

Multi- kriterieanalys för Hållbar Byggprocess

MED FOKUS PÅ KLIMATPÅVERKAN OCH
BYGGKOSTNADER



Multi-kriterieanalys för Hållbar Byggprocess

med fokus på klimatpåverkan och byggkostnader

Hamid Movaffaghi

Med stöd från

VINNOVA
Sveriges innovationsmyndighet

 **Energimyndigheten**

FORMAS 

**Strategiska
innovations-
program**

Förord

Smart Built Environment är ett strategiskt innovationsprogram för hur samhällsbyggnadssektorn kan bidra till Sveriges resa mot att bli ett globalt föregångsland som realiserar de nya möjligheter som digitaliseringen för med sig. Smart Built Environment är ett av 17 strategiska innovationsprogram som har fått stöd inom ramen för strategiska innovationsområden, en gemensam satsning mellan Vinnova, Energimyndigheten och Formas. Syftet med satsningen är att skapa förutsättningar för Sveriges internationella konkurrenskraft och bidra till hållbara lösningar på globala samhällsutmaningar.

Samhällsbyggnadssektorn är Sveriges enskilt största sektor som påverkar hela vår bebyggda miljö, men den är fragmenterad med många aktörer och processer. Att förändra samhällsbyggandet med digitaliseringen som drivkraft kräver därför samverkan mellan många olika aktörer. Smart Built Environment tar ett samlat grepp över de möjligheter som digitaliseringen innebär och blir en katalysator för spridningen av nya möjligheter och affärsmodeller.

Programmets mål är att till 2030 uppnå:

- 40 % minskad miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv för nybyggnad och renovering
- 33 % minskning av total tid från planering till färdigställande för nybyggnad och renovering
- 33 % minskning av de totala byggkostnaderna
- flera nya värdekedjor och affärsmodeller baserade på livscykelperspektiv, plattformar samt nya konstellationer av aktörer

I programmet samverkar programparter från näringsliv, kommuner, myndigheter, bransch- och intresseorganisationer, institut och akademi. Tillsammans nyttiggör vi den kunskap som tas fram i programmet.

Multi-kriterieanalys för Hållbar Byggprocess *med fokus på klimatpåverkan och byggkostnader* är ett av projekten som har genomförts i programmet. Det har letts av Hamid Movaffaghi och har genomförts i samverkan med Företaget Informationsbyggarna.

Samhällbyggnadssektorn står inför stora utmaningar inom den närmaste framtiden, bland annat med avseende på hur sektorns miljöpåverkan kan reduceras, samt hur kostnaderna för att producera bostäder kan minskas. Projektets övergripande syfte har varit att utveckla metoder och verktyg för livscykel- och livscykelkostnadsanalys samt produktutveckla konstruktionselement och byggsystem.

Jönköping, 28/4 - 2020

Sammanfattning

Samhällbyggnadssektorn står inför stora utmaningar inom den närmaste framtiden, bland annat med avseende på hur sektorns miljöpåverkan kan reduceras, samt hur kostnaderna för att producera bostäder kan minskas.

Syftet med projektet har varit att utveckla, justera och förfinas för tillfredställande utformning av byggnadsstommar och konstruktionselement med fokus på klimat, materialkostnad och produktionstid. Ett första delmål i projektet har varit att utveckla metoder och verktyg för tillförlitlig och robust LCA- och LCCA beräkning. Andra delmål med projektet har varit att ta fram en metodik för produktutveckling av byggnadsstommar och konstruktionselement med fokus på livscykelperspektiv.

Ett teoretiskt ramverk baserat på värde driven metodik har utvecklats för dimensionering och analys av konstruktionselement och byggsystem. Teoretiska ramverket har använts för både analys av stommar med olika stabilitetssystem och utformning av samverkansbjälklag av betong och trä i flervåningshus med optimal spännvidd. Fokus i utformningen har varit klimatpåverkan, byggkostnader, deformationer och vibrationer.

Summary

The build environment sector is facing major challenges with regard to how the sector's environmental impact can be reduced, as well as how the costs of producing buildings can be reduced in the coming future.

The objective of the project has been to develop, adjust and refine tools for satisfactory design of building frames and structural elements focusing on climate, material cost and production time. The first aim of the project has been to develop methods and tools for reliable and robust LCA and LCCA calculations. The second aim of the project has been to develop a methodology for product development of building frames and structural elements with focus on the life cycle perspective.

A theoretical framework based on value-driven methodology has been developed for designing and analysis of structural elements and building systems. The theoretical framework has been used for the both analysis of structures with different stabilization systems and designing timber concrete composite floor system in multi-storey buildings with optimum span-length. The focus in the design has been climate impact, construction costs, deformations and vibrations.

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION	7
2 VÄRDEDRIVEN METODIK OCH TEORETISKA RAMVERK	8
2.1 VÄRDEDRIVEN METODIK	8
2.2 TEORETISKA RAMVERK BASERAD PÅ VÄRDEDRIVEN METODIK	8
3 LIVSCYKELPERSPEKTIV	13
3.1 LIVSCYKELANALYS	13
4 FALLSTUDIER	15
4.1 TRÄSTOMMAR MED OLIKA STABILISERINGSSYSTEM	15
4.1.1 RESULTAT OCH SLUTSATSER	16
4.2 SAMVERKANSBJÄLKLAG AV BETONG OCH TRÄ	16
4.2.1 RESULTAT OCH SLUTSATSER	18
5 REDOVISNING OCH SPRIDNING AV RESULTAT	20
5.1 EXAMENSARBETEN	20
5.2 KONFERENSBIDRAG	21
5.2.1 CIBW078 2018	21
5.2.2 COMPWOOD 2019	22
5.2.3 CIVILCOMP 2019	22
5.3 TIDSKRIFTSBIDRAG	23
6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER	24
7 REFERENSER	26

1 INTRODUKTION

Regeringskansliet i sin promemorian publicerat den 17 februari 2020 har lämnat förslag till ny lag och förordning om klimatdeklaration för nya byggnader. *Syftet med den nya lagen är att minska klimatpåverkan vid uppförande av byggnader genom att synliggöra denna påverkan. Förslagen i promemorian innebär att byggherren ansvarar för att upprätta och lämna in en klimatdeklaration till Boverket (Klimatdeklaration för byggnader Ds 2020:4).* Därmed står samhällsbyggnadssektorn inför stora utmaningar inom den närmaste framtiden, bland annat med avseende på hur sektorns miljöpåverkan kan reduceras, samt hur kostnaderna för att producera bostäder/kontor kan minskas.

För närvarande finns det begränsade möjligheter för beslutsfattaren att se till att den levererade byggnaden uppfyller både miljö- och kostnadskrav. Skälen är att det i synnerhet finns behov av 1) verktyg för tillförlitlig och robust livscykelanalys- (LCA) och livscykelkostnadsanalys- (LCCA) beräkningar under tidiga skedet av projektering och 2) integrering av olika analyser och simuleringar under projekteringen för att sammanväga analysresultaten med fokus på livscykelperspektivliv.

Mot den beskrivna bakgrunden är projektets mål att 1) utveckla metoder och verktyg för tillförlitlig och robust LCA- och LCCA-beräkningar i tidigt skede av ett projekt och 2) analysera stomsystem och konstruktionselement med utnyttjanden av kompositmaterial med fokus på livscykelperspektivliv.

Att utveckla verktyg för tillförlitlig och robusta LCA-beräkning av ett objekt i tidigt skede innebär att sätta miljöförutsättningar baserat på den kravbild som finns tillgängligt. Det är därför viktigt att hantera kravbilderna på ett organiserat sätt. CoClass har inbyggt i sin profil att på ett enkelt sätt förmedla de delar av kraven som behövs i en LCA-beräkning. Genom att använda flera listor i CoClass, kombinerat med ett antal egenskaper där egenskapen material blir en av de viktigare, kan man med nära hundra procentig träffsäkerhet matcha ett objekt mot en generisk resurs miljödata. Denna del av projektet beskriver hur man kan göra så och genom att hantera klassifikationen och egenskaperna från tidigt skede fram till att objektet är framställt kan man förfina en LCA-beräkning så att den så småningom kan betraktas som en deklARATION. Detta utan att någon speciell hänsyn behöver tas till hanteringen av LCA-beräkningen under tidigt skede i projekteringen.

Att ta fram en metodik för analys av stomsystem och konstruktionselement för hållbart samhällsbyggande innebär att minska negativa miljöeffekter av byggproduktionen med bättre materialutnyttjande genom användning av kompositmaterial och därmed få lägre materialkostnader och lägre klimatpåverkan. Som kompositmaterial har en typ av samverkanskonstruktion som ett innovativt bjälklag har analyserats som utnyttjar betongens brand- och ljudisolerandeegenskaper i kombination med träs lätthet och med optimala hållbarhetsegenskaper.

