

## TYÖKONEOHJAAMOIDEN MONIKERROSLASIEN VIBROAKUSTIIKKA

**Jukka Tanttari**

VTT  
PL 1300 Tekniikankatu 1  
33101 TAMPERE  
jukka.tanttari at vtt.fi

### Tiivistelmä

Ikkunoiden (lasien) osuus modernin työkoneohjaamon ulkopintojen alasta voi olla yli 40 %. Lasien hyvä äänitekniinen toiminta onkin tärkeää pyrittäessä matalaan melutasoon ohjaamossa. Ääni- ja turvallisuusteknisen toiminnan samanaikainen varmistaminen on merkittävä suunnitteluhaaste. Lasin paksuuden kasvattaminen alentaa kriittistä taajuutta ja tämä voi tehdä paksusta lasista ääniteknisesti huonon. Tunnettu turvallisuutta parantava ratkaisu on laminointi. Sillä on merkittävä vaikutus myös äänitekniiseen toimintaan. Taustalla on kaksi mekanismia: vaikutukset taivutusaaltojen dispersioon (rakente-ilmä -kytkentään) sekä sisäisiin häviöihin. Paksun monikerroslasin suunnitteluvaruus on niin suuri, että parhaita ratkaisuja on työlästä löytää kokeilemalla. Kuusi kerrosta  $a \cdot 10$  paksuutta tuottaa  $10^6$  yhdistelmää. Apuna onkin syytä käyttää numeerisia malleja sekä optimointia. Optimoinnilla haetaan edullisimmat kerrospaksuudet halutun kokonaispaksuuden, kerrosten lukumäärän ja muiden rajoitteiden puitteissa. Voidaan käyttää myös erityisiä akustisia kalvoja. Niiden oikealla hyödyntämisellä voidaan saavuttaa merkittäviä lisäetuja. Paperissa käsitellään monikerroslasien vibroakustisia ominaisuuksia, niiden määräytymistä ja esitetään optimointiesimerkkejä.

## 1 JOHDANTO

Työkoneohjaamoiden akustiset tarkastelut rajautuvat usein valmiisiin tuotteisiin. Ohjaamoraakenteiden ollessa annettuja ohjautuu kiinnostus ”sisäakustiikkaan”, so. sisäisen äänikentän ominaisuuksiin, verhoilumateriaalien vaikutukseen äänenpaineeseen ja/tai koettuun äänen laatuun [1, 2, 3].

Ohjaamoakustiikan olennainen osatekijä on myös ohjaamon perusrakenne ja sen vibroakustiset ominaisuudet. Niihin voidaan vaikuttaa parhaiten (ja usein vain) suunnittelun varhaisissa vaiheissa [4]. Kaikki äänienergian poistuminen ohjaamosta on ilmatilan kannalta efektiivistä absorptiota. Ohjaamon rakenteiden ääneneristävyyden, vuotojen ja ulkoisen äänikentän huomiotta jättäminen (laskentamalleissa) voi johtaa ylioptimistisiin arvioihin verhoilumateriaalien vaikutuspotentiaalista ohjaamoiden äänenhallinnassa.

Eräs tärkeä erityisalue on ohjaamon lasien akustinen mitoitus ja valinta. Hyvä näkyvyys ohjaamosta ulos eri suuntiin on tehokkaan työskentelyn edellytys. Siksi ikkunoiden (lasien) osuus modernin työkoneohjaamon ulkopintojen alasta voi olla yli 40, jopa 60 % ( $5..7 \text{ m}^2$ ), ks. Kuva 1. Seuraavassa tarkastellaan erityisesti lasien vibroakustisia ominaisuuksia

ja niiden mitoitusta. Ohjaamon rakenteisiin kohdistuvat ulkoiset mekaaniset voimat sekä ohjaamon sisäiset äänilähteet (kuten ilmanvaihtolaitteet) samoin kuin lämpötilan vaikutukset lasien ominaisuuksiin jäävät tarkastelun ulkopuolelle.

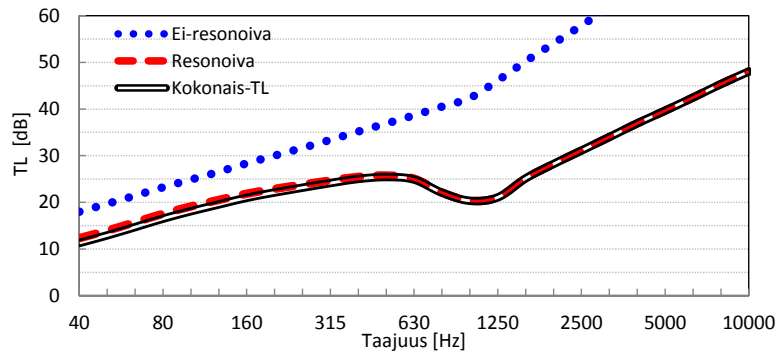


Kuva 1. Moderni työkoneohjaamo [5, 6].

