

Vårt ombud	Vår ref – uppdragsbeteckning	Ert ombud och postadress
Christian Simmons	2004167-C	Skanska Sverige AB (Skanska Teknik)
Mölndal, vårt datum	Vårt dokument-ID	Rikard Espling
2007-02-13	SkTkSyd-SAUra-SBUF-DelC-Berakningar.doc	Drottningtorget 14
Anm.		S-20533 MALMÖ
Ert datum	Er beteckning	Er fax och e-postadress
		040-144788
		rikard.espling@skanska.se

Distribution  
Ombudet 1 ex.

## SBUF 11860 Stomburet installationsljud (121997)

### Delrapport C. Beräkningar av ljudnivå enl. prEN 12354-5

#### Bakgrund

I denna tredje delrapport redovisas mätningar och beräkningar enligt förslag till standardiserade metoder. Dessa metoder avses kunna användas för att beräkna stomburet ljud i angränsande utrymmen, alstrat av vissa maskintyper uppställda på tunga bjälklag. I detta exempel har vi kombinerat mätmetoden i prEN 12354-5 med beräkningsmetoden i EN 12354-2 (avseende beräkning av stegljudsnivå i byggnad). En utvidgning av mät- och beräkningsmetoderna till lätta bjälklag diskuteras översiktligt.

För att illustrera den förenklade metoden har vibrationsnivåer mätts upp på ett isolerat referensbetongbjälklag hos Electrolux Laundry Systems i Ljungby, med tvättmaskiner (för tvättstuga) respektive en standardiserad hammarapparat,. Vibrationsnivåerna för dessa 5 fall visas i mätavsnittet nedan, och analyseras med två olika metoder, substitutionsmetoden och direktmetoden.

#### Mätmetoder

##### Substitutionsmetod

I prEN 12354-5 (annex D) anges principer för mätning enligt en så kallad substitutionsmetod. I denna metod mäts först vibrationsnivåerna på ett bjälklag då den standardiserade hammarapparaten (SS-EN ISO 140-7) verkar på bjälklaget, och sedan med aktuell maskin i olika driftsfall. Metoden gäller för tunga bjälklag och stabilt roterande (eller vibrerande) maskiner, som utgör stomljudskälla istället för den standardiserade hammarapparaten. En förutsättning är att maskinen är lätt i förhållande till underlaget, och uppbyggd med veka bärande strukturer, eller försedd med vibrationsisolatorer i uppställningspunkterna. Strikt

simmons akustik & utveckling ab

postadress	telefon kontor/mobil	fax kontor/mobil	bankgiro	org.nr.
Kroksläotts Fabriker 1	+46 (0)31 27 66 00	+46 (0)709 72 71 65	5298 - 3426	556625-6417
SE-431 37 Mölndal	e-post & internet	SMS/e-post mobil	plusgiro	innehar F-skattebevis
<b>besök</b> Göteborgsvägen 97	info@simmons.se	+46 (0)709 72 72 65	-	<b>momsreg.nr./VAT.no</b>
Mölndal (vid Byggcentrum)	www.simmons.se	christian.simmons@euromail.se		SE556625641701

uttryckt skall maskinens mekaniska mobilitet vara mycket högre än underlagets<sup>1</sup>. Sådana stomljudskällor benämns i standarden för konstant-kraft källa, dvs. dess vibrationskraft är konstant oavsett smärre variationer i underlagets mobilitet.

Anm. Motsatsen till denna typ av källa är konstant-hastighet källa, som ger samma vibrationshastighet i uppställningspunkterna oavsett underlag. Generatorer, elmotorer, kompressorer och liknande maskiner med robusta strukturer och stora roterande massor, som placeras på veka underlag, kan beräknas enligt detta antagande. I prEN 12354-5 finns också en helt generell metod, som klarar flertalet kombinationer av källa, vibrationsisolatorer och underlag.

Differensen i vibrationsnivåer som mätts upp med hammarapparaten respektive maskin i drift, antas vara samma då maskinen ställs upp på ett annorlunda betongbjälklag. Genom att mäta eller beräkna stegljudsnivån i ett rum under detta tänkta bjälklag då den standardiserade hammarapparaten verkar, och beräkningsmässigt lägga på differensen i vibrationshastighet mellan hammarapparat och maskin, kan normaliserade ljudnivåer för maskinen skattas korrekt i ett rum under eller intill det tänkta bjälklaget. Skillnaden i vibrationshastighet antas då vara samma som skillnaden i exciterande kraft mot bjälklaget. Tillvägagångssättet innebär faktiskt, att maskinen beräkningsmässigt hanteras på samma sätt som en stegljudsdämpande golvbeläggning eller ett undertak! Ett exempel visas nedan.

