



Samband mellan styvhet och
ändring av fukthalt i KL-trä vid låg
mekanisk belastning
Slutrapport till förstudieprojekt

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning	2
Sammanfattning	2
Bakgrund	3
Viktigaste resultat	3
Uppställning	3
Variation av fukt över tid	4
Variation av egenfrekvenser över tid	5
FEM analyser	6
Analys	7
Slutsatser	8
Fortsättning	9
Literatur	10

Sammanfattning

Korslimmat trä (KL-trä) tillverkas av brädor som limmas ihop korsvis i flera skikt. Skivorna som erhålls används som byggelement, mestadels för väggar och bjälklagselement. Utgångsmaterialet trä tar står i jämvikt med det omgivande klimatet och kommer därför ändra fuktkvoten. I studien undersöktes en skiva av KL-trä under varierande fuktförhållanden i en klimatkammare hos Linnéuniversitetet. Egenfrekvenser samt fuktkvoten följdes upp och sambandet med klimatet studerades. Det visade sig att första och tredje uppmätta egenfrekvensen (böjning) visade negativ korrelation med omgivande fukten, den gick upp när fukten minskades (och tvärtom). För andra egenfrekvensen (torsion) däremot visade sig ett mer komplicerat samband. Ett flertal möjliga orsaker presenteras som förklaring. Medverkande organisationer var Linnéuniversitetet som huvudpart samt Södra Skogsägarna och Saab som bidragit som stödfunktionen och bollplank.

Bakgrund

Hus Charlie är en kontorsbyggnad som utfördes 2017–18 med inflyttning augusti 2018. Byggnaden är fyra våningar hög och byggd med en trästomme: pelare och balkar är gjorda av limträ och bjälklagen av KL-trä som bär vertikala laster. Ytterväggar är icke-bärande, det är trapphusen i betong samt stålkryss i fasaderna som stabilisera mot horisontella laster. Hus Charlie är del av Växjö Linnæus Science Park och rymmer kontorslokaler samt reception och större mötesrum.

I samarbete med Videum installerades ett permanent mätsystem med ett flertal olika typer av givare: fukt- och temperatur, sättningar, uteväder, samt dynamiska egenskaper, se rapporten av Dorn et al. (2019) för en sammanfattning av installationer. Larsson et al. (2022b) utvärderade de första tre åren av data med hänsyn till förändringar i det dynamiska beteende av Hus Charlie. Där framgick ett positivt samband mellan fuktkvoten i träet och de uppmätta egenfrekvenserna för huset.

Trä som naturligt material står i samband med omgivningen och dess fuktkvot ökar när omgivningen fuktas upp. En högre fuktkvot medför dock en minskning av materialets styvhet som leder till en minskad egenfrekvens – detta samband förväntades egentligen. Förväntningar bekräftades även i en numerisk studie av Larsson et al. (2022a) där en modell för Hus Charlie gjordes med hjälp av Dlubal REFM, ett ingenjörsmässigt verktyg för design av konstruktioner.

Mätresultaten från Hus Charlie var därför överraskande för det första då sambandet av ökade egenfrekvenserna och ökade fuktkvot gick tvärtom vad som förväntades.

Utvärderingen av litteratur, exempelvis i Gülzow et al. (2011), och i diskussioner av möjliga orsaker ledde fram till ett flertal möjliga orsaker för detta beteende, delvis på materialnivå, delvis på systemnivå. Förstudien hade målsättningen visa effekten i laborativ miljö med välkända förutsättningar och randvillkor. Planeringen utgick ifrån att undersöka flera mindre element, det visade sig dock att ett helt KL-träelement kunde användas. Studien begränsades då på materialnivå och exempelvis förband undersöktes inte.