## 2 LASI, KERROSLASI, MONIKERROSLASI JA VIBROAKUSTIIKKA

Lasien paksuus on, ohjaamotyypistä riippuen, noin 6...18 mm. Järeimpiä laseja käytetään erityyppisissä kaivoskoneissa. Lasin kimmomoduuli on noin 65 GPa ja tiheys 2400 kg/m<sup>3</sup>. Sisäinen häviöluku on pieni, luokkaa 0.002. Pitkittäisaallon nopeus lasimateriaalissa on noin 5200 m/s ja taivutusaaltojen kriittinen taajuus 700...2100 Hz (paksuudet 18...6 mm). Paksun monoliittisen lasin ääneneristävyyden on lasin massa- tai jäykkyyteen nähden varsin vaatimaton keski- ja suurilla taajuuksilla.

Kuvassa 2 on monoliittisen, n. 12 mm paksun lasin ääneneristävyyden komponentit (resonoiva, ei-resonoiva ja kokonaisääneneristävyys). Keski- ja suurilla taajuuksilla lasi eristää yli 20 dB huonommin kuin sen potentiaalinen eristävyys voisi massan tai taivutusjäykkyyden (ei-resonoivan äänenläpäisyn) perusteella olla. Tämä on tärkeä seikka erityisesti sellaisissa tapauksissa (mm. iskuporaus) joissa herätteet ovat suuritaajuisia.



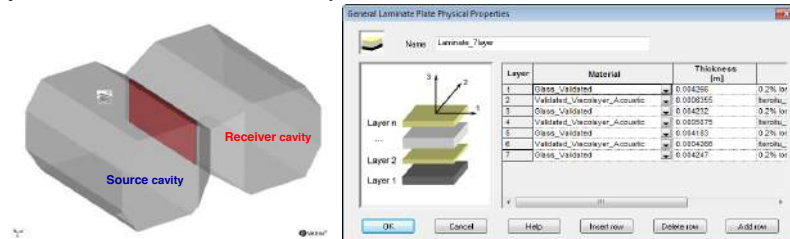
Kuva 2. Monoliittisen, n. 12 mm paksun lasin lasketut ääneneristävyyden komponentit.

Lasien laminointi on tunnettu mekaanista turvallisuutta lisäävä ratkaisu. Tiedetään myös, että jäykän rakenteen tai materiaalin, kuten lasin, jakaminen kahteen tai useampaan kerrokseen, joiden välissä on viskoelastinen tai muu vastaava materiaali, muuttaa olennaisesti yhdistelmän dynaamista käyttäytymistä [7, 8]. Ääneneristävyyteen dynamiikan muuttuminen vaikuttaa kahta kautta; (i) yhdistelmän häviöluku yleensä kasvaa ja (ii) taivutusaaltojen etenemisnopeus pienenee.

Laminoinnin positiivisia vaikutuksia lasien vibro- ja aero-vibroakustiikkaan alettiin tietoisesti hyödyntää henkilöautoissa 1990-luvulta alkaen [9, 10]. Normaalien PVB (polyviinyyli-butadieeni) -kalvojen lisäksi on käyttöön tullut ns. akustisia kalvoja. Niiden liukumoduuli on standardikalvoihin verrattuna huomattavan pieni ja häviöluku suuri. Oikein hyödynnettyinä voidaan näillä kalvoilla saavuttaa huomattavia lisämuutoksia verrattuna standardikalvoilla toteutettuun laminointiin.

Paksuissa työkonelaseissa erikoiskalvojen hyödyntämispotentiaali on suuri. Lasit voidaan jakaa useaan kerrokseen. Kerrosten määrän myötä vibroakustinen mitoitus muuttuu kuitenkin olennaisesti haastavammaksi, koska yksittäisten kerrosten paksuuksien valintaan liittyvä parametriavaruus kasvaa räjähdysmäisesti. Erilaisia yhdistelmiä kokeilemalla päästään alkuun, mutta ei välttämättä kovin pitkälle. Sopivia laskentatyökaluja hyödyntämällä voidaan parhaita, kustannustehokkaita ratkaisuja hakea automaattisesti.

