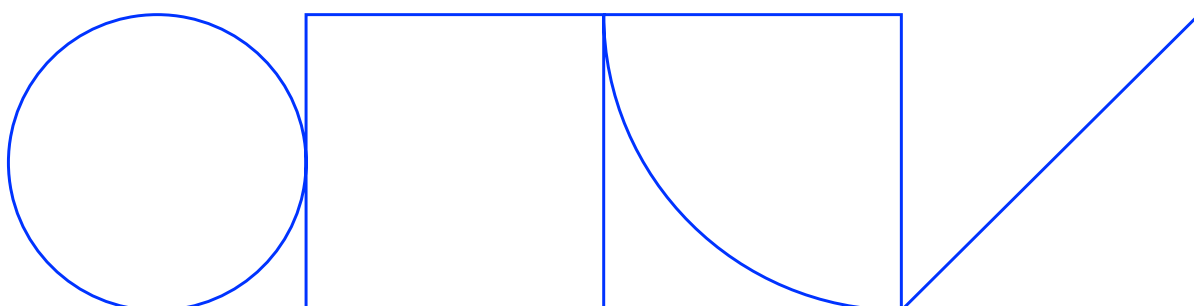


Resurseffektiv utformning av betongbjälklag

Janna Karlsson, Mats Karlsson
Thomas Betong

2026-06-22



Förord

Projektets arbetsgrupp har bestått av:

Alexander Christoffersson, Thomas Betong (projektledare)

Carlos Gil Berrocal, Thomas Concrete Group (projektledare under uppstart)

Janna Karlsson, Thomas Betong (huvudförfattare)

Mats Karlsson, Thomas Betong

Jan Adolfsson, Peab

Projektet har finansierats av SBUF. Referensgruppen består av medlemmarna i Byggföretagens utskott FoU Väst.

Göteborg, juni 2026

Sammanfattning

Bygg- och anläggningssektorn spelar en betydande roll för den svenska ekonomin och samhällsutvecklingen, och det uppskattas att den totala klimatpåverkan från byggprocesser i Sverige är cirka 10 miljoner ton koldioxid per år, vilket motsvarar ungefär 20 procent av Sveriges rapporterade växthusgasutsläpp år 2020 [1].

Syftet med projektet var att undersöka hur man kan minska CO₂-utsläppen från betongbjälklag genom att kombinera olika tekniker med hålrum och sparkroppar i utformningsprocessen för att minska materialanvändningen.

Projektet har även undersökt hur man med hjälp av en akustisk modell kan bedöma ljudisoleringsegenskaperna hos ett optimerat betongbjälklag. Resultaten från akustiska modeller har validerats genom mätdata från labbförsök.

Från resultaten i projektet framkommer att geometri och utformning av sparkroppens storlek har stor betydelse både för luftljud och stegljud. Påverkan är så stor att det vid en stor sparkropp inte hjälper att kompensera detta med ytterligare betong. Trots en ökning med 45 mm betong på bjälklaget förbättrades inte ljudmotståndet på det sätt som hade förväntats.

Förutsättningarna för ljudisolering bedöms kunna förbättras genom att fördela mindre sparkroppar mer jämnt över bjälklagsytan. Volymförhållandet mellan sparkroppar och betong kan vara likvärdigt men med fler sparkroppar av mindre dimension. Detta bedöms kunna minska påverkan på ljudisoleringen från resonanser i hålrummen. Att fylla hålrummen med exempelvis stenull före gjutning skulle också kunna påverka deras resonansbeteende. Denna effekt och dess påverkan har inte ingått i projektets omfattning.

Mot bakgrund av projektets resultat finns en stor potential att sänka klimatavtrycket genom att använda sparkroppar. För att lyckas med detta är det viktigt att minska resonansen i hålrummen genom att välja fler och mindre ursparningar. Det rekommenderas fortsatt forskning för att erhålla bättre förståelse och kunskap om ljudegenskaper i bjälklag med sparkroppar.

Summary

The construction and civil engineering sector plays a significant role in the Swedish economy and societal development, and it is estimated that the total climate impact from construction processes in Sweden amounts to approximately 10 million tons of carbon dioxide per year, corresponding to roughly 20 percent of Sweden's reported greenhouse gas emissions in 2020 [1].

The purpose of the project was to investigate how CO₂ emissions from concrete floor slabs can be reduced by combining different techniques involving voids and hollow bodies in the design process to reduce material use.

The project also investigated how the sound insulation properties of an optimized concrete floor slab can be assessed using an acoustic model. The results from the acoustic models were validated using measurement data from laboratory tests.

The project results show that the geometry and design of the size of the hollow bodies have a significant impact on both airborne and impact sound insulation. The effect is so considerable that, in the case of a large hollow body, it is not possible to compensate for this by adding more concrete. Despite adding 45 mm of concrete on top, the sound insulation did not improve in the way that had been expected.

The conditions for sound insulation are improvable by distributing smaller hollow bodies more evenly across the slab surface. The volume ratio between hollow bodies and concrete may remain similar, but with a greater number of smaller units. This is expected to reduce the impact on sound insulation caused by resonance in the voids. Filling the voids with materials such as mineral wool prior to casting could also affect their resonance behavior. This effect and its impact were not included within the scope of the project.

Based on the project results, there is significant potential to reduce the carbon footprint by using hollow bodies. To achieve this, it is important to reduce resonance in the voids by selecting a larger number of smaller recesses. Further research is recommended to gain a better understanding and greater knowledge of the acoustic properties of floor slabs with hollow bodies.

Innehåll

Förord	2
Sammanfattning	3
Summary.....	4
1 Inledning.....	6
1.1 Bakgrund och problemställning	6
1.1.1 State-of-the-art med nyckelreferenser.....	7
1.1.2 Koppling till tidigare SBUF projekt.....	9
1.1.3 Branschförankring och fokus	9
1.2 Syfte och mål.....	9
1.2.1 Fokusområden SBUF	10
2 Metodik	11
2.1 Utformning av bjälklag.....	11
2.2 Akustisk provning i labb.....	12
2.2.1 Luftljudsisolering	12
2.2.2 Stegljudsnivå	14
2.2.3 Montering	15
2.3 Framtagning av beräkningsmodell	16
3 Resultat och diskussion	17
3.1 Resultat från akustiska labbprovningar samt jämförelse med konventionella bjälklag i betong	17
3.2 Resultat från akustiska simuleringar	19
3.2.1 Exempelstomme för BBR-krav.....	21
3.2.2 Sammanfattande slutsatser av utförda beräkningar och simuleringar ..	21
3.3 Beräkning av klimatpåverkan för bjälklag med sparkroppar	22
4 Slutsatser	23
Referenser	24

1 Inledning

Detta kapitel ger en övergripande introduktion till studiens bakgrund, syfte och relevanta sammanhang.

1.1 Bakgrund och problemställning

Parisavtalet trädde i kraft 2016 med målet att begränsa den globala uppvärmningen till 1,5°C under detta århundrade genom att minska utsläppen av växthusgaser. Sverige antog enligt avtalet ett klimatpolitiskt ramverk där det långsiktiga målet är att uppnå klimatneutralitet, det vill säga inga nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären senast år 2045.

Bygg- och anläggningssektorn spelar en betydande roll för den svenska ekonomin och samhällsutvecklingen men det uppskattas att den totala klimatpåverkan från byggprocesser i Sverige är cirka 10 miljoner ton koldioxid per år, vilket motsvarar ungefär 20 procent av Sveriges rapporterade växthusgasutsläpp år 2020 [1].