2 VÄRDEDRIVEN METODIK OCH TEORETISKA RAMVERK

2.1 Värddriven metodik

Värddriven metodik är en övergripande tillvägagångssätt som möjliggör att alla viktiga kvantitativa och kvalitativa aspekter kan beaktas i utformningen av delkomponenter med tanke på effekten på slutprodukten. Metodiken härstammar från produktutveckling hos flygplanstillverkaren Boeing. Metodiken använder begreppet värde för tidigt utformning och kassindelning av produkter för näst kommande urval. Därmed kopplas beslutfattarens/kundens förväntningar till egenskaper i produkten och möjliggör värdeuppfyllelse som drivkrafter för produktutvecklingen.

2.2 Teoretiska ramverk baserad på värddriven metodik

Ett teoretisk ramverk baserad på värddriven metodik har utvecklats som har fokus på den totala värdet för slutprodukten. Ramverket utnyttjar 1) flexibiliteten i funktionskraven genom införandet av kvalitetsklasser i form av komfort 2) multiobjektiv optimering för att undvika suboptimering av målfunktioner och 3) multi-kriterieanalys för val av den kvalitetsklassen som uppfyller beslutfattarens subjektiva preferenser. Aktiviteter som har ingått i teoretiska ramverken är bland annat LCA, LCCA, multi-objektiv optimering och multi-kriterieanalys .

Teoretiska ramverket har verifieras med hjälp av två fallstudier. I första fallstudien har två stomsystem i flervåningshus med olika stomsatbilisering analyserats. I det andra fallstudien har utformningen och optimal spännvidd hos samverkansbjälklag av betong och trä i flervåningshus analyserats. Fokus i analys av fallstudier har varit klimatpåverkan, produktionskostnader, deformationer och vibrationer.

I första fallstudien valdes att undersöka hur valet av stabiliseringsystem kan påverka koldioxidutsläppet och produktionskostnader hos industriellt flervåningshus med trästommar. Frågeställningen är väldigt viktig i tidig fas av ett projekt där olika alternativ kan skapas och utvärdera för hållbart byggande. I figur 1 visas ramverkets flödeschema för val av stomsystem baserat på värddriven metodik där LCA, LCCA, multi-objektiv optimering (MOO) och multi-kriterieanalys (ANP) har integrerats. Fokus i analysen har varit klimatpåverkan och produktionskostnader.

Figur 1

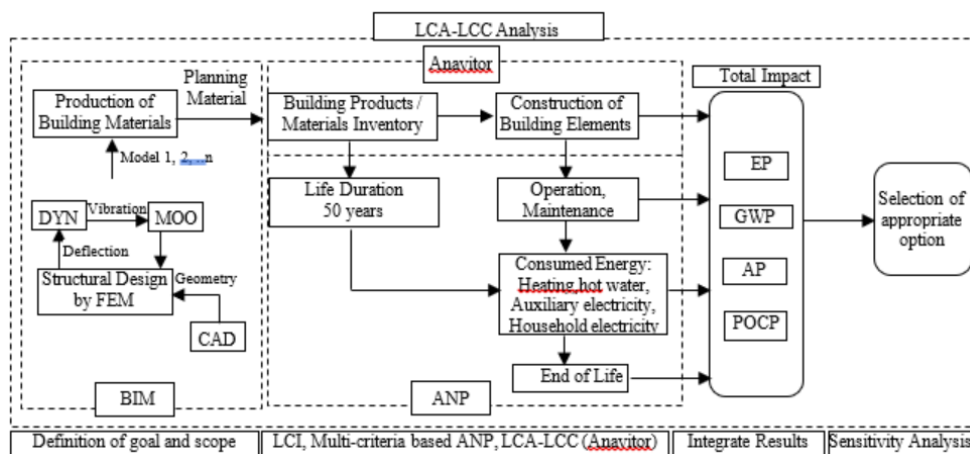


Fig. 1. Flödesschemat för val av stomsystem baserad på värdedrivna metodik och multi-kriterieanalys (ANP).

Huvudkomponenten i trästommar för flervåningshus är bjälklaget när det gäller vikt/kostnader. Vikt med hänsyn till produktion och vägtransport är huvudkällan till koldioxidutsläppen till atmosfären. Pågående forskning visar att träindustrin har stort behov av tillämpning av bjälklagselement som uppfyller funktionskraven för större spännvidder på upp till 9 m. Större spännvidder möjliggör stora öppna ytor och fria planlösningar och eventuell en ökat användningsområden av bjälklaget även i andra stommar som i betong och stål. Dessutom skapar långa spännvidder hos bjälklag bra dispositionsmöjligheter av bärande väggar/pelare i källarvåning som kan utnyttjas för parkeringsändamål som ofta är slutanvändarnas önskemål för både flervåningsbostäder och kontorsbyggnader.

Samverkansbjälklaget av betong och trä som ett innovativt bjälklag har inte använts i Sverige i stor omfattning. Samverkansbjälklaget utnyttjar båda materialens individuella bärförmågor och böjstyvhet där de behövs och har betydligt högre böjstyvhet än traditionella träbjälklag. Detta innebär att nedböjningar, svikt och vibrationer som ofta är dimensionerade för traditionella träbjälklag kan begränsas med tillämpningen av samverkansbjälklag av betong och trä i trästommar.

Samverkansbjälklag med spännvidder på upp till 9 och med optimal betongtjocklek kan bidra till en mer innovativ och hållbar byggande genom att minska klimatpåverkan med optimal användning av konstruktionselement som bjälklag. Redan för drygt 2000 år sedan beskrev den romerske arkitekten Vitruvius att byggandet ska genomföras enligt citatet "hållbarhet uppnås när byggnaden står på fast grund och består av klokt valda material". Materialbesparing gäller framförallt reducering av ett antal icke lägenhetsskiljande bärande mellanväggar när samverkansbjälklaget spänner större spännvidder.

I en typ av samverkansbjälklag bärs betongskivan av limträbalkar som har styva skjuvförbindare med betongskivan för större samverkan. Tryckspänningar upptas främst av betongskivan där betongen är starkt, medan dragspänningar upptas av limträbalkar där trä är starkt och skjuvspänningar mellan betong och trä upptas av skjuvförbindare. Betongskivan är förutsatt att tillverkats av cement med flygaska för att minska klimatpåverkan.

Samverkansbjälklag med fri uppläggning mellan bärande väggar är också en barriär mellan lägenheter med avseende på både ljud och brand. Ett bjälklag som utnyttjar betongens brand- och ljudisolerandeegenskaper i kombination med träs lätthet och hållfasthet skulle, rätt utformat, kan optimera och sammanföra hållbarhetsegenskaperna för ett innovativt bjälklag.

Ett viktigt bidrag med industriell byggande är att större konstruktionselement som samverkansbjälklag kan färdigställas i verkstäder eller hos leverantörer och i större utsträckning monteras konstruktionselementet på byggsplatsen för högre produktionstakt och lägre produktionskostnader.

Inom projektet har vi undersökt kostnasbesparingar för reduktion av bärande innerväggar med måtten 10x2.7 m² i fyra våningar vid tillämpningen av samverkansbjälklag istället för konventinell träbjälklag.

Tabell 1 redovisar ingående material och mängder av en 27 m² stor bärande innervägg. Resultatet av livscykelanalysen redovisar den totala klimatpåverkan av 4 stycken bärande innerväggar (från fyra våningar) i fallstudien.

Resurssammanställning av material i bärande innervägg samt klimatpåverkan av delarna för informationsmodulerna A1-A3.

Tabell 1

Material	Mängd [m ²]	Miljöpåverkan [GWP]
Spånskiva	54	1.8 kg CO ₂ -ekv/m ²
Gips	54	2.6 kg CO ₂ -ekv/m ²
Stenull	25	1.48 kg CO ₂ -ekv/m ²
Konstruktionsvirke	0.39	32.1 kg CO ₂ -ekv/m ³

Enligt livscykelanalysen av de bärande innerväggarna som inkluderat 4st väggar blev resultatet 2607 kg CO₂-ekv/m². Totala kostnaden för att utföra en vägg med måtten 10x2.7 m² i ett fyrvåningshus har också beräknats till enligt nedan.

Informationen gällande den bärande innerväggen tillhandahölls från en etablerad hustillverkare. I kostnaden antogs att väggarna var 10x2.7 m² stora, 15st väggar levereras per transport och en timmes transportsträcka. Montering av väggen antogs binda två yrkesarbetare under 15 minuter. Kostnaden och uppbyggnad av väggen definierades enligt följande:

- Skikt: gips 13mm, spånskiva 12mm, träregel 45x95 med isolering, spånskiva 12mm, gips 13mm

- Kostnad för tillverkning av väggen var angivet till 360 kr/m²
- Kostnaden för lastning i fabrik var angivet till 8 kr/m²
- Kostnaden för transport och montering var angivet till 4.65 kr/m²
- Ungefärlig total bruttokostnad för bärande innervägg 370 kr/m²

Utifrån fallstudien antogs väggarna placeras på fyra plan. Kostnaden för samtliga väggar blev då:

$$K_{\text{väggar}} = 370 \times 10 \times 2.7 \times 4 = 39\,960 \text{ kr}$$

I denna summa ingår inte kostnader för tillkommande arbeten att färdigställa väggen såsom målning och innebär att kostnaden i själva verket är högre. I andra fall, med byggnader bestående av flera våningar och flera långa spännvidder, innebär reducering av bärande väggar större kostnadsbesparingar.

