

TEKNISTÄ AKUSTIIKKA PÄHKINÄNKUORESSA

Tapio Lahti

Insinööritoimisto Akukon Oy
Kornetintie 4 A, 00380 HELSINKI
Tapio.Lahti@akukon.fi

1 JOHDANTO

Tässä artikkelissa esitän henkilökohtaisen näkemyksen ja henkilökohtaisia kokemuksia teknisen akustiikan perusteista sekä kehityksestä ja tilasta Suomessa. Esitys on kolmiosainen: ensin katsaus opetuksen ja tutkimuksen vaiheisiin muutaman viime vuosikymmenen aikana sekä arvio tämänhetkisestä tilasta. Seuraavaksi itse teknisen akustiikan ydin, sen matemaattinen ja fysikaalinen perusta, puristettuna muutamaksi avainsanaksi ja -yhtälöksi. Tarkoitukseni on muistilistan kaltainen kooste perusasioista, jotka akustiikkainsinöörin tulisi täysin hallita suunnittelu- tai muissa työtilanteissa, ”selkäydintasolla”, tarvitsematta palauttaa asioita mieleen oppikirjoista. Sekä viimeisenä pieni kokoelma kokemuksia, tapauksia ja edellisten perussääntöjen arkisia sovelluksia akustiikkainsinöörin käytännön työstä.

Aluksi teknisen akustiikan määritelmä ja rajaus: yksinkertaisimmin se tapahtuu muunkielisten vastineiden kautta — teknisk akustik, engineering acoustics, technische Akustik, acoustique technique. Toisaalta mainiten, mitä se pitää sisällään: tekninen akustiikka on yhteisnimitys seuraaville akustiikan osa-alueille: meluntorjunta, rakennus- ja huoneakustiikka sekä sähköakustiikka. Viimemainittu mielletään nykyisin usein lähes samaksi kuin audiotekniikka. Käsitettä ”äänitekniikka” on vanhastaan joskus, lähinnä rakennusakustiikan puolella käytetty Suomessa teknisen akustiikan synonyyminä, saksankielen vaikutuksesta. Toisaalta anglosaksisen käytännön perusteella se onkin audio engineering -termin vastine. Ja lopuksi tärkeänä täydennyksenä: menestyksellinen työskentely teknisessä akustiikassa edellyttää myös tietynasteista värähtelytekniikan osaamista.

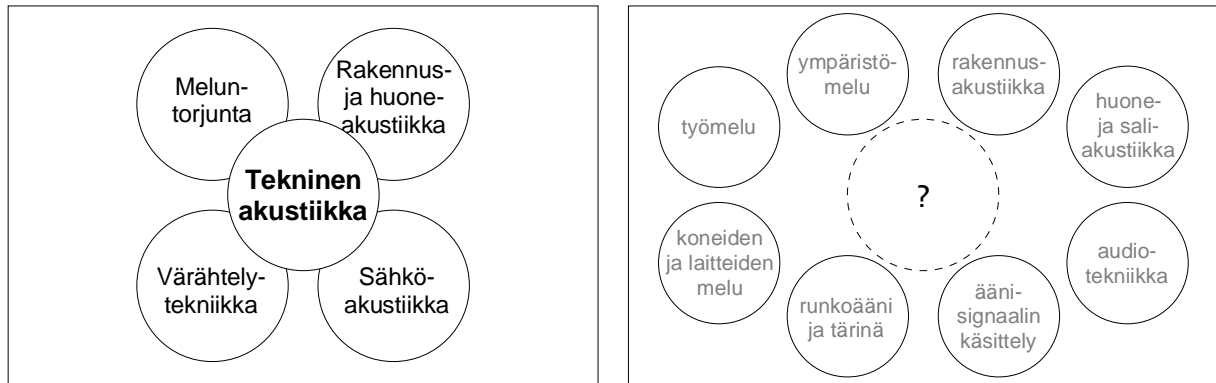
2 OPETUS, TUTKIMUS JA RAHOITUS SUOMESSA

2.1 Suomi ja muut Pohjoismaat

Kun Suomen teknistä akustiikkaa verrataan muihin Pohjoismaihin, Suomi näyttäytyy pienenä ja köyhänä serkkuna. Vertailu on kuitenkin ehkä hieman kohtuuton siinä mielessä, että kaikki kolme muuta ovat jo pitkään olleet tällä alalla kokoonsa nähden hyvinkin merkittäviä tekijöitä. Ruotsi on yleisen teollisen perinteensä tukemana (auto- ja lentokoneteollisuus etunenässä) monipuolisesti vahva. Tanska tunnetaan jo vanhastaan laadukkaimmista äänen mittalaitteista ja äänentoistolaitteista. Norjakin on viime vuosikymmeninä ollut varsin merkittävä.

2.2 Opetus

Teknisen akustiikan opetus käynnistyi Suomessa 1950-luvun alussa, kun vieraileva sveitsiläinen professori G. von Salis piti Teknillisen korkeakoulun sähköosastolla akustiikan kursseja. Säännöllinen opetus vakiintui vuonna 1957 TKK:n Puhelinlaboratorion kurssina, opettajana TkT Eero Lampio. Kurssimonisteen esikuvana oli Beranekin vastaava kirja [1]. Samoihin aikoihin perustettiin TKK:n Akustiikan laboratorio. 1960-luvun lopulla valmistuivat Otaniemeen ajanmukaiset laboratoriotilat. Vakinaista henkilökuntaa oli kuitenkin 1970-luvulle saakka vain yksi laboratoriomestari!