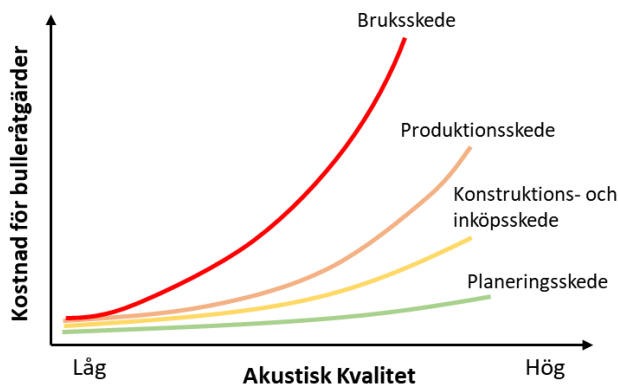
Globalt står byggnader idag för 39 % av de energirelaterade koldioxidutsläppen enligt World Green Building Council [2], där byggprocessen står för cirka 50 procent av den totala klimatbelastningen under byggnadens livstid, beräknat över 50 år, för ett flerbostadshus byggt av betong [3]. Samtidigt står tillverkning av cement, nyckelingrediensen i betong, för cirka 7 % av de globala CO₂-utsläppen [4].

Under de senaste åren har stora ansträngningar gjorts för att minska utsläppen kopplade till betongkonstruktioner genom användning av SCM (supplementary cementitious materials), vilket har resulterat i kommersiellt tillgänglig klimatförbättrad betong med upp till 50% lägre global uppvärmningspotential (GWP) jämfört med standardbetong som brukar användas i betongbyggnader. Att minska CO₂-utsläppen från betongens andel kopplade till användning av cement är dock inte tillräckligt för att uppnå klimatneutralitet.

Enligt Favier et al. [5] skulle en ytterligare 30% minskning av CO₂-utsläpp kunna uppnås genom att optimera den strukturella utformningen med nuvarande byggtekniker. I ett typiskt flerbostadshus står bjälklag för upp till 60% av det totala koldioxidavtrycket från material från hela leveranskedjan, inklusive energiförbrukning vid tillverkningsprocessen och logistik från råmaterial till byggplats [6].

Bostadsbyggandet förväntas öka betydligt inom en snar framtid, med vissa prognoser som uppskattar att den totala boytan kommer att fördubblas under de närmaste 40 åren [7]. En fortsatt optimering av bjälklagen kommer därför bli nödvändig för att minska klimatpåverkan ytterligare.

Trots potentialen för material- och CO₂-besparingar kan minskningen av massa och förändringen av geometri i icke-traditionella betongbjälklag ha en stor inverkan på konstruktionens dynamiska beteende, vilket därmed orsakar problem med vibrationer och ljudöverföring. Som visas i figur 1 ökar kostnaden för att implementera ljudisolerande åtgärder snabbt i senare skeden av byggprocessen, och så gör även den åtgärdens CO₂, vilket i vissa fall helt kan kompensera besparingarna som uppnåtts genom materialminskningen.



Figur 1. Samband mellan akustik, kvalitet och kostnad för bulleråtgärder, anpassad från Boverkets Handbok [8].

Därför är det viktigt att inkludera en akustisk analys i de tidiga skedena av utformningen för att utveckla lösningar som är både hållbara och ekonomiskt genomförbara. Även om den dynamiska prestandan för traditionella bjälklag är väl etablerad och praktiska riktlinjer [9] för akustiska krav finns tillgängliga, är prestandan för optimerade betongbjälklag med icke-traditionella geometrier fortfarande mindre förstådd.

Följaktligen kan studier av det dynamiska beteendet hos betongbjälklag genom akustiska simuleringar, till exempel med hjälp av finita elementmetoden, visa sig vara mycket användbara för att styra designprocessen. Ändå är det också mycket viktigt att de dynamiska resultaten valideras experimentellt för optimerade betongbjälklag som omfattar komplexa geometrier och olika materialegenskaper.

1.1.1 State-of-the-art med nyckelreferenser

Studier har visat att det finns stor potential för optimering av bjälklag. Till exempel, i en studie från Cambridge [10] jämfördes klimatpåverkan för olika bjälklagsystem, och slutsatsen var att en 12 % besparing av CO₂-utsläppen kunde uppnås genom att minska tjockleken och betongkvaliteten för ett betongpelardäck. Vidare kunde man, genom att ersätta pelardäcket med en betongplatta med samverkande balkar eller hålldäck, spara upp till 36% av CO₂-utsläppen. En annan studie av företaget Buro Happold [11] från 2020 visade också att klimatpåverkan för en referens pelardäck kunde minskas med 30% genom att använda spännarmering och upp till 42% genom att använda ett system med våffelbjälklag. Liknande resultat hittades i en LCA-studie [12] utförd av The Concrete Centre som undersökte olika system av betongbjälklag, där den största potentialen för besparingar återfanns för längre spännvidder och högre belastningar.

Andra forskare har gått ifrån mer traditionella system och föreslagit innovativa lösningar baserade på topologiskt optimerade bjälklagsystem bestående av ett dubbelt krökt skal med eller utan ribbstag, se t.ex. Block Research Group [13] i Schweiz och Acorn Project [14] i Storbritannien. Ett annat exempel på en innovativ betongbjälklagslösning är "Stereoform plattan", utvecklad av Skidmore, Owings och Merrill [15]. Exempel på optimerade bjälklagslösningar med icke-traditionell geometri visas i figur 2. Figuren illustrerar hur alternativa geometrier kan användas för att

reducera materialanvändningen, men också hur dessa lösningar avviker från traditionella massiva bjälklag.

(a) The Block Research Group



(b) The Acorn Project



(c) Stereoform Slab



Figur 2. Olika exempel på optimerade bjälklagsystem med icke-traditionell geometri.

Som tidigare nämnts kan vibrationer och ljudöverföring bli den begränsande faktorn i designen för lättare bjälklag. Det dynamiska beteendet styrs ofta av styvhet för frekvenser under elementets naturliga frekvens, medan ljudöverföring huvudsakligen kontrolleras av massa vid högre frekvenser. För betongkonstruktioner med en vanlig geometri har tidigare studier experimentellt validerat det dynamiska beteendet för bjälklag som simulerats med olika metoder.

Till exempel använde Neves e Sousa et al. [16] en analytisk modell för att förutsäga ljudfältet som genererades av punktljudkällor för homogena rektangulära betongplattor med olika randvillkor. I en annan studie använde Asakura et al. [17] en numerisk metod baserad på finita differenser i tidsdomänen för att studera ljudöverföringsegenskaperna för betongstommar, inklusive bjälklag, balkar och pelare. I mer nyliga studier visade Roozen et al. [18] och Wu et al. [19] hur noggranna resultat av det dynamiska beteendet för bjälklag med icke-traditionella former kan erhållas med simuleringar baserade på beräkningsmodeller, i båda fallen baserade på finita elementmetoden, för topologiskt optimerade bjälklag.

För betongbjälklag används i första hand den standardiserade hammarapparaten (tapping machine) enligt SS-EN ISO 10140-3 för laboratoriemätningar och ISO 16283-2 för fältmätningar när det gäller att mäta ljudegenskaper. Resultaten utvärderas med vägt stegljudstal $L_{n,w}$ eller $L'_{n,T,w}$ enligt ISO 717-2, vilket är den etablerade metoden för jämförbarhet och kravuppfyllnad. För tunga konstruktioner som betongbjälklag ger denna metod tillförlitliga och reproducerbara värden. Kompletterande källor som gummiboll används främst för komfortbedömning i lätta konstruktioner och är normalt inte nödvändiga för betongbjälklag [20,21].

