

Flervåningsbyggnader i trä, del II

Design och konstruktion av bjälklag, väggar och anslutningar

I tidigare artiklar i Bygg & teknik har vissa delprojekt inom primärt de två första områdena (1) kompletta byggnadssystem och (2) horisontalstabilisering presenterats. I denna artikel redovisas några ytterligare delprojekt primärt inom områdena (3) samverkanskonstruktioner för bjälklag och väggar och (4) konstruktiv design av komponenter och förband, men också en komplettering avseende området kompletta byggsystem.

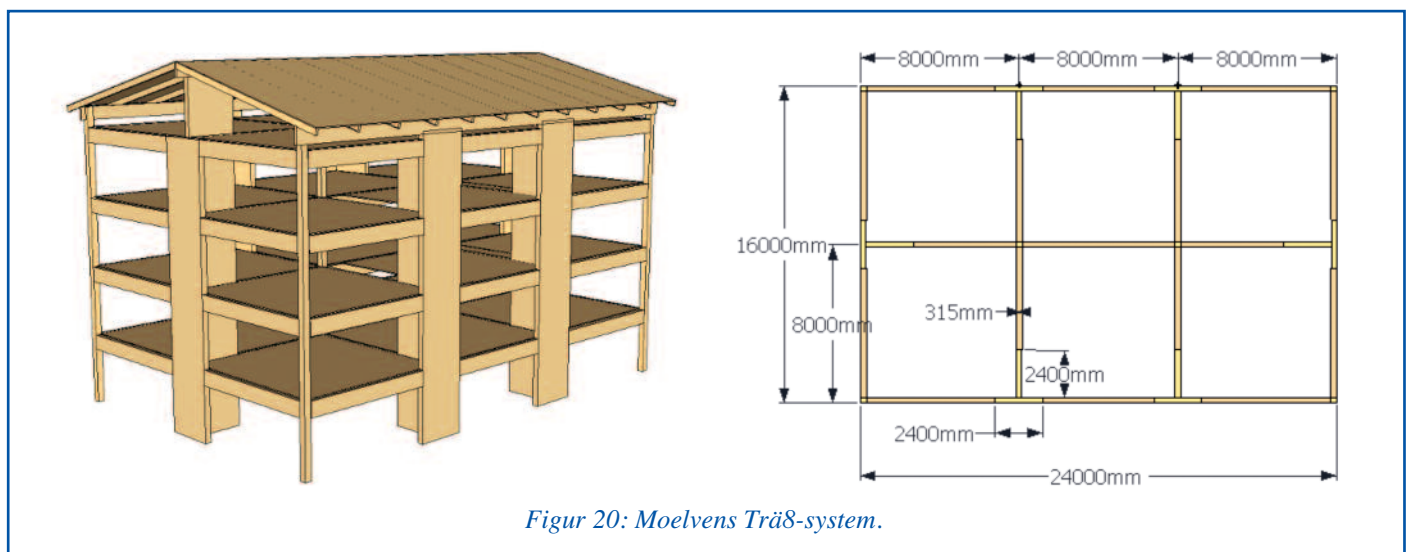
ges en kort resumé över Moelvans Trä8-byggsystem.

Moelvans Trä8-byggsystem. Byggsystem och byggmetoder för flervåningsbyggnader i trä har genomgått en snabb utveckling. Idag används inom träbyggnadstekniken ofta prefabricerade enheter, som är konkurrenskraftiga avseende kostnader, miljö och montage. Moelvans Trä8-system är ett av flera system som baserar sig på prefabricering.

För kontorsbyggnader är öppna ytor ett krav. Därvid blir de flesta byggsystem baserade på bärande väggar ineffektiva. Moelvans Trä8-byggsystem bygger på ett

modulnät med 8 m rutor (*figur 20*). I varje hörn i nätet står en pelare som är kontinuerlig från grund till tak. Balkar hängs in till pelarna och på balkarna vilar bjälklag med alternerande lastbärningsriktning. Stabiliseringen i byggsystemet hanteras via ett särskilt stabiliseringselement, en styv skiva med ett limträskelett klätt med LVL-skivor (*figur 21*). Stabiliseringselementet löper från grund till tak och förankras via inlimmade skruvar mot en ståldetalj som för lasten ned till grunden (*figur 22*).

Stabiliseringselementet kan utformas antingen som en plan skiva, men kan ock-



Figur 20: Moelvans Trä8-system.

Kompletta byggsystem

Som nämnts tidigare har primärt tre byggsystem studerats: (a) Masonites flexibla byggsystem, ett skiv-regelbärande system med en speciell komponent kallad Plyboard; (b) Moelvans Trä8-byggsystem, ett balk-pelarsystem med en speciell stabiliserande lådbalk; och (c) Martinsons massiva byggsystem, ett skivbärande system med CLT (korslimmad träpanel). Exempel på studier med Masonites och Martinsons byggsystem gavs i föregående artiklar i Bygg & teknik. Här

Artikelförfattare är **Ulf Arne Girhammar**, professor, och **Helena Johnsson**, docent, Luleå tekniska universitet, **Bo Källsner**, **Erik Serrano** och **Anders Olsson**, professorer, SP Trä och Linnéuniversitetet, **Per Johan Gustafsson** och **Roberto Crocetti**, professorer, Lunds universitet, **Magnus Larsson** och **Alex Kaiser**, arkitekter, Ordinary Ltd, samt **Per-Anders Daerga**, tekn lic, Umeå universitet.



Figur 21: Moelvans stabiliserande tvärställda väggelement. T-formen gör stabiliseringselementet stabilt i sig självt och därför behövs mindre stagning vid monteringen. Stabiliseringselementen utnyttjas som stagning för pelare och balkar som monteras mot dessa.



Figur 22: Förankring av de stabiliserande väggelementen genom infästning till grunden med hjälp av stålbeslag och inlimmade skruvar.

så prefabriceras i förmonterade L- och T-konfigurationer och kan då stabilisera byggnaden i två riktningar. Byggsystemet Trä8 har använts på byggnader två till fem våningar höga och marknadsförs av Moelven Töreboda Limträ AB. För en närmare beskrivning av hittills utförda studier hänvisas till avhandlingen av *Gabriela Tlustokowicz*, "Stabilising system for multi-storey beam and post timber buildings", Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2011.

Samverkanskonstruktioner – bjälklag och väggar

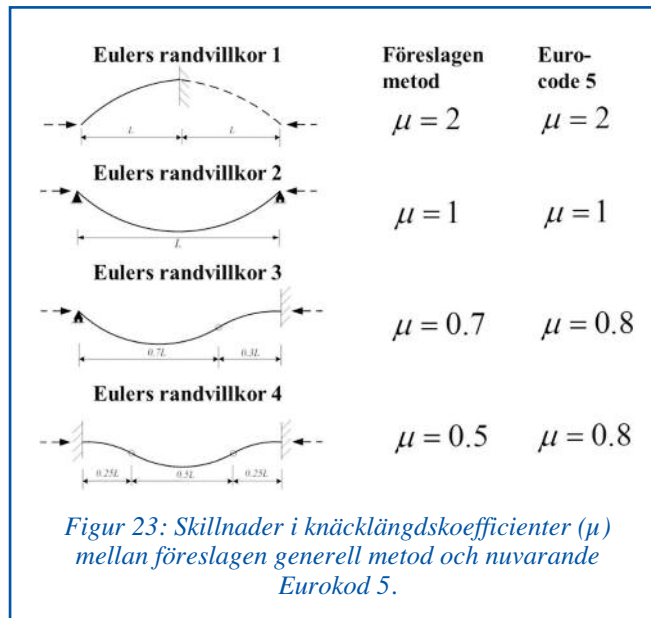
Sammansatta konstruktioner kännetecknas av en hög grad av förädling av träråvaran och utveckling av träprodukter som effektivt utnyttjar de olika ingående materialens eller delkomponenternas egenskaper och skapar resurssnåla komponenter och system. Dessa typer av konstruktioner förekommer vanligen i flervåningsbyggnader, hallbyggnader och brobyggnader.

