

Jan Oscarsson, Institutionen för byggt teknik, Linnéuniversitetet
Anders Olsson, Institutionen för byggt teknik, Linnéuniversitetet
Johan Blixt, Vida AB / Vida Building



Limmad balk av sidobrädor

Förstudie kring tekniska egenskaper och
marknadsförutsättningar

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning.....	2
Sammanfattning.....	3
Bakgrund	3
Tidigare undersökningar	4
Syfte, mål och omfattning	6
Material.....	7
Utrustning	9
Mätresultat.....	9
Prediktering av böjstyvhets hos en simulerad balk.....	11
Böjstyvhetsens medelvärde vid simulerad balkproduktion	15
Jämförelse av egenskaper: Kerto- och SB-balk	19
Marknadssegment för sidbrädesbalkar.....	21
Investeringsbehov och marginalkostnader för produktion av balkar av sidbräder.....	23
Viktigaste resultat	25
Fortsättning.....	25
Referenser	26
Innovationsmiljöns finansiärer och koordinator.....	27

Sammanfattning

Konstruktionsvirke produceras idag ofta med en största dimension på 245 mm. Vid industriell trähustillverkning används därför balkar av fanérträ, s.k. LVL-balkar, som ersättning för konstruktionsvirke i bjälklags- och takkonstruktioner där större dimensioner krävs för att klara styvhetskrav avseende t.ex. svikt, deformationer och vibrationer. Eftersom LVL-balkar är dyra i inköp finns dock ett intresse från trähusindustrin att finna billigare produkter men med styvhetsgenskaper motsvarande LVL-balkar.

Tidigare forskning vid universitet i Växjö har visat att det är möjligt att nå minst samma styvhetsgenskaper som i LVL-balkar av typen Kerto genom att använda hållfasthets sorterade sidobränder som lameller i limmade balkar. De tidigare undersökningarna, som genomfördes under åren 2009–2012, baserades dock på lameller från endast ett enskilt sågverk belaget i Långasjö i östra Småland där virkeskvaliteten i allmänhet bedöms vara förhållandevis hög.

Syftet med detta projekt har varit att undersöka möjligheterna att med utgångspunkt från sidobränder med en sågfallande kvalitet som är representativ för ett större geografiskt område i södra Sverige tillverka limmade balkar som är konkurrenskraftiga såväl egenskapsmässigt som ekonomiskt.

Det virkesmaterial som användes bestod av ca 3000 sidobränder av sågfallande kvalitet från Vidas sågverk i Hästveda, Vislanda och Bruza. Brädornas styvhetsgenskaper bestämdes genom hållfasthets sortering och därefter simulerades balktillverkning där sidobränder med högre styvhet användes som lameller i yttre delar av balkar, medan sidobränder med lägre styvhet användes som lameller i balkarnas inre. Styvheten för de simulerade balkarna kunde sedan beräknas genom att kombinera balkteori med provningsresultat från de fysiska balkar som tillverkades och böjprovades i en av de undersökningar som genomfördes åren 2009–2012.

Resultaten visade att drygt 50 % av de sidobränder som förväntas falla vid sågverksproduktion i södra Sverige kan användas för tillverkning av limmade balkar med styvhetsgenskaper som motsvarar LVL-balkar av typen Kerto. Resterande bränder, med lägre styvhet, kan antingen limmas till balkar med styvhet motsvarande konstruktionsvirke av klass C24, eller säljas som läkt, råspont eller emballage. En investerings- och kostnads kalkyl visade att det är möjligt att få lönsamhet i en tillverkning med det beskrivna produktsortimentet.

Bakgrund

En utmaning inom dagens träbyggande är att klara högt ställda krav på ljudisolering, svikt och vibrationer i flerfamiljshus av trä. För detta krävs bl.a. styva bjälklag som kan klara en betydande spännvidd, utan att bjälklagets tjocklek blir oacceptabelt stor. För att uppnå en optimal utformning måste de material som används i balkar och skivor i träbjälklag ha en hög styvhet.