1.1.2 Koppling till tidigare SBUF projekt

Projektet ansluter till flera områden inom tidigare SBUF-projekt. De mest närbesläktade är projekt som behandlat ljudöverföring och vibrationer i lätta konstruktioner. Nedan redogörs för kopplingen till tidigare SBUF-projekt.

Human induced vibrations in Light steel floors

Projektet SBUF 09038 "Human induced vibrations in Light steel floors" rapporterades 2003 och syftade till att experimentellt undersöka de dynamiska egenskaperna hos lätta stålbjälklag och deras respons på gånginducerade vibrationer.

Svikt, vibrationer och lågfrekvent ljud i lätta konstruktioner

Projektet SBUF 12445 "Svikt, vibrationer och lågfrekvent ljud i lätta konstruktioner" rapporterades 2013 som en del av det nationella projektet AkuLite. Syftet med projektet var att ta fram en rapport som kan användas som hjälpmedel av små och medelstora byggentreprenörer för att i så stor utsträckning som möjligt undvika lågfrekvent ljud och vibrationer i lätta stommar.

1.1.3 Branschförankring och fokus

En bättre förståelse av potentialen för CO₂-reduktion av betongbjälklag genom tillgängliga tekniker och möjligheterna att bestämma ljudöverföringsegenskaper hos konstruktionselement kommer att uppmuntra designers och entreprenörer att optimera sina stomlösningar.

Optimerade lösningar i sin tur kommer att resultera i minskade mängder betong och stål, vilket kommer att leda till ett mer effektivt byggnadsverk med bättre utnyttjande av material.

Dessutom kan lättare bjälklag också innebära ekonomiska besparingar i vertikala element som pelare och väggar samt grundläggning, vilket ger betydande ekonomiska fördelar och bidrar till ökad hållbarhet över hela livscykeln genom ett lägre koldioxidavtryck.

1.2 Syfte och mål

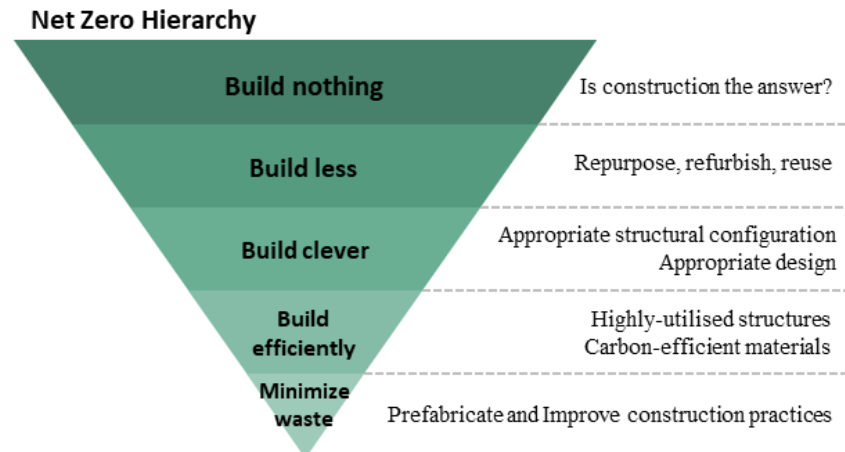
Syftet med projektet var att undersöka hur CO₂-utsläppen från betongbjälklag kan minskas ur ett designperspektiv genom att kombinera olika tekniker i utformningsprocessen. Detta har studerats genom formoptimering och användning av sparkroppar, vilket leder till en minskad betonganvändning.

Projektet har även undersökt hur man med hjälp av numeriska modeller kan bedöma ljudisoleringsegenskaper av ett optimerat betongbjälklag och hur det kan inkluderas i utformningsprocessen i tidiga skeden. Resultaten från akustiska modeller har validerats genom mätdata från labbförsök.

Projektets huvudsakliga mål är att öka kunskapen och förståelsen kring hur ett resurseffektivt bjälklag med minimerad mängd betong uppför sig akustiskt. Detta skapar förutsättningar för branschens aktörer att bygga mer resurseffektiva konstruktioner.

1.2.1 Fokusområden | SBUF

Hållbarhet är ett av SBUF:s fokusområden och ligger i linje med detta projekt. Projektets resultat kan hjälpa den svenska byggbranschen att minska klimatpåverkan från betongbyggnation och därmed bidra till uppsatta klimatmål om 50 % minskning av CO₂-utsläpp till 2030 och klimatneutralitet år 2045, med fokus på nivåerna "Build clever" och "Build efficiently" i Net Zero Design-hierarkin, se figur 3.



Figur 3. Net Zero hierarki.

2 Metodik

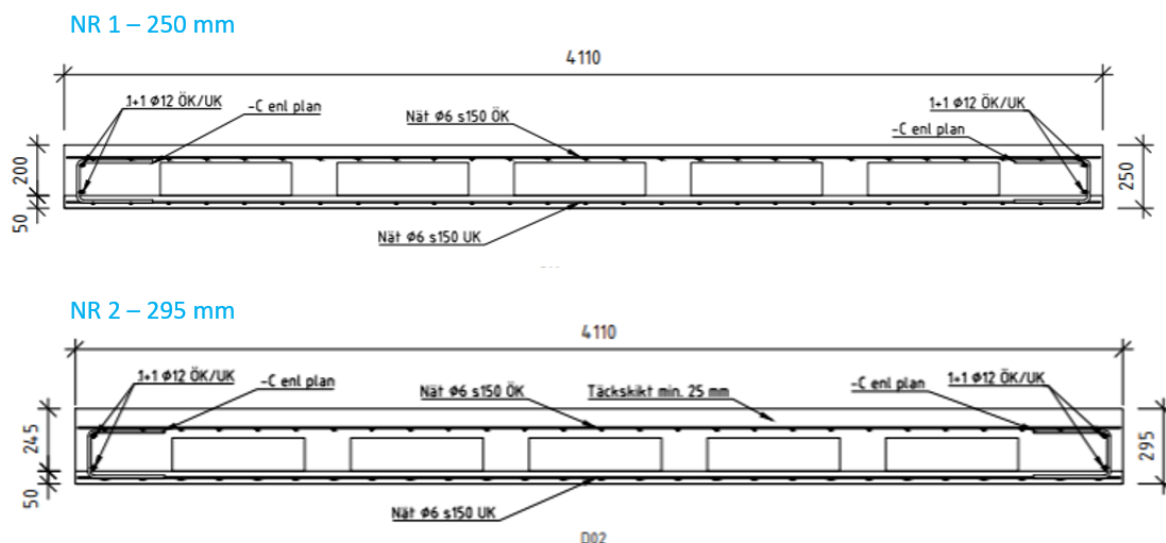
I detta kapitel förklaras hur studien utförts.

2.1 Utformning av bjälklag

Bjälklagen utformades med hänsyn till att totala höjden skulle understiga 300 mm, då detta har framkommit som ett önskemål eller en etablerad praxis från flera aktörer i branschen. Vid större bjälklagshöjder uppkommer det nya utmaningar, där bland annat byggnadens totalhöjd kan bli så hög att den totala byggnadens byggbara yta påverkas negativt.

Två typer av bjälklag utvärderades, det ena 295 mm och det andra 250 mm i höjd. Genom att minimera betongvolymen i dessa bjälklag med hjälp av sparkroppar skapades nödvändiga förutsättningar för att kunna studera hur ljudegenskaperna varierar mellan de olika bjälklagen. Hållrummen skapades genom att integrera kvadratiske boxar av återvunnen plast med dimensionerna 520 × 520 mm och höjden 130 mm. Genom provning av ljudegenskaperna kunde en akustisk modell etableras för att variera och simulera olika typer av utformningar. Genom att variera antalet boxar samt boxarnas höjd erhålls en modell som tar hänsyn både till bjälklagets höjd och andelen hållrum.