Anm. Substitutionsmetoden kan också vara användbar i fält, för att värdera huruvida ett ljudproblem beror på byggnadsstommen eller på aktuell maskin. Om uppmätt stegljudsnivå avviker markant från den som kan beräknas enligt EN 12354-2 med indata för aktuella byggnadskonstruktioner, bör man granska dessa i första hand. Ser stegljudsnivåerna ut som förväntat kan felet misstänkas ligga i installationen.

### Direktmetod

I förslag till ny mätmetod från CEN/TC 126/WG 7<sup>2</sup> används en så kallad direktmetod, där vibrationsnivåer med maskinen i drift används för att beräkna referensbjälklagets energiförluster. Enligt metoden kan maskinens "karakteristiska stomljudeffekt" då bestämmas som den energi som tillförs till referensplattan, vilken är densamma som den absorberade effekten när vibrationsnivåerna har stabiliserats på en konstant nivå. Den karakteristiska stomljudeffekten kan jämföras mellan olika maskinfabrikat och är därför ett lämpligt mått för tillverkarna att redovisa för respektive maskintyp.

Anm. Vid felsökning i en installation i byggnad kan uppmätta vibrationer med maskinen i drift jämföras med de som deklarerats av tillverkaren av aktuell maskin, omräknade till aktuellt bjälklag. Om flera maskiner är i samtidig drift bör man i första hand försöka mäta med en maskin i taget, men då detta inte är möjligt (t.ex. till och frånluftsfläktar som måste drivas samtidigt för att inte skapa över- eller undertryck i huset), så kan man mäta ljud och vibrationer med smalbandsanalys. Genom att jämföra varvtal för alla komponenter (motorer, växlar, fläktar mm) med toppar i vibrationsspektrum kan den störande maskinen eller i många fall lokaliseras.

<sup>1</sup> Mobilitet definieras som kvoten mellan vibrationshastighet och exciterande kraft, medan impedans är inversen av denna kvot. Mobilitet kan också avse kvoten mellan rotationshastighet och påfört moment.

<sup>2</sup> CEN/TC 126 N 527, WI 00126061, Laboratory measurement of airborne and structure borne sound from building equipment – Part 1: simplified cases where the equipment mobilities are much higher than the receiver mobilities, taking whirlpool baths as an example

## 8.5. Structural power calculation

### 8.5.1 Structural power calculation

For each plate (index  $i$ ), the structural power level  $L_{\overline{w}_{s,i}}$  (ref.  $10^{-12}$  Watt) injected to the plate by the specimen is calculated from the measured spatially averaged vibration velocity level  $L_{v,i}$  (ref.  $10^{-9}$  m/s) and the loss factor  $\eta_i$ , according to:

$$L_{\overline{w}_{s,i}} = 10 \cdot \log(\eta_i \cdot 2\pi f \cdot m_i \cdot S_i) + L_{v,i} - 60 \quad (4)$$

The loss factor is calculated from the measured structural reverberation time of the plate using equation (1).

The energetic space average of the velocity is calculated with

$$L_{v,i} = 10 \cdot \lg \frac{v_{i,1}^2 + v_{i,2}^2 + \dots + v_{i,n}^2}{n \cdot (10^{-9})^2} \quad (2)$$

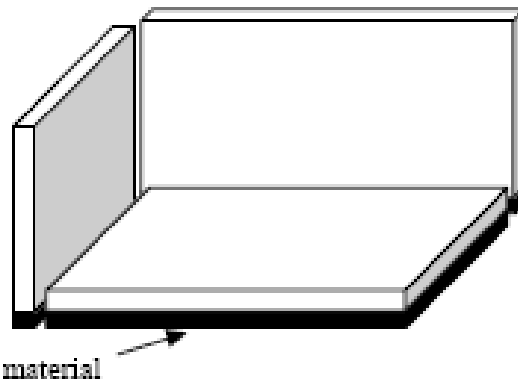
where  $v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,n}$  are r.m.s. (root mean square) velocities in m/s at  $n$  different positions on element  $i$ ,  $n$  being not less than 6. The measurement points shall be as far as possible from the equipment connection points and from the edges of the reception plate. At each measurement point, the velocity is measured in 1/3 octave band according to pr EN ISO/DIS 10848 part 1.

Metoden har ursprungligen utvecklats för bubbelbadkar för montage i hörn, vilket krävde att mättrigen skulle innehålla både bjälklag och två fristående väggar i vinkel. När det gäller tvättmaskiner, ventilationsaggregat och liknande som avses ställas på ett bjälklag räcker det med att använda bjälklaget i metodförslaget, men för små fläktar, motorer för portar, rulljalousier, kylkompressorer med mera är väggmontage vanligt förekommande. Mätupställningen med väggar kan därför bli intressant att studera i huvudprojektet.

## 6.2. Three plate test rig

### 6.2.1. Vibration requirements

Figure 1: schematic drawing of the three plate test rig



The three plates shall be isolated from each other (see figure 1), the corresponding vibration level difference, measured according to EN ISO/DIS 10848 without the equipment installed, being greater than 10 dB in each frequency band.