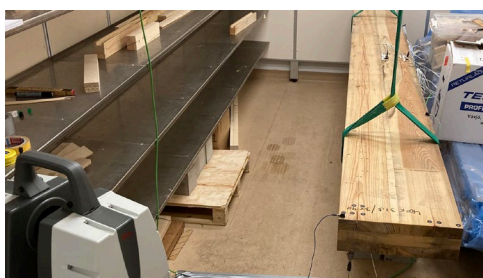
Projektet genomfördes hos Linnéuniversitetet mellan juni 2022 och april 2023. Deltagande var Michael Dorn, Osama Abdeljaber, Carl Larsson samt Carmen Amaddeo från Linnéuniversitetet. Externa partners var Per Finander (Saab) samt Kristoffer Segerholm (Södra). Per Finander har varit delaktig genom support för mätsystemet för både klimat/fukt samt för dynamiken. Kristoffer Segerholm har stor erfarenhet med materialet trä och dess tillämpning som byggnadsmaterial. Han verkade som bollplank och diskussionspartner inom projektet.

Viktigaste resultat

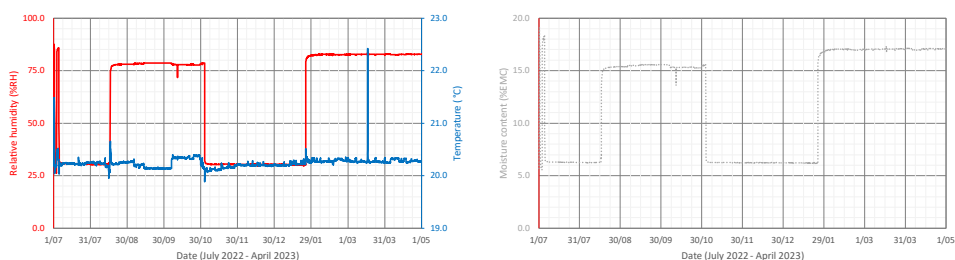
Uppställning

Ett KL-träelement hängdes upp i klimatkammaren hos Linnéuniversitetet under juni 2022 (Figur 1). Elementet hade en längd på ca. 4 m, en bredd på 375 mm och en tjocklek på 120 mm (3x40 mm).

Under ena hörnet av elementet placerades en shaker som styrdes av en dator. Shakern sattes i gång fyra gånger om dygnet i två minuter. Under samma tid samlades in vibrationer från tre stycken accelerometrar, ena monterades vid shakern, de andra två direkt på KL-elementet. Klimatkammaren ställdes in på olika relativ fukthalt i luften över årets gång, både ned- och uppfuktning ingick i schemat. Temperaturen hölls konstant vid 20 °C. Hastigheten på variationen med väldigt kraftiga upp- och nergångar motsvarar inte vanliga omställningar under årets lopp. Sammanlagt ingick två längre perioder av uttorkning och uppfuktning, se Figur 2 för förloppet i klimatkammaren. De första två (juli-början på november) var till för att stabilisera fukten i KL-trä elementet. Första riktiga mätning pågick sedan från början på november 2022 till slutet på januari 2023 med en uttorkning från runt 78 %RH ner till ca. 20 %RH. Under den följande perioden (fram till inklusive april 2023) pågick en uppfuktning upp till ca. 82 %RH.



Figur 1: Uppställningen i klimatkammaren: KL-elementet hänger fritt på gummiband; längst ner syns kopplingen mot shakern samt en accelerometer på ovansidan; till vänster laserskannern.



Figur 2: Temperatur och relativ fuktighet i klimatkammaren (t.v.) samt motsvarande jämviktsfuktkvot (t.h.).

Variation av fukt över tid

På tre ställen sattes in sensorer som kontinuerligt mäter temperatur och relativ fukt. För varje ställe sattes in tre sensorer, en i mitten av varje skikt. Sensordatan räknades därefter om till fuktkvoten som möjliggjorde att följa utvecklingen av fuktkvoten i träet på olika ställen med snabbare/långsammare fuktupptag/torkning. Fuktkvoten beräknades enligt Bergman et al. (2010).