Konstruktionsvirke sorteras i olika hållfasthetsklasser där kravet på materialstyvhet för de virkesstycken som sorteras till en viss klass uttrycks som ett medelvärde för en lokalt bestämd elasticitetsmodul (E-modul) i böjning. Att E-modulen är "lokal" innebär att den avses återspegla den lägsta böjstyvhet som förekommer längs ett virkesstycke. Kraven på medelvärden för lokal E-modul anges i den europeiska standarden EN 338 (2016). Exempelvis skall konstruktionsvirke av gran (*Picea abies*) som sorteras till klassen C24 ha en elasticitetsmodul vars medelvärde (E_{mean}) vid lokal böjning utförd enligt provningsstandard EN 408 (2010) uppgår till 11 GPa (gigapascal) vid en fuktkvot på 12 %. Konstruktionsvirke produceras dock vanligtvis inte med större höjd än 245 mm, vilket innebär att användningen begränsas. Ett alternativ för att kunna använda balkar med större höjd och större styvhet är s.k. LVL-balkar som består av ca 3 mm tjocka sammanlimmade träfanér där limfogarna mellan fanérskikten är orienterade vertikalt i balkarnas tvärsnitt. LVL-balkar anses vara de styvaste träbyggprodukterna på marknaden. De kan jämföras med tjock plywood, med skillnaden att fiberriktningen i alla fanér i en LVL-balk är parallella med den limmade balkens längdriktning. En vanlig typ av LVL-balkar är de som säljs under produktnamnet *Kerto* och som tillverkas av antingen gran eller furu. Materialstyvhet för sådana balkar uttrycks enligt LVL-standard EN 14374 (2004) som ett medelvärde för lokal elasticitetsmodul bestämd vid böjprovning enligt EN 408 (2010). Enligt det certifikat (VTT 2016) som gäller för tillverkning av *Kerto*-balkar skall denna lokala elasticitetsmodul uppnå ett medelvärde på 13.8 GPa vid högkantsböjning av balkar som har en fuktkvot på 12 %. *Kerto*-balkar kan produceras i önskat format, men priset per kubikmeter för denna typ av produkter är väsentligt högre än för konstruktionsvirke.

Det styvaste virket i en stock av gran är det som finns på störst avstånd från stockens märg. Av det sågade virket är det därför de s.k. sidobräderna, dvs. de bräder som sågas från de yttersta delarna av en granstock, som är styvast. Trots detta utnyttjas sådana bräder sällan för tillverkning av lastbärande produkter där den höga styvheten kan utnyttjas. Detta beror framför allt på att sidobräder har klena dimensioner. Denna typ av virke används därför oftast i produkter med lågt värde, som t.ex. i råspont eller lastpallar, men genom att limma samman sidobräder, flatsida mot flatsida, skulle det vara möjligt att producera billiga balkar med hög styvhet vilket är vad som efterfrågas på marknaden.

Tidigare undersökningar

Vid universitetet i Växjö genomfördes under åren 2006–2013 ett antal forskningsprojekt i syfte att undersöka möjligheterna att använda sidobräder av sydsvensk gran i konstruktiva tillämpningar. Projekten genomfördes i samarbete med dåvarande SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP) och Södra. Projekten handlade bl.a. om att välja ut och limma ihop råa, dvs. otorkade, sidobräder till balkar, därefter utföra torkning av balkarna och sedan bedöma balkarnas tekniska egenskaper med avseende på bl.a. hållfasthet, styvhet och formstabilitet. Genom att använda sidobräder som lameller i limmade balkar skulle den konstruktiva potentialen i denna typ av bräder kunna utnyttjas. Valet av

våtlimning syftade till att åstadkomma en mera kostnadseffektiv hantering av sidobräder jämfört med motsvarande process i torrt tillstånd.

Hållfasthetsortering av virke i vått tillstånd

En förutsättning för att kunna tillverka balkar i vått tillstånd är att lamellerna kan hållfasthetsorteras före torkning. I ett projekt som genomfördes vid universitetet i Växjö år 2009–2010 (Oscarsson *et al.* 2011) undersöktes om axiell dynamisk excitering, s.k. "knackning", kunde användas på otorkade sidobräder för att förutsäga brädernas styvhet och hållfasthet efter torkning. Resultatet av undersökningen visade att hållfasthetsortering av vått virke är lika tillförlitlig som motsvarande sortering efter torkning. Dessa slutsatser bekräftade vad som tidigare framkommit i andra liknande undersökningar (t.ex. Unterwieser och Schickhofer 2007).