Kuva 1. Teknisen akustiikan osa-alueet: (vasen) periaate, (oikea) näkemykseni nykytilasta Suomessa.

Lisäksi TKK:n rakennus- ja arkkitehtiosastoilla oli akustiikan peruskurssi, alkuvaiheessa opettajana DI Paavo Arni, joka kirjoitti myös Suomen ensimmäisen akustiikan oppikirjan [2]. 1960-luvulta lähtien em. osastojen sekä koneosaston rakennus- ja meluakustiikan peruskursseja piti pitkään arkkitehti Alpo Halme.

Seuraava askel otettiin 1975, jolloin TKK:n sähköosastolle perustettiin akustiikan apulaisprofessori. Kurssien määrä kasvoi neljään: tekninen akustiikka peruskurssina sekä sen tukena kommunikaatioakustiikka, kenttäteoria ja värähtelytekniikka, joka hieman myöhemmin vaihtui akustiseksi mittaustekniikaksi. Laajennuksen toteutti vt. apul.prof. Jarmo Toivanen, joka kuitenkin ehti opettaa vain kaksi vuotta ennen varhaista kuolemaansa.

1980-luvun alussa akustiikan apulaisprofessoriksi valittiin Matti Karjalainen. Akustiikan laboratorion opetus ja tutkimus lähtivät edelleenkin jatkuvaan vahvaan kasvuun. Täysi professori ja itsenäinen laboratorio saatiin myöhemmin samalla vuosikymmenellä. Laajentuminen suuntautui kuitenkin pääasiassa äänisignaalin käsittelytekniikkaan. Teknisen akustiikan opetus on pitkään pysynyt suurin piirtein vuoden 1975 laajuudessa.

Teknistä akustiikkaa ei Suomessa opeteta TKK:n lisäksi juuri missään muualla. Kuopion yliopistossa on ympäristötieteiden koulutusohjelman osana pieni meluntorjunnan osuus. Ehkäpä hämmästyttäväkin on ollut Tampereen TY:n opetuksen niukkuus. Tietävästi eräät alalla toimijat (mm. VTT) ovatkin joutuneet vuosien mittaan järjestämään itse sisäistä koulutusta. Suuri osa Suomen eturivin akustikoista onkin itse- ja työn ohessa oppineita.

2.3 Tutkimus, laitokset ja yritykset

Suomessa valtion tutkimuslaitosten suhteellinen merkitys on ollut kansainvälisesti verraten ehkä poikkeuksellisenkin suuri verrattuna korkeakouluihin ja yrityksiin. Teknisen akustiikan alalla keskeiset tutkimuslaitokset ovat olleet ja ovat edelleen VTT ja Työterveyslaitos. Aikaisemmin myös Yleisradio oli merkittävä toimija. Korkeakoulujen teknisen akustiikan tutkimus on ollut tutkimuslaitoksiin verrattuna hyvin vaatimatonta.

VTT:n rakennustekninen laboratorio harjoitti rakennusakustista testaustoimintaa 1950-luvun alusta lähtien. Otaniemeen siirtyminen 1960-luvun jälkipuolella toi omat, tosin väliaikaiset laboratoriotilat. 1970-luvun loppupuolelle mennessä rakennusakustiikan jaoston toiminta oli laajentunut myös tutkimukseen sekä muuhunkin tekniseen akustiikkaan.

Samaan aikaan, 1970–80 -lukujen vaihteessa, tapahtui Suomen teknisen akustiikan kannalta kenties ratkaiseva hajaannus. Seuraava laajennus sijoitettiin Tampereelle ja se jäi myös organisatorisesti erilleen ensimmäisestä akustiikkayksiköstä. Näin aluepoliittisin perustein samalla

estyi yhtenäisen, monipuolisen ja tehokkaan teknisen akustiikan laboratorion kehittyminen, sellaisen joka mm. Tanskassa ja Norjassa oli jo tuolloin. Sitten VTT:n Tampereen akustiikkayksikkö on omalla osa-alueellaan noussut Suomen tutkimusyksiköiden kärkipäähän. Myös värähtelytekniikka on VTT:llä ollut pääosin akustiikasta erillään, kun muissa maissa ääntä ja värähtelyä tutkitaan usein samassa yksikössä.

Työterveyslaitoksen perinteinen työmelun altistuksen ja torjunnan tutkimus- ja testaustoiminta on viime vuosikymmeninä laajentunut perinteisen työsuojelun ulkopuolelle, mm. rakennusakustiikkaan ja jopa ympäristömeluunkin.

Yksityisten konsulttiyritysten osuus säilyi Suomessa hyvin pitkään määrällisesti vaatimattomana. 1970-luvulla konsulttien kokonaismäärän saattoi laskea yhden käden ja 1980-luvulla kahden käden sormin. Samaan aikaan Ruotsin suunnittelutoimistoissa työskenteli tiettävästi pitkälti toistasataa konsulttia. Paikallisesti Arkkitehtitoimisto Alpo Halme vastasi silti toki muutamankin hengen voimin varsin merkittävästä osasta Suomen teknistä akustiikkaa.