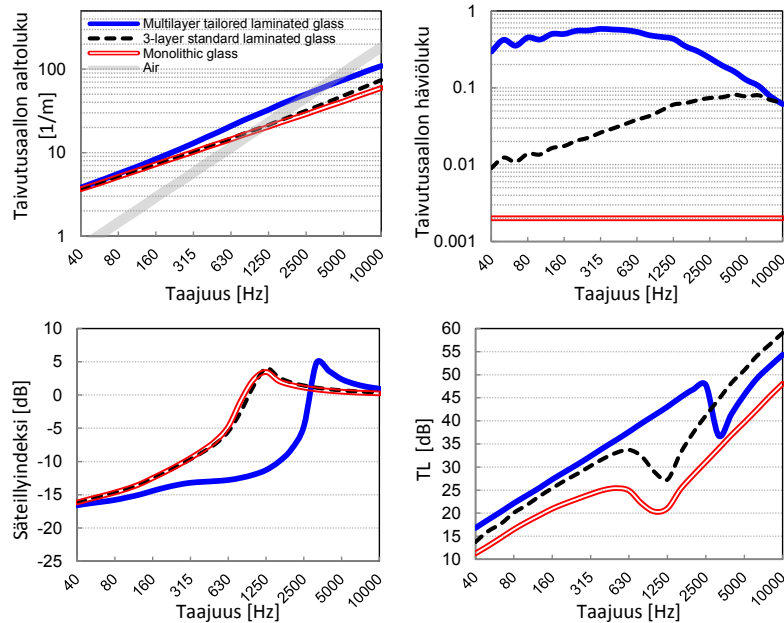
Monikerrolasin dynamiikkaa ja vibroakustisia ominaisuuksia voidaan tehokkaasti kuvata yleisellä laminaattiteorialla [8]. Se on käytettävissä VA One -ohjelmiston [11] SEA-moduulissa eräänä levy- ja kuoriosajärjestelmien mallina. Lasikerrokset voidaan mallintaa lineaarisina solidimateriaalikerroksina ja kalvot lineaarisesti viskoelastisina kerroksina. Viimeksi mainituissa liukumoduuli annetaan kompleksisena taajuuden funktiona. Mallinnettu ikkuna voidaan liittää kahden akustisen tilan väliin ja näin simuloida ääneneneristävyyttä tai äänenläpäisyä tilasta toiseen, Kuva 3. Laskenta tapahtuu taajuusalueessa halutulla resoluutiolla, yleensä 1/3-oktaaveilla.



Kuva 3. Ikkunan äänenläpäisyn skemaattinen laskenta-asetelma ja monikerrolasin kuvaus yleisellä laminaattimallilla.

Kerrosten paksuus voidaan parametrisoida ja lasin kokonaispaksuus voidaan rajoittaa tiettyyn arvoon tai tiettyyn väliin. Kohdefunktiona voi olla esimerkiksi ääneneneristävyys tai vastaanottotilan äänenpainetaso. Viimeksi mainittu on käytännöllinen ja suoraviivainen menettely tapauksissa, joissa heräteäänepaineen taajuusjakauma on tunnettu. Minimoitaessa vastaanottotilan (yleensä A-painotettua) äänenpainetta tulee ratkaisussa suoraan huomioiduksi käytännön tehtävä, jota ratkaisu (monikerrolasin koostumus) painottaa automaattisesti. SEA-mallin etuna on ongelman kannalta epäoleannaisten yksityiskohden sivuuttamiseen liittyvä laskennallinen tehokkuus [8, 12].

Esimerkki n. 12 mm paksun lasin ominaisuuksista monoliittisena, standardilaminoituna lasina sekä optimoinnin avulla räätälöitynä monikerrolasina on Kuvassa 4. Ääneneneristävyysero voi olla yli 20 dB. Monikerrosratkaisulla on olennainen vaikutus sekä taivutusaallon aaltolukuun (t. nopeuteen) että häviölukuun. Nämä vaikutukset näkyvät erittäin selvästi lasin säteilyindeksissä ja ääneneneristävyydessä. Lasien mallintamisessa tarvittavat parametrit on määritetty kokeellisesti lasipalkkien moodianalyyysityyppisillä mittauksilla ja optimoitujen lasien toiminta validoitu todellisessa ohjaamoissa [4].

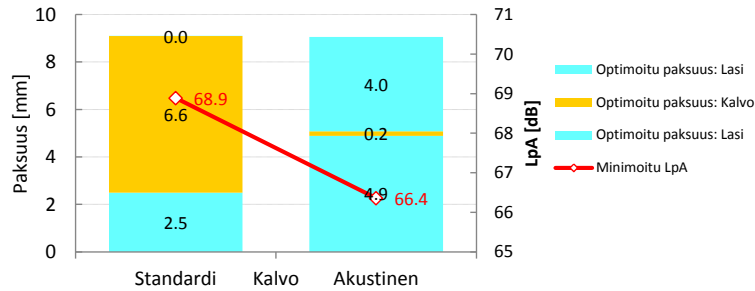


Kuva 4. 12 mm paksun lasin vibroakustisia ominaisuuksia. Monoliittinen, kolmikerroksinen sekä monikerroksinen räätälöity lasi.

