisiaan sekä 500 Hz:n että 2 kHz:n kaistoilla. Vastaavuus oli parhaita puhekohinasuhteilla -10 dB...10 dB. Pienillä puhekohinasuhteilla Brüel&Kjærin RASTI-mittarilla saatiin jopa 0.1 yksikköä korkeampia arvoja kuin WinMLS:llä. Tämä johtuu RASTI-mittarin testisignaalin satunnaisesta luonteesta, jonka vuoksi RASTI-arvoa 0 ei käytännössä saavuteta. Vastaava ilmiö havaittiin suurilla puhekohinasuhteilla, joilla RASTI-mittarin arvot olivat pienempiä kuin WinMLS:llä mitatut.

STI- ja RASTI-arvot ennustettiin mitattujen puheen ja peittokohinan tasojen sekä T_{10} -arvojen avulla STI:n teorian mukaisesti viitteessä [1] kuvatulla tavalla. Ennustetut ja WinMLS:llä mitatut STI-arvot vastasivat hyvin toisiaan eron ollessa suurimmillaankin vain 0.03 yksikköä. Brüel&Kjærin RASTI-mittarilla mitatut arvot vastasivat myös hyvin ennustettuja arvoja. Eroa mitattujen ja ennustettujen arvojen välille syntyi jälleen aivan pienimmillä sekä suurimmilla puhekohinasuhteilla ollen suurimmillaan 0.06 yksikköä. Syynä oli jälleen RASTI-mittarin testisignaalin satunnainen luonne. Aidoissa huoneissa varhaiset jälkikaiunta-ajat voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi huoneen eri pisteissä, joten STI- ja RASTI-arvojen luotettava ennustaminen vaatii melko tarkkaa arviota jälkikaiunta-ajoista taajuuskaistoittain kuuntelijan kohdalla.

STI ja SII ovat määrittäytävältaan hyvin samantyyppisiä, sillä molemmat perustuvat puhekohinasuhteen määrittämiseen. SII ottaa huomioon korvan sisäisen melun sekä liian voimakkaan puheen esitystason huonontavan vaikutuksen puheen erotettavuuteen, mitä STI ei tee. Näiden tekijöiden merkitys on kuitenkin vähäinen normaaleilla puheen esitystasoilla. Tärkeämpiä eroa aiheuttavia tekijöitä ovat tarkasteltavien taajuuskaistojen erilainen painottaminen sekä se, että puheen erotettavuusindeksi ei huomioi laskennassa 125 Hz:n

oktaavikaistaa. Näilläkin tekijöillä ei ollut suurta vaikutusta: mitatut STI- ja SII-arvot vastasivat käytännössä toisiaan.

Kuvassa 4 on esitetty kuuntelukokeessa eri koehenkilöiden oikein kuulemat tavut prosentteina listan tavumäärästä listaa vastaavan STI-arvon funktiona. Lisäksi kuvaan on merkitty seitsemän koehenkilön keskimäärin oikein kuulemien tavujen prosentti kutakin tavulistaa vastaavalla STI-arvolla, sekä keskiarvopisteisiin sovitettu kolmannen asteen polynomi. Hajonta eri koehenkilöiden välillä oli pientä: Ero parhaimman ja huonoimman oikein kuultujen tavujen kokonaistuloksen välillä oli 11 tavua eli noin 4 % kaikista tavuista.

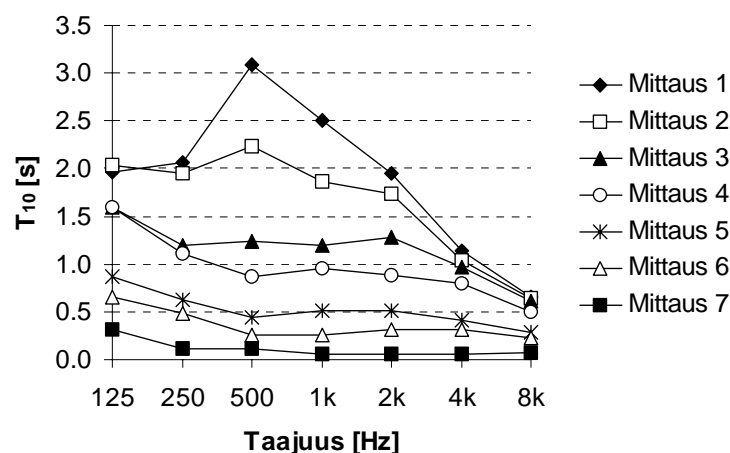
5 YHTEENVETO

STI-arvoja voitiin laboratorio-olosuhteissa ennustaa melko luotettavasti, kun tarkastelupisteen varhainen jälkikaiunta-aika ja puhekohinasuhde tiedettiin. Aidot huoneet ovat kuitenkin laboratorio-olosuhteita selvästi monimutkaisempia, joten STI:n ennustamisen tarkkuutta niissä on vaikea arvioida näiden tulosten pohjalta. Tehdyt kokeet vahvistivat sen, että RASTI:a tulisi käyttää vain tasaisissa kaiunta-olosuhteissa. Erot STI:n ja RASTI:n välillä voivat olla selviä varsinkin suurilla puhekohinasuhteen arvoilla, joilla kaiunnon vaikutus on hallitsevampi. Sekä Brüel&Kjærin RASTI-mittarilla että WinMLS:llä saatiin toisiaan vastaavia tuloksia käytettyjen kaiuttimien, mikrofonien, oletetun puheen spektrin sekä itse mittausten menetelmän erilaisuudesta huolimatta. STI- ja SII-arvot vastasivat käytännössä toisiaan, kun SII:n laskennassa huomioitiin kaiunnon vaikutus.