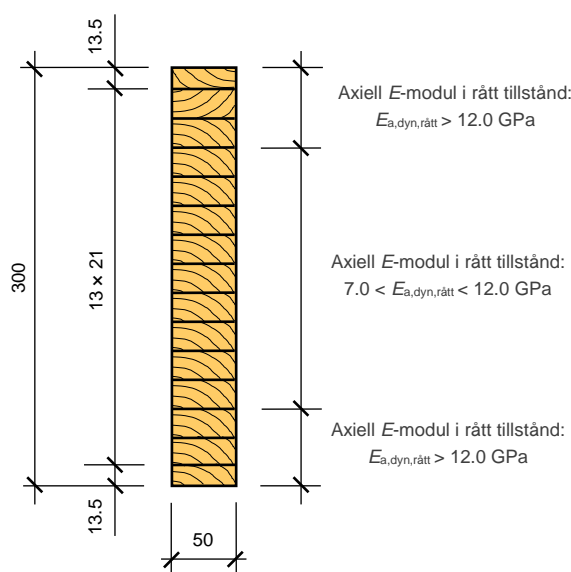
Det är väl känt att styvheten för virke av barrträd minskar med ökande fuktkvot (t.ex. Dinwoodie 2000, s. 115). Detta samband gäller i princip upp till fibermåtnadspunkten, dvs. upp till en fuktkvot på ca 30 %. För fukthinnehåll över denna nivå är styvhetsvariationen inte lika tydlig. I undersökningen av Oscarsson *et al.* (2011) konstaterades att den axiella dynamiska elasticitetsmodulen, E_a , för de undersökta sidobräderna i genomsnitt ökade med 20 % när fuktkvoten minskade från fibermåtnad till ca 13 % fuktkvot. Motsvarande förändring av styvheten uppgick enligt Unterwieser och Schickhofer (2007) till 15 %, men då torkades virket till 12 % fuktkvot, vilket motsvarar jämviktsfuktkvoten för gran. Dessutom omfattade den senare undersökningen såväl sidobräder som centrumutbyte, vilket kan ha påverkat resultatet eftersom fuktkvot i rått tillstånd oftast är väsentligt högre i splinten än i mårgen.

Egenskaper hos våtlimmade balkar med lameller av sidobräder

Resultaten från Oscarsson *et al.* (2011) utnyttjades i ett senare projekt som genomfördes år 2010–2012 och som handlade om att limma balkar av otorkade lameller av sidobräder (Serrano *et al.* 2011; Serrano *et al.* 2014). De bräder som användes som råvara vid balklimningen levererades från Södras sågverk i Långasjö och efter klyvning i rått tillstånd erhöles drygt 430 balklameller med en genomsnittlig dimension på 21.5×58.3×5400 mm. Därefter användes "knackning" för att sortera de kluvna och otorkade lamellerna i två olika styvhetsklasser. I den styvare klassen sorterades bräder med en styvhet, dvs. axiell dynamisk E -modul, som i rått tillstånd var större än 12.0 GPa och i den lägre klassen sorterades bräder med rå styvhet mellan 7.0–12.0 GPa. I samband med sorteringen gavs varje lamell ett unikt identifikationsnummer och den axiella E -modulen i rått tillstånd dokumenterades för varje enskild lamell. Därefter limmades balkar där tre+tre bräder som sorterats i den styvare klassen placerades i de yttre och mest belastade delarna av balkarnas tvärsnitt medan nio bräder i den lägre styvhetsklassen placerades i balkarnas inre delar. Lamellernas placering i balkarna framgår av Figur 1. Totalt limmades 21 balkar och för varje balk dokumenterades identifikationsnummer och position för var och en av de i balken ingående 15 lamellerna, vilket innebar att styvhetsvariationen över varje balktvärsnitt var känd. Efter limningen torkades balkarna till en målfuktkvot på 16–18 %, vilket innebar att lamellernas tjocklek minskade till ca 21 mm. Därefter hyvlades balkarna till tvärsnittsdimensionen 50×300 mm, vilket innebar att de yttersta lamellernas tjocklek minskades till i genomsnitt 13.5 mm. Efter konditionering i standardklimat under fem månader