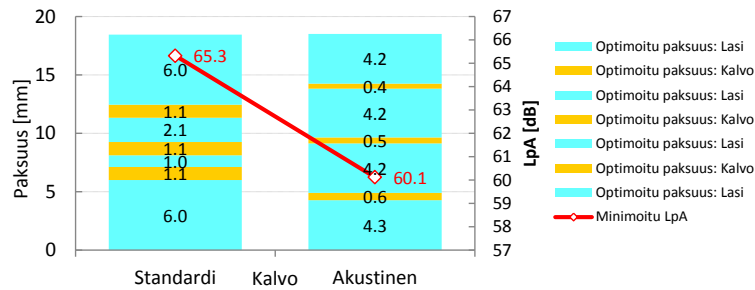
### 3 MONIKERROSLASIEEN OPTIMOINNIN TULOKSISTA

Kuvassa 5 on optimoitu laminoitua (lasi-kalvo-lasi) kolmikerroslasia. Minimoitu suure on vastaanottotilan äänenpainetaso todellisella herätteellä. Laskennassa oli kaksi eri tapaus: A: Standardikalvo ja B: Akustinen kalvo. Kerrosten paksuuksien on annettu hakeutua vapaasti siten, että kokonaispaksuus on 9 mm. Optimointimenetelminä olivat ensin ”globaali” (GA) ja sen jälkeen optimia tarkentaen ”lokaalit” MMA ja SQP. Akustisen kalvon tapauksessa ratkaisu oli epästabiili vaatien yli 16000 laskentakierrosta. Syynä tähän olivat korkeammat aaltomuodot rakenteessa. Akustisen kalvon ratkaisu on noin 2.5 dB parempi. Standardikalvoa käytettäessä ratkaisu pyrkii kaksikerroksiseksi siten, että toinen lasikerros on hyvin ohut ja kalvo on paksumpi kuin paksumpi lasi. Tulos vastaa jäykähkön vaimennusmateriaalin käyttöä vapaana kerroksena [7]. Akustista kalvoa käytettäessä ratkaisu vastaa ns. rajoitetun vaimennusmateriaalikerroksen optimiratkaisua: symmetrinen rakenne jossa on ohut kerros neutraalitasolla [7].

Kuvassa 6 on optimoitu 7-kerroksista lasia paksuuden ollessa noin 18 mm. Tässä tapauksessa kalvojen [0.38...1.14 mm] ja lasien [1...6 mm] paksuudet on rajattu. Laskentakierroksia oli 600...900. Standardikalvoa käytettäessä kalvojen paksuus menee lähelle maksimia ja ne keskittyvät lähelle neutraalipintaa. Ulkoreunoille tulee paksuuden ylärajalla olevat lasikerrokset. Tulos muistuttaa eräällä tavalla Kuvan 5 kolmikerrosratkaisua. Akustinen kalvo tuottaa hyvin erityyppisen ratkaisun. Lasikerrokset ovat saman paksuisia ja kalvot ohuita, lähellä minimiä. Akustisen kalvon ratkaisu on noin 5 dB parempi.

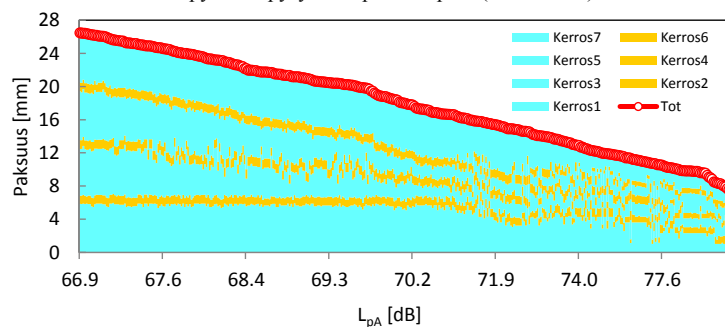


Kuva 5. Optimointiesimerkki: kolmikerroksinen laminoitu lasi. Paksuus 9 mm. Standardikalvo vs. akustinen kalvo. Yksittäisten kerrosten paksuuksia ei ole rajoitettu.



Kuva 6. Optimointiesimerkki: 7-kerroksinen laminoitu lasi. Paksuus n. 18 mm.