Uudelle vuosituhannele tullessa suunnittelutoimistojen osuus ja merkitys on vähitellen ”normalisoitunut” kansainvälisesti verraten. Alalla toimii noin neljä varsinaista ammattilaistason konsulttitoimistoa, joiden palveluksessa on reilut kolmisenkymmentä konsulttia. Voidaan jopa sanoa, että merkittävä osa teknisestä akustiikasta, koneiden meluntorjuntaa ja osin rakennusakustiikkaa lukuunottamatta on nykyisin lähes pelkästään niiden harteilla. Suomen kokonaisuuden kannalta tilanne ei ole optimaalinen, koska yrityksillähän ei ole omia tutkimusmahdollisuuksia, ne tekevät vain tilattuja toimeksiantoja.

2.4 Aineelliset ja henkiset resurssit

Suurin linjoin tarkasteltuna Suomen teknisen akustiikan tutkimus-, testaus- ja konsultointipalvelujen tarjonta on heijastanut yritysten ja muiden tarvitsijoiden pitkän aikavälin kysyntää. Mutta opetuksesta tuskin voidaan sanoa aivan samaa.

Vanhimmassa kerrostumassa hallitsevina tarvitsijoina ovat olleet rakennustuotteiden valmistajat, joille on suurelta osin riittänyt testauspalveluiden saanti. Muullekin teollisuudelle riittivät konsultointipalvelut. 1970–80 -lukujen vaihteesta varsinaista tutkimusta rahoittivat mm. Työsuojelurahasto, Suomen Akatemia ja Ympäristöministeriö; jälkimmäiset suhteellisen pienen panoksin.

Viime ja tämän vuosikymmenen kuluessa tutkimuksen tarve ja tarjonta ovat tasaisesti kasvaneet, mutta tekijöidenkin tarpeen samalla kasvaessa osajista on ilmeisesti alkanut olla kasvavaa vajausta. Rahoittajiksi ja myös rekrytoijiksi ovat nousseet lähinnä konepajatyypin teollisuuden yritykset. VTT:n arvion mukaan vähämeluisten koneiden kehittämisen julkinen rahoitus on 1990-luvulla ollut n. 1 milj.€ ja 2000-luvulla n. 4 milj.€ Yritysten rahoitus lienee ollut suunnilleen samaa luokkaa tai hieman enemmän.

Hetkellisesti varsin merkittävän sysäyksen antoi Tekesin VÄRE-teknologiaohjelma 1999-2002, jonka aiheena oli melun- ja värähtelytorjunta eli hienostellen ”värähtelyn ja äänen hallinta”. Useat tutkimusyksiköt, korkeakoulut ja yritykset osallistuivat ohjelmaan, joka sisälsi sekä julkisia tutkimusprojekteja että teollisuuden tuotekehitysprojekteja. Ohjelman kokonaisrahoitus oli n. 20 milj. € josta Tekes rahoitti puolet. Ohjelman loppusanoissa todettiin, että aihepiiri ”on erityisosaamisalue, johon useimmat yritykset eivät voi tai halua panostaa. Tämän takia korkeakouluissa, tutkimuslaitoksissa sekä konsulttiyrityksissä oleva asiantuntijaverkko ja sen osaaminen ovat tärkeitä yritysten käytettävissä oleva resurssi. Tätä resurssia on ohjelmassa

pystytty määrällisesti ja laadullisesti parantamaan.” Ohjelman jälkeen rahoitus on jälleen pääosin jäänyt yritysten harteille.

Maailman ja Suomenkin verrattomasti suurin ja tärkein akustinen ongelma on tieliikenteen melu. Vuosien 2005–07 VIEME-projekti pyrki parantamaan suomalaista alan osaamista. ”Vierimismeluhankkeen” akustisessa osassa tutkittiin TKK:n Autotekniikan laboratorion ja Akukonin voimin renkaiden ja tienpäällysteiden melun vähentämistä, liikenne- ja viestintäministeriön johdolla sekä tihallinnon, useiden kuntien, tie- ja päällysteyritysten ja kotimaisen rengasvalmistajan rahoittamana. Budjetti oli valitettavasti vain murto-osa Tekes-projektin vastaavasta. On toki myönnettävä, että tämän ongelman ratkaisu on vain vähäiseltä osin insinöörien käsissä, päinvastoin kuin esimerkiksi uuden hiljaisemman koneen kehittäminen.

2.5 Tilanne muissa Pohjoismaissa

Ruotsissa tutkimus on ollut jonkin verran muita Pohjoismaita enemmän keskittynyt korkeakouluihin. Merkittävimmät ovat Tukholman Kungliga tekniska högskolanin ääni- ja värähtelytutkimuksen Marcus Wallenberg -laboratorio ja Göteborgin Chalmers tekniska högskolanin teknisen akustiikan osasto. Lisäksi Lundin teknisessä korkeakoulussa on teknisen akustiikan osasto ja Uumajan teknisessä yliopistossa ääni- ja värähtelyosasto. Ruotsin ”VTT:n” eli Statens Provningsanstaltin akustiikkalaboratorio oli alkuaan suhteellisen kapea-alainen, mutta se on noussut sittemmin täysipainoiseksi yksiköksi.

Tanskassa ja Norjassa tilanne on ollut keskenään samantapainen: teknisissä yliopistoissa Lyngbyssä Kööpenhaminan lähellä (DTU) ja Trondheimissa (NTNU) on molemmissa teknisen akustiikan yksiköt (DTU akustinen teknologia ja NTNU akustiikkaryhmä). Niiden läheisyydessä toimivat teknisten tutkimuslaitosten Delta ja SINTEF akustiikan osastot, Trondheimissa hyvinkin läheisessä yhteistyössä.