The three plates shall be made of concrete (density of  $2300 \pm 200 \text{ kg/m}^3$ ), have a thickness of  $10 \pm 1 \text{ cm}$ , a minimum surface area of  $5 \text{ m}^2$  and preferably more than  $7 \text{ m}^2$ , a ratio length/width close to  $\sqrt{2}$  and a minimum loss factor at low frequencies (50-100 Hz) of 8 %. The loss factor can be estimated from the structural reverberation time of the plate using:

$$\eta = 2.2 / (f T_s) \quad (1)$$

The minimum dimension of the plates must be equal or greater than the maximum dimension of the specimen. The specimen must not overhang the edge of the reception plate when installed

Referensbjälklagets massa och förlustfaktor måste bestämmas för att den absorberade stömljudseffekten skall kunna beräknas enligt ekvation 4. Förlustfaktorn för referensbjälklaget i Ljungby bestämdes med efterklangstidsmätningar, där accelerometersignalens avklingning bestämdes med transient frekvensanalys i fyra mätpositioner på bjälklaget. Bjälklaget exciterades med träklubba, två gånger i vardera fyra slagpositioner. Mätmetoden beskrivs i ISO 10848.

Frekvens, Hz	Efterklangstid, s	Förlustfaktor, $\eta$
63	0,61	0,06
125	0,31	0,06
250	0,42	0,02
500	0,16	0,03
1000	0,1*	0,02*
2000	0,1	0,01
4000	0,1*	0,005*

\* osäkra mätresultat

En svårighet vid mätning av efterklangstid i vibrationsfält, är att filterbandbredden påverkar efterklangstiden. Mätningen av efterklangstider indikerar, att sandbädden ger stora strukturförluster vid låga frekvenser, men avsevärt mindre vid höga frekvenser där betongplattan sannolikt "flyter" på sanden, dvs. sanden fungerar som en vibrationsisolering. Vid 50 och 125 Hz indikerar vibrationsmätningarna, att plattan kan vara något resonant.

Jämförelser med beräknade egenfrekvenser stämmer om plattan kan antas vara fritt upplagd på styva ränder, vilket skulle kunna förklaras av att sandbädden är mycket tunn nära bjälklagets kanter. Nedrinnande betong kan ha gett styva punkter, som stagar upp kanterna på plattan. Fler mätningar planeras, som skall kartlägga fördelningen av vibrationer på referensbjälklaget.

Ett problem med direktmetoden är att mätvärdet är avhängigt referensplattans egenskaper. Det krävs därför någon form av normalisering för att göra resultaten jämförbara mellan olika laboratorier och med provplatser ute hos tillverkarna. I metoden anges vidare:

The characteristic reception plate mobility  $Y_{\infty,rec}$  has been chosen as the characteristic mobility of a 10 cm thick concrete plate of value:  $Y_{\infty,rec} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/Ns}$ .

Plattan hos Electrolux är 20 cm, vilket ger en mobilitet (för högre frekvenser) nära  $1.3 \times 10^{-6} \text{ m/Ns}$ . Mätplattan hos Electrolux är tjockare än vad som specificeras i metoden, men förefaller ändå vara lämplig för provningar av vibrationsnivåer. Om uppmätta vibrationsnivåer och stomljudeffekter räknas om från mätplatsen till den angivna karakteristiska mobiliteten (motsvarande en platta 10 cm betong), innebär denna normalisering, att uppmätta vibrationsnivåer skall ökas med 6 dB.