Samanaikaisesti voidaan minimoida useampiakin asioita. Tämä tuottaa suuren määrän sellaisia ratkaisuja, joissa toista (tai jotakin) suuretta ei voida parantaa ilman että toinen suure huononee. Kuvassa 7 on 40 sukupolven ja 7893 yhdistelmän analysoinnin kautta saadut 393 globaalia ratkaisua melutason ja paksuuden yhtäaikaisesta minimoinnista 7-kerroslasissa. Kerrosten paksuus on rajattu samalla tavalla kuin edellisessä esimerkissä, mutta kokonaispaksuus ei ole rajattu. Näin ollen yhdistelmän paksuus voi olla noin 5...27 mm. Kalvojen keskipaksuus säilyy lähellä ylärajaa kokonaispaksuuden pienentyessä. Uloimmat lasikerrokset pyrkivät pysymään paksuimpina (vrt. Kuva 6).



Kuva 7. 7-kerroksisen (4+3) lasin optimointi, melutason ja paksuuden minimointi. Kalvot standardikalvoja. Globaali optimointi (GA), 393 optimiratkaisua.

### 3 YHTEENVETO

Modernin työkoneohjaamon pintojen alasta puolet voi olla lasia (so. ikkunoita). Lasien vibroakustiset ominaisuudet vaikuttavatkin melutasoon voimakkaasti, joissakin tapauksissa jopa ratkaisevasti. Käytännön syistä lasit on edullista mitoittaa ja valita ohjaamon suunnitteluvaiheessa. Monikerroksisilla, laminoiduilla lasiratkaisuilla voidaan saavuttaa erittäin hyvät ominaisuudet, erityisesti jos kerroksissa hyödynnetään ns. akustisia kalvoja. Monikerroslasien suunnitteluvaruus on niin suuri, että lasien mitoituksessa ja räätälöinnissä tehokkaat laskentamallit ja niihin liitetyt optimointityökalut ovat erittäin hyödyllisiä ja melkeinpä välttämättömiä. Löydettyä optimiratkaisua ei aina voida sellaisenaan hyödyntää esimerkiksi siksi, että kalvoja ei ole saatavilla kaikissa mahdollisissa paksuuksissa. Mutta optimi tarjoaa hyödyllisen referenssin haettaessa sen läheltä riittävän hyvää ja helpommin toteutettavaa ratkaisua. Kalvojen ominaisuudet ovat herkkiä lämpötilalle. Tässä paperissa on lämpötilaksi oletettu noin +20°C. Käytännössä lasissa on ohjaamon sisä- ja ulkolämpötilasta ym. riippuva tuntematon paksuussuuntainen lämpötilajakauma. Määritettyjä lasiratkaisuja on sovellettu käytäntöön hyvällä menestyksellä.

#### VIITTEET

- [1] Saarinen A. & Uosukainen, S. Kuormaajan ohjaamon äänikentän mallitus kytketyllä menetelmällä. Akustiikkapäivät 2009, Vaasa.
- [2] Mellin V. Kaivoskoneen melu. Akustiikkapäivät 2009, Vaasa.
- [3] Nykänen H., Antila M., Maijala P. & Uosukainen S. Psykoakustisen kokemuksen evaluointi ja muokkaaminen ohjaamo- ja matkustamoympäristössä. Akustiikkapäivät 2011, Tampere.
- [4] Tanttari J. & Lamula L. Acoustic design of a best-in-class drill rig cabin. ICSV24, 23-27 July 2017, London UK.
- [5] <http://www.fendt.fi/>
- [6] <http://mediabase.sandvik.com>
- [7] Cremer L. Heckl M. & Petersson B.A.T. Structure-Borne Sound. Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. 3rd edition, Springer, 2004. 607s.
- [8] Shorter P.J. Wave propagation and damping in linear viscoelastic laminates. J. Acoust. Soc. Am. 115 (5), 1917-1925, (2004).
- [9] Lu J. Passenger Vehicle Interior Noise Reduction by Laminated Side Glass. inter-noise 2002, Dearborn, MI, USA, August 19-21, 2002.
- [10] Bouayed K. & Hamdi M. Dynamic behavior of laminated windscreen. J. Acoust. Soc. Am. 132 (2), 757-766, (2012).
- [11] VA One vibro-acoustic software package. ESI Group, 2005-2017.
- [12] Shorter, P. Modeling noise and vibration transmission in complex systems. In: A.K. Belyaev, R.S. Langley (eds.), IUTAM Symposium on the Vibration Analysis of Structures with Uncertainties, IUTAM Book series 27, Springer 2011. p. 141 – 156.