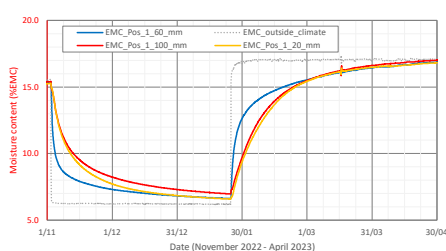
Figur 3 visar förloppet av fuktkvoten för alla mätpunkter över tid samt positionering av givarna. Tydliga skillnader i hastigheten på uttorkning syns mellan de olika positionerna. Vid position 1, hörnet av elementet, pågår uttorkning snabbast, både längs- och tvärskiktet har relativt kort avstånd till kanten. För position 2, längs med kanten men i mitten på längden pågår uttorkningen snabbt för det

mellanliggande tvärsiktet men betydligt långsammare för ytskikten med längsgående lameller. Position 3 ligger i mitten på elementet och uttorkningen går mycket långsammare än för de andra positionerna.

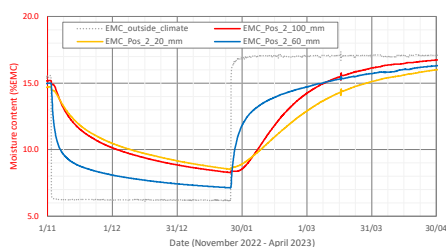
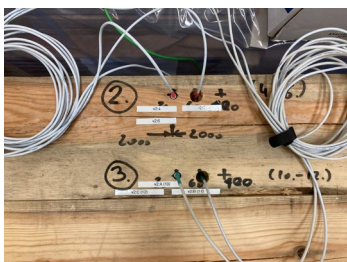
För andra delen av förloppet med uppfuktning syns ett omvänt mönster än beskrivet ovan.

Variation av egenfrekvenser över tid

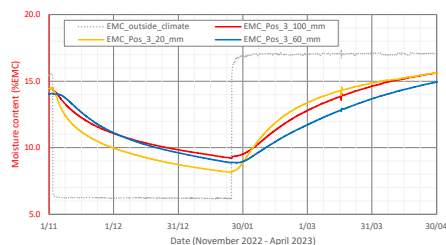
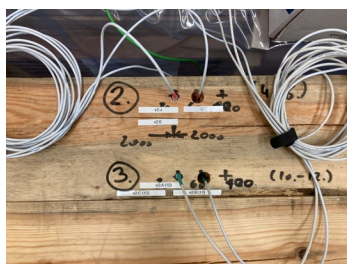
Egenfrekvenserna bestämdes genom en Experimental Modal Analysis (EMA) med data från accelerometern som ingångsdata. Genom en EMA bestäms egenmoder av en struktur, alltså egenfrekvenserna och modformerna. Första och andra egenmoder kunde tas fram direkt, högre egenfrekvenserna visade sig vara känsliga. Den tredje egenmoden kunde delvis beräknas från mätdata, dock inte för hela mätperioden så att endast de första och andra egenmoderna rapporteras. Första egenmod är en längsböjning av hela elementet i vertikal riktning, formen visas i avsnittet om FEM-beräkningar.



Fuktkvoten i position 1 i ett hörn av KL-elementet.



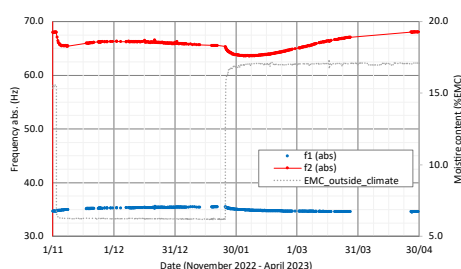
Fuktkvoten i position 2 i vid halva längd och ut med kanten av KL-elementet.



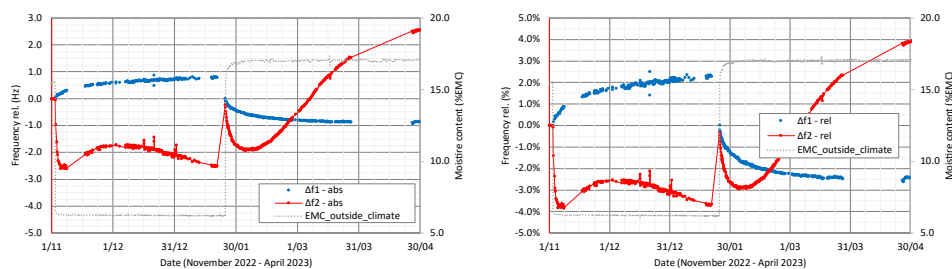
Fuktkvot i position 3 i mitten av KL-elementet.