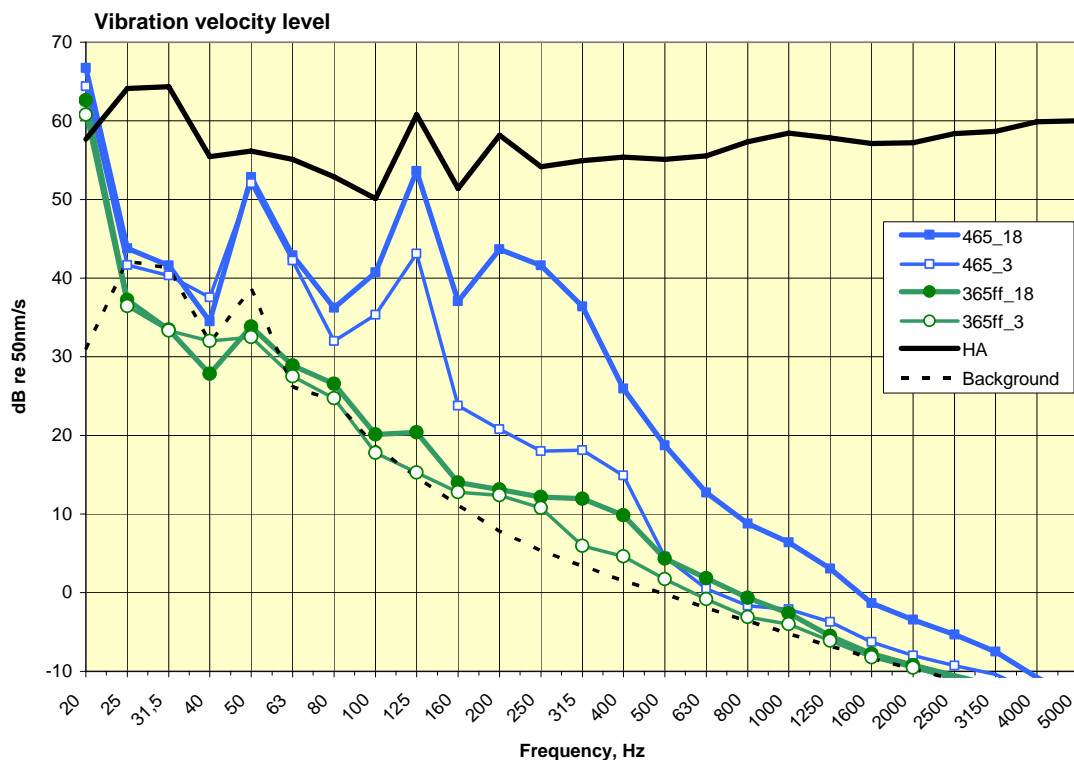
## Mätningar - Tvättmaskiner

Två tvättmaskiner med två belastningsfall vardera (obalanser) har mätts upp på ett referensbetongbjälklag 4,2 x 4,2 x 0,2 (m) hos Electrolux Laundry Systems i Ljungby. Bjälklaget ligger på sand och är frigjort från övriga delar av byggnadens stomme. På samma bjälklag har även vibrationsnivåer mätts upp då den standardiserade hammarapparaten verkade direkt på bjälklaget. Mätningar på referensplatta gjordes för tre fall:

- standardiserad hammarapparat (HA)
- tvättmaskin typ W465H ställd direkt på bjälklag
- tvättmaskin typ W365H fastgjord vid ett fundament (plåt- och betongplatta 180 kg) som ställdes upp flytande på mjuka vibrationsisolatorer

Maskin W365H har i princip samma uppbyggnad som W465H. Tvättmaskinerna centrifugerade vid 1100 rpm (18 Hz), med två fall av obalans (excentrisk belastning av trumman): 1.6 kg (maximal obalansvikt) resp 0,34 kg (normal obalansvikt) som placerats i mitten av trummans svep.

Mätningarna gjordes i mätpunkter 1-4 fördelade osymmetriskt över hela plattan, med maskinerna placerade i objektpunkter A-D fördelade osymmetriskt över plattans mittdel.

