

# AKUSTIKEN BAKOM KULISSERNA

## STOMLJUDSÅTGÄRDER PÅ OPERAN OCH DRAMATEN

Simon Edwinsson (Delta Akustik)  
simon@akustiker.se  
Deniz Hadzalic (Delta Akustik)  
deniz@akustiker.se

### BAKGRUND OM PROJEKTET

**D**en 30:e augusti 2024 invigdes den nya byggnaden för Operan och Dramaten i Flemingsberg. Byggnaden innehåller lokaler där alla förberedelser kan göras innan en produktion har premiär på Kungliga Operans och Kungliga Dramatiska teatern. I huset finns dekorateljéer där man tillverkar fonder och kulisser, t.ex. smidesverkstäder, snickerier, måleri och syateljéer. I huset finns också repetitionslokaler för sångare, dansare och musiker. Mest utmärkande är den stora repetitionssalen på nedre plan som mäter 25x25 meter och har en takhöjd på 14 meter.

Byggnadens akustik, särskilt rumsakustiken i de stora repetitionssalarna, väckte stor uppmärksamhet bland invigningens besökare. Artifon hade uppdraget att projektera och implementera de rumsakustiska lösningarna, och arbetet resulterade i en utmärkt rumsakustisk ljudmiljö. En annan anmärkningsvärd aspekt, som däremot inte hörs, är byggnadens förmåga att hålla ljud från omgivningen ute.

### STOMLJUD FRÅN TÅG

Trots att stambanans tåglinjer går endast 50 meter från scenhuset hörs ingen tågtrafik inne i byggnaden. För att möta Operans krav på ljudisolering och tystnad krävdes omfattande akustisk projektering för att minimera luftljud, stomljud och vibrationer från omgivningen. I denna text beskrivs projektets akustiska utmaningar och de lösningar som användes för att skapa en miljö fri från stomljud.

Delta Akustik deltog i samtliga projektfaser, från programhandling och systemhandling under Fabeges ledning, till bygghandling och produktion under ledning av byggfirman MVB. Redan vintern 2020 utfördes initiala mätningar av vibrationer från tågtrafiken för att fastställa förutsättningarna för scenhuset. Totalt genomfördes fem mätningar av vibrationer/stomljud, samt en tillkommande slutlig verifiering vid projektets slutbesiktning.

### FÖRSTA TESTMÄTNING

Vi utförde mätningar av vibrationer i mark (lera) och på berg. Dock fanns inget synligt berg vid platsen för scenhuset (50 meter från spåren) så istället gjordes mätningen på en bergsknalle lite längre bort längsmed spåret, men på ungefär samma avstånd från spåren -55 meter. Se bild 1 för mätpunkt (innan huset byggdes) och bild 2 (med scenhuset markerat med rött)

Resultaten visade att den vägda accelerationsnivån på berg vid tågpassager uppfyllde det projektspecifika riktvärdet med god marginal. Dock uppmättes påtagliga vibrationer i frekvenserna 40-80 Hz vilket kan framkalla stomljud. Högst värden uppmättes vid passager av äldre SJ-tåg med toppar (Slow max) strax under 1 mm/s<sup>2</sup> i tersbandet 63 Hz.

Dessa mätvärden användes för att estimerar stomljudsnivån inomhus i repetitionssalen med hänsyn till rummets dimensioner och planerad rumsdämpning. Golv ansattes till strålningsfaktor 1. Övriga ytor till strålningsfaktor 0. Hänsyn togs däremot inte till förluster i övergång mellan berg och grundläggning eller till byggnadens egenresonans.

Den beräknade stomljudsnivån i dBA blev då 30 dBA (Slow max) vilket var 5 dB över det projektspecifika riktvärdet för stomljud, 25 dBA (Slow max)

Dessa resultat föranledde ett beslut om att göra scenhusets repetitionssal som ett fullskaligt rum i rum med flytande golv, fribärande tak och väggar uppställda på vibrationsisolering. Även andra faktorer spelade in i valet av rum-i-rum-lösning, såsom det faktum att smidesverkstaden låg vägg-i-vägg med repsalen och att repsal 2 var belägen ovanför. Med sin rumsvolym på nästan 9000 kubikmeter måste det vara ett av de största rum-i-rum som byggts i Sverige. Ett stålskelett bär upp hela konstruktionen med stora fackverksbalkar i tak. Stomljudsisoleringen sker mellan



Bild 1.