Figur 3: Placering av givarna för fuktkvotsmätningar i tre positioner i KL-elementet samt utveckling av fuktkvoten över tid.

Variationen av frekvenserna för egenmoderna 1 och 2 skiljde sig i väsentliga punkter så att tydliga slutsatserna kan dras om hur fuktvariation påverkar dessa. Figur 4 visar förlopp för första och andra egenfrekvensen vid ändrade fukt. Observera att systemet återställdes innan ändring av fukt för att säkerställa att systemen och uppställningen fungerar. Första egenfrekvensen visar tydlig uppgång vid minskning av fukten samt en nedgång vid ökning av fukt över tid – principiellt vad som förväntades i förväg. Andra egenfrekvensen visar dock väsentliga skillnader mot detta beteende: vid uttorkning gick även egenfrekvensen ner i väldigt rask takt för att jämnas ut, följd av en lätt ökning och en övergång till en nedåtgående trend igen. Vid den följande uppfuktningen gick frekvensen snabbt ner i början med den övergick dock till en ökning och en sammanlagt högre egenfrekvens än vid start. I Figur 5 visas variationen som en förändring jämfört med värden precis innan klimatet ändrades. Första delfiguren visar den absoluta skillnaden mot startvärdet ($f_t - f_{t0}$) i Hz samt den relativa skillnaden $((f_t - f_{t0})/f_{t0})$ som visas som procentuell avvikelse. Trenderna som beskrevs ovan förtydligas i dessa figurer.



Figur 4: Variation av de uppmätta första (blå) och andra (röd) egenfrekvenserna över tid.



Figur 5: Variation av de uppmätta första (blå) och andra (röd) egenfrekvenserna över tid i jämförelse med värden innan fuktändringen: absoluta förändringen (t.v.), relativa förändringen (t.h.).

FEM analyser

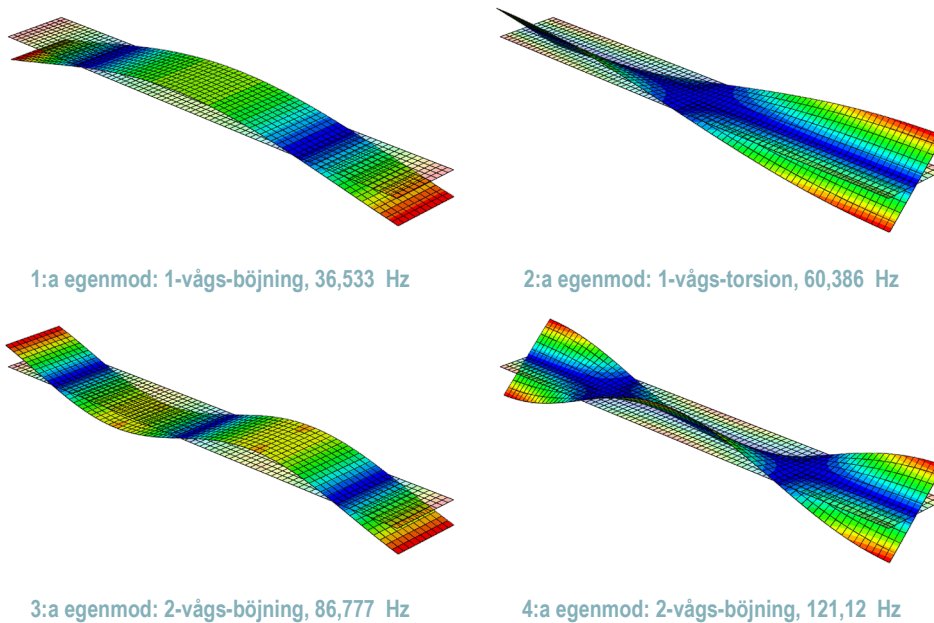
Parallellt med experimenten genomfördes en datoranalys med hjälp av den Finita Element Metoden (FEM). KL-elementet simulerades och även där togs egenmoderna fram. KL-elementet modellerades som skalelement med uppskattade materialegenskaper för KL-trä. Den dynamiska analysen ger egenmoder där både egenformen och egenfrekvensen beräknas. De första fyra egenmoder presenteras i Figur 8 där det blir tydligt att första och andra moden motsvarar böjning och torsion.