I figur 4 presenteras tillverkningsritningar för de två bjälklagen, 250 mm och 295 mm högt som användes i den experimentella studien.



Figur 4. Tillverkningsritningar för de två bjälklagen.

För att anpassa bjälklagets dimensioner till provning av ljud tillverkades dessa i måtten 3 × 4 meter. I normalfallet skulle längden på en bjälklagsplatta vara i storleksordningen 5–9 meter och med en bredd på cirka 1,2–3 meter. Testelementen tillverkades därefter i Thomas Betongs fabrik i Lane-Ryr. Utformningen av bjälklagen med sparkroppar visas i figur 5, där man ser hur hållrummen är placerade i konstruktionen.



Figur 5. Utformning av bjälklag med sparkroppar.

2.2 Akustisk provning i labb

Mätningarna har utförts i RISE luft- och stegljudslaboratorium för golv i en provöppning med måtten 3×4 m. Det övre och det nedre rummet har en volym på 103 respektive 138 m³. Laboratoriet uppfyller kraven i SS-EN ISO 10140-5 som motsvarar den internationella standarden med samma nummer. RISE är ackrediterat för svensk standard.

2.2.1 Luftljudsisolering

Mätningarna utfördes enligt SS-EN ISO 10140-1:2021 och SS-EN ISO 10140-2:2021 som motsvarar de internationella standarderna med samma nummer. RISE är ackrediterat för svensk standard.

Reduktionstalet R har bestämts enligt:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg (S / A)$$

Där

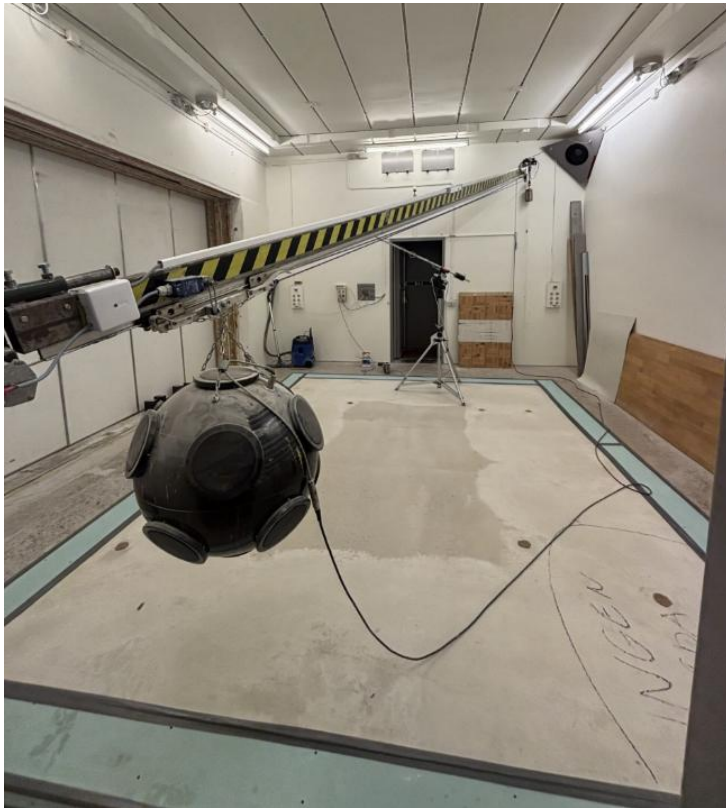
L_1 är medelljudtrycksnivån i sändarrummet (dB),

L_2 är medelljudtrycksnivån i mottagarrummet (dB),

S är den fria provöppningens area (m²) och

A är mottagarrummets ekvivalenta absorptionsarea (m²).

Medelljudtrycksnivåerna i respektive utrymme har fastställts med hjälp av en roterande mikrofonbom, se figur 6, (radie > 1,1 m) och en digital frekvensanalysator. En rörlig högtalare har använts i sändarrummet. Under mättiden 128 s har den rört sig upp och ner längs en bana tvärs genom rummet.



Figur 6. Roterande mikrofon för mätning av luftljudsisolering.

Resultaten har utvärderats med avseende på vägt reduktionstal i laboratorium, R_w , enligt SS-EN ISO 717-1:2020 som motsvarar den internationella standarden med samma nummer. RISE är ackrediterat för svensk standard.

2.2.2 Stegljudsnivå

Mätningar och utvärdering utfördes enligt SS-EN ISO 10140-3:2021 och SS-EN ISO 717-2:2020, vilka är likvärdiga med de internationella standarderna med samma nummer. RISE är ackrediterat för svensk standard.

En stegljudsapparat placerades, se figur 7, i 9 olika positioner i sändarrummet fördelade på mätobjektet med en diagonal placering i 45° vinkel mot bjälklagets kantlinjer. En roterande mikrofonbom (radie > 1,1 m) har använts i mottagarrummet och integrationstiden i varje position var 64 s.



Figur 7. Stegljudsapparat för mätning av stegljudsisolering.

Den normaliserade stegljudstrycksnivån, L_n , har bestämts enligt:

$$L_n = L_i + 10 \lg (A / A_0)$$

Där

L_i är den genomsnittliga ljudtrycksnivån i mottagarrummet, som uppstår då mätobjektet exciteras med en standardiserad stegljudsapparat.

A är den ekvivalenta absorptionsarean i mottagarrummet (m^2).

$$A_0 = 10 \text{ m}^2$$

Resultaten från stegljudsnivåmätningen har utvärderats med avseende på den vägda normaliserade stegljudstrycksnivån, $L_{n,w}$, enligt SS-EN ISO 717-2:2020 tillsammans med anpassningstermen för lågfrekvent stegljudsnivå (CI och $CI_{50-2500}$).

2.2.3 Montering

Montering av bjälklagen i provöppningen gjordes av RISE. Runt provobjektens kanter byggdes en sarg av 10 mm OSB som isolerades med mineralull och 2–4 × 13 mm gips beroende på bjälklagshöjd (250 mm, 295 mm). Dessutom tätades bjälklagen med lera underifrån och tejp ovanifrån, se figur 8 och figur 9, vilka illustrerar hur provobjekten monterades i provöppningen samt hur sargen och tätningen utfördes för att säkerställa korrekta mätförhållanden.



Figur 8. Provobjekt monterat i provöppning. Byggnation av sarg runt bjälklagskant.



Figur 9. Provobjekt monterat i provöppning.

2.3 Framtagning av beräkningsmodell

En beräkningsmodell samt en guide inför användning av bjälklagselement med sparkroppar i flerbostadshus togs fram med hjälp av Efterklang.

Modellen är en hybridmodell baserad på empiriska data från mätningar på bjälklag i kombination med parameterstudier utförda i en numerisk finit element-modell.

Som underlag till modellen har två laboratoriemätningar från RISE använts, för ett 250 mm respektive 295 mm tjockt bjälklag.

Bjälklagen har modellerats i Comsol där mätningarna har använts för att verifiera och anpassa den numeriska Comsol-modellen.

Comsol-modellen har därefter använts för en parameterstudie där sparkropparnas storlek och antal har varierats systematiskt.

Baserat på parameterstudien identifierades egenskaper som påverkar de dynamiska egenskaperna. Ett antal resonanser i konstruktionen kopplas till fysiska egenskaper hos bjälklagen.

Resonanser i grundkonstruktionen samt i sparkropparna, både strukturella och akustiska, identifierades och infördes i den förenklade Excel-modellen.