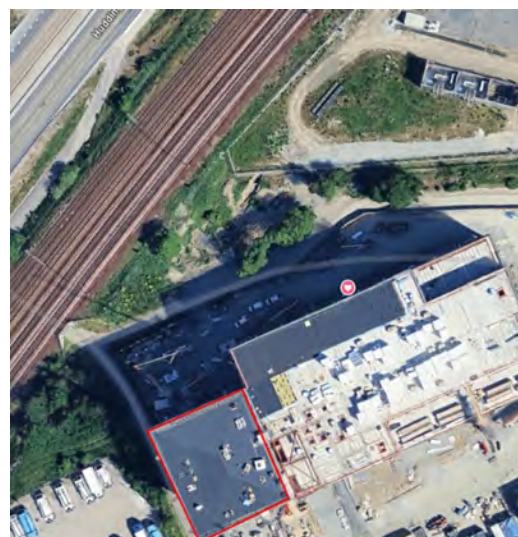


Bild 2.



Bild 3.

pelarfot och konstruktionsbetongen, se bild 3. Golv utförs helt flytande på remsor av Regufoam.



## ANDRA TESTMÄTNING

Som ett led i kvalitetssäkringen av MVB:s projektering av bygghandlingar utfördes förnyade mätningar på frilagt berg på den plats där scenhusbyggnaden kommer att uppföras, se bild 4.



Bild 4.

Syftet var att få en högre noggrannhet i resultaten genom att mäta på den exakta platsen för scenhusbyggnaden. En överraskning var att vibrationerna på denna plats var väsentligt högre, ca 2,5 mm/s<sup>2</sup> i tersbandet 63 Hz jämfört med tidigare uppmätt 1 mm/s<sup>2</sup>. Förklaringen antogs vara att berget i den tidigare mätpunkten haft fler sprickor och därmed en högre förlustfaktor. Med de nya vibrationsvärdena som indata ökade den beräknade stomljudsnivån till 35 dBA, dvs 10 dB högre än kravet. Bedömningen var därmed att de åtgärder som beskrivits i SH/FU var nödvändiga att utföra. Se bild 5.

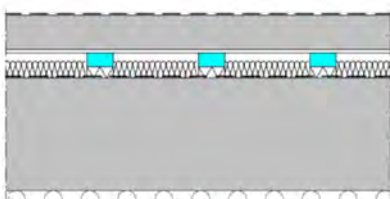


Bild 5.

## TREDJE OCH FJÄRDE TESTMÄTNING

Vid mättillfälle 3 började det bli oroligt på riktigt. Mätningarna på den gjutna plattan, som delvis är pålad och delvis är platta på mark, visade nämligen att vibrationsnivåerna i frekvensen 63 Hz förvärrats avsevärt jämfört med mätningen på berg. Det är inte märkligt i sig, eftersom en betongplatta har större frihetsgrader än berget. Plattan var dock lastad med stålomme och bjälklag för ovanliggande våningar, vilket torde haft en dämpande effekt på amplituden i vibrationerna i rummets ytterkanter, dock ej

i mitten av rummet där mätningen utfördes. Där uppmättes som högst 5 mm/s<sup>2</sup> vilket, efter omräkning till A-vägd stomljuds nivå (Slow max) inomhus, beräknades till 41 dBA dvs 16 dB högre än kravet.

Vid mättillfälle 4 utfördes en mer omfattande mätning av vibrationer över hela plattan, uppdelad i 36 sektioner. Medelvärdet av dessa mätningar gav en bättre bedömning av ljudstrålningen för hela golvytan, men visade sig vara marginellt lägre (bättre) än den tidigare mätningen i enstaka punkter. Det började nu bli intressant att ta reda på den exakta effekten av det flytande golvet. Skulle det vara tillräckligt för att minska stomljuken till 25 dBA?

## FEMTE TESTMÄTNING

För att ta reda på den stomljuddämpande effekten av golvlösningen i det flytande golvet byggde MVB ett testgolv i likhet med den projekterade lösningen i SH/FU, bild 6.