Ytan väggarna upptar som tillkommen boarea för fallstudien med fyra våningar beräknades till:

$$A_{\text{vägg}} = 0.145 \times 10 \times 4 = 5.8 \text{ m}^2$$

Det vill säga en besparing av produktionskostnader med minst 39 960 kr och en reducering av klimatpåverkan med minst 2607 kg CO₂-ekv/m² samt en bruttoareaökning med 5.8 m² genom tillämpning av samverkansbjälklag med 7.3 m spännvidd istället för traditionellt träbjälklag.

Samverkansbjälklag av trä och betong är också ett effektivt byggsystem som har hög prefabriceringsgrad som medför att produktionstiden kan minskas avsevärd vid större volymer. Alltså är det fullt möjligt att genom användning av samverkansbjälklag med spännvidder upp till 9 m i trästommar minska både klimatpåverkan och material- och produktionskostnader vid produktion av flervåningsbostäder- och kontorsbyggnader.

För all produktutveckling gäller det nära samarbete med tillverkningsindustrin. Informationen om t ex provningar, tillverkningskostnad mm är viktig för utformning. Därför har vi etablerat ett samarbete med företaget Hedared AB som är en av få leverantörer av samverkansbjälklag av betong och trä i Sverige. Tillsammans har vi utvecklat metoder och verktyg för dimensionering av samverkansbjälklag med spännvidder upp till 9 m och med optimal betongtjocklek och optimal styvhet hos skjuvkopplingar mellan betong och limträbalkar. Funktionskraven som har kontrollerats är tillåtna nedböjningar, svikt och vibrationer. För flexibilitet i utformningen har tre olika komfortklasser A, B och C för samverkansbjälklaget introducerats. Flödesschemat för produktutvecklingen av samverkansbjälklaget av betong och trä baserad på värdedrivna metodik visas i figur 2.

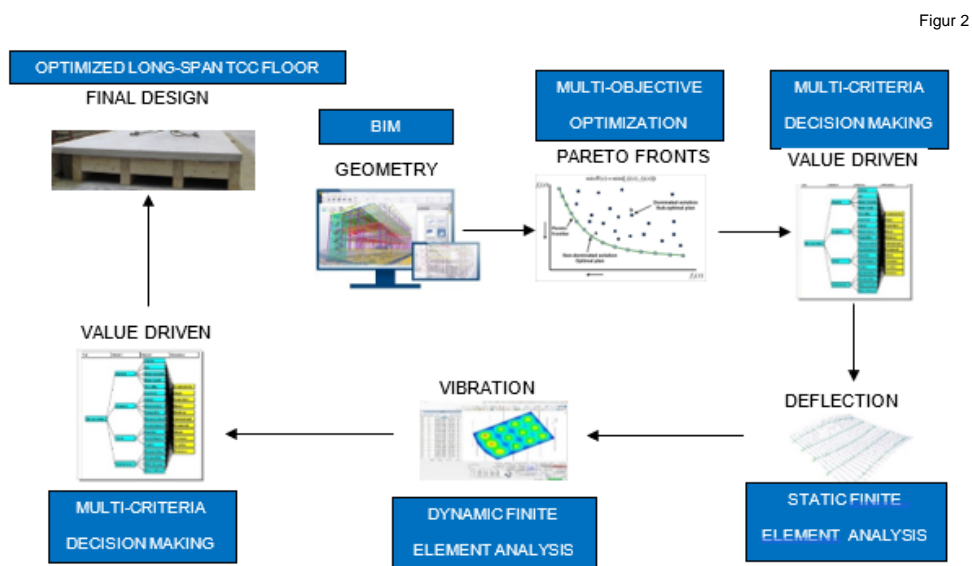


Fig. 2. Flödesschema för produktutveckling av samverkansbjälklag av betong och trä baserad på värdedrivna metodik.

3 LIVSCYKELPERSPEKTIV

För närvarande finns det begränsade möjligheter för beslutsfattaren att se till att den levererade byggnaden uppfyller både miljö- och kostnadskrav. Skälen är att det i synnerhet finns behov av 1) tillförlitlig och robust LCA- och LCCA beräkning under tidiga skedet av projektet.

3.1 Livscykelanalys

Det som behövs för att hantera en LCA-beräkning är att klassificeringen av alla objekt i projektet följer en tydligt uppgjord mall. I projektet har det gjorts försök med olika klasslistor i CoClass och den väg som förefaller mest lämpad är att hantera listorna: "Funktionellt system", "Tekniskt system", "Komponent" och ett antal egenskaper där CoClass egenskapen "Material" är den viktigaste. En del av dessa förutsättningar finns införda i den resurshub som definierades i ett tidigare Smart Built Environment projekt.

I de flesta applikationer som hanterar BIM-Modeller så är definitionen av egenskaper (properties, attributes) inte entydiga. Även vid export av informationen till öppna format som IFC så är det inte säkerställt vad det är för en egenskap och hur denna skall valideras. Dessutom betraktas klassifikation som egenskaper i de flesta applikationer, det gör att det är svårt att säkerställa vad som är vad. Detta har gjort att projektet har bestämt sig att endast använda CoClass egenskaper i livscykelberäkningarna, samt att i överföringen mellan applikation och resurshubb skicka all information paketerat som en i CoClass benämnd "Referensbeteckning". Denna skall vara uppbyggd av åtminstone tabellerna Funktionellt system, Tekniskt system, Komponent (möjligt i flera nivåer) samt med eventuella egenskaper definierade där egenskapen material synes vara den viktigaste i LCA hänseende. Alla tabeller skall skickas med sina systembeteckningar i formen [system: Klasskod] och egenskaper i formen [Egenskap=Värde]. I övrigt skall referensbeteckningen följa de riktlinjer som finns för sådan beteckning i standarden. I en framtid kan det komma att vara möjligt att i det API som Svensk Byggtjänst tillhandahåller för CoClass att få klasser och egenskaper validerade och sammansatta till referensbeteckningen och på motsvarande sätt referenskoden validerad och upppackad till klasser och egenskaper.

Genomförande

Projektet har genom att klassificera objekt i BIM-modeller i olika projekteringskedan letat efter en metod att nå en entydighet i relationen mellan objektet och en resurs i resurshubben och som dessutom kan hanteras i olika tekniska miljöer utan tolkningsproblem.

Genom att använda CoClass referensbeteckning som transportör av data mellan applikationer och resurshubben uppnås en så kvalitativt stark entydighet som är möjlig. Referenskoden behandlas i API:et till resurshubben på ett sådant sätt att API:et letar efter en entydighet i kopplingen mellan referensbeteckningens innehåll och den generiska resursen i resurshubben.

Kombinatorisk med de olika listornas klasser, där man utgår från Komponent, ibland med flera nivåer och för det mesta kombinerar detta med vilket materialval man gör,

kan en nästan fullständig koppling mellan objektet och det miljödata som representerar objektet göras med automatik.

När en kombination av klasser och/eller egenskaper ger en och endast en träff på en resurs returneras den generiska resursens identitet och då går det att finna vilken generiska miljödata som motsvarar den erhållna resursidentiteten i vald miljödatas. Tid har lagts på att kontrollera olika hypoteser och kombinationer för att säkerställa att vald metod är tillräckligt stabil och att en hög grad av modellen kan bli LCA-beräknad generiskt med låg grad av handpåläggning. Dagens klassdefinitioner i resurshubben är begränsad varför testerna har hållit sig inom redan definierade material och komponenter.

Inom projektet har vi tagit fram ett "proof of concept" där vi visat att automatisera klimatberäkningen med relativt små medel är genomförbart.

Slutsatser

Vi har efter genomförda tester kommit fram till att det är möjligt att uppnå en hög grad av träffsäkerhet i matchningen mellan objekt och en resurs i resurshubben. Om man inför klassificering med hjälp av CoClass redan i tidiga skeden finns det en stor möjlighet att hela tiden hantera en LCA-beräkning. När ett objekt/projekt börjar definieras så bestäms huvuddelen av klimat och annan miljöpåverkan. Genom att arbeta med klassificeringen på alla ingående komponenter så kan objektet LCA beräknas ofta och enkelt, utifrån de förutsättningar som gäller och det blir enklare att optimera till exempel klimatpåverkan genom hela projektet.