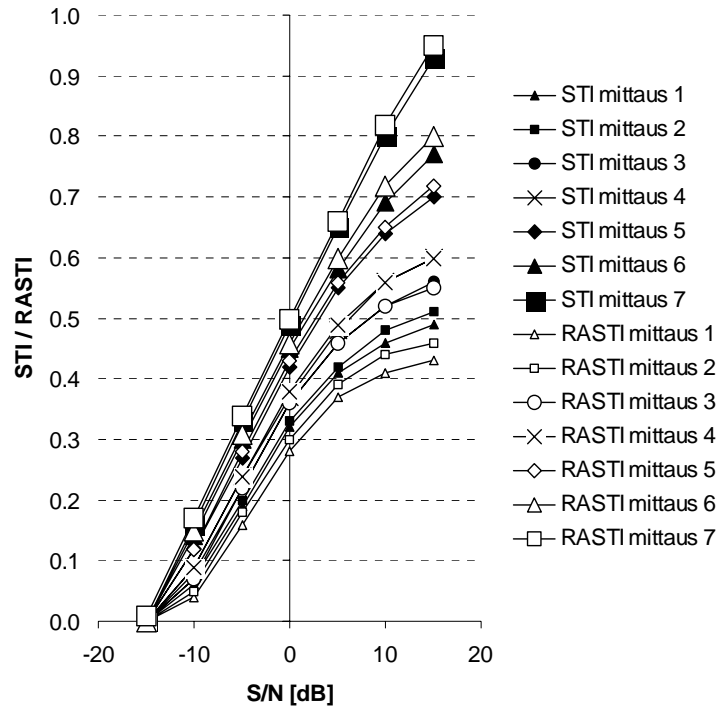
Kuuntelukokeissa havaittiin, että STI-arvolla 0.23 vielä puolet tavuista kuultiin oikein. Kuuntelukokeessa koehenkilöiden tehtävänä oli kuunnella tavuja, ja huonoimmilla STI-arvoilla he pinnistelivät kuullakseen. Toimistotyöpaikoilla kuitenkin keskitytään muuhun kuin ympäriltä kuuluvaan puheeseen, joten sujuvan työskentelyn kannalta sopivaksi STI-arvoksi arvioidaan alle 0.50. Avotoimistoissa STI-arvot ovat usein selvästi tätä korkeampia, ja niitä tulisikin akustisen suunnittelun avulla pyrkiä pienentämään.

VIITE

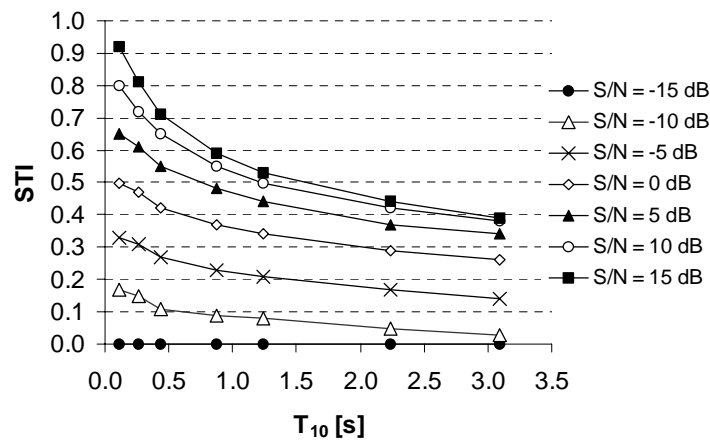
[1] LARM P, Puheen erotettavuuden ennuste- ja mittausten menetelmät, Pro gradu -tutkielma, Turun yliopisto, Fysiikan laitos, 2003



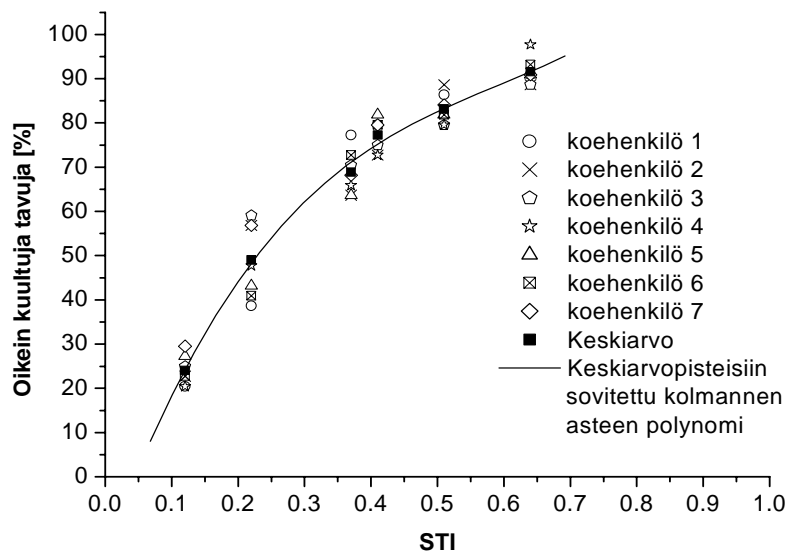
Kuva 1: Mittaustilanteiden varhaiset jälkikaiunta-ajat oktaaveittain.



Kuva 2: WinMLS:llä mitatut STI- ja RASTI-arvot puhekohinasuhteen funktiona.



Kuva 3: STI-arvot varhaisen jälkikaiunta-ajan funktiona 500 Hz:n oktaavikaistalla.



Kuva 4: Kuuntelukokeiden tulokset.