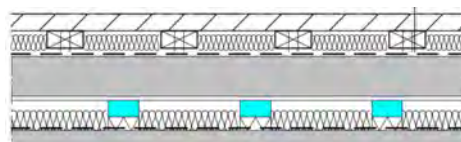


Bild 6.

Eftersom resultatet är temperaturberoende inväntades försommaren med en temperatur på ca 20 grader. Mätning gjordes med accelerometer placerad på toppen av det flytande golvet, först på betongen innan läggning av ytskikt och sedan med ytskikt (furutiljor) monterat. På sidan om

provgolvet placerades en accelerometer för att få referensvärden, se bild 7. På så vis kunde förbättringen av provgolvet utläsas.

Följande noterades:

- 50 Hz – en dämpning med ca 11 dB
- 63 Hz – en dämpning med ca 7 dB
- 80 Hz – en dämpning med ca 10 dB
- beräknad stomljuds nivå i repsalen blev 12 dBA lägre

Ovanstående får som konsekvens att den mest bullrande tågpassagen skulle ge upphov till ca 30 dBA (Slow max). Samtidigt konstaterades att 6:e högsta passage per timme skulle klara riktvärdet 25 dBA. Därmed gjordes bedömningen att lösningen med det flytande golvet kvalitetssäkrats så långt som möjligt och att konstruktionen skulle fungera för att klara kravet. >>

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| 100 | ÖVERGOLV ENL. A, YTSKIKT ENL. PLAN  |
| -   | PE-FOLIE                            |
| 100 | BETONG C30/37 INKL. KVARVARADE FORM |
|     | AV 22mm CEMINWOOD, ARMERAS MED      |
|     | NFS10150 CENTRISKT.                 |
| 67  | GOLV ENL. LJUDBESKRIVNING           |

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| 100 | BETONG C30/37 INKL. KVARVARADE FORM |
|     | AV 22mm CEMINWOOD, ARMERAS MED      |
|     | NFS10150 CENTRISKT.                 |
| 67  | GOLV ENL. LJUDBESKRIVNING           |
|     | 37x70 REGUFODAM EL. LIKV. s300      |
|     | 30 XPS F1300 s300                   |
|     | 45 MINERALULL                       |
| -   | PE-FOLIE                            |
| 100 | BETONG H ENL. PLAN                  |
|     | ISOLERING, STENULL                  |
|     | (FÖRSKJUTNA SKARVAR)                |

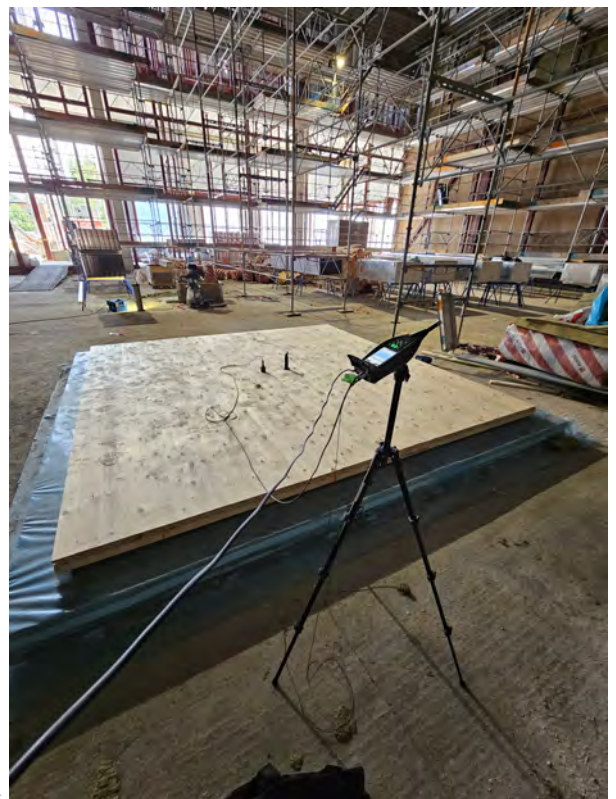


Bild 7.