Sammansatta konstruktioner byggs upp av två eller fler delkomponenter av samma eller olika material. Delmaterialen är vanligen förbundna med varandra med hjälp av limförband eller mekaniska förbindningar, så kallade skjuvförbindningar. Vid mekaniska förbindningar blir verkningssättet hos dessa konstruktioner relativt komplext på grund av att skjuvförbindningarna vanligen medger endast delvis samverkan mellan de olika delkomponenterna. För att analysera dem krävs därför att man beaktar denna inbördes förskjutning mellan deelementen.

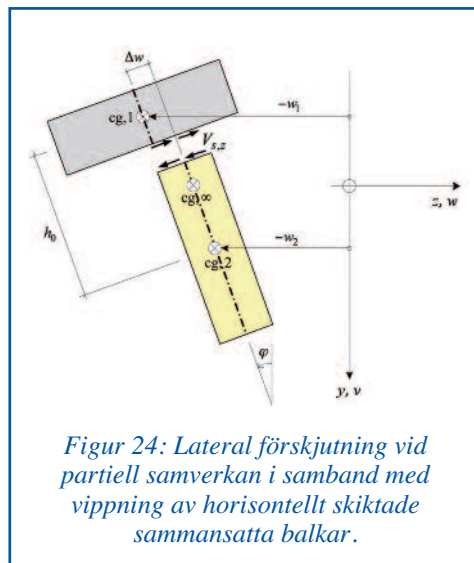
Avsikten med projektet är att utveckla optimala och effektiva sammansatta komponenter och system och att genom exakta analysmetoder utvärdera noggrannheten och tillämpbarheten hos existerande dimensioneringsmetoder samt att utveckla nya förenklade metoder för praktiskt dimensioneringsarbete. Avsikten är också att analysera grundläggande verkningssätt hos sammansatta komponenter med partiell samverkan vid olika kombinerade belastningssituationer.

Ett primärt exempel på sammansatt träkonstruktion är så kallade samverkansbjälklag i trä. Dessa är en av de mest kritiska konstruktionsdelarna i ett träbyggsystem. Vid dimensionering och utformning av träbjälklag ställs krav på (1) hållfasthet och stabilitet, (2) styvhet och svikt samt (3) vibrationer och akustik. Dessa krav blir speciellt stora i samband med långa spännvidder, vilket är aktuellt i många moderna byggnader där man vill ha stora öppna ytor.

Böjning och knäckning vid partiell samverkan. Approximativa metoder för

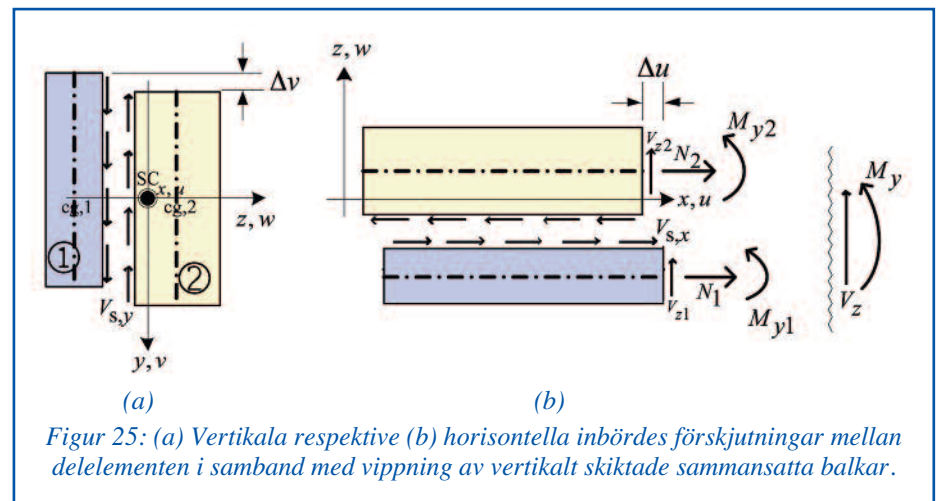


Figur 23: Skillnader i knäcklängskoefficienter (μ) mellan föreslagen generell metod och nuvarande Eurokod 5.



Figur 24: Lateral förskjutning vid partiell samverkan i samband med vippning av horisontellt skiktade sammansatta balkar.

partiellt samverkande balkar och pelare har utvecklats. Den för samverkansbalkar har också presenterats för att kunna ingå i Eurokod 5 och skulle därvid kunna ersätta eller komplettera den nuvarande så kallade γ -metoden. γ -metoden bygger på vissa specifika förutsättningar, medan denna föreslagna metod är generell till sin karaktär och gäller för olika belastnings- och upplagssituationer. Exempel visar att



Figur 25: (a) Vertikala respektive (b) horisontella inbördes förskjutningar mellan deelementen i samband med vippning av vertikalt skiktade sammansatta balkar.

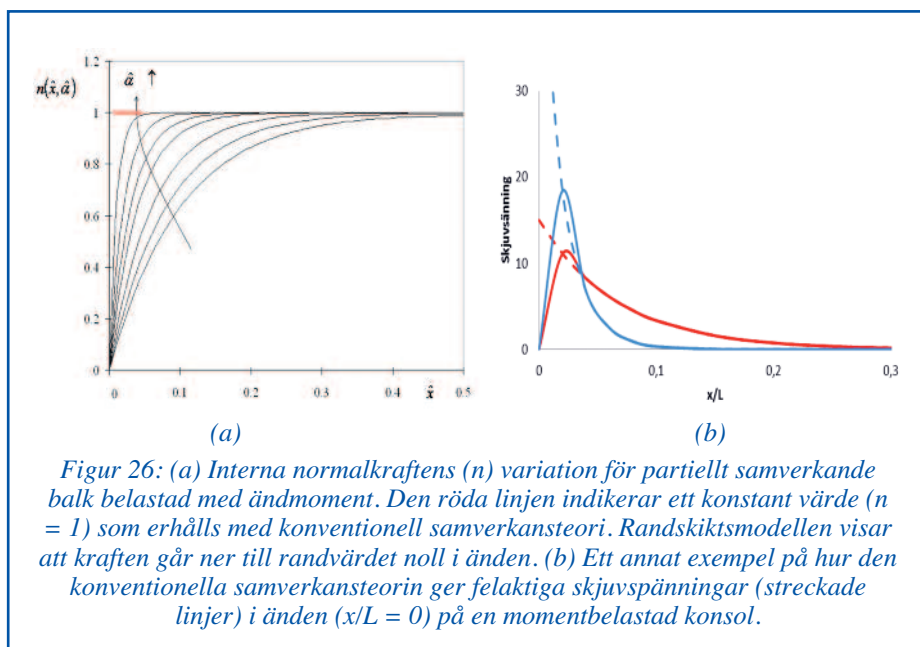
γ -metoden enligt Eurokod 5 kan i vissa fall ge så mycket som 30 procents avvikelse, jämför figur 23 där exempel på skillnader i val av knäcklängskoefficienter framgår. När den föreslagna generella metoden tillämpas för samma villkor som γ -metoden är giltig för ger den exakt samma resultat.