En referensreduktionskurva för det 250 mm tjocka bjälklaget togs fram genom att korrigera labbmätningen för det aktuella bjälklaget med de resonanskorrigeringar som identifierats med Comsol-modellen.

För att validera den förenklade Excel-modellen beräknades reduktionstal för 250 mm respektive 295 mm-bjälklaget genom att korrigera referensreduktionskurvan med korrigeringar motsvarande konstruktionsändringarna.

Båda labbmätningarna kunde då upprepas för reduktionstalet med Excel-modellen.

Sambandet mellan stegljudsnivå och reduktionstal kan beskrivas enligt nedan. För tunga bjälklag beräknas stegljudsnivån enklast utifrån reduktionstalet och stegljudsförbättringen:

$$L_n = -R + 38 + 30 \cdot \log(f) - \Delta L$$

När reduktionstalet är beräknat kan stegljudsnivån beräknas enligt ovan.

Den förenklade Excel modellen kunde reproducera de labbmätta stegljudsnivåerna inom 1–2 dB.

Modellen är enbart testad och jämförd med två laboratoriemätningar med en variant av uppsättning sparkroppar (19 st 520 × 520 mm) samt två olika tjocklekar (250 mm, 295 mm).

Det finns en stor osäkerhet vid extrapolering av bjälklagskonstruktioner utanför det verifierade området.

3 Resultat och diskussion

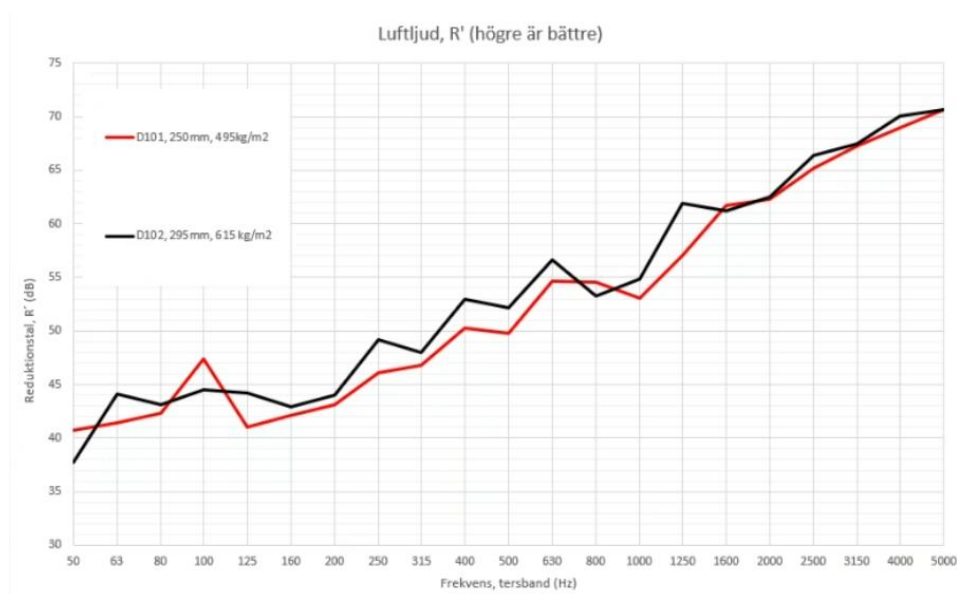
I detta kapitel presenteras och diskuteras resultaten från studien.

3.1 Resultat från akustiska labbprovningar samt jämförelse med konventionella bjälklag i betong

Resultaten från de akustiska laborieprovningarna redovisas i form av frekvensberoende reduktionstal, R (dB) och stegljudsnivå, L_n (dB).

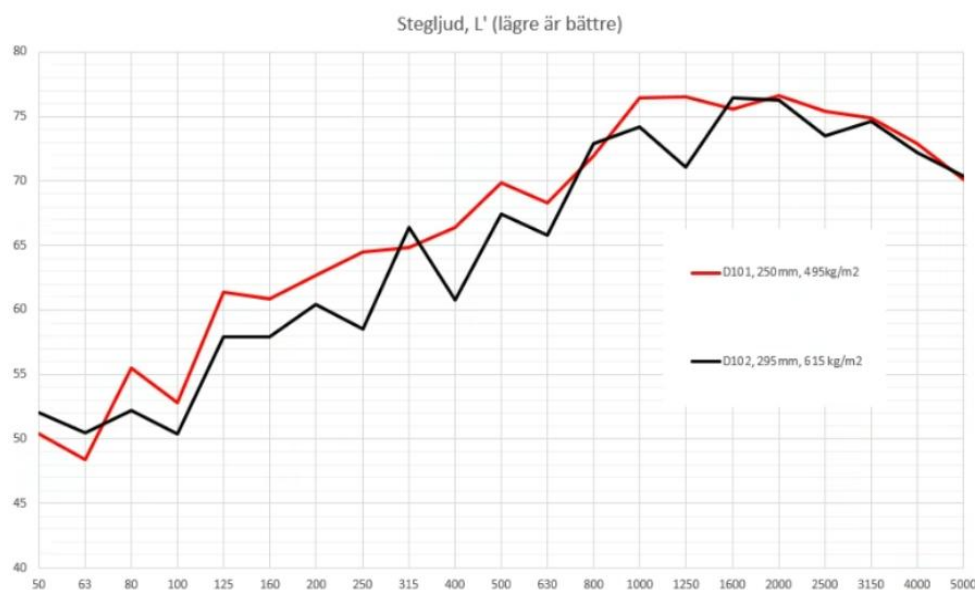
Reduktionstalet beskriver konstruktionens förmåga att isolera luftburet ljud och definieras som skillnaden i ljudtrycksnivå mellan sändar- och mottagarrum, korrigerat för rummets absorption. Ett högre värde på R innebär bättre luftljudsisolering. Stegljudsnivån L_n beskriver i stället den ljudnivå som uppstår i mottagarrummet vid excitation med stegljudsapparat, där ett lägre värde indikerar bättre ljudisolering.

I Figur 10 visas reduktionstalet som funktion av frekvens för de två undersökta bjälklagen med sparkroppar, D101 (250 mm, 495 kg/m²) och D102 (295 mm, 615 kg/m²). Resultaten visar att det tjockare och tyngre bjälklaget (D102) generellt uppvisar ett något högre reduktionstal, vilket överensstämmer med masslagen, där ökande massa normalt ger förbättrad ljudisolering. Skillnaderna är dock relativt små, trots skillnaden i tjocklek och massa. Detta indikerar att ljudisoleringen i dessa bjälklag inte enbart styrs av massa, utan även påverkas av konstruktionens uppbyggnad med sparkroppar.



Figur 10. Luftljudsisolering för bjälklagen med sparkroppar.

Motsvarande resultat för stegljudsnivå visas i Figur 11. D102 uppvisar generellt något lägre stegljudsnivå än D101, vilket är förväntat då ett tyngre bjälklag rör sig mindre vid steglåst. Skillnaderna är dock begränsade och kurvorna sammanfaller delvis i vissa frekvensområden. Detta visar, i likhet med luftljudsisoleringen, att stegljudet inte enbart styrs av massa utan även påverkas av konstruktionens utformning.