bestämdes sedan balkarnas lokala böjstyvhet genom standardiserad böjprovning enligt EN 408 (2010). Vid tidpunkten för denna provning hade balkarna en medelfuktkvot på 15.5 % (Serrano *et al.* 2011). Vid utvärderingen av resultaten från böjprovningarna exkluderades två balkar eftersom stora horisontella sprickor hade uppstått i balkarnas ändar i samband med torkningen. Resultaten från provningarna av de återstående 19 balkarna visade att balkarnas medelstyvhet uttryckt som en lokal E -modul vid böjning uppgick till 14.17 GPa vid den uppmätta medelfuktkvoten 15.5 % (Serrano *et al.* 2011), dvs. en högre styvhet än vad som uppnås med Kerto-balkar.

En begränsning i den beskrivna undersökningen var att virket levererades från ett enskilt sågverk, vilket innebär att den egenskapsvariation som finns mellan virke från olika regioner i södra Sverige inte återspeglades i resultaten.



Figur 1. Balkutformning i tidigare undersökning av styvhet och hållfasthet i balkar av sidobränder limmade i rått tillstånd (Serrano *et al.* 2011; Serrano *et al.* 2014). Angivna mått avser mått efter torkning av balkarna till målfuktkvot 16–18 % och därpå följande hyvling.

Syfte, mål och omfattning

Syftet med projektet *Limmad balk av sidobränder* är att undersöka möjligheten att sortera balklameller av sidobränder på ett sätt som innebär att lamellernas användning kan optimeras och att det därigenom skall vara möjligt att få fram balkar med hög styvhet.

Målsättningen är att klargöra de viktigaste tekniska egenskaperna för balkar bestående av sammanlimmade sidobränder från ett större upptagningsområde i södra Sverige samt utreda de

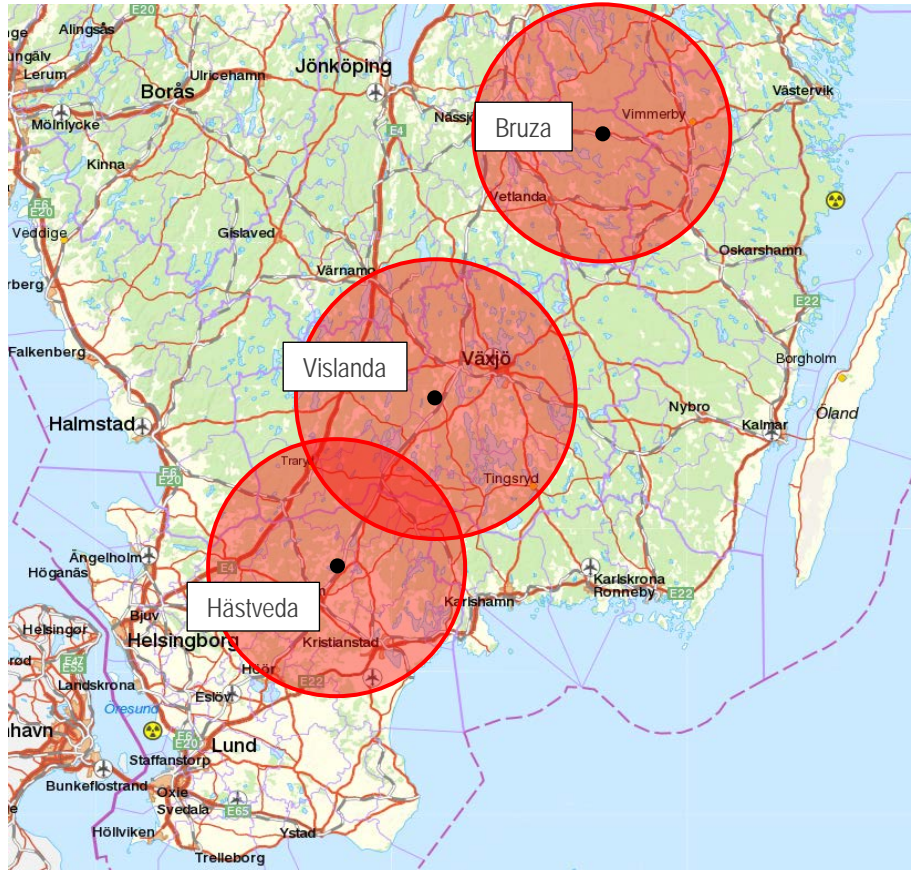
tekniska och ekonomiska förutsättningarna för att en sådan produkt skall kunna konkurrera med etablerade träbaserade produkter på marknaden.