Metoden att bestämma hur ett objekt i projektet skall beräknas kan tillämpas under alla de skeden innan definitiv produktbestämning sker. Ytterligare arbete för att automatisera processen genom produktbestämningssfasen återstår.

Branschen måste enas om hur man skall hantera produkter och artiklars identifikation så att det blir möjligt att genom en produkt/artikelidentifikation går att hitta den specifika miljöinformationen för produkten (EPD) digitalt. Samt att på samma sätt från hanterad klassifikation kunna finna tillämpliga produkter till produktbestämningen. Arbete kring detta pågår i ett flertal projekt utom och inom Smart Built Environment, bland annat inom områden som behandlar "product data templates".

När denna länk finns på plats blir det möjligt att med liten arbetsinsats för LCA arbetet kunna ha med miljöprestanda för ett projekt genom dess hela genomförande. Därmed kan miljöpåverkan hanteras som styrparametrar inom byggprocessen.

För att nå en stabil hantering i LCA-beräkningen är det viktigt att det finns möjligt att neutralt (via Svensk Byggtjänst) verifiera referenscodes som används för dialogen med resurshubben.

4 FALLSTUDIER

4.1 Trästommar med olika stabiliseringssystem

För verifiering av ramverket har ett fallstudie med trästommar av fyrvåningshus med källare och med olika stabiliseringssystem och med beteckningen Modell 1 och Modell 2 studerats. Fokus i analysen har varit produktionskostnad och stommens livscykelpåverkan i termer av livscykelkostnad och CO₂-utsläpp. Byggnadens storlek är LxWxH=20.2x13.2x14.7 m, se figur 3. För stommen tillhörande Modell 1 och Modell 2 gäller följande:

Modell 1. Källaren är uppbyggd av armerade betongväggar och betongbjälklag. Hisschakt och trappuppgång är också uppbyggd av armerade betongväggar för stomsstabilitet. Allt annat konstruktionselement är i trämaterial, se figur 3 Vänstra.

Modell 2. Källaren är uppbyggd av armerade betongväggar och betongbjälklag. Hisschakt och trappuppgång består av skjuvväggar i trämaterial för stomsstabilitet. Allt annat konstruktionselement är i trämaterial, se figur 3 Högra.

Figur 3

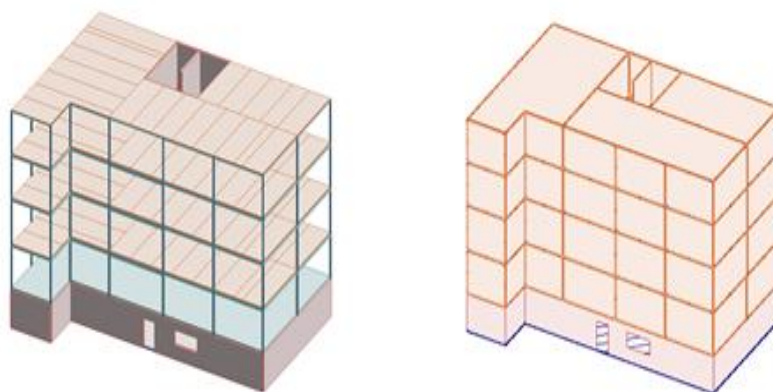


Fig. 3. Vänstra: Trästomme med hisschakt och trappuppgång i betong (Modell 1). Högra: Trästomme med hisschakt och trappuppgång i trämaterial (Modell 2).

4.1.1 Resultat och slutsatser

Baserat på 3D-modellernas relaterad information har 5D-simulering, LCCA och LCA har utförts för att beräkna produktionskostnad, livscykelkostnad och klimatpåverkan i form av koldioxidutsläpp. Figur 4 visar resultatjämförelsen mellan stommar beträffande produktionskostnad, livscykelkostnad och klimatpåverkan. Som framgår i figuren Modell 2 har lägsta värden i alla tre jämförelsen och därmed har valts för vidare analys.

Figur 4

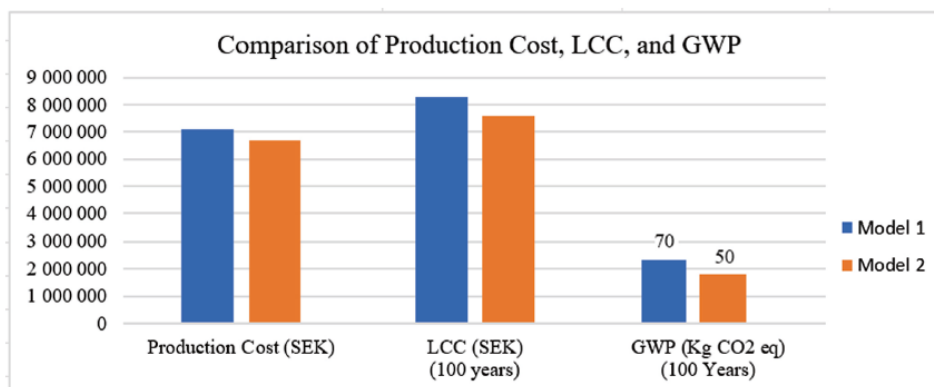


Fig. 4. Jämförelsen av produktionskostnad, livscykelkostnad och CO₂ utsläpp för fallstudien, Modell 1 och Modell 2.

Studien har presenterats och publicerats i internationella konferensen 35th CIB W78 2018.

4.2 Samverkansbjälklag av betong och trä

För verifikation av ramverket har trästommen till ett bostadshus i fem våningar med samverkansbjälklag från våning två till fem har studerats. Första våningen samt hisschakt och trappuppgång är i armerad betong för stomstabilitet. Byggnadstommen har dimensionen $L \times B \times H = 30 \times 11 \times 14$ [m³], se figur 5.

Figur 5

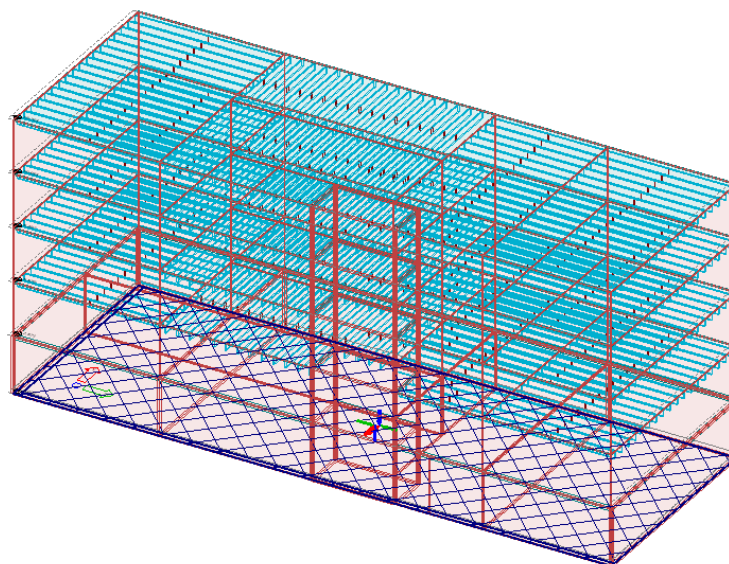


Fig. 5. 3D-vyn av undersökta trästommen till ett bostadshus som en fallstudie.

Samverkansbjälklaget av betong och trä består av limträbjälkar och armerad betongskiva, sammanfogade med skjuvkopplingar. All samverkansbjälklag i stommen är fritt upplagda på alla fyra sidor och är lägenhetsskiljande bjälklag. Tvärsnittet för den undersökta samverkanbjälklaget visas i figur 6.

Figur 6

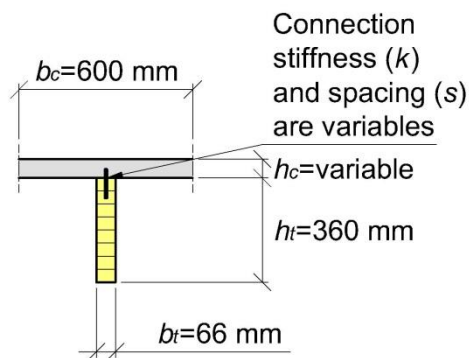


Fig. 6. Tvärsnitt av undersökta samverkansbjälklaget av betong och trä.

Samverkanbjälklaget i stommen över andra till femte våningen med längsta spännvidd på 7.3 [m] och med tre olika komfortklasser har valts för att kontrollera huruvida den uppfyller dimensioneringsvillkoren för nedböjning, svikt och vibrationer. Samma beräkningar har även utförts för samvekanbjälklag med 9.0 [m] spännvidd.

4.2.1 Resultat och slutsatser

3D-grafen i figur 7 visar storleken på effektiva böjstyvheten för samverkanbjälklaget baserad på γ metoden Eurokod som funktion av både betongtjocklek h_c och utsmed styvhet hos skjuvförbindarna k_s/s för bjälklagslängden $L=7.3$ [m].