Vippning vid partiell samverkan. Vippning av sammansatta balkar vid partiell samverkan med horisontell eller vertikal skiktning har hittills varit olöst, speciellt avseende horisontell skiktning. Problemen är nu i en grundläggande form lösta med hjälp av variationskalkyl. För fallet horisontell skiktning görs en åtskillnad mellan inbördes förskjutningar mellan

deelementen i transversella planet (vilka beaktas i vanliga samverkansteorin) respektive i laterala planet, jämför figur 24. Några ingenjörsmässiga resultat avseende det kritiska vippningsmomentet presenteras för partiellt samverkande balkar utsatta för rent böjmoment. För mer komplicerade situationer tillämpas Rayleigh-Ritzmetoden för approximativa lösningar.

Fallet vertikal skiktning kräver ett förfinat kinematiskt antagande för att ge sunda kritiska vippningsmoment. Vippningsmomentet påverkas kraftigt av att inkludera både horisontella och vertikala inbördes förskjutningar mellan deelementen i dessa vertikalt skiktade samverkansbalkar, jämför figur 25. Även för detta problem ges några ingenjörsmässiga formler för vippningsmomentet.

Speciella problem vid partiell samverkan – randlaster och randvillkor. Den endimensionella samverkansteorin för sammansatta element med inbördes förskjutbara delar ger goda resultat i de flesta fall. För vissa randlaster och/eller vissa randvillkor ger den dock inte korrekta resultat. I vissa andra belastningssituationer måste man behandla lasterna eller uppdelning av lasterna på specifika sätt. Såda-



Figur 26: (a) Interna normalkraftens (n) variation för partiellt samverkande balk belastad med ändmoment. Den röda linjen indikerar ett konstant värde ($n = 1$) som erhålls med konventionell samverkansteori. Randskiktmodellen visar att kraften går ner till randvärdet noll i änden. (b) Ett annat exempel på hur den konventionella samverkansteorin ger felaktiga skjuvspänningar (streckade linjer) i änden ($x/L = 0$) på en momentbelastad konsol.

na situationer är till exempel när elementet utsätts för ändmoment eller för axiallast beroende på var de angräper.

En analytisk säregenhet eller paradox uppträder alltså då sammansatta balkar med partiell samverkan belastas med randmoment. För en fullt samverkande sammansatt balk belastad med sådant ändmoment ger samverkansmodellen att det existerar normalkrafter i de individuella delelementen i änden. Från en formell matematisk synvinkel är detta en skenbar motsägelse avseende randvillkoren, i vilka normalkrafterna i änden vanligen ansätts till noll. I ett av projekten utreds denna matematiska paradox och förklaras med begreppet randskikt genom att utnyttja en asymptotisk metod med ett inre skikt giltigt nära randen och yttre giltigt ett stycke från randen, jämför figur 26 där den röda linjen illustrerar lösningen som erhålls med konventionell samverkansteori. Det inre skiktets tjocklek är omvänt proportionellt mot den dimensionslösa förskjutningsmodulsparametern.

Vibrationer i träbjälklag. Ett ökat byggande av hus med trästomme kombinerat med längre spännvidder hos bjälklagen ökar risken för störande vibrationer av persontrafik. Det dynamiska dimensioneringskriteriet i de nuvarande dimensioneringsanvisningarna baseras tillsammans med impulshastighetsresponsen på bjälklagets första resonansfrekvens och dämpning. Mer kunskap om dämpningen i träbjälklag behövs. Inverkan av golvytans form och upplagens utformning på vibrationsegenskaperna behöver också klargöras.

I flervåningshus av trä är det viktigt att reducera flanktransmissionen av ljud mellan olika lägenheter. I vissa byggsystem görs detta genom att installera ett vibrationsdämpande elastiskt skikt,

Sylodyn) eller Sylomer), mellan upplagen och bjälklagselementen. Detta skikt förbättrar också bjälklagets vibrationsegenskaper genom att öka dämpningen i konstruktionen.

Vibrationsegenskaper hos ett träbjälklag i laboratorium och under olika faser av byggskedet. I några studier har förändringarna i egenfrekvens, dämpning och modform hos ett bjälklagselement undersökts efter hand som det byggs in i ett av husen ingående i kvarteret Limnologen i Växjö. Bjälklagselementet som tillverkades av Martinssons (figur 14) modalprovades först i laboratorium under simulering av frisvävande och fritt upplagda randvillkor och därefter i fält under olika faser av byggskedet. Bjälklagselementets placering i den aktuella byggnaden framgår av figur 27. Analysen begränsades till de första fem moderna såväl i laboratorie- som i fältmätningarna.

Sammanfattningsvis gäller att de största förändringarna i egenfrekvenser uppträder då bjälklagselementet kopplas ihop med anslutande bjälklagselement och när mellanväggar byggs i det studerade rummet. Störst påverkan är det på de sväng-

ningsmoder där bjälklaget blir mycket tvångsstyrt i rörelsen. Dämpningen är beroende av upplagens dämpningsegenskaper, särskilt egenskaperna hos de vibrationsdämpande elastiska skikten mellan upplagen och bjälklagselementen. Dämpningen påverkas även av att bjälklaget kopplas ihop med byggnaden i övrigt och därigenom samverkar med denna. Dämpningens medelvärde uppmättes till storleksordningen fem procent, vilket är betydligt mer än värdet en procent som anges i den svenska träkonstruktionsnormen.

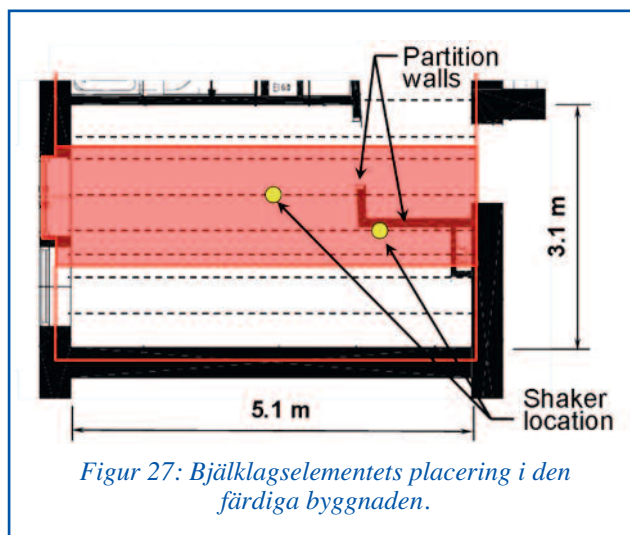
I en kompletterande studie provades samma bjälklagselement fritt upplagt i laboratorium varvid de båda stödens eftergivlighet varierades genom att använda vibrationsdämpande elastiska mellanskikt med olika egenskaper. En jämförelse av dessa resultat med resultaten från de tidigare refererade fältprovningarna visar att dämpningen i den färdiga byggnaden är approximativt tre gånger högre än dämpningen hos motsvarande bjälklagselement i laboratoriet. Impulshastighetsresponsen, som vid dimensionering av träbjälklag används för att rangordna upplevd olägenhet, reduceras då upplagen förses med vibrationsdämpande elastiska skikt.

I en parallell undersökning studerades inverkan av olika upplagsförhållanden på accelerationerna i olika riktningar av randzonen mellan det aktuella bjälklaget och den underliggande kantbalken. Sju olika upplagsförhållanden testades: fem provkroppar med olika elastomerer mellan bjälklag och kantbalk, en provkropp med bjälklagselementet skruvat till kantbalken och slutligen en provkropp med bjälklagselementet fritt upplagt på kantbalken. Provningarna följdes upp med finita elementanalyser. Resultaten visar att mer sofistikerade modeller behöver användas för att simulera det dynamiska verkningssättet hos konstruktionen. Modformerna i det lågfrekventa området kan emellertid modelleras förhållandevis bra. Försöken visar att elastomerernas dämpningsegenskaper har ett stort inflytande på konstruktionens verkningssätt.