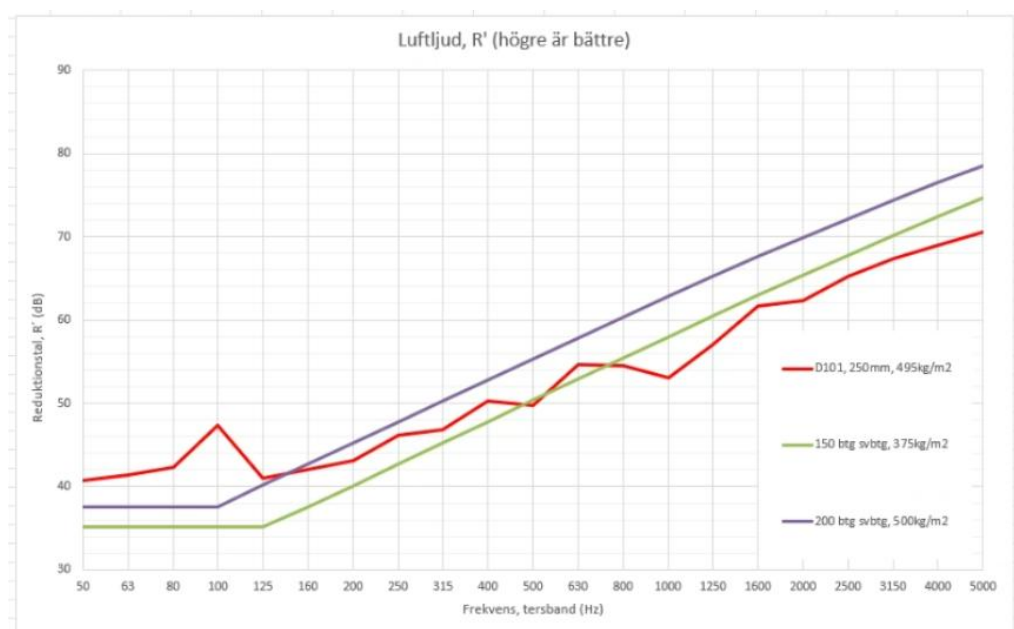


Figur 11. Stegljudsisolering för bjälklagen med sparkroppar.

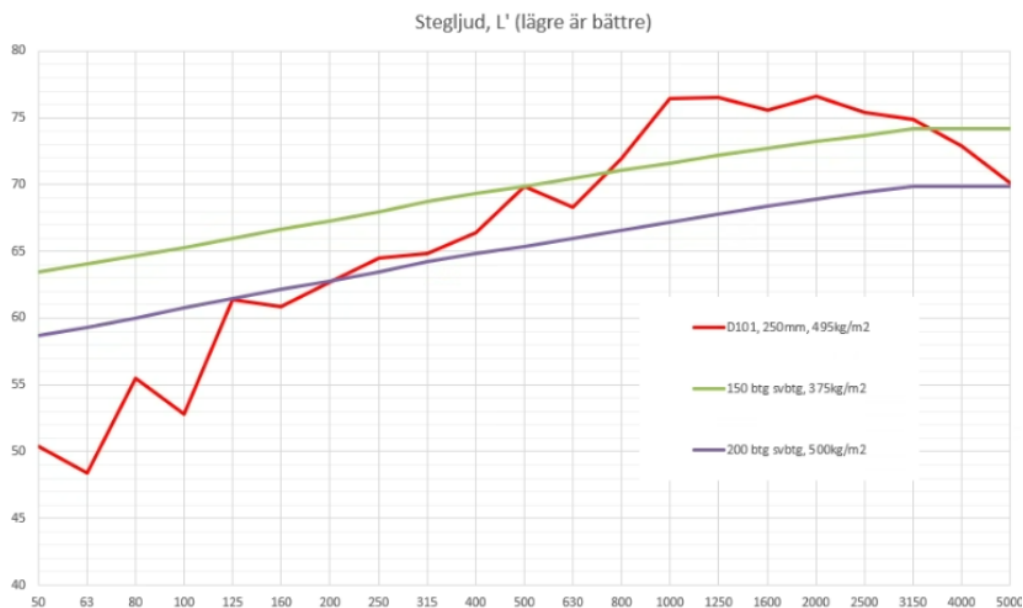
I Figur 12 och Figur 13 jämförs D101 med homogena betongbjälklag (150 mm respektive 200 mm). För luftljud framgår att D101 generellt har något lägre reduktionsstal än motsvarande massiva bjälklag, särskilt vid högre frekvenser.

För stegljud uppvisar D101 också högre stegljudsnivå i stora delar av frekvensområdet, särskilt över cirka 500 Hz.

Sammantaget visar resultaten att hålrummen påverkar ljudisoleringen negativt jämfört med en homogen konstruktion.



Figur 12. Jämförelse av luftljudsisolering mellan bjälklag med sparkroppar och homogena bjälklag.



Figur 13. Jämförelse av stegljudsnivå mellan bjälklag med sparkroppar och homogena bjälklag.

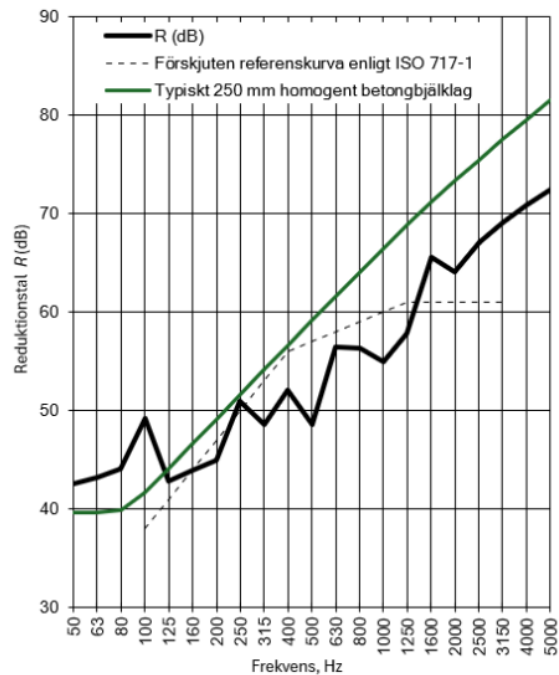
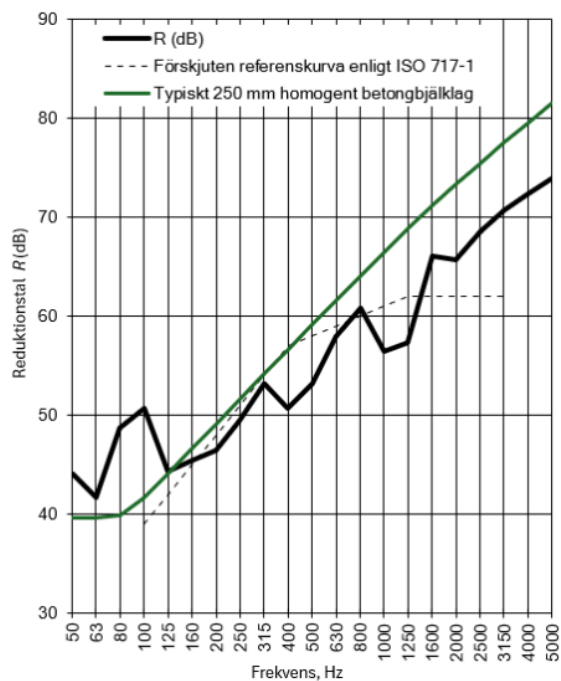
Sammanfattningsvis visar resultaten att:

- Ökad massa ger förbättrad luftljudsisolering och lägre stegljudsnivå.
- Sparkroppar försämrar den akustiska prestandan något jämfört med homogena betongbjälklag.
- Skillnaderna mot konventionella bjälklag är frekvensberoende och mest uttalade vid högre frekvenser.