Figur 7

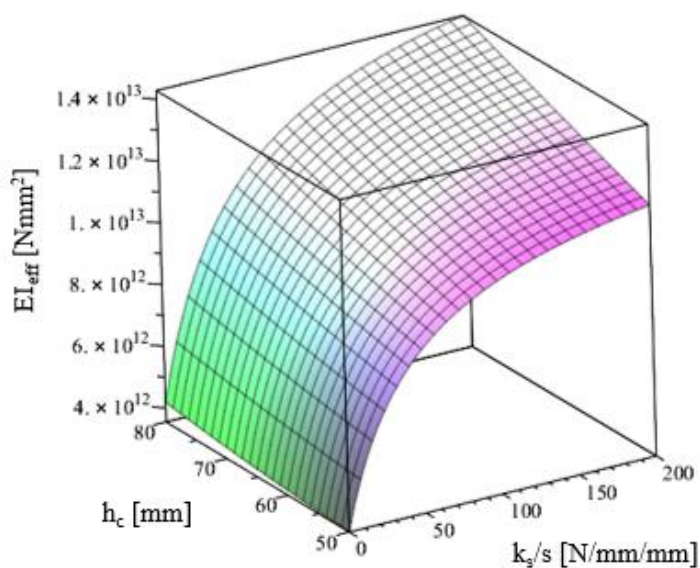


Fig. 7. Effektiv böjstyvhet baserad på γ metod som funktion av betong tjocklek h_c och utsmed styvhet hos skjuvförbindare k_s/s och för bjälklagslängd $L=7.3$ [m]

Från 3D-graften har tre Pareto fronter för tre olika komfortklasser utlästs för samverkansbjälklag med spännvidden $L=7.3$ m och visas i figur 8.

Figur 8

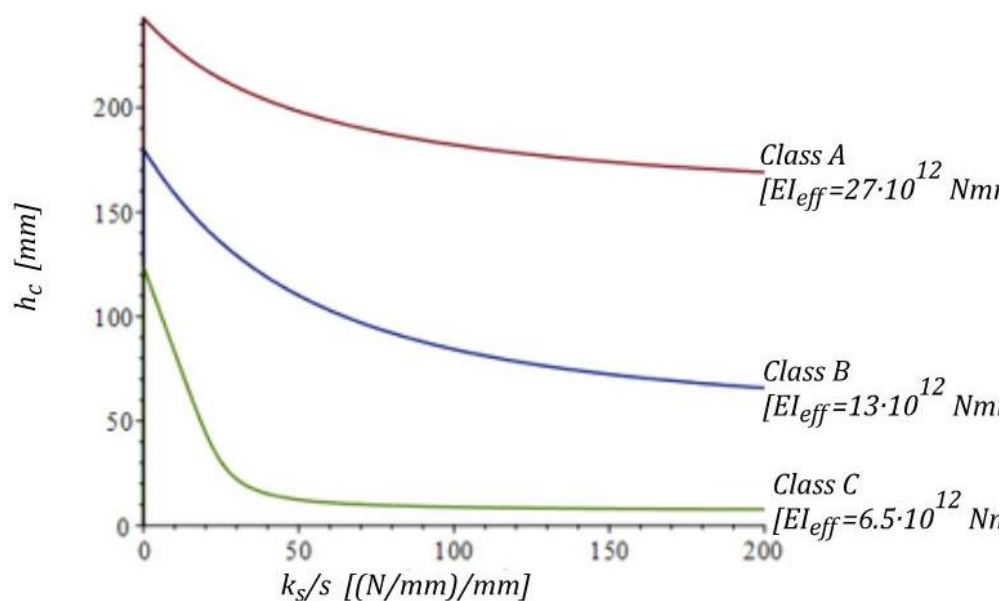


Fig. 8. Pareto fronter för tre olika komfortklasser A, B och C utläst från 3D-graften för samverkansbjälklaget med spännvidden 7.3 m.

Därefter har tre lösningspar med lägsta betongtjocklek och motsvarande utsmetad styvhet har valts från var och en av Pareto-fronterna för vidare analys beträffande nedböjning, svikt och vibrationer både för spännvidd 7.3 m och 9.0 m. I studien har samverkansbjälklag med spännvidden 7.3 verifierats för högsta komfortklassen A och samverkansbjälklag med spännvidden 9.0 verifierats för lägsta komfortklassen C. Det är fullt möjligt att öka komfortklassen för samverkansbjälklaget med spännvidden 9.0 m från C till A med utbyte av limträbalken och med styvare skjuvförbindare.

Delar av studien har presenterats och publicerats i internationella konferensen CompWood 2019. Studien har i sin helhet redogörts i en vetenskaplig artikel och skickats till tidskriften "Civil Engineering and Environmental Systems".

För vidare forskning föreskåts att undersöka möjligheterna att ersätta prefabricerade betongbjälklag i stål- och prefabricerade betongstommar med samverkansbjälklag med utformning som överbryggar nio meter spännvidd och högsta komfortklassen A. Därmed finns det stora möjligheter att minska klimatpåverkan från tunga betongbjälklag och dess transporten genom att ersätta den med lättare prefabricerad samverkansbjälklag.

5 REDOVISNING OCH SPRIDNING AV RESULTAT

Resultaten av projektet har redovisas i form av tre konferensartiklar och en tidskriftsartikel.

Delar av forskningen med produktutvecklingen av samverkansbjälklaget av betong och trä har presenterats i kursen konstruktionsteknik 2 på Tekniska Högskolan i Jönköping. Desutom planeras att använda delar av dimensioneringsverktyget för dimensionering av samverkansbjälklaget i en inlämningsuppgift i kursen Datorstöd Konstruktionsteknik (tidigare Konstruktionsteknik 3) i Högskolan i Borås VT2021.

Under projekttiden har flertal examensarbeten inicieerats med fokus på hållbarhet och ekonomi med anknytning till projektet. Idéer som har kommit upp i projektet har spridits sig till utbildningen och gjort att studenterna har blivit mer uppmärksamma på hållbarhetsfrågor senaste två åren.

5.1 Examensarbeten

Under vårterminen VT2018, VT2019 och VT2020 har jag examinerat 16 examensarbeten med 15 hp som har haft anknytning till forskningsprojektet. Här nedan följer rubrikerna för examinerade examensarbeten:

VT2018:

1. LCA och LCCA av olika isoleringsmaterial i en träbaserad väggkonstruktion, Adi Fetahagic, Henrik Pantzar
2. Pålprojektering med hjälp av BIM, Anton Dahlberg, Adam Helgesson
3. Klimatpåverkan av fackverkstakstolar i trä med fokus på koldioxidutsläpp, Kling Daniel, Lennström Gustaf
4. Integrering av LCA och LCC i en multikriterieanalys, Filip Lunnergård, David Nilsson
5. Livscykelanalys av ett samverkansbjälklag av KL-trä och betong - åtgärdsförslag för minskade koldioxidutsläpp, Fredrik Tambour, Gustaf Wenström
6. LCCA jämförelse mellan centralt- och lägenhets placerade FTX-system, Linus Johansson, Marcus Pettersson
7. Implementering av maskinstyrning på grundläggningsmaskiner, Robin Andersson, Jonathan Lundström

VT2019

1. Utvärdering av samverkansbjälklag av limträ och betong samt limträförstärkt KL-träbjälklag - En jämförelsestudie, Stefan Cronberg, Albin Löfvall

VT2020:

1. KL- trä i flerbostadshus med 3–5 våningar, Krav på byggelement i byggkonstruktion med avseende på brand och akustik, Ellen Hansson, Larsana Namroud
2. Förändrade arbetsmetoder vid gjutning av klimatvänlig betong, Albin Fröding, Eric Larsson
3. Ekonomisk projektstyrning med hjälp av value engineering, Samiel Yemane, Hjalmar Ericsson
4. En jämförelse mellan klimatpåverkan av samverkansbjälklag av KL-trä och prefabricerat eller platsgjuten betong, Fredrika Sjögren Brolinsson, Hülya Cizmeli Utsel
5. Multikriterieanalys av samverkanskonstruktioner, Optimering av antal skjuvförbindare, Emilia Dahlin, Lina Jarefalk
6. Vilket konstruktionsmaterial bör väljas? Betong, Eco Betong och Trä, Linnea Kvarnvik, Agnes Loneberg
7. En energilivscykelanalys av mobila solceller på bodetableringar under byggproduktion, Jennifer Karlsson, Lydia Hagström
8. En jämförelse av trä och betong som stommaterial - ur ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv, Kristoffer Öhrling, Sanna Eriksson

5.2 Konferensbidrag

Följande konferensartiklar har presenterats och publicerats under projektets gång:

5.2.1 CIBW078 2018

Movaffaghi, H., Yitmen, I. (2018). Developing a framework of a multi-objective and multi-criteria-based approach for integration of LCA-LCC and dynamic analysis in industrialized multi-storey timber construction. Cham, Switzerland: Springer, 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction and Management, Chicago, 01-03 October 2018.