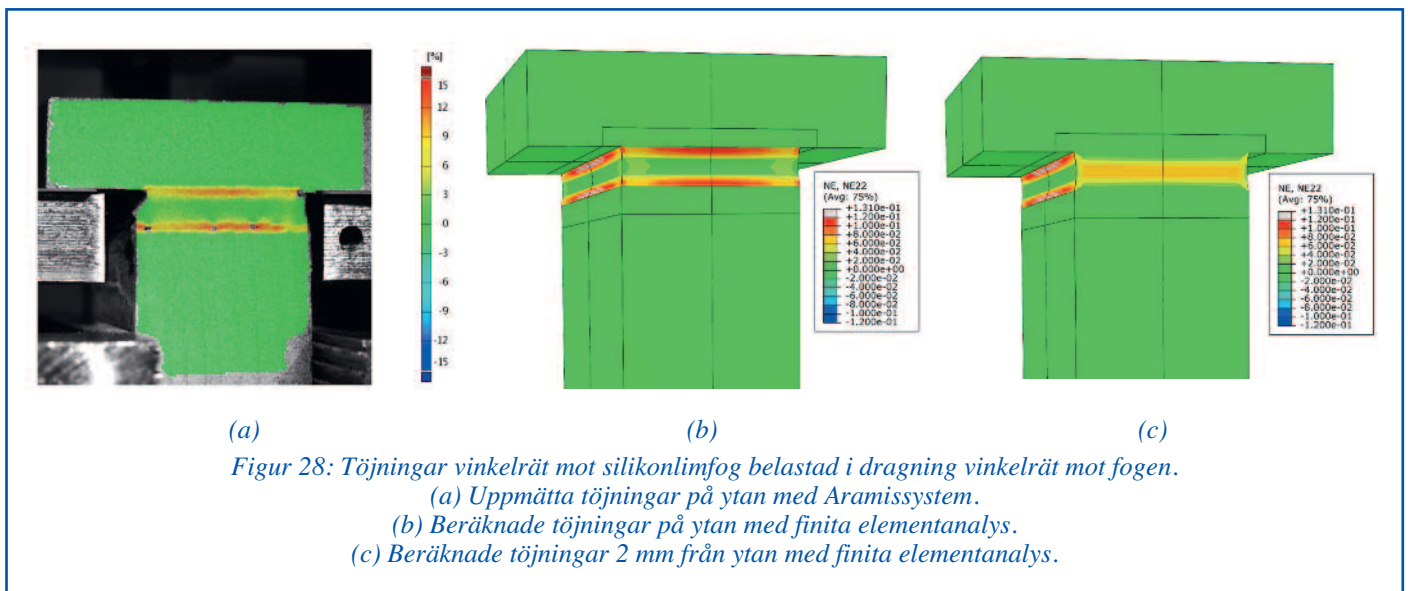
Samverkan trä och glas.

Syftet med detta projekt är att öka kunskapen om att använda sammansatta komponenter av trä och glas till bärande konstruktionsdelar och att tillverka ett par prototyper för att demonstrera praktiska tillämpningar för byggsektorn. Den grundläggande idén är att samverka mellan trä och glas ska uppnås med limförband.

En viktig faktor vid limning av glas är limfogens förmåga att fördela lasten till det anslutande konstruktionsmaterialet. Därför valdes limmer med ett brett spann på mekaniska egenskaper, från mycket eftergivliga limmer till limmer med betydande styv-



Figur 27: Bjälklagselementets placering i den färdiga byggnaden.



(a) Uppmätta töjningar på ytan med Aramissystem.
 (b) Beräknade töjningar på ytan med finita elementanalys.
 (c) Beräknade töjningar 2 mm från ytan med finita elementanalys.

het. Limmerna som slutligen valdes var ett silikonlim, ett akrylatlim och ett polyuretanlim.

För att bestämma limfogarnas mekaniska egenskaper tillverkades små provkroppar som belastades i dragning vinkelrät mot limfogen och i skjuvning parallellt med den samma. I samband härmed utfördes kontaktfria optiska mätningar av töjningsfälten på provkropparnas yta med ett Aramissystem. I anslutning till provningarna genomfördes även finita elementanalyser av töjningarna i limfogarna. Ett exempel på sådana resultat visas i figur 28 för en provkropp med en limfog av silikon som belastas i dragning vinkelrät mot limfogen. För silikonlimmet används en hyperelastisk inte sammantryckbar materialmodell. Av figuren framgår att töjningarna i riktning vinkelrät mot fogen erhållna med Aramissystemet överensstämmer väl med de beräknade töjningarna på provkroppens yta. Finita elementanalysen visar samtidigt att fördelningen av töjningarna en bit in i limfogen skiljer sig avsevärt från töjningarna på ytan. Detta sammanhänger bland annat med att tvärkontraktionen förutsatts vara

lika med 0,5 i den valda materialmodellen.

Akrylatlimmet visade sig vara starkast och silikonlimmet var det minst starka. Polyuretanlimmet visade sig ha en mycket stor variation i hållfasthet. Av de undersökta limmerna var det endast akrylatlimmet som bedömdes värt att studera vidare.

I projektet har tre olika prototyper av limmade trä-glas komponenter provats: I-balkar, pelare med lådprofil och väggskivor. I-balkarna var uppbyggda av liv av glas och flänsar av LVL enligt figur 29. Från att de första sprickorna uppträder i glaset på den dragna sidan av I-balkarna kan lasten ökas med cirka 140 procent innan maximal kapacitet uppnås.

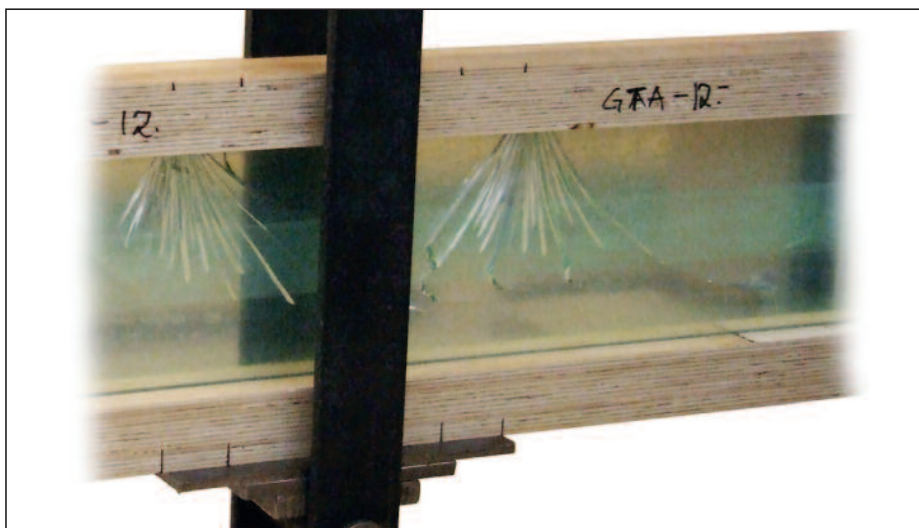
Konstruktiv design av komponenter och förband

Trä är ett material som i förhållande till sin egenvikt har mycket god drag- och tryckhållfasthet i träets fiberriktning och därmed också mycket god böjmomentkapacitet. Träets svaga punkter handlar istället om låg drag- och tryckhållfasthet vinkelrätt fibrerna och i viss mån även