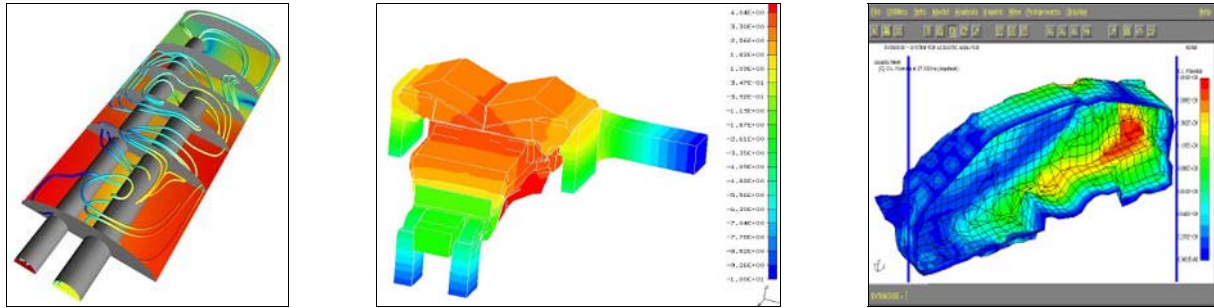
Taulukko 1. Eräiden teknisten korkeakoulujen maisteritason teknisen akustiikan ”koulutusohjelmat”.

korkeakoulu	kursseja	pisteitä	määrä ja laatu
TKK Espoo	8	34	kurssien määrä miltei vertailukelpoinen, laajuus vaatimaton, taso epätasainen
KTH Tukholma	13	102	laaja, erittäin kovatasoinen
Chalmers Göteborg	13	97,5	laaja, erittäin kovatasoinen
NTNU Trondheim	7	52,5	tiivis, kovatasoinen
DTU Lyngby	9	70	tasapainoinen, kovatasoinen

Oheisessa taulukossa vertailen eräiden ym. teknisten korkeakoulujen akustiikan opetusta. Tiedot on poimittu koulujen nettisivujen kurssiluetteloista ja -kuvauksista. Kursseista olen valinnut ne varsinaiset akustiikkakurssit, joiden katson muodostavan teknisen akustiikan kannalta täysipainoisen kokonaisuuden. Pinnallisesti vaikuttaisi siltä, että kurssien nimikkeissä ja määrässä TKK lähes kestänee vertailun, mutta tarkempi tutustuminen kurssien laajuuteen ja sisältöön valitettavasti kallistaa vaa’an Suomelle kovin epäedulliseksi.

3 AKUSTIIKKA PÄHKINÄNKUORESSA

Monesta muusta tekniikan alasta poiketen teknisen akustiikan perustiedot eivät juuri vanhene. Se mikä on muuttunut aikaisempiin vuosikymmeniin verrattuna, on tietotekniikan avaamat mahdollisuudet laskea asioita, jotka aiemmin olivat ”vain” teoriaa.



Kuva 2. Laskentamenetelmät tuottavat näyttäviä kuvia, mutta akustikon tulee kyetä arvioimaan niiden toimintaa ja tuloksia kriittisesti.

On kuitenkin korostettava, että tietokoneohjelma ei vapauta nykyinsinööriä vankan perustan hankkimisesta; se on edelleen yhtä välttämätöntä kuin ennenkin. Kauniiden värikuvien takana olevien lähtötietojen ja -kohtien sekä laskentamenetelmien rajoitusten ja heikkouksien kriittinen arviointi ja tulosten merkitysten tulkinta edellyttävät edelleen todellista osaamista.

3.2 Akustiset ”Maxwellin yhtälöt”

Jos akustiikka ylipäätään haluttaisiin todella puristaa pähkinänkuoreen, se mielestäni on tässä: Äänikentän kaksi perusyhtälöä, Eulerin yhtälö sekä tila- ja jatkuvuusyhtälön yhdistelmä

$$\nabla p(t) = -\rho \frac{\partial \vec{u}(t)}{\partial t} \quad \leftrightarrow \quad \nabla \mathbf{P}(f) = -j\omega\rho \vec{\mathbf{U}}(f) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}(t) = -Q \frac{\partial p(t)}{\partial t} \quad \leftrightarrow \quad \nabla \cdot \vec{\mathbf{U}}(f) = -j\omega Q \mathbf{P}(f) \quad (2)$$

missä äänipaine p ja hiukkasnopeus \vec{u} ovat muuttujia, äänikentän perussuureet; väliaineen tiheys ρ ja puristuvuus Q ovat vakioita. Oikeanpuoleiset versiot on puolittain Fourier-muunnettu. Helposti nähdään, että ensimmäinen muodostaa äänikentän inertiasäännön, joka on luonteeltaan Newtonin $F = ma$, ja toinen joustavuussäännön, kuten $F = kx$. Paineen ja nopeuden riippuvuus toisistaan on toki symmetrinen, sillä tiheyden ja puristuvuuden sitoo yhteen tuttu vakio $c = \sqrt{\rho Q}$. Ja tästähän päästäisiinkin seuraavaksi aaltoyhtälöön.

Viittaus sähkömagneettisiin aaltoihin on harhaanjohtava sikäli, että akustiikka kuluu itseoi-keutettuna fysiikan vanhimpaan kerrostumaan: näiden yhtälöiden sisältämä tieto tunnettiin jo lähes sata vuotta ennen Maxwelliä. Klassisen mekaniikan kultakaudeksi nimetyllä jaksolla (n. 1730–1780) akustiikkaa edistivät useat tieteen suurimmista: d’Alembert, Bernoulli, Euler, Lagrange. Vain analogia, muotoilu kauniin symmetriseksi pariaksi on ”Maxwelliä”. Mikään ei kuitenkaan ole uutta akustiikassa: elementti- tai differenssilaskennan juuret ovat tässä.