Abstract. To improve organizational decision-making process in construction industry, a framework of a multi-objective and multi-criteria-based approach has been developed to integrate results from Life-Cycle Analysis (LCA), Life-Cycle Cost Analysis (LCC) and dynamic analysis for multi-storey industrialized timber structure. Two Building Information Modelling (BIM)-based 3D structural models based on different horizontal stabilization and floor systems will be analyzed to reduce both climate impact, material and production costs and enhance structural dynamic response of the floor system. Moreover, sensitivity of the optimal design will also be analyzed to validate the design. The multi-objective and multi-criteria based LCA-LCC framework analyzing the environmental, economic, and dynamic performances will support decision making for different design in the early phases of a project, where various alternatives can be created and evaluated. The proposed integrated model may become a promising tool for the building de-signers and decision makers in industrialized timber construction.

5.2.2 COMPWOOD 2019

Movaffaghi, H., Pyykkö, J., Yitmen, I. (2019). *Multi-Objective and Multi-Criteria Approach for Value-Driven Design in Industrialized Residential Multi-Storey Timber-Building*. Växjö Comp Wood 2019 International Conference on Computational Methods in Wood Mechanics – from Material Properties to Timber Structures. ECCOMAS Thematic Conference, June 17-19, 2019, Växjö, Sweden.

Abstract. Serviceability in terms of springiness, vibration and deflection (Chuan, 2008), as well as sustainability in terms of climate impact, production cost and human comfort (Movaffaghi and Yitmen, 2018) have been identified as the most important aspects for appropriate function in residential multi-story timber-buildings. Thus, the aim of this study is focused on value driven design approach of a timber-concrete composite (TCC) floor as a hybrid construction system in residential multi-story timber building by 1) enhancing serviceability performances of the floor for optimum span range approximately between 5 to 10 meters in terms of stiffness and dynamic response from footfall-induced vibrations, and 2) reducing climate impact in terms of CO₂-emissions, by optimizing material usage.

As the case study, a residential five-story timber building, including reinforced concrete first story and shaft, with the overall dimensions $[L \times W \times H = 30 \times 11 \times 14 \text{ [m]}^3]$ has been studied. The three-dimensional geometry of the load bearing structural elements has been modelled for different types of analysis.

As serviceability criteria for the floors, the deflection due to a point load was chosen. The deflections were related to comfort classes given by Jarnerö (2014) and transverse load distribution was considered according to Ohlsson (1984). The deflection and effective bending stiffness (EI_{ef} in EC5 Annex B) were chosen as objective functions, while thickness of concrete slab and shear stiffness of the connection between glulam beam and concrete slab to fulfill structural requirements were chosen as design variables in a multi-objective optimization. After optimization, a multi-criteria analysis was applied to select several design solutions from the Pareto optimal front satisfying some subjective preferences of the stakeholders for value-driven design. This is followed by life cycle analysis and life cycle costing on the selected design solutions and the results have been integrated to a final design solution by a multi-criteria analysis.

The results in this study integrates serviceability and sustainability performances using value driven design approach that supports decision making in the early phases of a design, where various alternatives can be analyzed and evaluated.

5.2.3 CIVILCOMP 2019

Movaffaghi, H., Pyykkö, J., Yitmen, I., Svensson S. (2019). *Large Span Timber Buildings Under Horizontal Forces*. Italy: Elsevier, CIVIL-COMP 2019, The Sixteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing 16-19 September 2019, Lake Garda, Italy.

Abstract. In timber concrete composite (TCC) floor systems the concrete contributes to increase of the stiffness and research is ongoing to develop large span TCC floor systems with less supporting walls to create both modular flexibility and wide-open spaces. Nevertheless, removing supporting walls can degrade structural performance against horizontal forces (Ferdous, et al., 2019). Meanwhile both the height of the structure and the type of floor diaphragm (rigid or flexible) has influence on the magnitude of the

lateral loads transferred to the supporting shear walls. This is a challenge, not least when prefabricated elements are used; the individual elements must be connected to form a continuous floor diaphragm.

The main aim of this paper is to study lateral load transferred to the shear walls through the TCC floor with both rigid and/or flexible diaphragms in low and medium-rise timber buildings. The focal point of the study is the analysis and design of floor elements and connection systems connecting the TCC floor elements to each other as well as to the adjoining structure.

The case studies for low and medium-rise timber structures have been analyzed both using finite element modelling and analytical methods based on both deep beam theory and beam or diaphragm actions depending on the height of the structure. The results in this study indicate that the magnitude of load transferred to the shear walls depends on both the height of the structure and the type of floor diaphragms. The structural performance in terms of stability can be enhanced by effective use of connection systems of TCC floor elements.

5.3 Tidskriftsbidrag

Följande tidskriftsartikel (abstract ingår) har i sin helhet redogörts i en vetenskaplig artikel och skickats till tidskriften "Civil Engineering and Environmental Systems" under projektets gång:

Value-Driven Design Approach for Optimal Long-Span Timber Concrete Composite Floor in Multi-Storey Wooden Residential Buildings. Submitted to the journal of Civil Engineering and Environmental Systems.

Abstract. Long-span timber-concrete composite floor has the potential to address the design challenges for conventional wooden floors in residential multi-storey timber frame buildings. The aim of this paper is to develop a design approach for long-span timber-concrete composite floor system of 6 to 9 m. A framework based on value-driven design approach has been developed for integration of results from graphical multi-objective optimization, spreadsheet-based analysis according to Eurocode 5 specifications, structural static and dynamic finite element analysis, and multi-criteria decision making. To verify the developed framework, a residential five-story timber frame building as a case study has been studied. Optimal design includes optimized thickness of the concrete and optimized smeared stiffness of connectors for three different comfort classes A, B and C. TCC floor with span length 7.3 [m] belonging to comfort class A and TCC floor with span length 9.0 [m] belonging to comfort class C has been chosen as optimal solutions. The results indicate that proposed and innovative design approach is a promising tool for developers, architects and structural engineers when designing optimal long-span timber-concrete composite floor system.

6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Vi har efter genomförda tester kommit fram till att det är möjligt att uppnå en hög grad av träffsäkerhet i matchningen mellan objekt och en resurs i resurshubben för att uppnå en automatiserad LCA-beräkning. Om man inför klassificering med hjälp av CoClass redan i tidiga skeden finns det en stor möjlighet att hela tiden hantera en LCA-beräkning. När ett objekt/projekt börjar definieras så bestäms huvuddelen av klimat och annan miljöpåverkan. Genom att arbeta med klassificeringen på alla ingående komponenter så kan objektet LCA beräknas utifrån de förutsättningar som gäller och det blir enklare att optimera till exempel klimatpåverkan genom hela projektet.

Denna metod att bestämma hur ett objekt skall beräknas kan tillämpas under alla de skeden innan definitiv produktbestämning sker. Ytterligare arbete för att automatisera processen genom produktbestämningssfasen återstår.

Här måste branschen enas om hur man skall hantera produkter och artiklars identifikation så att det blir möjligt att genom en produkt/artikelidentifikation går att hitta den specifika miljöinformationen för produkten (EPD) digitalt. Samt att på samma sätt från hanterad klassifikation kunna finna tillämpliga produkter till produktbestämningen. Arbete kring detta pågår i ett flertal projekt utom och inom Smart Built Environment, bland annat inom områden som behandlar "product data templates".

Med tillämpning av samverkansbjälklag med långa spännvidder på upp till 9 m i stommar för flervåningsbyggnader är det fullt möjligt att minska antalet icke vertikalt bärande innerväggar och därmed reducera stommens totala klimatpåverkan och totala produktionskostnader med mindre mängd materialanvändning. Samtidigt en minskning av antal icke vertikalt bärande innerväggar kan påverka negativt på stommens horisontalstabilitet för vind och snedställningslaster. Därför bör stabilitetsanalys inkluderas vid utformningen av samverkansbjälklag med lång spännvidd. Med den anledningen finns det behov för vidare forskning när det gäller metoder för horisontalstabilisering av stommen för tillämpningar av samverkansbjälklag med långa spännvidder i trästommar.

Samverkansbjälklag i stommar med långa spännvidder kan också ersätta betonghåldäck i stålstommar och betongplattan i prefabricerade betongstommar och därmed minska klimatpåverkan avsevärt genom minskning av betonganvändning och dess transport som är stor källa till koldioxidutsläppen. Därför behövs det vidare forskning tillsammans med aktörer i byggnadsindustrin för att undersöka möjliga nya tillämpningar av samverkansbjälklag i flervåningsstommar i betong och stål. Det ska också nämnas att skjuvförbindarnas klimatpåverkan har antagits att vara liten i jämförelse med klimatpåverkan från betongskivan när produktion och materialtransporten av betongen är en av de viktigaste källorna till koldioxidutsläppen.