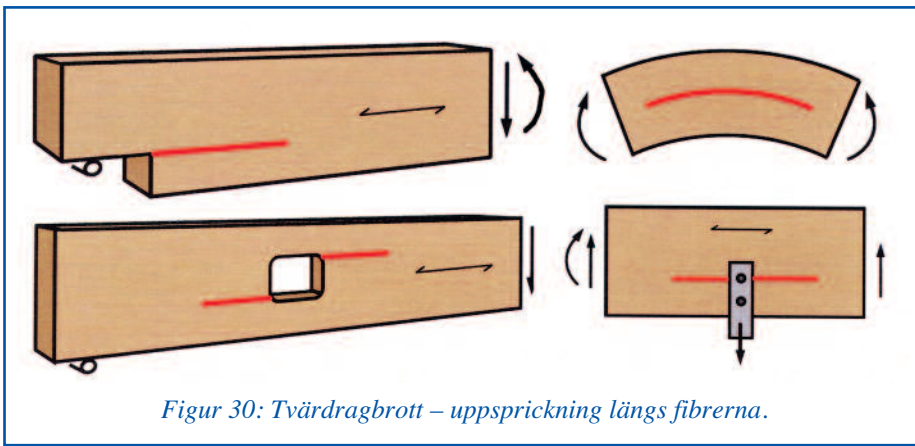
om låg skjuvhållfasthet. Dragstyrkan vinkelrätt fibrerna är i storleksordningen bara några få procent av styrkan i fiberriktningen. Vid utformning av träkonstruktioner beaktas detta och design som innebär drag- eller tryckspänning vinkelrätt fibrerna undviks i görligaste mån. Det är emellertid svårt att alltid undvika ogynnsamma spänningstillstånd och de kan då bli avgörande och därför viktiga att kunna beräkna på bra sätt.

Bra hållfasthetsberäkning för dessa ogynnsamma spänningstillstånd är emellertid inte enkel. Konventionell linjärelastisk beräkning där maximalt värde på en spänningsskomponent eller en jämförelsespänning jämförs med ett motsvarande hållfasthetsvärde för trämaterialen ger ofta missvisande och ibland helt orimliga resultat. Detta gäller även om spänningsberäkningen gjorts med god precision, till exempel med tredimensionella finita elementberäkningar. Den viktigaste orsaken till detta bedöms vara de ogynnsamma spänningstillstånden ofta uppkommer koncentrerat till ett litet område med höga spänningar. I en sådan belastningssituation är materialets hållfasthet av liten betydelse för bärförmågan, istället är det materialets brottseghet som är avgörande och denna beaktas inte vid konventionella linjärelastiska beräkningar. En annan svårighet är det så kallade storleksberoendet som betyder att materialets hållfasthet skenbart avtar med ökande storleken på den belastade komponenten. För situationer med dragspänning vinkelrätt fibrerna är storleksberoendet kraftigt.

De ogynnsamma spänningstillstånden med normalspänning vinkelrätt fibrerna och eventuell skjuvspänning är svåra att undvika vid förband och upplag och i konstruktionselement med krökning eller vid särskilda detaljer som hål eller urtagning, jämför figur 30 på sidan 72. Ogynnsamma spänningstillstånd uppkommer också om träet utsätts för uttorkning och därmed krympning som leder till egen-spänningar. Dessa orsakas av fuktgradi-



Figur 29: Provning av I-balksprototyp. Sprickor har just börjat uppträda i glaset på den dragna övre sidan av balken.



Figur 30: Tvärdragbrott – uppsprickning längs fibrerna.

enter i materialet under uttorkningsförloppet och av att trä krymper olika mycket i olika riktningar.

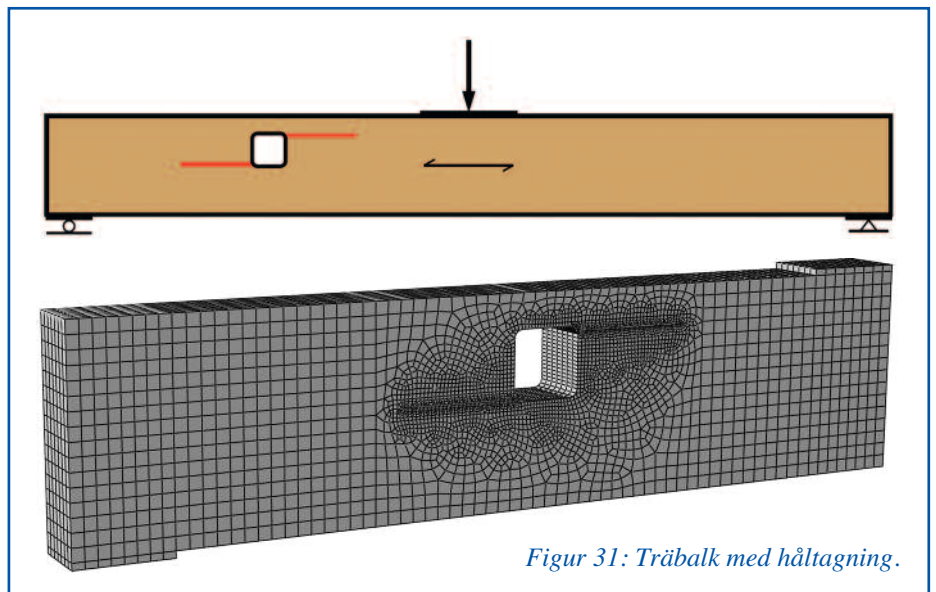
Brottmekaniska modeller tillämpade på komponenter – speciellt vid håltagning. I aktuellt projekt har dels generella brottberäkningsmodeller utvecklats för situationer med brott orsakade av dragspänningar vinkelrätt fibrerna och/eller skjuvspänningar, dels har några specifika exempel på konstruktionselement och förband studerats närmare genom beräkningar och/eller provningar. Två generella brottberäkningsmodeller har utvecklats: en baserad på sannolikhetsteori och generaliserad linjärelastisk brottmekanik, och en baserad på en typ av olinjär brottmekanik, där en brottszons gradvisa tillväxt vid ökande yttre belastning beaktas. För båda modellerna används finita elementmetoden som verktyg för att genomföra de numeriska beräkningarna.

Först nämnda modell kan beskrivas som en kombination av Weibulls hållfasthetsteori och en generaliserad typ av linjärelastisk brottmekanik. Weibulls hållfasthetsteori beaktar att verkliga material är heterogena med varierande materialgenskaper. Linjärelastisk brottmekanik handlar om spricktillväxt och hur bärförmågan kan predikteras om det finns något område med i princip oändligt stora spänningar, som till exempel invid spetsen av en skarp spricka. Den konventionella linjära brottmekaniken kan generaliseras så att inte bara brott utgående från en spricka kan predikteras. I aktuellt fall görs generaliseringen genom att i brottkriteriet utgå från medelspänningen i ett område med viss storlek istället för spänningen i en punkt. Områdets storlek bestäms av materialets brottseghet. På detta sätt kan risken för brott i olika områden beräknas och risken för brott i konstruktionselementet som helhet summeras eller integreras i enlighet med Weibulls teori. Som utgångspunkt för brottriskberäkningen används det för ett ortotrop linjärelastisk material i plan spänning beräknade spänningsfältet. Detta gör att datorberäkningarna kan göras ganska snabbt. Begränsningarna är främst att bara tvådimensionella strukturer kan hanteras och att den gradvisa tillväxten av ett brott inte kan beaktas.