3.3 Kentät, signaalit ja systeemit: taustoja ja perusteita

Useat kaikkein keskeisimmistä akustiikan käsitteistä, teorioista ja työkaluista ovat peräisin 1800-luvulta. Vuosisadan alun hahmoja olivat Pierre-Simon Laplace (1749–1827) ja Joseph Fourier (1768–1830). Molemmat vaikuttivat tieteellisesti Ranskan Académie des science’issa. Laplace oli lähinnä tähtitieteilijä, mutta myös matemaatikko ja yleisfyysikko. Fourier oli hallintovirkamies (mm. maaherra) ja oman toimensa ohessa matemaattinen fyysikko.

Vuosisadan jälkipuoliskon akustiikkaa hallitsivat Hermann von Helmholtz (1821–1894) ja lordi Rayleigh (1842–1919). Helmholtz oli alunperin lääkäri. Hän toimi Königsbergissä, Bonnissa, Heidelbergissä ja lopuksi Berliinissä fysiikan professorina.



Kuva 3. Laplace, Fourier, Helmholtz ja Rayleigh.

Rayleigh oli aatelismies, paroni. Akustiikan historian suurin hahmo oli kenties viimeisin fyysikan yleisnero; häneen päättyi kausi, jolloin yksi henkilö pystyi hallitsemaan laajaa osaa fyysikasta. Hän sai myös fyysikan Nobel-palkinnon — mutta ei akustiikasta, vaan argonin keksimisestä. Rayleigh oli jonkin aikaa Cambridgen fyysikan professori, mutta pääosin hän työskenteli oman aateliskartanonsa laboratoriossa.

Laplace ratkaisi muiden tutkimustensa lomassa äänennopeuteen liittyneen kuuluisan perusongelman [3]. Tämän päivän akustikolle hän on lähinnä merkittävä integraalimuunnoksensa kautta. Fourier ei ollut akustikko, vaan tutki lämmön siirtymistä [4]. Mutta Fourier'n teoreeman merkitys nykyakustiikalle, kuten monelle muullekin fyysikan ja tekniikan alalle, on aivan keskeinen. Fourier-sarjan, -muunnoksen ja -analyysin hallinta ja merkityksen ymmärrys on jokaiselle akustiikkainsinöörille ”must”. Tässä kaksi versiota muunnoksesta:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-j2\pi ft} dt ; \quad P(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (3)$$

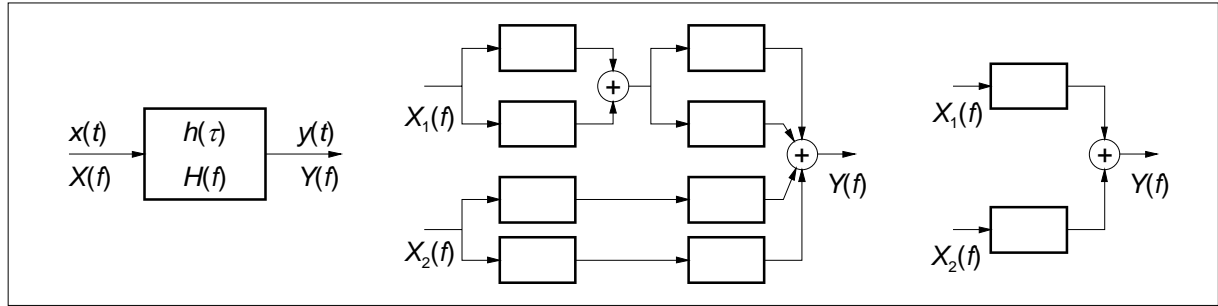
Vasemmalla tuttu perusversio, äänipaineen aikasignaalin spektri taajuusalueessa. Oikealla harvemmin tavattava akustisen kenttäsuureen paikkajakautuma ja sen 2-ulotteinen muunnos aaltolukualueeseen. Jälkimmäinen kuuluu repertuaariin, josta akustiikkainsinöörin tulee jollakin tasolla olla tietoinen.

Harmoninen kenttä tai harmoninen tasoalto mainitaan usein muodollisten menettelyjen lähtökohtana. Mutta tähän ei ole mikään rajoitus. Fourier'ta soveltaen voidaan käsitellä akustisten systeemien vasteita mielivaltaiselle signaalille tai kenttäjakautumalle. Kuten yleinen signaalikin, yleinen äänikenttä hajoaa aika-taajuus Fourier-muunnettuna harmoniseksi kentäksi ja edelleen paikka-aaltoluku Fourier-muunnettuna sarjaksi tasoaltoja.