Projektet går ut på att utreda a) hur hög böjstyvhet som kan uppnås i balkar av limmade sidobräder med utgångspunkt ifrån statistisk fördelning av elasticitetsmodulen E för sidobräder sågade från sydsvenskt timmer, b) vilka i övrigt viktiga tekniska egenskaper som t.ex. tryckhållfasthet vinkelrätt fibrerna som kan förväntas av denna typ av balkar, c) möjliga marknadssegment med hänsyn till balkarnas tekniska egenskaper, och d) förutsättningar för att kunna producera limmade sidobräddebalkar och sälja dem till ett konkurrenskraftigt pris inom identifierade marknadssegment.

Arbetet i projektet omfattar 1) att ta fram ett statistiskt underlag avseende styvheten i sidobräder med ursprung i södra Sverige genom att samla in bräder från ett antal olika sågverk i inom nämnda region och därefter mäta brädornas axiella dynamiska elasticitetsmodul, 2) analys av provningsdata samt simulering, beräkning och prediktering av styvhetsegenskaper i tänkta limmade balkar av sidobräder, 3) intervjuer med konstruktörer för att identifiera marknadssegment och begränsningar för användning av sidobräddebalkar, samt 4) ekonomiska kalkyler avseende investeringsbehov och marginalkostnader för produktion av balkar, i syfte att kunna bedöma vilket kubikmeterpris som skulle behöva tas ut för sidobräddebalkar beroende på försäljningsvolymen.

Material

För att åstadkomma ett statistiskt underlag avseende styvhet i sidobräder med ursprung från ett större område i södra Sverige insamlades närmare 3000 brädor av sågfallande kvalitet från Vida-koncernens sågverk i Bruza, Vislanda och Hästveda. Sågverkens geografiska läge och ungefärliga upptagningsområde för virke framgår av Figur 2. Virkesdimensioner och antal sidobräder som levererades från respektive sågverk redovisas i Tabell 1. Leveranserna var, med utgångspunkt ifrån dimension och geografiskt ursprung, uppdelade i åtta olika serier.



Figur 2. Sågverk, med tillhörande upptagningsområde för virke, från vilka sidobränder av sågfällande kvalitet levererades. Karta över södra Sverige hämtad från Lantmäteriet (2018).

Tabell 1. Ursprung, dimensioner och antal sidobränder som använts i det aktuella projektet.

Serie	Ursprung	Dimensioner [mm]	Antal
1	Bruza	26x128x3300	351
2	Bruza	26x78x3300	586
3	Hästveda	26x128x3310	358
4	Vislanda	24x100x3610	358
5	Vislanda	23x127x3920	240
6	Vislanda	24x126x3920	236
7	Hästveda	24x101x4520	481
8	Bruza	26x103x3020	383
			Σ 2993

Utrustning

Allt virke som användes i projektet levererades till sågverket i Hästveda. Där genomfördes såväl knackning av samtliga brädor som fuktkvotsmätning av i genomsnitt 6 % av brädorna i varje serie.

Knackningen utfördes med hjälp av en sorteringsmaskin av typen Precigrader från företaget Dynalyse, Göteborg, Sverige. Maskinen är monterad i justerverket i sågverket i Hästveda och består, utöver hård- och mjukvara, av tillhörande hammare, mikrofoner, våg och längdmätare. Sortering med en Precigrader innebär att axiella vibrationer i en bräda exciteras genom ett hammarslag i brädans ena ände. Vibrationerna ger upphov till ljudvågor som fångas med hjälp av mikrofonerna varefter resonansfrekvenser för axiella vibrationsmoder kan bestämmas. Tillsammans med uppmätta värden av brädans vikt och längd kan sedan densitet och axiell dynamisk elasticitetsmodul beräknas. Med hjälp av den sistnämnda parametern kan brädans hållfasthet därefter predikteras.