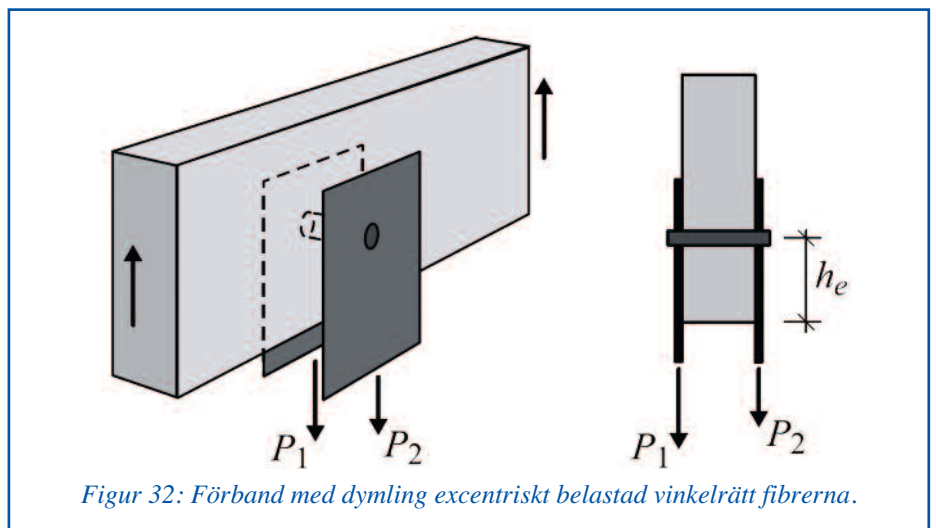
Den andra nämnda modellen bygger på tredimensionell plasticitetsteori för beskrivning av materialets brottbeteende vid gradvis ökande deformation. När spänningen i materialet i det mest ansträngda området minskar vid ökande deformation uppkommer töjningsinstabilitet och därmed lokalisering av brottszonen till ett smalt område. Materialets beteende i brottszonen kan bestämmas genom provning av små provkroppar och beskrivas teoretiskt inom ramen för olinjär brottmekanik, i detta fall definierad med hjälp av plasticitetsteori. Genom att modellen är

tredimensionell kan årsringsmönster och skillnad i egenskaper mellan radiell, tangentiell och longitudinell riktning beaktas. Eftersom olinjärt samband mellan spänning och deformation och även tredimensionell geometri beaktas kan de numeriska beräkningarna bli ganska tunga även om en kraftfull dator är tillgänglig.

Båda modellerna har använts för studium av brott vid en håltagning i en balk av limträ eller massivträ, se figur 31. För verifiering har sådana balkar också provats experimentellt. Provningarna har bland annat innefattat excentrisk placering av hålet i balkens höjddled. Undersökningen har också innefattat sammanställning och jämförelse med och mellan tidigare normsamband för beräkning av balk med håltagning. De aktuella två beräkningsmodellerna för simulering av brott och även provningarna har påvisat en betydande storlekseffekt i bärförmåga; med hålstorlek i proportion mot balkstorlek är fördubbling av balkhöjden inte tillräcklig för att fördubbla tvärkraftskapaciteten, typiskt krävs istället mer än trefaldig ökning av balkhöjden. Genom möjligheten till tredimensionell simulering av brottförlopp kunde även inverkan av balkens bredd och orientering av årsringarna stu-



Figur 31: Träbalk med håltagning.



Figur 32: Förband med dymling excentrisk belastad vinkelrätt fibrerna.

deras. Typisk för limträ är att initiering och propagering av en spricka normalt inte sker likformigt över balkens hela bredd utan startar istället i balkens inre, vid ett djup motsvarande halva balkbredden.

Brottmekanisk modell tillämpad på förband – speciellt med dymlingar. Möjligheten till tredimensionell simulering av brottförlopp användes också för studera hur bärförmågan hos en dymling påverkas av excentrisk belastning, det vill säga belastning med olika stora laster P_1 och P_2 , se figur 32.

Det visade sig som väntat att excentricitet påverkar bärförmågan negativt och bland annat också att inverkan av excentriciteten är olika för en dymling i en LVL-skiva jämfört med en träbalk. Med lastfallet P_1 är lika med $5P_2$ som exempel erhöles för skivan 43 procent reduktion av bärförmågan på grund av excentriciteten och för balken bara 23 procent reduktion. Dessa resultat för skiva och balk erhöles för lika och ganska liten tvärsnittsbredd, 40 mm.

Kombinerade änd- och kantavstånd. I Eurokod 5 finns endast regler för separata ändavstånd respektive kantavstånd. I ett delprojekt har regler för kombinerade änd- och kantavstånd för en bult vid belastning vinkelrätt mot fibrerna utarbetats med hjälp av kvasilinjär brottmekanik. Dessa principer har också presenterats för att kunna ingå i Eurokod 5.

De materialdata som behövs som ingångsvärden för dessa regler är tvärdraghållfastheten, brottnerning avseende mode



Figur 33: Tryckbrott vinkelrätt fibrerna vid balk-pelarslutning.

I. En generaliserad modell presenteras som är giltig för både korta och långa änd- och kantavstånd och den inbegriper som ett specialfall den linjära elastiska brottmekaniska modellen, som för närvarande används för att beräkna spjälkningskapaciteten i europeiska och kanadensiska trädimensioneringsnormer.

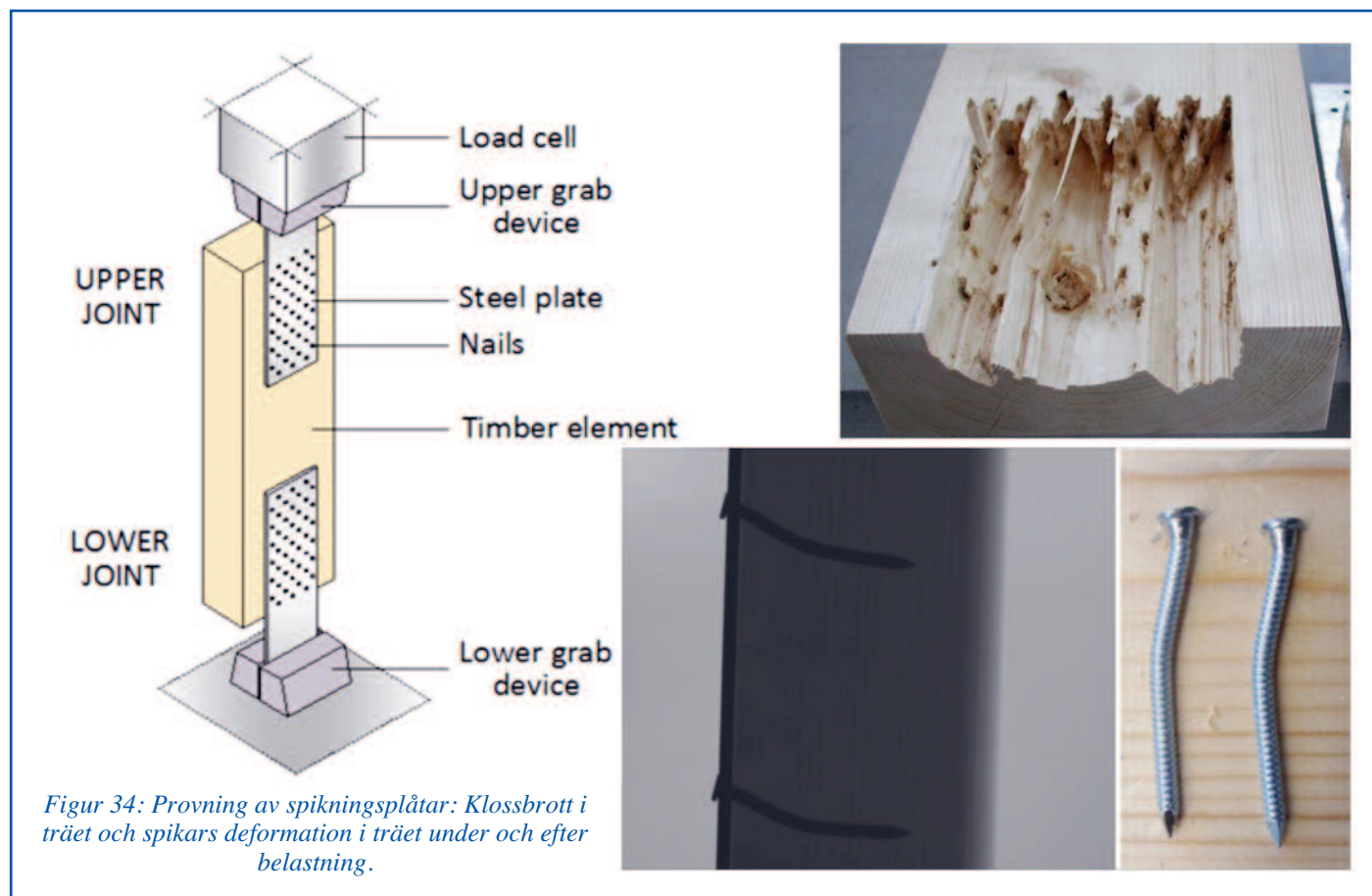
Tryck vinkelrätt fibrerna. Det ogynnsamma belastningsfallet med tryckspänning vinkelrätt fibrerna uppkommer i flervåningsbyggande bland annat vid balkupplag och i syllar i anslutning till regler eller balkar, jämför figur 33.