Beräkningsmodellen användes för att uppskatta egenfrekvenserna i första hand och kontrollera om mätresultaten ligger inom rimligt område. Placeringen av accelerometrar bestämdes även med hjälp av de beräknade egenmoderna så att både böj- och torsionsmoderna kunde mätas.

Analys

I ett fjäder-massa-system finns sambandet mellan systemets odämpade egenfrekvens och systemets styvhet (c) samt massan (m) genom $f \sim \sqrt{c/m}$. Detta samband kan i grova drag även användas på KL-elementet där både material- och systemegenskaper ingår i styvheten.

Uppfuktningen och uttorkningen påverkar KL-elementet egenskaper och därmed i andra hand även egenfrekvenserna. För den första egenfrekvensen är sambandet som ursprungligen förväntat: E -modulen i träet minskar när träet blir fuktigare så att även värdet på c minskar och därmed egenfrekvensen f . Därutöver ökar massan och en ökad massa ytterligare minskar egenfrekvensen. Vid uttorkningen finns omvänt samband.



Figur 6: Resultat av FEM-beräkningar för de första fyra egenmoder.

Andra egenfrekvensen visade tydliga skillnader som inte kan förklaras med ovanstående förklaringar. Ytterligare faktorer som påverkar beteendet i en träkonstruktion kan vara: befintliga sprickor, ny sprickbildning, förbandens styvhet och glapp i förband bredvid de ovanstående faktorerna (materialstyvhet, geometri, och massan). Tabell 1 ger en överblick av alla dessa faktorer, hur de styrs av fuktändringar samt vilken konsekvens dessa faktorer har på egenfrekvenserna.

- Faktor 1 är den övergripande faktor som dock inte direkt påverkar frekvenserna.
- Faktorer 2–4 förklaras ovanstående och påverkar första egenfrekvensen. Faktor 2 gäller alla styvhetsegenskaper, både i längs- och tvärriktning samt för skjuvning.

- Faktorer 5–6, sprickor, påverkas av fuktändringar men påverkas väldigt sällan egenskaper i materialets längdriktning (X_{LL}), sprickor tvärs L-riktningen uppstår inte vid sådana förhållanden. Sprickor har dock stor betydelse på kraftöverföring tvärs fiberriktning (X_{RR}, X_{TT}) samt för skjuvning (X_{LR}, X_{LT}, X_{RT}). Detta betyder att styvhet E_{LL} inte påverkas som ingår i första egenmod. I andra egenmoden däremot ingår skjuvstyvheten G_{ij} som har stor påverkan på andra egenfrekvensen.
- Faktor 5 behandlar befintliga sprickor som antingen öppnas helt vid uttorkning eller tappar förmågan för kraftöverföring (minskad friktion och vidhäftning). Vid uppfuktning och utvidgning av material pressas ytorna ihop däremot och kraftöverföringen genom friktion ökas.
- Faktor 6 uppstår endast vid uttorkning där befintliga sprickor kan fortsättas växa eller där nya sprickor uppstår. Vid kommande uppfuktning går detta över till faktor 5.
- Faktorer 7–8 är möjliga faktorer som påverkar på systemnivå. Kraftöverföringen i förband med spikar, skruvar eller dymlingar fungera till stor del genom anpressning och kontakt. Vid uttorkning minskas oftast anpressningstryck, tom kan det uppstå glapp, som minskar förbandets styvhet. Däremot höjs styvhet i trämaterial och bäddhållfastheten som bör öka förbandets styvhet. Samspelet är oklart, främst med tanke på förband med flera förbindare som samverkar.

Tabell 1: Faktorer med påverkan på egenfrekvensen vid uppfuktning och uttorkning.