Akustiikassakin Fourier'n menetelmien keskiössä on lineaaristen aikainvarianttien järjestelmien analyysi. Järjestelmä voi olla puhtaasti akustinen, mekaanis-akustinen tai sähköakustinen. Muunnoksilla systeemivasteen työläs integraali muuttuu helpoksi kertolaskuksi

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad \leftrightarrow \quad Y(f) = H(f) X(f) \quad (4)$$

Systeemin impulssivasteen, konvoluutiointegraalin ja taajuusvaste- eli siirtofunktion muotoilu valmiiksi kokonaisuudeksi on ehkä lähinnä pantavissa Bellin laboratorion tiliin 1920–30 -lukujen tienoilla. Mutta rakennelma oli jo Rayleigh'lle kristallinkirkas: ”... *in almost all the applications that we shall have to make, it will be convenient to analyse the motion by Fourier's theorem and treat separately the simple harmonic motions of various periods, afterwards, if necessary, compounding the results.*” [5, § 277]



Kuva 4. Vasemmalla lineaarinen systeemi. Taajuuden funktiot, tulo- ja lähtösignaalien spektrit sekä systeemin taajuusvastefunktio ovat Fourier-muunnoksia tulo- ja lähtösignaaleista sekä systeemin impulssivastefunktiosta. Keskellä mahdollinen käytännön analyysin alkutilanne, jossa yleensä tarvitaan ja voidaankin tehdä redusointia ja separointia (oikealla).

Yllä kerrattu voi tuntua kovinkin alkeisoppikirjan asialta. On kuitenkin hyvä muistaa, että järjestelmien taajuusvasteet ovat sovellettuina, pinnan alla käytössä useissa akustikon työkaluissa kuten esimerkiksi huonetilojen tai ympäristömelun laskentamalleissa. Myös esim. impedanssi ja admittanssi, heijastus- ja läpäisykerroin sekä muut vastaavat ovat taajuusvasteita.

Helmholtzin ja Rayleigh'n nimiin liittyvät pintojen äänen säteilyä hallitsevat perusintegraalit, niistä raskaampana Helmholtzin integraali

$$\mathbf{p}(\bar{r}) = \int_S \left\{ \mathbf{p}(\bar{r}_0) \frac{\partial}{\partial n} [g(\bar{r} | \bar{r}_0)] + j\omega\rho\mathbf{u}(\bar{r}_0)[g(\bar{r} | \bar{r}_0)] \right\} dS \quad (5)$$

ja kevyempänä Rayleigh'n integraali tasosäteilijän yläpuolella vapaassa kentässä

$$\mathbf{p}(\bar{r}) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \int_S 2\mathbf{u}(\bar{r}_0) \frac{1}{R} e^{-jkR} dS \quad (6)$$

joissa $g()$ on Greenin funktio ja R etäisyys säteilypisteestä r_0 laskentapisteeseen r . Ja taas: mikään ei ole uutta; tässähän on äärettömien elementtien perusta.

Seuraavaksi teknisen akustiikan ehdoton ydin: lähes kaikessa, mitä akustikko haluaa suunnitella tai tehdä, kyseessä on pohjimmiltaan äänitehon (tai -energian) virtauksen hallinta. Joko tehon siirtyminen halutaan optimoida tai maksimoida taikka se halutaan estää tai minimoida. Ääni- tai melulähteiden emissio on tietenkin teho, mutta samasta asiasta on kyse myös esim. ilma- ja askeläänieristyksessä sekä absorptio-, heijastus-, läpäisy- tai säteilysuhteissa.

Tässä kaksi eritasoista äänitehon määritelmää:

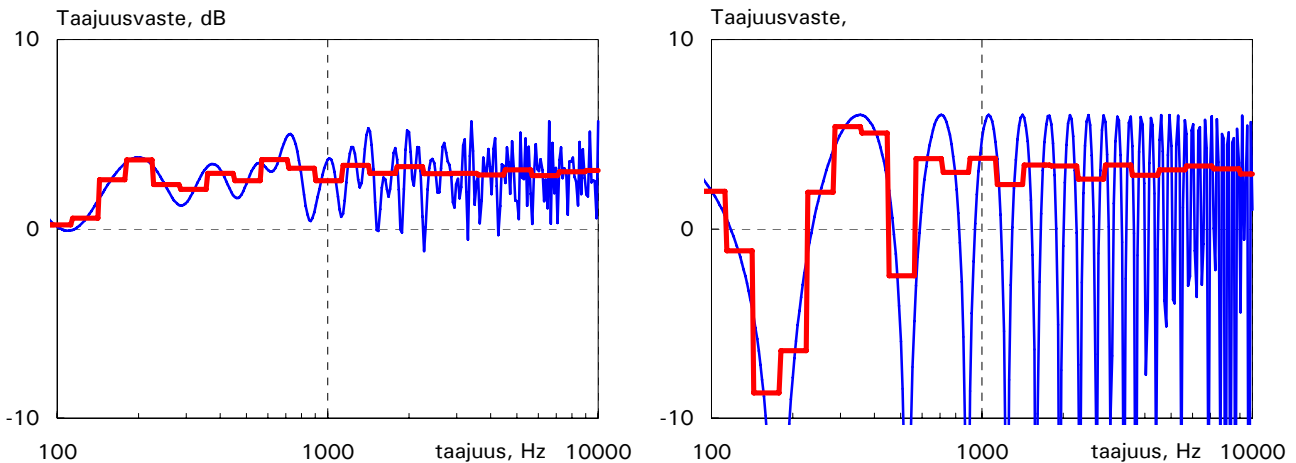
$$W = \int_S \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T p(t) u_n(t) dt dS ; \quad W(f) = \frac{1}{\rho c} \int_S |\mathbf{P}(f, S)|^2 dS \quad (7)$$

missä u_n on pinta-alkion normaalin suuntainen hiukkasnopeuskomponentti ja $\mathbf{P}(f, S)$ äänipaineen spektri pinta-alkion dS luona.