Mot bakgrund av förslag till ändring av normregler som skulle innebära svårigheter vid utformning av upplag, särskilt balkpelarslutningar, gjordes provningar och beräkningar avseende tryckspänning vinkelrätt fibrerna. Både provningarna och beräkningarna gällde materialegenskaper, deformationer vid balkupplag vid olika

upplagslängd och åtgärder för förstärkning av träet vinkelrätt fibrerna. Studerade förstärkningsåtgärder innefattade inlimmade trästavar, inlimmade stålstänger och spikningsplåtförband. Särskilt inlimmade stavar och stänger visade sig öka styvhet och styrka markant och ge möjlighet att halvera erforderlig upplagsarea. Beräkningar av deformationer vid upplag gjordes med finita elementmetoden och en typ av beräkningsmodell kallad "foam-modell" för simulering av materialbeteendet hos eftergivliga material med betydande andel luftporer.

Skjuvhållfasthet. I anslutning till diskussioner om förändring av normer har även träets skjuvhållfasthet och träbalkars tvärkraftkapacitet provats. Provningar utfördes på olika sätt och med olika utformningar av provade balkar. Att döma av provningsresultaten kan en sänkning av det tidigare normvärdet, 4,0 MPa, för karakteristiskt skjuvhållfasthet för den vanligaste typen av limträ vara befogad. Med utgångspunkt från nämnda provningar och om man väljer att inte införa i normen en föreslagen reduktionsfaktor (sprickfaktor) för sidospäckor i balkar kan ett lämpligt nytt värde bedömas vara 3 MPa, vilket är ett mer generöst värde än andra förslag som framförts under de senaste åren.

Spikningsplåtförband. Det mest omfattande experimentella arbetet som utförts i projektet avser brottbeteende och bärförmåga för spikningsplåtar belastade i träets fiberriktning, se figur 34. Provningens programmet innefattade två spik-



Figur 34: Provning av spikningsplåtar: Klossbrott i träet och spikars deformation i träet under och efter belastning.

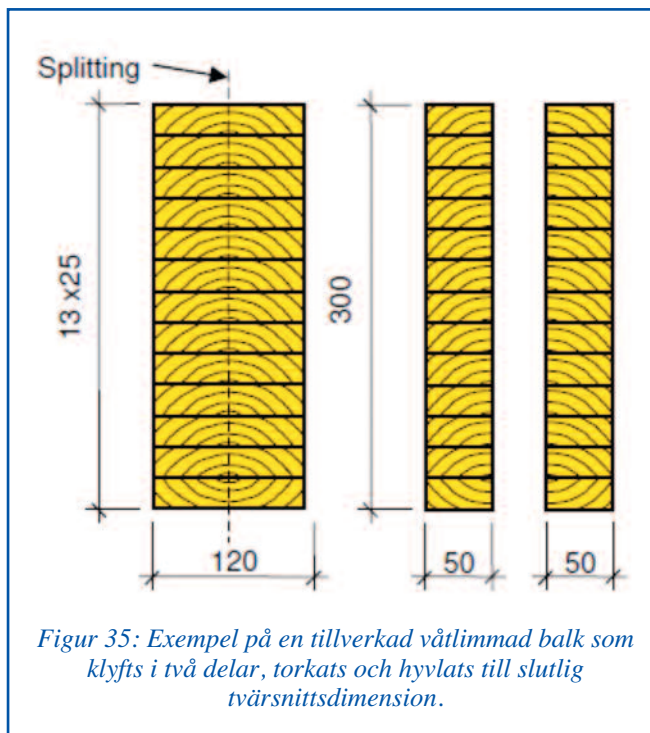
längder, två plåttjocklekar och sexton spikmönster, varje provserie med fem till tolv nominellt lika provningar och med två plåtar belastade vid varje provning.

Sju spikmönster var utformade för att ge segt brott genom böjning av spikarna, sex var utformade för sprött så kallat klossbrott i träet och övriga förband låg på gränsen mellan dessa två brottyper. Brottlast, deformationer och brottförlopp noterades vid provningarna. Med hjälp av röntgenapparaturler fotografierades även hur spikarna deformerades och böjdes i träet under belastningsförloppet. I flera avseenden erhöles skillnader mellan de experimentella observationerna och vad som är etablerat i bland annat normer och genom Johansens välkända teori för segt brott genom plasticering av spikar, det vill säga utveckling av flytleder, inverkan av spiklängd, plåttjocklek och spik- och kantavstånd. Ett maximalt antal spikar per yta för undvikande av sprött brott identifierades. Provningsresultaten bildar underlag för ett pågående teoarbeta.

Våtlimmade balkar av sidobräder. Det uppskattas att cirka 30 procent av produktionen vid ett typiskt sydsvenskt sågverk som sågar gran utgörs av sidobräder. Dessa sidobräder används inte till bärande konstruktioner. Trots att kostnaden för att producera och hantera sidobräderna är hög, är deras pris på marknaden typiskt bara hälften av vad som gäller för konstruktionsvirke.

Det är väl känt att de mekaniska egenskaperna hos granvirke varierar med hänsyn till avståndet från mörgen i stammen. Följaktligen kan elasticitetsmodulen i virkets längdriktning variera så att den är dubbelt så hög i stammens yttre delar jämfört med vid mörgen. Detta innebär att sidobräder normalt sett har bättre styvhetsegenskaper än virke som är uttaget från stammens centrala delar, något som gynnar användningen av sidobräder.

Den bakomliggande idén till projektet är att finna nya användningsområden för sidobräder genom att använda dem som lameller i limmade balkprodukter. Eftersom sidobräderna är tunna med en typisk tjocklek på 20 till 25 mm och en bredd på 70 till 150 mm är det angeläget att reducera materialspletten orsakat av hyvling. Detta kan uppnås genom att limma sidobräderna på flatsidan i vått tillstånd, det vill säga innan de torkats, då bräderna fortfarande antar den ursprungliga framsågade tvärsnittformen. Detta ställer särskilda krav på limningsprocessen. Limmet som använts finns på marknaden och är ett enkomponents polyuretanlim som härdar i kontakt med fukt. Efter att limmet härdat klyvs balkarna vanligtvis i längsled för att



Figur 35: Exempel på en tillverkad våtlimmad balk som klyfts i två delar, torkats och hyvlats till slutlig tvärsnittsdimension.

torkningstiden ska bli densamma som för sågat konstruktionsvirke med normala tvärsnittsdimensioner. I figur 35 visas ett exempel på en tillverkad våtlimmad balk som klyfts i två delar, torkats och hyvlats till slutlig tvärsnittsdimension.