Fuktkvotsmätningarna genomfördes för att kunna bestämma en medelfuktkvot för var och en av de åtta virkesserierna. Fuktkvoten mättes med två olika fuktkvotsmätare; dels med en insticksmätare/resistansmätare av typen Delmhorst RDM-2S, dels med en kapacitansmätare av typen Wagner MMC 220.

Mätresultat

Vid knackningen i Hästveda var Precigrader-maskinen inställd för sortering av virke till klassen C24. Av Tabell 2 framgår att av totalt 2993 knackade brädor sorterades 2864 stycken, motsvarande 96 %, till nämnda klass, medan resterande 129 brädor, dvs. 4 %, klassades som vrak. Den senare klassning kan ha berott på låg virkeskvalitet, dvs. brädans beräknade axiella dynamiska elasticitetsmodul var lägre än vad som krävdes för att brädan skulle kunna sorteras till C24. Det finns dock ytterligare ett antal skäl till att en bräda kan klassas som vrak (Perstorper 2017):

- signalnivån från mikrofonerna kan vara för låg, vilket exempelvis kan bero på dålig ändkapning eller hörnträff av hammaren på flatböjd eller vriden bit,
- ingen uppmätt längd från längdmätare,
- svårtolkat frekvensspektrum, vilket kan bero på 1. inhomogenitet i form av t.ex. svårartat toppbrott, 2. annan defekt såsom grava ändsprickor, eller 3. misslyckat hammarslag i form av hörnträff på flatböjd eller vriden bit, eller
- uppenbart felaktig densitet, t.ex. två bitar på samma medbringare.

Att brädor kan klassas som vrak av andra skäl än dålig virkeskvalitet innebär att sådana brädorna inte nödvändigtvis behöver kasseras i en verklig produktion. I den fortsatta redovisningen har dock samtliga 129 brädor som klassades som vrak exkluderats.

SMART HOUSING SMÅLAND

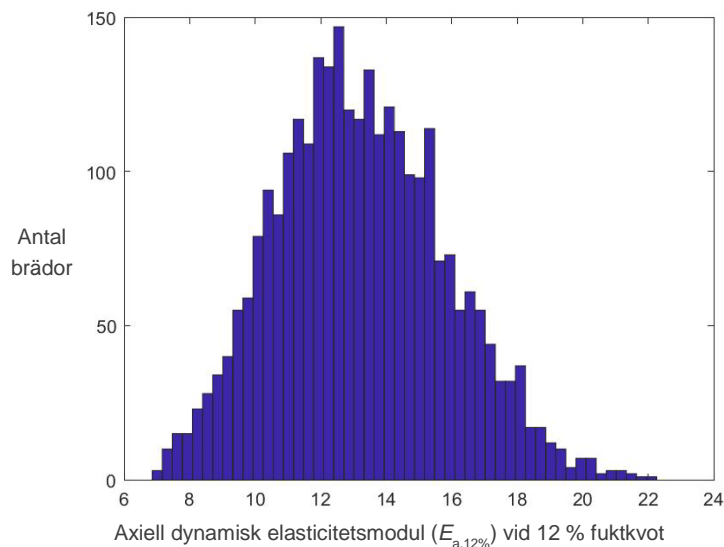
För var och en av de 2864 brädor som vid sorteringen i Hästveda sorterades i klassen C24 levererades en beräknad axiell dynamisk elasticitetsmodul, E_a . Detta värde korrigerades därefter med hänsyn till medelfuktkvoten för den serie som den aktuella brädan ingick i. Justeringen innebar att det E_a -värde som levererades från Precigradern för en enskild bräda ökades med 1 procent för varje procent som den aktuella seriens medelfuktkvot översteg fuktkvoten 12 %. Det justerade värdet på den axiella dynamiska elasticitetsmodulen dokumenterades för var och en av de brädor som sorterats i klassen C24.