3.2 Resultat från akustiska simuleringar

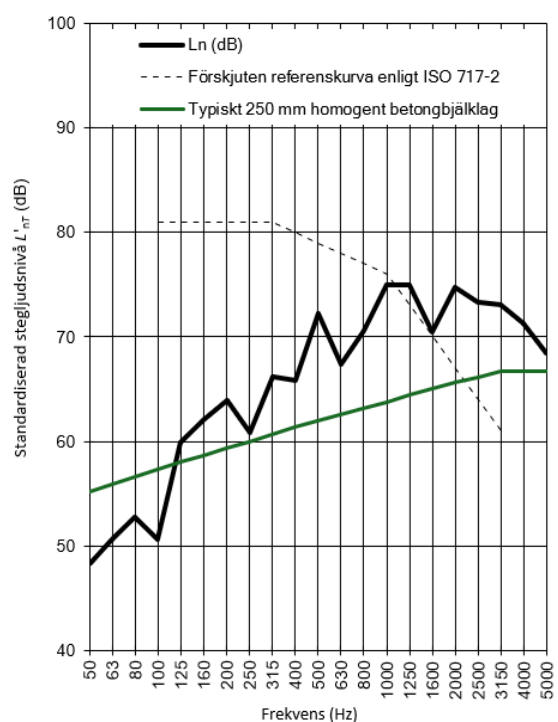
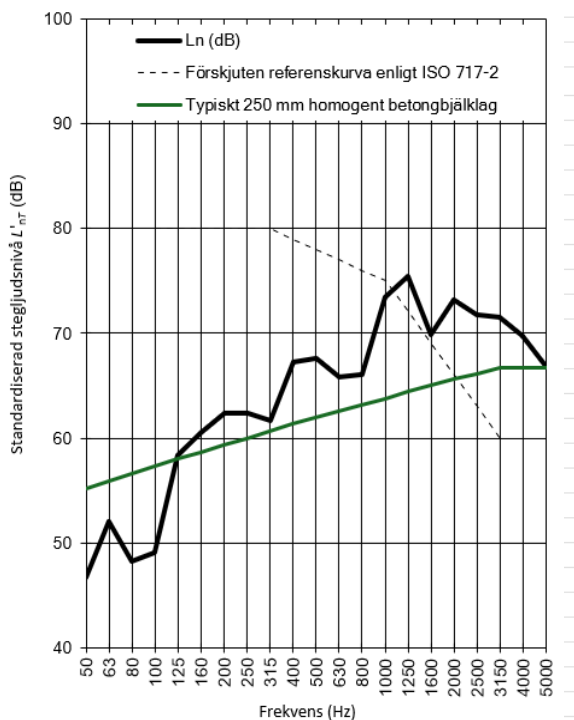
En beräkningsmodell framtagen av Efterklang, baserad på laboriemätningarna, har använts för att analysera hur variationer i utformning påverkar bjälklagens akustiska egenskaper.

I Figur 14 visas luftljudsisolering för ett 295 mm bjälklag för två fall: ett med 4 sparkroppar och ett med 15 sparkroppar. Resultaten visar att ett ökat antal sparkroppar leder till ett lägre reduktionstal över större delen av frekvensområdet. Detta kan förklaras av att den effektiva massan minskar samtidigt som fler hålrum introduceras i konstruktionen. Jämfört med ett homogent betongbjälklag ligger båda fallen lägre, vilket bekräftar den trend som även observerats i laboriemätningarna.



Figur 14. Jämförelse av luftljudsisolering för två fall: 4 sparkroppar (vänster) respektive 15 sparkroppar (höger).

I Figur 15 visas motsvarande resultat för stegljudsnivå. Även här framgår att ett större antal sparkroppar ger en försämrad akustisk prestanda i form av högre stegljudsnivå. Skillnaden mellan fallen är särskilt tydlig i mellan- och högfrekvensområdet.



Figur 15. Jämförelse av stegljudsisolering för två fall: 4 sparkroppar (vänster) respektive 15 sparkroppar (höger).

Simuleringarna visar tydligt hur hålrummen påverkar konstruktionen. Ett ökat antal sparkroppar innebär fler lokala områden där betongen får lägre styvhet, vilket gör att bjälklaget vibrerar mer vid excitation. Samtidigt kan luften i hålrummen bidra till resonanser, vilket förstärker vissa frekvensområden och ger en mer ojämn frekvensrespons.

Sammanfattningsvis visar simuleringarna att:

- Ökat antal sparkroppar leder till försämrad luftljudsisolering och högre stegljudsnivå.
- Resultaten överensstämmer med laboratiemätningarna och förklarar de observerade skillnaderna.

3.2.1 Exempelstomme för BBR-krav

I tabell nedan redovisas en exempelstomme för att uppnå BBR-krav i en teoretisk flerbostadsbyggnad när mellanbjälklaget utförs av 265 mm håldäckselement. Därefter diskuteras de ändringar som beräknas krävas om bjälklaget byts ut mot sparkroppselement typ D101.

Beräkningar för att jämföra ljudisolering i HD/F mot sparkroppselement har utförts enligt SS-EN 12354-1 och 12354-2.

Tabell 1. Exempelstomme, inkl. golvbeläggning, för BBR-krav i flerbostadshus med håldäcks-bjälklag.

Konstruktion	Uppbyggnad
Mellanbjälklag	HD/F 265 med total ytvikt omkring 420 kg/m ² ²⁾
Lägenhetsvägg	Dubbel, fullisolerad, 70-regelstomme med 2×13 normalgips på båda sidor
Yttervägg	Utfackningsvägg med bärande regelstomme alt. pelare. Invändig installationsregel med 1×12,5 normalgips.
Golvbeläggningar	• Bostadsrum med parkett på underlagsmatta typ foam. Badrum med klinker. • Gemensamma trapphallar/korridorer med klinker el. terrazzo

²⁾ Notera att det jämförda håldäcket har cirka 75 kg/m² lägre total ytvikt än testelement D101.

En stomme utförd enligt Tabell 1 kan uppfylla BBR-krav mellan lägenheter. Den begränsande faktorn för kravuppfyllelse i stommen är då håldäcket. Därtill spelar storleken på minsta bostadsrum roll, därför att ljudisolering till mindre rum blir sämre.

Byts bjälklaget i samma fall till ett D101-sparkroppselement så beräknas ljudnivåskillnaden mellan lägenheter försämrats med ca 2 dB. Samtidigt uppfylls ej stegljudsnivå som är krav enligt RISE mät rapport visade att sparkroppselementet gav minst 2 dB högre stegljudsnivå i vissa positioner. Notera att stegljudet på ett håldäck är mer likvärdigt över hela bjälklagsytan, dvs att skillnader är mindre mellan olika positioner. Detta motiverar en konservativare marginal i beräkning och jämförelse när sparkropparna av storlekarna som i D101 (520 × 520 × 130 millimeter) används.

3.2.2 Sammanfattande slutsatser av utförda beräkningar och simuleringar

I de akustiska simuleringar som utförts med varierande andel sparkroppar så blir det tydligt att även ett fåtal ursparingar påverkar ljudegenskaperna negativt. Detta innebär att användande av sparkroppar är mer utmanande än vad som hade förutsatts. Speciellt är ursparingens (sparkroppens) storlek och geometri viktig och det hjälper inte att kompensera för detta med ökad mängd betong ovanpå. Grundproblemet med den reducerade akustiska prestandan som orsakas av hålrummet kvarstår.