Det är även intressant att jämföra resultaten av utformningen av samverkansbjälklaget i detta projekt med experimentella resultat i en framtida studie för kalibrering och

verifiering av beräkningar. Det finns experimentella resultat hos tillverkaren Hedared AB som ska användas för jämförelsen i nästa konferens- eller tidskriftsartikel.

7 REFERENSER

Avsnitt 5.2.1

Anastaselos, D., Giama, E., Papadopoulos, A.M.: An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, 41(11) 1165-71 (2009).

Bierer A., Götze U., Meynerts L., Sygulla R.: Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting, *Journal of Cleaner Production*, 108, 1289-301 (2015).

British Standards Institute, Standardized Method of Life Cycle Costing for Construction Procurement BS EN ISO 15686-5, United Kingdom (2008).

Buchanan, A.H., Levine, S.B.: Wood-Based Building Materials and Atmospheric Carbon Emissions. *Environmental Science and Policy*, 2(6), 427-37 (1999).

Coelho A.C., Lopes A., Branco J.M., Gervásio H.: Comparative Life-Cycle Assessment of a Single-Family House: Light Steel Frame and Timber Frame, https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/20801/2/Ecowood_paper.pdf

De Felice, F., Petrillo, A.: Multicriteria approach for process modelling in strategic environmental management planning. *Int. J. Simul. Process. Model*, 8 (1), 6-16 (2013).

Deniz, G.O.: An analytic network process (ANP) model to examine LEED-certified buildings' operational performance. *Built Environment Project and Asset Management*, 7(4), 366-376 (2017).

Ding, G.K.C.: Developing a multicriteria approach for the measurement of sustainable performance. *Building Research & Information*, 33(1), 3-16 (2005).

Flanagan, R. and Jewell, C.: *Whole life appraisal for construction*, Blackwell Publishing, Oxford (2005).

Hamdy M., Hasan A., Siren K.: A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy and Buildings*, 56,189-203 (2013).

Heijungs R, Settanni E, Guinée J.: Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9):1722-33 (2013).

Hoogmartens R., Van Passel S., Van Acker K., Dubois M.: Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*. 48, 27-33 (2014).

International Organization for Standardization, Standard 14040: *Environmental management - Life cycle assessment: Principles and framework* (2006).

Kovacic, I., Reisinger, J., Honic, M.: Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1774–1786 (2018).

Kehily D., Underwood J.: Embedding life cycle costing in 5D BIM. *Journal of Information Technology in Construction*, 22, 145-167 (2017).

Kuzman K.M, Sandberg D.: Comparison of timber-house technologies and initiatives supporting use of timber in Slovenia and in Sweden - the state of the art. *iForest*, 10, 930-938 (2017).

Lam, J.S.L., Laib, K.H.: Developing environmental sustainability by ANP-QFD approach: the case of shipping operations, *Journal of Cleaner Production*, 105, 275-284 (2015).

Lee, J.W., Kim, S.H.: Using analytic network process and goal programming for interdependent information system project selection. *Comput. Oper. Res.* 27 (4), 367–382 (2000).

Lennartsson, M., Movaffaghi, H., Linderoth, H. (2018). Exploration of the BIM Development and Application: Identifying Key Areas for the Industrialized House-Building Sector. 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, ICCCBE2018, Tampere, Finland, June 5-7, 2018.

Leontief, W.: Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *Rev Econ Stat*, 262–71 (1970).

Levander, E., Stehn, L.: Addressing Uncertainties about Timber Housing by Whole Life Costing, *Proceedings of 4th Nordic Conference on Construction Economics and Organisation: Development Processes in Construction Management*, 249-258 (2007).

Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., Sonnemann, G.: Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Build Environ*, 93, 165–78 (2015).

Lenzen, M.: Errors in conventional and Input-Output-based Life-Cycle inventories. *Ind Ecol*, 4(4),127–48 (2000).

Menzies G.F., Turan S., Banfill P.F.: Life-cycle assessment and embodied energy: a review. In: *Proceeding of the institution of civil engineers – construction*, 160(4), 135–44 (2007).

Movaffaghi, H., Yitmen, I. (2018). Developing a framework of a multi-objective and multi-criteria-based approach for integration of LCA-LCC and dynamic analysis in industrialized multi-storey timber construction. Cham, Switzerland: Springer, 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction and Management, Chicago, 01-03 October 2018.

Movaffaghi, H., Pyykkö, J., Yitmen, I., Svensson, S. (2019). Large Span Timber Buildings Under Horizontal Forces. Italy: Elsevier, CIVIL-COMP 2019, The Sixteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing 16-19 September 2019, Lake Garda, Italy.

Movaffaghi, H., Pyykkö, J., Yitmen, I. (2019). Multi-Objective and Multi-Criteria Approach for Value-Driven Design in Industrialized Residential Multi-Storey Timber-Building. Växjö CompWood 2019 International Conference on Computational Methods in Wood Mechanics – from Material Properties to Timber Structures. ECCOMAS Thematic Conference, June 17-19, 2019, Växjö, Sweden.

Movaffaghi, H., Pyykkö, J., Svensson S., Yitmen, I. (2020). Value-Driven Design Approach for Optimal Long-Span Timber Concrete Composite Floor in Multi-Storey Wooden Residential/Office Buildings. Submitted to the journal of Civil engineering and Environmental Systems.

Petrillo A., De Felice F., Jannelli E, Autorino C, Minutillo M, Lavadera A.L.: Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renew-able energy system. *Renewable Energy*, 95, 337-55 (2016).

Promentilla, M.A.B., Tapia, J.F.D., Arcilla, C.A., Dugosa, N.P. Gaspillo P.D., Roces, S. Tan, R.R: Interdependent ranking of sources and sinks in CCS systems using the analytic network process. *Environmental Modelling & Software*, 50 21-24 (2013).

Saaty, T.L.: *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh (2001).

Sadiq, R.; Khan, F.I.: An integrated approach for risk-based life cycle assessment and multi-criteria decision-making: selection, design and evaluation of cleaner and greener processes, *Business Process Management Journal*, 12(6), 770-792 (2006).

Sathre, R., O'Connor, J.: Meta-analysis of Greenhouse Gas Displacement Factors of Wood Product Substitution. *Environmental Science and Policy*, 13(2), 104-14 (2010).

Savino M.M, Manzini R, Della, S.V, Accorsi R.: A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines. *Applied Energy*, 189:739-52 (2017).

Schmidt, M., Crawford, R.H.: Developing an integrated framework for assessing the life cycle greenhouse gas emissions and life cycle cost of buildings, *Procedia Engineering*, 196, 988 – 995 1877-7058 (2017).

Senante, M., Gómez, T., Caballero, R., Hernández-Sancho, F., Ramón Sala-Garrido, R.: Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. 532, 676-687 (2015).

Theißen, S., Spinler, S.: Strategic analysis of manufacturer-supplier partnerships: an ANP model for collaborative CO₂ reduction management. *European Journal of Operational Research*, 233, 383-397 (2014).

Treloar, G.J., Love, P.E., Holt, G.D.: Using national input/output data for embodied energy analysis of individual residential buildings. *Constr Manag Econ*, 19(1), 49–61 (2001).

Tukker, A.: Life Cycle Assessment as a Tool in Environmental Impact Assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 435-456 (2000).

Weckendorf, J., Zhang, B., Kermani, A., Reid, D.: Dynamic Response of Timber Floors, 2nd PRoBE 2005 Conference, Postgraduate Researchers of the Built & Natural Environment, Glasgow, UK, 1617 November 2005.

Wudhikarn, R., Chakpitak, N., Neubert, G.: A Framework for New Product Selection Decision using Analytic Network Process and Knowledge Management. *Advanced Materials Research*. 538-541 3098-3105 (2012).

Avsnitt 5.2.2

Andersson, J. 1999. On Engineering System Design. A simulation optimization approach, Licentiate Thesis, Department of Mechanical Engineering, Linköping University.

Andersson, J. 2000. A survey of multi-objective optimization in engineering design. Technical Report: LiTH-IKP-R-1097. Department of Mechanical Engineering Linköping University 581 83 Linköping, Sweden.

Castagne, S., Curran, R. and Collopy, P. 2009. "Implementation of value-driven optimization for the design of aircraft fuselage panels." *International Journal of Production Economics* 117: 381-388.

Ceccotti, A. 2002. "Composite concrete-timber structures". *Progress in Structural Engineering and Materials*. 4(3): 264-275.

Godfrey, P. 2010. "Using systems thinking to learn to deliver sustainable built environments." *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(3): 219-230.