#	Namn	Uppfuktning	Uttorkning	Frekvens	Kommentar
1	Fuktkvot	ökar	minskar	<i>komplicerat</i>	Ingen direkt effekt på frekvensen.
2	Styvhet	minskar	ökar	ner/upp	Materialets styvhet i EI
3	Geometri	utvidgning	krympning	upp/ner	Geometrisk styvhet i EI
4	Massa (vikt)	ökar	minskar	ner/upp	---
5	Sprickor (befintliga)	stängs	öppnas	upp/ner	Friktion mellan ytorna; påverkan på LL/RR samt skjuvning LR, LT, RL
6	Sprickor (nya)	---	(kan) bildas	---/ner	Friktion mellan ytorna; påverkan på LL/RR samt skjuvning LR, LT, RL
7	Förband (glapp)	tajtare	lösare	upp/ner	Inte del av denna studie.
8	Förband (f_{nk}, E, G)	minskar	ökar	ner/upp	Inte del av denna studie.

Slutsatser

Det som skiljer egenmoder 1 och 2 är främst lastöverföringen i materialet. Egenmod 1 är en böjmod, det är främst de yttre skikt som bär lasten längs med fiberriktningen. Styvheten i dessa är träets längsriktning, alltså E_{LL} i första hand. Denna styvhet påverkas av fukt enligt förväntat och berörs inte av sprickbildning, det är alltså faktorerna 2–4 som ingår. Uttorkningen sker snabbast i de yttre fibrerna som succesivt minskar i fuktkvoten i trämaterial och därmed ökar i styvhet. Det är

Egenmod 2 är en torsionsmode som däremot kännetecknas av hög andel kraftöverföring genom skjuvning. G_{xy} -moduln påverkas på samma sätt som E_{LL} -moduln av uttorkningen. Till skillnad från E_{LL} -moduln, påverkas kraftöverföringen dock också av sprickor i materialet.

Studien visar på skillnaden i olika belastningssituationer för trä. På strukturnivå för resultaten tillämpas och tolkas separat då det kan finnas olika konsekvenser. För element belastat i böjning (t.ex. bjälklagselement) i längsriktning bör beteendet vara detsamma som för egenmod 1. Den större frågan är hur element som utsätts för skjuvning påverkas, t.ex. i väggar bär vertikallaster men som även används som skjuvvägg för stabilisering mot horisontella laster.

Fortsättning

Studien kommer presenteras på konferensen *20th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM)* under juli 2023 i Porto, Portugal. Bidraget är del av ett minisymposium *Wood Mechanics and Timber Engineering* som hålls av Michael Schweigler, Michael Dorn och Thomas Bader från Linnéuniversitetet tillsammans med Carmen Sandhaas från Karlsruhe Institute of Technology, Tyskland, med 23 bidrag sammanlagt.

Diskussion om ändringar är materialegenskaper över tid samt hur dessa ändringar berör en byggnads prestanda pågår. Studien av Larsson et al. (2022b) visar på just dessa. För konstruktörer är det av ytterst vikt att kunna förutse hur byggnader beter sig över lång tid så att bärformågan kan säkerställas över hela byggnadens livslängd. Det finns pågående diskussion om vilken skjuvstyvhet som KL-element kan beräknas med, främst skjuvstyvheten i planet som utnyttjas för att stabilisera byggnaden. Här pågår studier på LNU, exempelvis av Larsson et al. (2023), men även internationellt (t.ex. av Kurent et al. (2023)). Studien kan i fortsättningen bidra att förstå hur byggnader beter sig, hur de kan modelleras samt hur utvecklingen av materialens egenskaper förändras över tid.

Separat måste det undersökas om detta beteende har påverkan på andra typer av laster. I försöken har KL-elementet utsatts endast för låg mekanisk belastning. I brottgränstillståndet är det dock betydligt högre lastnivåer som verkar på en byggnad, vissa faktorer kan ha väsentligt avvikande beteende, exempelvis sprickbildning.