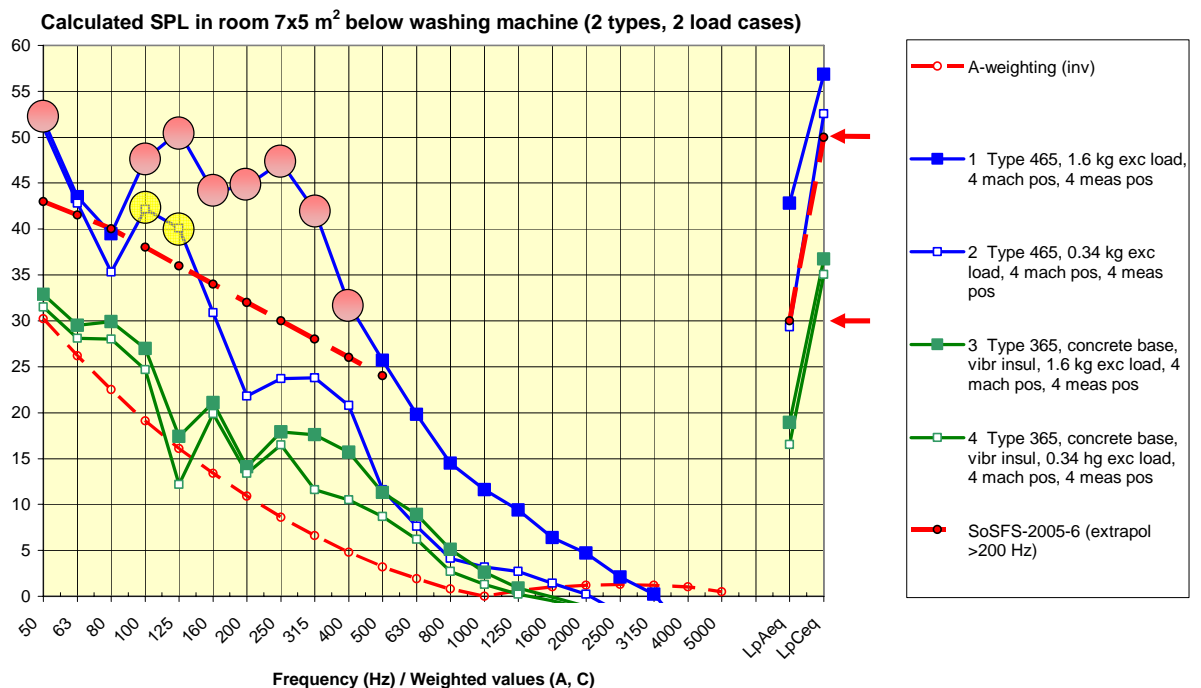


### Beräknad A- och C-vägd ljudtrycksnivåer i rum under tvättstuga

Differensen i vibrationsnivåer mellan hammarapparat och tvättmaskin (i respektive fall) användes sedan för att beräkna förväntade ljudnivåer i ett rum under ett 25 cm tjockt betongbjälklag på pelare, motsvarande ett rum 35 m<sup>2</sup> under en tvättstuga. Rummet under bjälklaget avgränsas av lättbetong- och tegelväggar som inte bär bjälklaget, varför detta får stora strukturförluster, marginella egensvängningar och bör ge lägre vibrationsnivåer än

referensbjälklaget. Först beräknades förväntade stegljudsnivåer (ljudnivåer med hammarapparaten verkande på bjälklaget), sedan lades dämpningen till som motsvarade skillnaden i vibrationsnivåer med tvättmaskinen verkande på bjälklaget. Beräkningen gjordes endast i intervallet 50-5000 Hz, eftersom stegljudsnivåberäkningar enligt EN 12354-2 och indata för byggnadsdelar endast är definierade i detta frekvensintervall. Som framgår av figuren ovan har man ganska stora vibrationsnivåer vid grundfrekvensen 18 Hz (motsvarar rotationsvarvtalet vid full centrifugering), men dessa vibrationer alstrar sannolikt inte hörbara ljud. Nästa topp i spektrat kommer vid 50 Hz.

I nedanstående figur visas beräknade ljudnivåer, och jämförs med kravnivåer från Socialstyrelsen (SoSFS 2005:6). Jämnheten i ljudnivåspektrum framgår genom att jämföra med koefficienterna för A-vägning av ljudnivåer (enligt ISO-standard).



Mätningen visar, att även med måttliga obalansvikter erhålls högre ljudnivåer i intervallet 50-500 Hz (inringade värden), mest uttalat vid 100 och 125 Hz. Med ett lågt fundament fastskruvat i maskinens undersida, och väl avstämda vibrationsisolatorer, fås avsevärt lägre ljudnivåer i hela frekvensområdet, än vad som krävs enligt BBR och SoSFS 2005:6. Marginalen till krav är så påtaglig, att man kan säga att i detta fall skulle man uppfylla ljudklass A (enligt SS 25267) även utan undertak. Med fyra bärande väggar runt bjälklaget skulle man sannolikt klara ljudklass B, dock utan stor marginal. Med tunnare bjälklag, nära maximala spännvidder, måste man kontrollera att inte maskinens grundvarvtal eller egenfrekvenser för vibrationsisoleringen sammanfaller med egenfrekvenser i bjälklaget. I händelse det skulle vara fallet, kan man överväga andra vibrationsisolatorer. I prEN 12354-5 annex H finns ett antal praktiska råd för ventilationsaggregat, som är tillämpliga även på tvättmaskiner. Se även fältexempel i delrapport B.

Exemplen illustrerar att stomljudsnivåer måste beräknas i varje enskild tillämpning.

**Jämförelse mellan substitutionsmetod och direktmetod**

I prEN 12354-5 ges två ekvationer, där man direkt kan jämföra utfallet av mätningarna hos Electrolux

$$L_{F,eq} = L_{F,sub.source} + (L_{source} - L_{sub.source}) \text{ dB} \tag{D.2a}$$