3.3 Beräkning av klimatpåverkan för bjälklag med sparkroppar

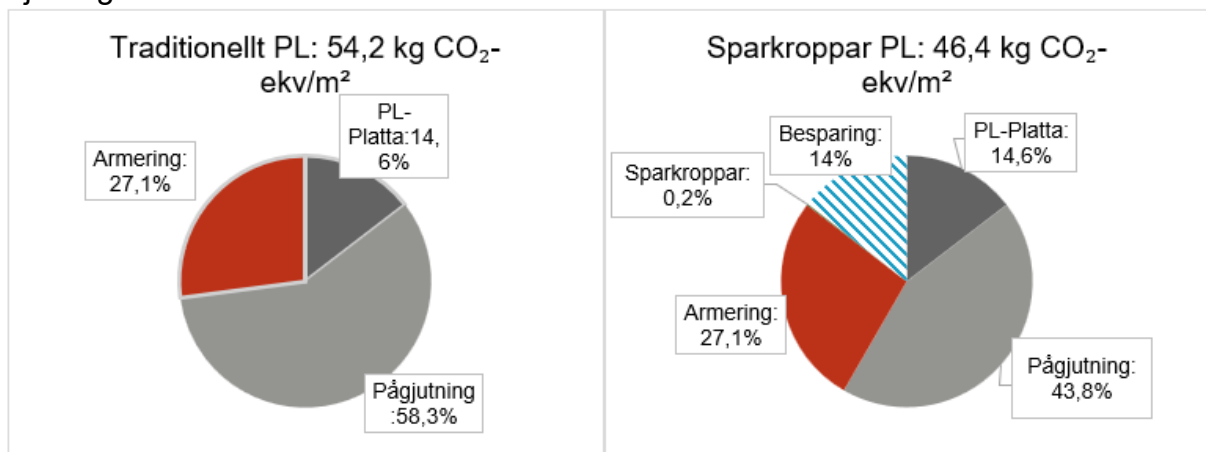
Klimatpåverkan har beräknats för två varianter av ett bjälklag med samma geometri och laster. Skillnaden mellan varianterna utgörs av att den ena innehåller sparkroppar, vilket reducerar betongvolymen.

Bjälklaget som analyserats har dimensionerna 7 m × 2,4 m och en total tjocklek på 250 mm. I varianten med sparkroppar har betongvolymen reducerats genom införande av 30 sparkroppar med dimensionerna 520 × 520 × 130 mm, fördelade på 3 i sidled och 10 i längsled.

Betongen i plattbärlaget och pågjutningen har hållfasthetsklass C30/37 och ett GWP-värde på 158 kg CO₂-ekv/m³. Armering samt övriga material har antagits vara identiska i båda fallen. Klimatpåverkan för sparkropparna har i beräkningen antagits till 0,05 kg CO₂-ekv per styck.

Syftet med beräkningen är att isolera effekten av reducerad betongvolym och därigenom kvantifiera den potentiella klimatbesparingen vid användning av sparkroppar.

Klimatpåverkan uttryckt i kg CO₂-ekv/m² redovisas i figur 16, där det framgår att varianten med sparkroppar ger en lägre klimatpåverkan jämfört med det traditionella bjälklaget.



Figur 16. CO₂/m² för ett traditionellt bjälklag till vänster och för ett med sparkroppar till höger.

CO₂-besparingen är 14 %, vilket motsvarar 7,8 kg CO₂-ekv/m² för det studerade typfallet. Reduktionen beror på att betongvolymen kan minskas genom användandet av sparkroppar.

4 Slutsatser

Sammanfattningsvis bedöms det finnas stor potential att integrera sparkroppselement i betongbjälklag för att minska materialanvändningen och därigenom minska klimatavtrycket.

Geometri och utformning av sparkroppens storlek har stor betydelse både för luftljud och stegljud. Påverkan är så stor att det inte hjälper att kompensera detta med ytterligare betong. Trots en ökning med 45 mm betong på bjälklaget förbättrades inte ljudmotståndet på det sätt som hade förväntats.

Ett bjälklagselement med sparkroppar utformade likt D101 presterade runt 2 dB sämre än det jämförda håldäcket, trots att det har en liknande ytvikt. Både avseende luftljudsisolering och stegljudsnivå. Samtidigt bedöms BBR-krav kunna uppfyllas för vissa planlösningar förutsatt generellt större bostadsrum. Exempelvis med minsta mått i bredd/längd 4 meter. Notera att många faktorer kan påverka detta. Exempelvis hur en golvbeläggning skulle påverka den uppmätta variationen i stegljud vid olika placering på det aktuella bjälklaget. Om kravet på den akustiska prestandan kan godtas kan man uppnå en klimatbesparing på ca 15 %.

Förutsättningarna i ljudisolering bedöms kunna förbättras genom att fördela mindre sparkroppar mer jämnt över bjälklagsytan. Volymförhållandet mellan sparkropp och betong kan vara likvärdigt men med fler sparkroppar av mindre dimension. Detta bedöms kunna minska påverkan på ljudisolering av resonanser i hålrummen. Att fylla hålrummen med exempelvis stenudd före gjutning skulle också kunna påverka deras resonansbeteende. Det rekommenderas fortsatt forskning för att erhålla bättre förståelse och kunskap om ljudegenskaper i bjälklag med sparkroppar.

Referenser

- [1] Naturvårdsverket. *Sveriges territoriella utsläpp*. (Hämtad: september 2023).
- [2] World Green Building Council. *Beyond Buildings*. (Hämtad: september 2023).
- [3] Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA). *Ett energieffektivt samhälle*. 2014. (Hämtad: september 2023).
- [4] Global Cement and Concrete Association (GCCA). *Nyheter*. (Hämtad: september 2023).
- [5] A. Favier, C. De Wolf, K. Scrivener and G. Habert. *A sustainable future for the European cement and concrete industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. ETH Zurich, 2018.
- [6] M. Sansom and R. J. Pope. *A comparative embodied carbon assessment of commercial buildings*. Structural Engineer, 2012.
- [7] B. Dean, J. Dulac, K. Petrichenko and P. Graham. *Towards zero-emission efficient and resilient buildings: Global status report*. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC), 2016.
- [8] Boverket. *Bullerskydd i bostäder och lokaler*. November 2008.
- [9] Svensk Betong. *Lathund Akustik bostadshus*. 2018. (Hämtad: september 2023).
- [10] A. Jayasinghe, J. Orr, W. Hawkins, T. Ibell and W. P. Boshoff. *Comparing different strategies of minimising embodied carbon in concrete floors*. Journal of Cleaner Production, 2022.
- [11] Institution of Structural Engineers (IStructE). *Embodied carbon structural sensitivity study*. 2020. (Hämtad: september 2023).
- [12] The Concrete Centre. *Comparison of embodied carbon in concrete structures*. (Hämtad: september 2023).
- [13] Block Research Group. *Rib-stiffened funicular floor system*. (Hämtad: september 2023).
- [14] Automated Construction. *Publications list*. (Hämtad: september 2023).
- [15] Skidmore, Owings & Merrill (SOM). *Stereoform Slab*. (Hämtad: september 2023).
- [16] A. Neves e Sousa and B. M. Gibbs. *Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors*. Applied Acoustics, 2011; 72(4): 177–189.
- [17] T. Asakura, M. Toyoda and T. Miyajima. *Numerical and experimental investigation on structure-borne sound transmission in multilayered concrete structures*. Journal of Sound and Vibration, 2018; 413: 1–25.

- [18] N. B. Roozen, Q. Leclère, D. Urbán et al. *Assessment of the airborne sound insulation from mobility vibration measurements: A hybrid experimental numerical approach*. Journal of Sound and Vibration, 2018; 432: 680–698.
- [19] H. Wu, A. Liew, T. Van Mele et al. *Analysis and optimisation of a rib-stiffened vaulted floor for dynamic performance*. Engineering Structures, 2020; 213: 110577.
- [20] ISO 16283-2:2018. *Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation*.
- [21] ISO 10140-3:2021. *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Impact sound insulation*.