4 ERÄITÄ SOVELLUKSIA

4.1 ”+3 dB heijastus”

Kolmantena osana seuraa pieni kokoelma perusasioiden arkisia sovelluksia käytännön teknisessä akustiikassa, ensimmäisenä niistä hyvinkin tavallinen ja yksinkertainen tapaus, jota tuskin koskaan pöyhähtään miettimään.



Kuva 5. Heijastus kovasta pinnasta; etäisyys tarkastelupisteestä (esim. mikrofonista) 1,5 m. Saapumiskulma (a) muuttuva, integrointi, (b) vakio 45°.

Melutason mittauksissa ja useimmissa äänitehon mittaamenetelmissä ainakin jalkojen juuresta tai joskus selän takaa tulee kovasta pinnasta heijastus. Akustikot ovat sisäistäneet tai menetelmä olettaa, että sen vaikutus tulokseen on +3 dB.

Suora ja heijastunut aalto muodostavat yksinkertaisen järjestelmän taajuusvasteen:

$$H(f) = 1 + e^{jk\Delta r} \quad (8)$$

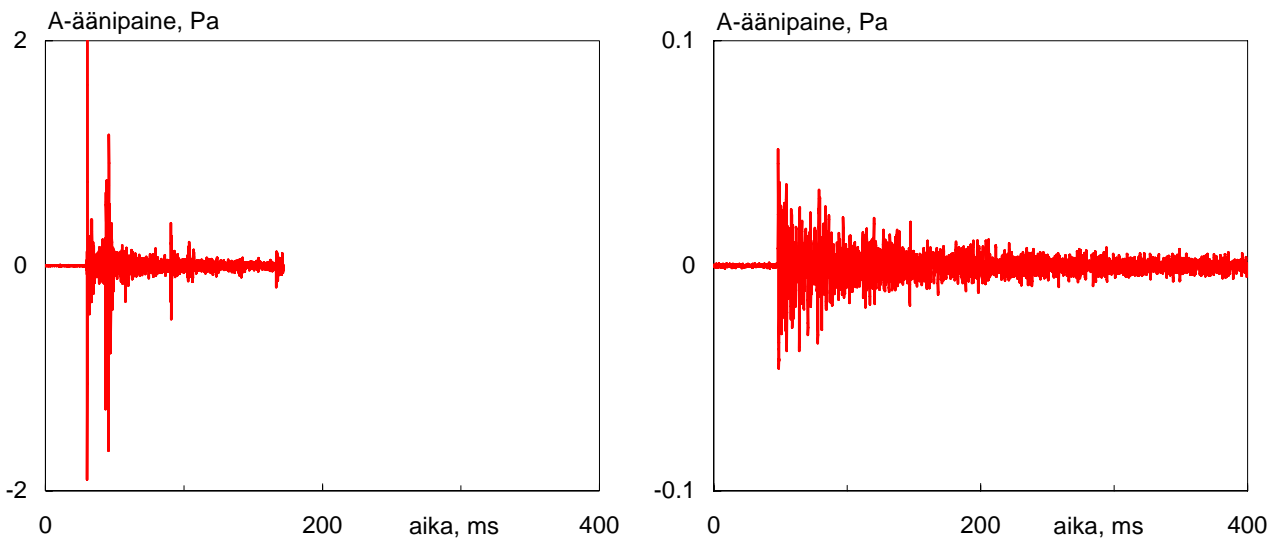
jossa Δr on matkaero ja taajuus sisältyy aaltolukuun k .

Kuvassa 5 on esitetty vasteen itseisarvo ja sen approksimaatio tersseittäin kahdessa tapauksessa: (a) Äänen saapumissuunta muuttuu ja heijastuksen vaikutus integroidaan yli tulokulmien, siis liikennemelun mittausta. (b) Saapumissuunta on vakio, kuten esim. tehomittauksissa. Nähdään, että liikkuvalla lähteellä ei ole huolta, mutta kiinteällä voi ollakin. Jos heijastava pinta on epätasainen (diffuusoiva) tai ei täysin kova, tilanne voikin olla parempi.

4.2 Ampumamelun mittaus ja laskenta

Ampumaratojen melumittauksissa määritetään ohjearvon määräämänä yhden laukauksen I-aikapainotettu enimmäis-A-äänitaso L_{AImax} . Ampumaratamelun pohjoismaisella laskentamallilla lasketaan samaa äänitasa. Malli on suora sovellus yleisestä eli ns. teollisuusmelun laskentamallista. Laskenta vain tehdäänkin tässä tapauksessa transienttisignaalin energialle eikä jatkuvan äänen signaaliteholle (ekvivalenttitaso). On osoittanut, että laskenta- ja mittaustulokset poikkeavat systemaattisesti ja huomattavasti toisistaan. Tämän korjaamiseksi mallissa käytetään ”hätäläästaria”: kasvillisuusvaimennusta on kasvatettu epätodellisen suureksi.

Mistä on kyse? Suoraviivaisesta impulssivasteen ja konvoluutiointegraalin sovelluksesta. Lähellä asetta laukausääni on hyvin lyhyt. Mutta kun se etenee kauemmaksi, pulssin kesto venyy sitä pidemmäksi mitä suurempi on etäisyys. Syynä on puiden, maaston ym. aiheuttama sironna, ”metsän kaiunta”. Pulssin signaalienergia alkaa vuotaa ulos I-painotuksen impulssivasteen muodostamasta aikaikkunasta. I-painotuksen nousuaikavakio on 35 ms, ja pulssi on lopulta tätä selvästi pidempi. Laskentamalli sen sijaan laskee kaiken oikein, signaalienergian häntä pysyy mukana. Paikattava asia ei olekaan mallin kasvillisuusvaimennus, vaan I-painotus tulisi korvata äänialtistustason L_{AE} mittauksella ja laskennalla.