Fortsättning eller uppföljning av studien planeras därför i flera delar:

- För det första kommer uppställningen i klimatkammaren fortsätter att stå kvar under våren/sommaren 2023. Ytterligare en sänkning av relativa fukthalten planeras för att se om samma effekt återkommer (igen).
- För det andra kommer systemeffekten att studeras i en ny laborativ studie. En mindre "byggnad" bestående av väggar och bjälklag i KL-trä kommer byggas upp i klimatkammaren och klimatet varieras. Variationen ska återspegla säsongsvariationen över 2–3 år. Denna studie planeras vara del av Carl Larssons doktorsprojekt och planeras att genomföras under 2024.

- Dessutom planeras ett detaljerat projekt som knyter ihop institutionens forskningsområden "tillståndsovervakning" med "byggfysik/fukttransport". Där ska denna effekt beskrivas i detalj på både material- och systemnivå. Konsekvenserna förväntas vara olika för olika typer av belastning, dvs. låg mekanisk last som i vibrationer och hög mekanisk last som i bruks- och brottgränstillstånd. Flera seniora forskare samt yngre forskare och även doktorander ska då samarbeta. Projektansökan för ett 3-årigt projekt ska lämnas in under våren 24.
- Under tiden elementet fanns i klimatkammaren har det även genomförts mätningar med hjälp av en Leica laserskanner. Laserskannern skapar ett punktmoln där det kan genomföras mätningar av längder mellan olika punkter. Den insamlade data ska användas för att upptäcka sprickor samt om sprickvidden.

Literatur

- Bergman, R., Z. Cai, C. G. Carll, C. A. Clausen, M. A. Dietenberger, R. H. Falk, C. R. Frihart, S. V. Glass, C. G. Hunt, R. E. Ibach, D. E. Kretschmann, D. R. Rammer, R. J. Ross, N. Stark, J. P. Wacker, X. Wang, A. C. Wiedenhoeft, M. C. Wiemann, and S. L. Zelinka. 2010. Wood handbook – Wood as an engineering material. (R. J. Ross, Ed.). . Forest Products Laboratory.
- Dorn, M., O. Abdeljaber, and J. Klaeson. 2019. Structural Health Monitoring of House Charlie. . Department of Building Technology, Linnaeus University.
- Gülzow, A., K. Richter, and R. Steiger. 2011. Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. *European Journal of Wood and Wood Products* 69:193–197.
- Kurent, B., W. K. Ao, A. Pavic, F. Pérez, and B. Brank. 2023. Modal testing and finite element model updating of full-scale hybrid timber-concrete building. *Engineering Structures* 289:116250.
- Larsson, C., O. Abdeljaber, T. K. Bader, and M. Dorn. 2022a. Modal Analysis and Finite Element Model Updating of a Timber-concrete Hybrid Building. 6th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 7-9 September 2022, Prague : Linnaeus University, Department of Building Technology.
- Larsson, C., O. Abdeljaber, Å. Bolmsvik, and M. Dorn. 2022b. Long-term analysis of the environmental effects on the global dynamic properties of a hybrid timber-concrete building. *Engineering Structures* 268.
- Larsson, C., O. Abdeljaber, and M. Dorn. 2023. Dynamic evaluation of a nine-storey timber-concrete hybrid building during construction. *Engineering Structures* 289:116344.

SMART HOUSING SMÅLAND

– INNOVATIONSARENA FÖR LIVSMILJÖER I GLAS OCH TRÄ

Genomförandeorganisationerna RISE, Linnéuniversitet, Jönköping University och Träcentrum i Nässjö i Smålandsregionen. I samverkan ingår förutom finansierarna representanter från näringslivet genom OBOS, Tengbom, CBBT- Centrum för byggande och boende med trä, TMF – Trä och möbelföretagen, Sveriges Träbyggnadskansli, Glasbranschföreningen, Glasforskningsföreningen Glafo och dessutom de tre lärens Länsstyrelser. Utöver detta sker samverkan med andra universitet, innovationsplattformar och samverkanskluster både nationellt och internationellt.

Finansieras av:

VINNOVA



Koordineras av:

RISE

SMART HOUSING SMÅLAND

Vejdes plats 3
352 52 VÄXJÖ
TEL 010-516 50 00
E-MAIL INFO@SMARTHOUSING.NU
SMARTHOUSING.NU