## VERIFIERINGSMÄTNING

Den avslutande mätningen utfördes som en del av verifieringsmätningarna under vintern 2024. Ljudnivån loggades i repsalen (övervakat) under en dryg timme med ventilationen ur drift. Samtidig loggning av ljudnivå skedde utomhus för att registrera tågpassager. Utvärderingen skedde genom att synkronisera utomhusmätningen med inomhusmätningen. Resultatet visar att ingen passage överskrider riktvärdet för stomljud,  $L_{ASmax}$  25 dBA. Ett avlägset stomburet muller kan förnimmas vid de kraftigaste tågpassagerna och det högsta uppmätta värdet för  $L_{ASmax}$  var 23 dBA samtidigt som utomhusnivån uppmättes till 83 dBA (frifältsvärde).

## LÄRDOMAR

Skillnaden mot den beräknade ljudnivån i testmätning 5 var därmed 7 dB. Man bör ställa sig frågan vad som kan förklara avvikelser mellan beräknat värde och uppmätt värde. Några av orsakerna kan vara:

- 3 dB förklaras av den säkerhetsmarginal haft med i beräkningen.
- vi hade ansatt efterklangstiden till nästan dubbla värdet än vad det verkligen mätte i oktavbandet 63 Hz, vilket förklarar 2-3 dB.
- vi hade ansatt strålningsfaktorn till 1, vilket gäller för betong men inte för trägolv som har en lägre koefficient.

Tack vare detta hade vi marginalerna på "rätt sida" och det behövde inte bli aktuellt att titta på 6:e passage utan även de värsta tågpassagerna uppfyller kravet. Några andra lärdomar att ta med sig:

- Vibrationsnivån på berg kan variera väldigt mycket trots lika avstånd till spåret. Det är viktigt att mäta på den exakta platsen för aktuell byggnad.
- En pålad platta på mark kan mäta avsevärt högre vibrationer jämfört med berget som grundläggningen sker mot. I detta fall ca 3 gg högre acceleration.

- Ett påkostat och avancerat flytande golv ger en dämpning på ca 10 dB i vibrationsnivå vid de kritiska frekvenserna i oktavbandet 63 Hz.

Upplevelsen för en akustiker att stå i salen, med ett tåg dundrande förbi strax utanför utan att ens förnimma det, är en påtaglig påminnelse om precisionen och kraften i de valda akustiska lösningarna. Nu när huset är invigt återstår det att se hur verksamheten upplever lokalerna. Är det tyst från hyresgästen är det ett kvitto på att också huset är tyst - och att vårt arbete tillsammans med Fabège och MVB varit lyckat!



Simon Edwinsson  
VD, Akustiker  
Delta Akustik  
simon@akustiker.se



Deniz Hadzalic  
Akustiker  
Delta Akustik  
deniz@akustiker.se

## EXAMENSARBETEN FRÅN KTH

*Anja Studic*

*Stockholm, Sweden 2024*

*School of Electrical Engineering and  
Computer Science (EECS)*

*Subject: Computer and Information Sciences*

### SPHERICAL MICROPHONE

### ARRAY FOR STUDIO

### RECORDING OF SPEECH:

### A SUBJECTIVE EVALUATION

With the rise of interest in podcasts and spoken audio media, radio stations are looking for ways to stay in the front line of audio technology development. This means trying new formats and ways of working. A promising technology for this is a type of spherical microphone array: the Ambisonic microphone. It enables the use of minimal gear and flexible post-production. However, the quality of the end result needs to be secured. In this study, 14 subjects were asked to compare the audio of a spoken

studio program recorded with a regular close-range microphone with that of the same program recorded with an ambisonic microphone using sound source localization and beamforming.

“radio stations are looking for ways to stay in the front line of audio technology development. This means trying new formats and ways of working”

The subjects reported their preferences for each of the ten excerpts of the program on a comparative five-point Likert scale and left free-form answers about their impressions of the audio. The results of the study show

a clear preference for the close-range microphone. The main reason stated by the subjects is the lack of lower frequencies in the ambisonic recording, followed by descriptions of the audio as "tinny" and "less natural". Another often-stated reason is the perception of the ambisonic recording as having too much room reverberation. The strength of the preference is indicated to vary between excerpts, and some comments suggest that differences in content could be a reason. In the future, it would be interesting to investigate whether the technology could perform better in environments with more movement. □