Habert, G., and Schlueter, A. (Eds.). 2016. "Expanding Boundaries: Systems Thinking in the Built Environment": Sustainable Built Environment (SBE) Regional Conference Zurich 2016. vdf Hochschulverlag AG.

Hu, L.J., Chui, Y.H., and Onysko, D.M. 2001. "Vibration serviceability of timber floors in residential construction." *Progress in Structural Engineering and Materials* 3(3): 228-237.

Jarnerö, K. 2014. "Vibrations in timber floors- Dynamic properties and human perception." PhD diss., Linnaeus University.

Isaksson, O., Kossmann, M., Bertoni, M., Eres, H., Monceaux, A., Bertoni, A., ... & Zhang, X. 2013. "Value-Driven Design-A methodology to link expectations to technical requirements in the extended enterprise". Paper presented at INCOSE International Symposium 23(1): 803 - 819.

Ohlsson, S. 1984. Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag – dimensioneringsmetoder (in Swedish). Byggeforskningsrådet.

Strusoft AB (2018). FEM-DESIGN: Theory Manual for Footfall Analysis, Version 1.1.

Yeoh, D., Fragiaco, M., and Carradine, D. 2013. "Fatigue behaviour of timber-concrete composite connections and floor beams." *Engineering structures* 56: 2240-2248.

T. Toratti and A. Talja, Classification of Human Induced Floor Vibrations, *BUILDING ACOUSTICS*, Volume 13. Number 3, 2006, Pages 211 – 221.

Avsnitt 5.2.3

Ferdous W., Bai Y., Ngo T. D, Manallo A. & Mendis P. (2019), “New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review”, *Engineering structures*, 183, 883–893.

Avsnitt 5.3.1

Andersson, J. 1999. On Engineering System Design. A simulation optimization approach, Licentiate Thesis, Department of Mechanical Engineering, Linköping University.

Andersson, J. 2000. A survey of multi-objective optimization in engineering design. Technical Report: LiTH-IKP-R-1097. Department of Mechanical Engineering Linköping University 581 83 Linköping, Sweden.

BFR, 1984. Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag – dimensioneringsregler Rapport T20: ISBN 91-540-4301-8, Sweden (in Swedish).

Boverket 1991. SVIKT – Exempel på godtagbar beräkningsmetod. Technical Report (in Swedish) in association with S. Ohlsson. Boverket, Byggavdelningen 1991-07-01. Karlskrona, Sweden (in Swedish).

Castagne, S., Curran, R. and Collopy, P. 2009. “Implementation of value-driven optimisation for the design of aircraft fuselage panels.” *International Journal of Production Economics* 117: 381-388.

Ceccotti, A. 2002. “Composite concrete-timber structures”. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 4(3): 264-275.

Godfrey, P. 2010. “Using systems thinking to learn to deliver sustainable built environments.” *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(3): 219–230.

Habert, G., and Schlueter, A. (Eds.). 2016. “Expanding Boundaries: Systems Thinking in the Built Environment”: *Sustainable Built Environment (SBE) Regional Conference Zurich 2016*. vdf Hochschulverlag AG.

Hu, L.J., Chui, Y.H., and Onysko, D.M. 2001. “Vibration serviceability of timber floors in residential construction.” *Progress in Structural Engineering and Materials* 3(3): 228-237.

Jarnerö, K. 2014. “Vibrations in timber floors- Dynamic properties and human perception.” PhD diss., Linnaeus University.

Isaksson, O., Kossmann, M., Bertoni, M., Eres, H., Monceaux, A., Bertoni, A., ... & Zhang, X. 2013. “Value-Driven Design—A methodology to link expectations to technical requirements in the extended enterprise”. Paper presented at *INCOSE International Symposium* 23(1): 803–819.

Ohlsson, S. 1984. Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag – dimensioneringsmetoder (in Swedish).

Pavic, A. and Reynolds, P. 2002a: Vibration Serviceability of Long-Span Concrete Building Floors. Part 1: Review of Background Information. *The Shock and Vibration Digest*, (34) 3: 191-211.

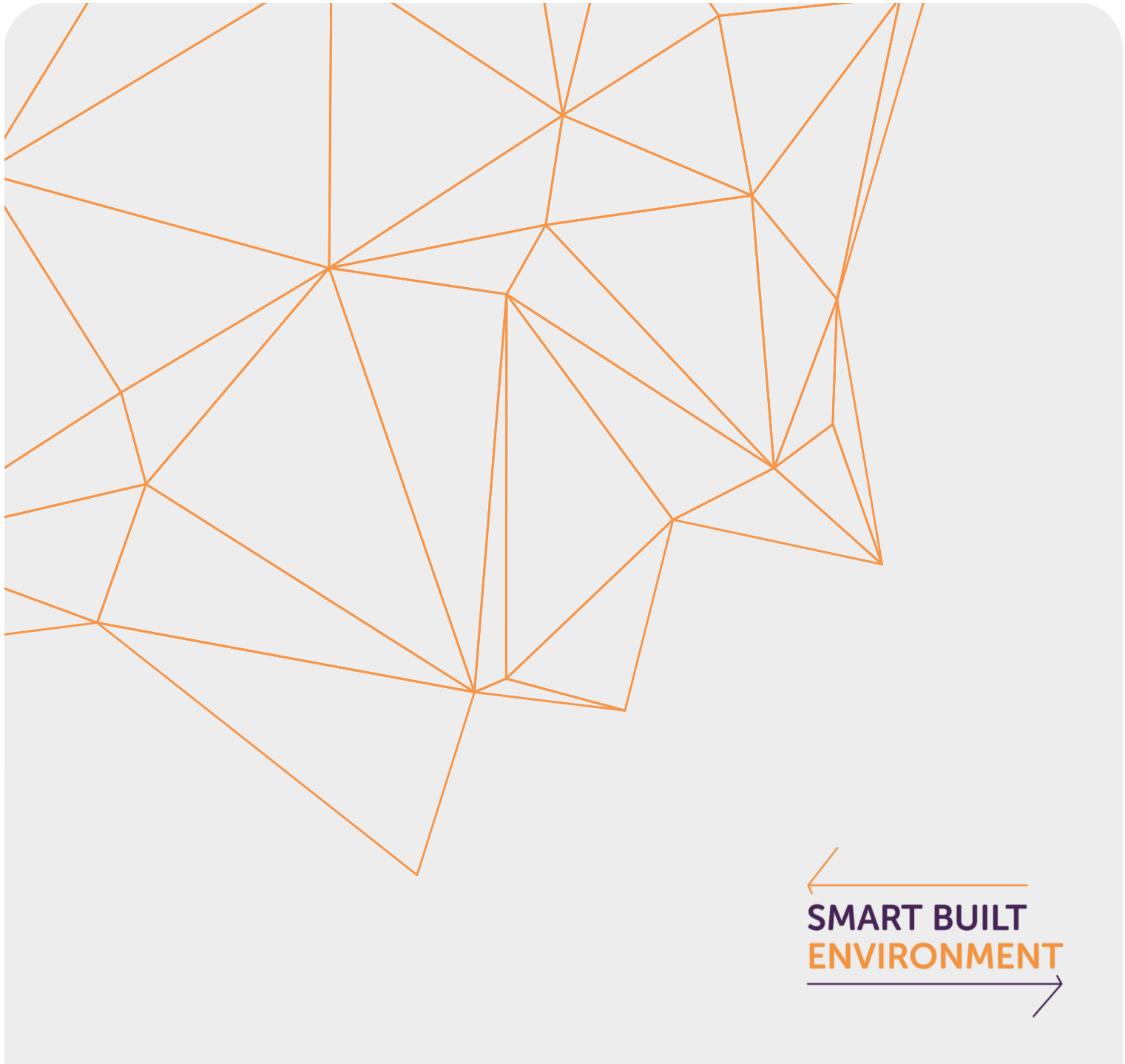
Pavic, A. and Reynolds, P. 2002b: Vibration Serviceability of Long-Span Concrete Building Floors. Part 2: Review of Mathematical Modelling Approaches. *The Shock and Vibration Digest*, (34) 4:279-297.

Strusoft AB 2018. FEM-DESIGN: Theory Manual for Footfall Analysis, Version 1.1.

Yeoh, D., Fragiaco, M., and Carradine, D. 2013. "Fatigue behaviour of timber-concrete composite connections and floor beams." *Engineering structures* 56: 2240-2248.

Toratti, T. and Kevarinmäki, A. 2001. Development of wood-concrete composite floors. Reports of the Working Commissions, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zurich, Switzerland, pp. 513-518. Toratti, T. and Talja, A. 2006. Classification of Human Induced Floor Vibrations, *BUILDING ACOUSTICS*, Volume 13. Number 3, Pages 211 – 221.

Willford, M.R. and Young, P. 2006. A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures, Concrete Society.



←
**SMART BUILT
ENVIRONMENT**
→



Med stöd från



**Strategiska
innovations-
program**