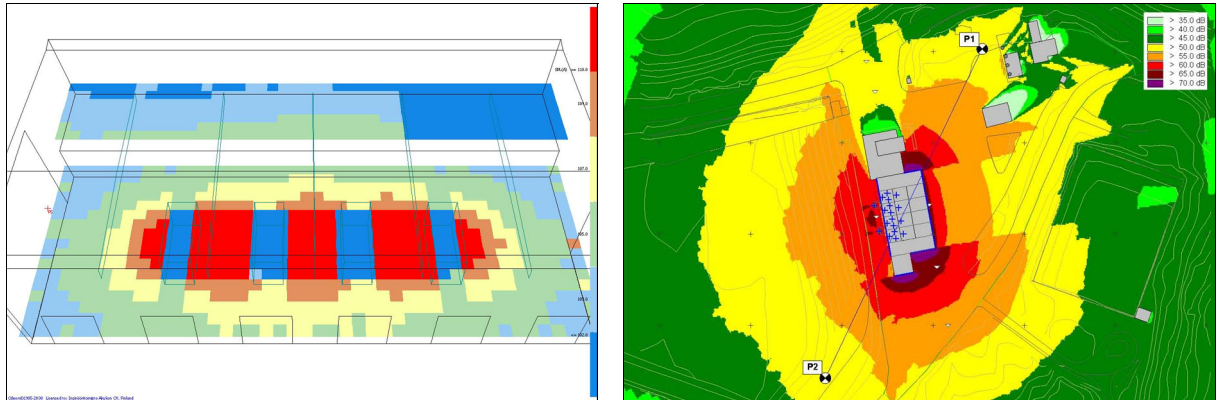
Kuva 6. Laukausäänien venyminen etäisyyden kasvaessa I-aikapainotuksen impulssivasteen pituus on vain 35 ms.

4.3 Case: voimalaitoksen akustinen suunnittelu

Lopuksi tyypillinen tapausesimerkki, joka sattumalta sisältää valtaosan tavallisimmista akustiikkainsinöörin työtehtävistä: Kaatopaikalle on suunnitteilla jätekaasulla toimiva dieselmoottorivoimala. Akustiikkasuunnittelun tehtäviä olivat konesalin akustointi, ulkoseinien äänieristyksen mitoitus (ml. kokonaan lasiset salin päätyseinät), äänieristyksen mitoitus valvomoon ja toimistosiipeen ovineen ja valvomon ikkunoineen, moottorien pakoputkien (piippujen) ulos säteilemän melupäästön vaimennuksen tarkistus sekä katolla olevien IV-laitteiden melupäästöjen tarkistus ja vaimennus.

Moottorisali on tavallisen teollisuussalin tapaan pitkä, leveä ja niihin nähden suhteellisen matala. Sabine-tilannetta lähikenttineen, kaiuntasäteineen ja diffuusine kaukokenttineen ei esiinny. Salin äänitasojakautuma ja seiniin kohdistuvat äänitehot laskettiin saliakustisella laskentaohjelmalla (ODEON 9.2). Lähtötietoina olivat moottorivalmistajan melupäästötiedot. Lisäksi laskettiin ja tarkistettiin seinien värähtely, runkoäänen kulkeutuminen ja sivutiesiirtymät sekä ohjeistettiin niiden torjunta. Maaperän kautta mahdollisesti kulkeutuva värinä tarkistettiin.

Ulkomelun leviäminen laskettiin teollisuuden ympäristömelun laskentamallilla, käyttäen CADNA/A 3.7 -ohjelmaa. Lähteitä olivat ulkoseinät, piiput, muuntaja ja katon IV-laitteet. Piippujen melupäästö oli peräisin moottorivalmistajan tiedosta pakoputkeen syntyvästä äänitehosta sekä äänenvaimentimen valmistajan vaimennustiedoista. Vaimennus tarkistettiin ja todettiin riittäväksi. Ottoilmakojeiden ja jäähdyttimien melupäästöt todettiin riittävän pieniksi, mutta poistoilman puhaltimien vaimentimet alimittaisiksi. Korvaavat vaimentimet mitoitettiin. Muutostöimien jälkeen ulkomelun kokonaisäänitaso täytti tavoitteen.



Kuva 7. Voimalan moottorisalin sisämelun ja ympäristömelun lasketut äänitasojakautumat.

VIITTEET

1. BERANEK L L, *Acoustics*. McGraw-Hill, New York 1954. 481 s.
2. ARNI P, *Käytännöllisen akustiikan perusteet*. Otava, Helsinki 1949. 228 s.
3. LAPLACE P-S, *Traité de mécanique céleste, vol. V*. Bachelier, Pariisi 1825. 465 s.
4. FOURIER J B J, *Théorie analytique de la chaleur*. Firmin–Didot, Pariisi 1822. 639 s.
5. HELMHOLTZ H L F VON, *Die Lehre von den Tonempfindungen, als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1862. 605 s.
6. RAYLEIGH, J S STRUTT, LORD, *Theory of sound I-II*. Macmillan, Lontoo 1877-78, 2. laaj. p. 1894–96. 480+504 s.