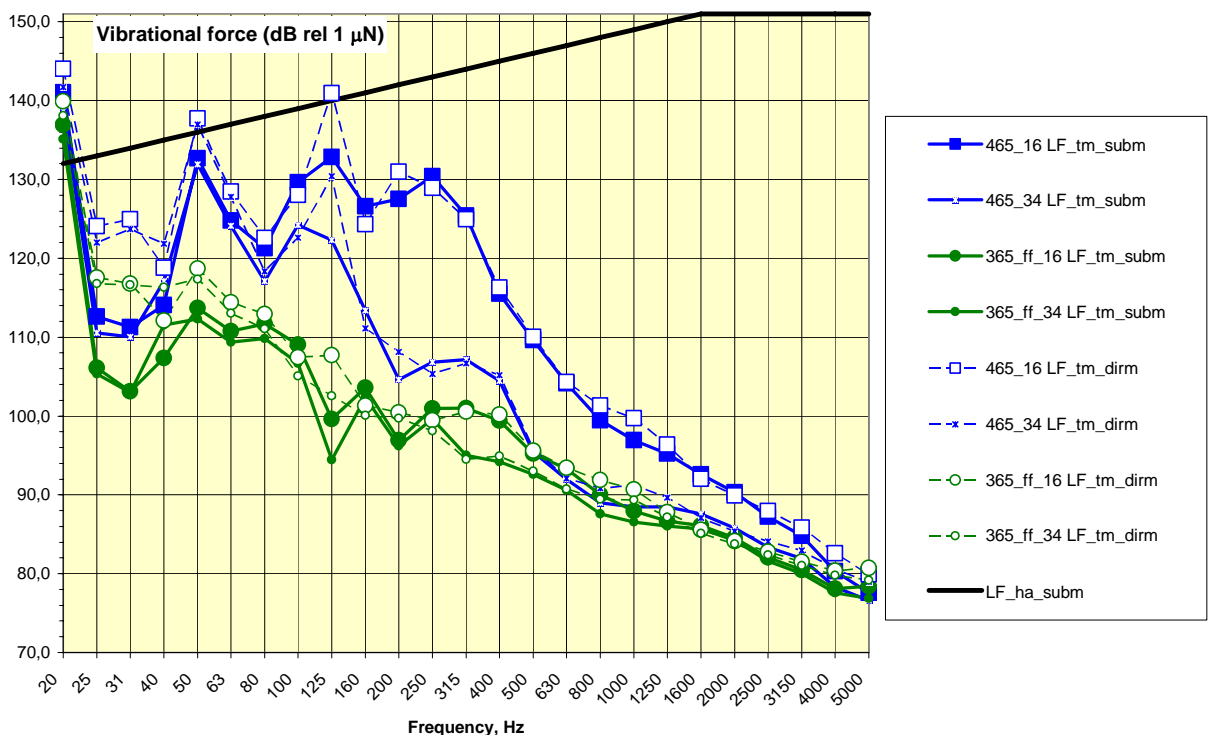
Another approach is the so-called plate method, were a resiliently mounted plate is used as the receiving structure, comparable with a reverberation room. The equivalent force level follows from the measured plate velocity  $v^2$  with working machine and the plate characteristics: excitation point mobility  $Y$ , mass  $M$  and structural reverberation time  $T_s$ :

$$L_{F,eq} = 10 \lg \frac{2,2v^2 M 2p}{T_s \text{Re}\{Y\} F_{ref}^2} \text{ dB} \tag{D.2b}$$

**Table F.1 – Force level  $L_F$  re 1 pN for the ISO tapping machine in octave bands**

Octave band with centre frequency in Hz							
31	63	125	250	500	1000	2000	4000
139	142	145	148	151	154	156	156

Ekvivalenta kraftspektra har beräknats enligt ekvationerna D2a och D2b för de fyra tvättmaskinsmätningarna enligt ovan. Jämförelsen visar, att direktmetoden (streckade linjer, vita punkter) tenderar att ge högre kraftvärden än substitutionsmetoden vid 50 Hz och 125 Hz (heldragna linjer, fyllda punkter), men att överensstämmelsen är god vid högre frekvenser. Som referens visas även hammarapparatens kraftspektrum, från tabell F.1, omräknat från oktavband till tredjedels oktavband.





I ett konferensbidrag<sup>3</sup> redovisar TNO liknande mätningar på tvättmaskiner, som kan jämföras med figuren ovan (det sägs dock inte vilken obalans man har haft i trumman vid mätning).

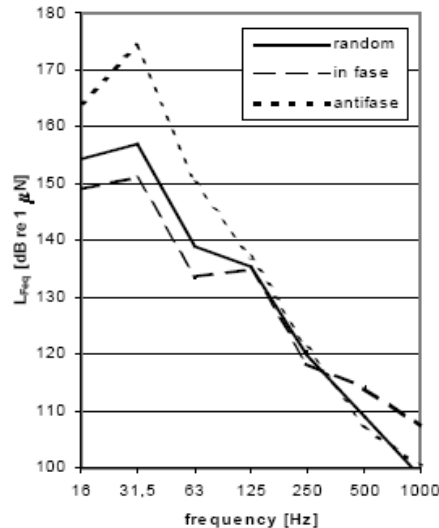


FIGURE 1. Equivalent force level, average of 8 washing machines with different phase assumptions between feet.