Arbetet som redovisas här har omfattat fördjupade studier av denna typ av våtlimmad balk med särskild tonvikt lagd på sortering av sidobräderna, limfogarnas mekaniska egenskaper samt fingerskarvning av lamellerna. Möjligheten att använda skanning för att mäta fibervinklar och för att förutsäga lamellernas och balkarnas styvhet och styrka har också undersökts, liksom förutsättningarna för CE-märkning av den tänkta produkten. Marknadsaspekter och de ekonomiska förutsättningarna för produktion har också studerats.

Möjligheten att sortera våta sidobräder genom axiell dynamisk excitering undersöktes med positiva resultat: Det är möjligt att med en sådan metod, med god precision, förutsäga lamellernas styvhet. Baserat på dessa resultat användes dynamisk excitering i kombination med kviststorleken som kriterier för att sortera sidobräder i två olika klasser, för användning som inner- respektive ytterlameller i balkar. Balkarna har provats vad gäller bland annat styvhet och styrka, och det visar sig att balkarna har egenskaper motsvarande dem för limträ i höga hållfasthetsklasser eller fanérträ (*laminated veneer lumber*, LVL).

Vad gäller balkarnas form och formstabilitet är det möjligen tvärsnittets kupning som kan kräva ytterligare åtgärder. Om balkarna torkas till lägre fuktkvot (tolv till fjorton procent) före hyvling bör dessa problem kunna undvikas.

Både skjuvprovning och delamineringsprovning av limfogar tagna från bal-

karna har genomförts. Dessa provningar visar att limfogarna uppfyller kraven för limträ avsett att användas i klimatklass 1 och 2. De strängare kraven som ställs för konstruktioner i klimatklass 3 har däremot inte uppnåtts fullt ut. Vidare har små limfogsprovkroppar provats för bestämning av hållfasthet och brottenergi i dragning vinkelrät fogen (Mod I). Provningarna visar bland annat att de våtlimmade fogarna i trä med hög densitet har samma hållfasthet och brottenergi som de torrlimmade fogarna. För fogar i trä med låg densitet, och/eller för fogar med låg limmängd, var hållfastheten lägre för de våtlimmade än för de torrlimmade fogarna, medan brottenergin var ungefär densamma.

Hållfasthetsprovning av både våt- och torrlimmade fingerskarvar har också genomförts.

Provningarna visade att fingerskarvar tillverkade av trä med hög densitet hade avsevärt högre hållfasthet än de som tillverkats av trä med låg densitet. Vidare visade undersökningarna att det inte fanns någon signifikant skillnad i styrka mellan våt- och torrlimmade skarvar vad gäller deras hållfasthet. Genom röntgenundersökningar (mikrotomografi) undersöktes limmets penetration i träet för både våt- och torrlimmade fogar i fingerskarvar. Undersökningen visar att penetrationen är mycket större för de våtlimmade fogarna.

Genom de algoritmer som utvecklats i projektet framgår att det är möjligt att, med tillfredsställande noggrannhet, mäta fibervinkeln och dess fördelning över brädernas ytor. Dessutom kan man få relativt detaljerad information om kviststorlekar, kvistläge och de fiberstörningar som förekommer i närheten av kvistarna. Genom skanning av ändträytor visade det sig också möjligt att bestämma tvärsnittskarakteristik som årsringsorientering och årsringsbredd. Denna information användes sedan för att förutsäga styvheten i sidobräderna och i de lamellerade balkarna. Den precision som uppnåddes är i paritet med vad som idag går att få med välrenommerade kommersiella sorteringsmaskiner.

Övrigt

Mekaniska egenskaper hos konstruktionsvirke. Det har genomförts ett antal projekt som syftar till att kartlägga konstruktionsvirkes mekaniska egenskaper för att komma fram till ett effektivare utnyttjande av materialet trä i bärande konstruktioner. I ett av projekten har ett Aramissystem för beröringsfri deformationsmätning använts för att studera töjningsfälten runt kvistar på ytan av dragbelastade provkroppar av granvirke. Det visar sig att de

Erkännande

Ett stort tack riktas till EU Struktur-fonder – Regionala fonden, Regionförbundet i Västerbotten och Länsstyrelsen i Västerbottens län för deras finansiella stöd.

uppmätta töjningsfälten stämmer förvånansvärt väl överens med motsvarande töjningar beräknade med förhållandevis enkla finita elementmodeller. Eftersom kvistarna i virket är avgörande för virkets hållfasthet öppnar detta för noggrannare metoder att hållfasthetssortera konstruktionsvirke genom att till exempel tillämpa brottmekaniska metoder.

Hållfasthets-sortering av konstruktionsvirke enligt de europeiska reglerna förutsätter att virket uppfyller vissa krav när det gäller böjhållfasthet, elasticitetsmodul och densitet. Vid maskinell hållfasthets-sortering utgår man ofta från att böjhållfastheten är korrelerad mot virkesbitens elasticitetsmodul med avseende på böjning eller tryck/dragning. För att öka precisionen används ibland även andra materialparametrar vid skattningen av böjhållfastheten.

I ett nyligen genomfört projekt har en metod för sortering av konstruktionsvirke utvecklats som baseras på en ny grundprincip. Metoden bygger på att den lokala

fiberorienteringen på virkesbitens flat- och kantsidor bestäms genom att använda högupplöst laserskanning. För att få data om trämaterialalets grundläggande materialegenskaper mäts även den första resonansfrekvensen i axialled och densiteten, vilka i kombination med fiberriktningarna kan användas för att beräkna elasticitetsmodulens medelvärde i fiberriktningen. Med denna information kan en detaljerad bild av hur böjstyvheten varierar längs med virkesbiten beräknas och en skattning av hållfastheten utgående från lokala styvhetsdata genomföras. Studien visar att virkets hållfasthet kan bestämmas med hög förklaringsgrad och att det även finns potential till att ytterligare förbättringar. För närvarande pågår ett projekt som syftar till att implementera metoden industriellt.

I ett par andra projekt har undersökts hur man, genom att dynamiskt excitera granvirke i böjning och använda informationen från flera av böjmoderna, bättre kan bestämma virkets mekaniska egenskaper. Följaktligen visas i en av studierna att resonansfrekvenserna svarande mot högre böjmoder kan användas till att definiera en ny indikerande parameter "inhomogenitetsmättet" som representerar ett mått på avvikelsen mellan uppmätta och beräknade egenfrekvenser (under antagande av homogent virke). Resultaten visar att man förbättrar precisionen i

sorteringen genom att använda "inhomogenitetsmättet" tillsammans med elasticitetsmodulen, svarande mot första böjmoden och virkets densitet. Samma tendens i resultaten noteras om man istället för första böjmoden använder första axialmoden. ■

Referenser

[1]. Girhammar, U. A. et al. *Flervåningsbyggnader i trä – Design och konstruktion av bjälklag, väggar och anslutningar*, Bygg & teknik, Nr 2, s. 62, 2013.

[2]. Girhammar, U. A. et al. *Flervåningsbyggnader i trä – Design och konstruktion av bjälklag, väggar och anslutningar* (fortsättning), Bygg & teknik, Nr 3, s. 63, 2013.