Anm. Notera att redovisningen görs i oktavband, som ger 3- 5 dB högre värden är tredjedels oktavband (linjärsumman av kraften i tre tredjedels oktavband ger oktavbandsvärdet)

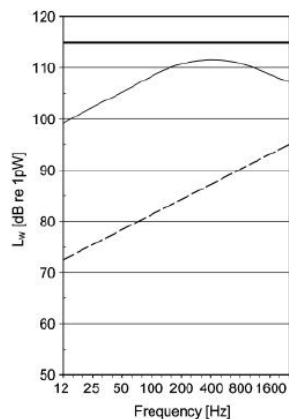
## Fortsatt utveckling

Flertalet medverkande företag har inte tillgång till den typ av specialkonstruerade bjälklag som finns hos Electrolux Laundry Systems. En intressant fråga som bör studeras i huvudprojektet, är om samma typ av mätningar skulle ge användbara resultat även om de utförs intill maskinen på en liten del av ett stort sammanhängande betongbjälklag eller betongplatta på mark, i fabriksmiljön. Är denna typ av mätuppställning praktiskt användbar skulle detta innebära avsevärda förenklingar för många tillverkare, eftersom man då kan göra stomljudsmätningen samtidigt som övriga provningar genomförs på maskinen. Fältprovningar skulle också kunna genomföras med samma metod. Metoden liknar då de så kallade direktfältsmätningar som görs av luftljudseffekt i halvekofria rum (ISO 3741, 3743 mfl metoder).

Förutsättningen för antagandet om konstant-kraft källa är uppfyllt för de provade tvättmaskinerna, de har en vek struktur jämfört med betongbjälklaget. Samma maskin skulle dock avge avsevärt mer stomljudeffekt på ett lätt bjälklag, vars mobilitet är i samma storleksordning som maskinens egen mobilitet. Detta förklarar något av tillverkarnas erfarenheter, att ljudstörningar uppträder oftare i byggnader med lätta bjälklag. I prEN 12354-5 visas ett exempel, där inmatad stomljudeffekt redovisas för den standardiserade hammarapparaten verkande på ett lätt och ett tungt bjälklag (vänstra figuren). I en artikel från ICA 2004 visas motsvarande figur beräknad för en tvättmaskin (hushållsmaskin)<sup>4</sup>:

<sup>3</sup> Structure-borne sound of equipment in buildings - characterisation and application of the source strength for washing machines as example. E. Gerretsen. Proceedings of ICA 2001, Rome

<sup>4</sup> Modelling structure-borne sound from equipment in buildings – current developments in EN 12354-5. Eddy Gerretsen TNO TPD, Sound and Vibration Division Delft, The Netherlands. Proceedings of ICA 2004, Kyoto. Th4 B.1.1.



Key

- Lw<sub>s,c,A</sub> = 124 dB(A)
- - - Lw<sub>s,inst-wood,A</sub> = 119 dB(A)
- ..... Lw<sub>s,inst-concr,A</sub> = 102 dB(A)

Figure D.1

Figure D.1 – Structure-borne sound power for the ISO-tapping machine: characteristic source power, installed power on a wooden floor and installed power on a concrete floor; the A-weighted power level is also indicated

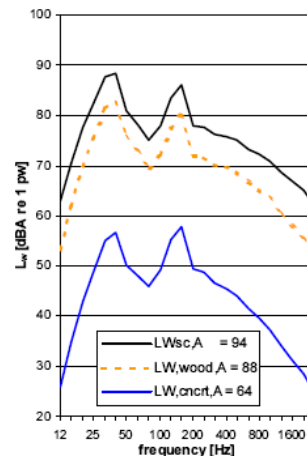


Figure 2: A-weighted structure-borne sound power of a washing machine; as source characteristic and injected into a wooden and a concrete floor.

The main effect in this case is an absolute shift in injected power between the concrete and wooden floor, compared to the characteristic power. More effect of frequency could be expected with more realistic floor mobility's, taking into account finite floor dimensions.

Olika typer av installationer ger avsevärda skillnader i inmatad stomljudeffekt. Exempel visas i prEN 12354-5:

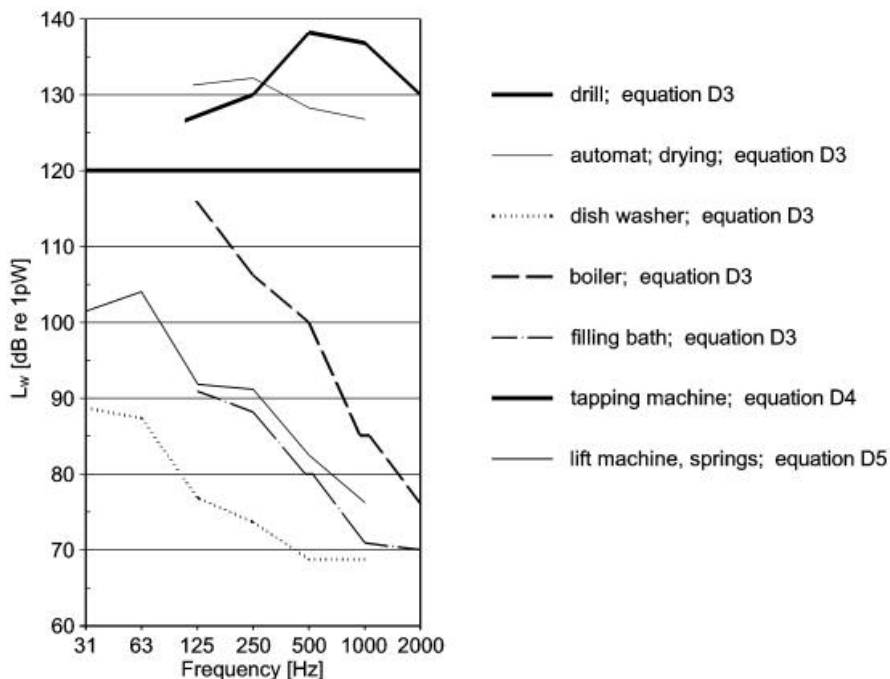
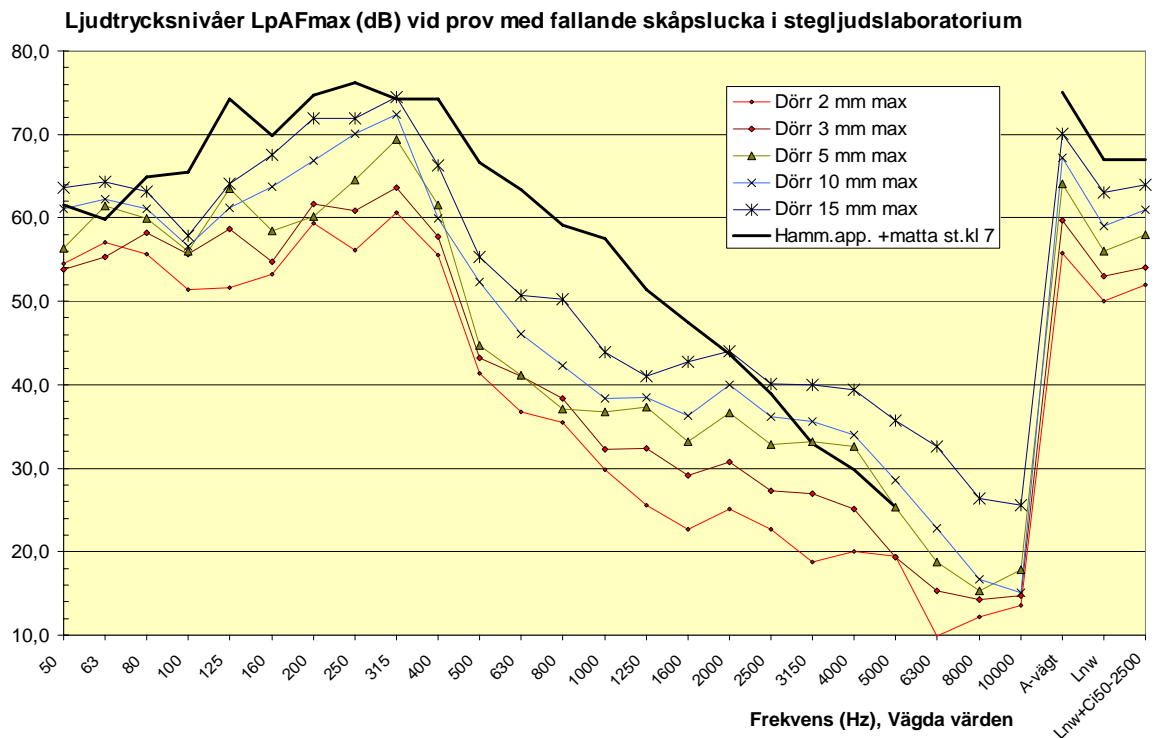


Figure D.4 – Examples of characteristic structure-borne sound power levels of some sources; derived from measurements of force or velocity using respectively Equations D.3, D.4 and D.5

Antagandet om konstant-kraft källa, och direktmetoden kan tillämpas även för köksskåp och liknande där det är praktiskt svårt att mäta med den standardiserade hammarapparaten (substitutionsmetoden). I förslaget till mätmetod från CEN/TC 126 (N 527, WI 00126061) anges

att en installation som byggts upp med veka skivor och balkar (vars mekaniska mobilitet är avsevärt större än i ett betongbjälklag, med en faktor  $\gg 10$ ), kan behandlas som en kraftkälla. Figuren nedan (från delrapport B) visar samband som stöder denna teori även när det gäller köksskåp. Frekvensspektrat för en hammarapparat som står på ett bjälklag med en tunn stegljudsdämpad plastmatta (cirka 1 mm skumskikt) har samma form som spektran för ett skåp vars skåpdörr slår mot stommen från olika höjder. Ökande fallhöjd ger approximativt en förskjutning uppåt av spektrat, svarande mot ökat energiinnehåll.



Vi tackar för uppdraget. Eventuella synpunkter på denna rapport ber vi Er lämna inom 8 dagar.

Med vänlig hälsning  
simmons akustik & utveckling ab

Christian Simmons

Bilagor: Inga