I Tabell 2 presenteras följande information för respektive virkesserie: ursprung, bräddimensioner, totalt antal brädor, antal brädor klassade i C24, antal vrak, medelfuktkvoter baserade på fuktkvotmätningar med resistans- resp. kapacitansmätare, samt fuktkvotkorrigerade medelvärden för den axiella dynamiska elasticitetsmodulen. Dessa korrigerade medelvärden betecknas $E_{a,12\%}$, se Tabell 2. Det bör noteras att de medelfuktkvoter som bestämdes med respektive fuktkvotmätare uppvisade små skillnader. Eftersom insticksmätare/resistansmätare anses ge något noggrannare värden än kapacitansmätare (Esping *et al.* 2005, s. 75) är de fuktkvotkorrigerade medelvärdena för E_a ($E_{a,12\%}$) beräknade med utgångspunkt ifrån de medelfuktkvoter som bestämdes med resistansmätaren/insticksmätaren.

Tabell 2. Ursprung, dimensioner, totalt antal brädor, antal brädor klassade i C24, antal brädor klassade som vrak, medelfuktkvoter och fuktkvotkorrigerade medelvärden för axiell dynamisk elasticitetsmodul ($E_{a,12\%}$), redovisade för respektive virkesserie. Beräkningen av $E_{a,12\%}$ baseras på fuktkvoter uppmätta med resistansmätaren.

Serie	Ursprung	Dimensioner [mm]	Totalt antal brädor	Antal brädor i klass C24	Antal vrak	Medel- fuktkvot, res.mät. [%]	Medel- fuktkvot, kap.mät. [%]	$E_{a,12\%}$ [GPa]
1	Bruza	26x128x3300	351	342	9	15.05	15.2	13.46
2	Bruza	26x78x3300	586	539	47	14.3	13.95	13.47
3	Hästveda	26x128x3310	358	352	6	14.49	13.56	12.34
4	Vislanda	24x100x3610	358	341	17	15.26	15.58	13.55
5	Vislanda	23x127x3920	240	232	8	16.06	16.07	13.19
6	Vislanda	24x126x3920	236	232	4	15.78	15.47	13.14
7	Hästveda	24x101x4520	481	466	15	12.99	13.42	13.51
8	Bruza	26x103x3020	383	360	23	14.56	14.28	12.83
			Σ 2993	Σ 2864	Σ 129			

För samtliga brädor som klassades i C24 erhöles ett medelvärde för den fuktkvotkorrigerade elasticitetsmodulen, $E_{a,12\%}$, på 13.22 GPa. Ett histogram som beskriver fördelningen för dessa brädor redovisas i Figur 3. Av histogrammet framgår att fördelningen var i princip normalfördelad. Den nedre "svansen" av histogrammet saknas dock, vilket beror på att de brädor vars styvhet inte uppfyllde kraven för att klassas i C24 istället klassades som vrak och därför inte ingår bland de brädor som redovisas i histogrammet.



Figur 3. Histogram över fördelning för fuktkvotkorrigerad axiell dynamisk elasticitetsmodul ($E_{a,12\%}$) för brädor klassade till C24 vid hållfasthetssortering med Precigrader i Hästveda.

Prediktering av böjstyvhet hos en simulerad balk

Syftet med det aktuella projektet är att undersöka möjligheterna att sortera balklameller av sidobrädor på ett sätt som innebär att lamellernas användning kan optimeras och att det därigenom skall vara möjligt att tillverka balkar med en böjstyvhet som skall kunna konkurrera med motsvarande egenskap för Kerto-balken.

Simulerad balktillverkning

Den principella metod som användes för att simulera tillverkning av sidbrädesbalkar innebar att de 2864 lameller som sorterades i klass C24 vid "knackningen" i Hästveda sorterades i två styvhetsklasser som sedan användes för simulerad tillverkning av balkar av samma typ och dimension som de som tillverkades i det våtlimningsprojekt som genomfördes 2010–2012 och som presenterats ovan, se Figur 1. Vid simulerad tillverkning av en balk användes sex slumpmässigt utvalda lameller från den högre styvhetsklassen som ytterlameller, tre lameller i överkant respektive tre lameller i underkant av en balk, medan nio slumpmässigt utvalda lameller av den lägre styvhetsklassen användes som lameller i en balks inre delar.

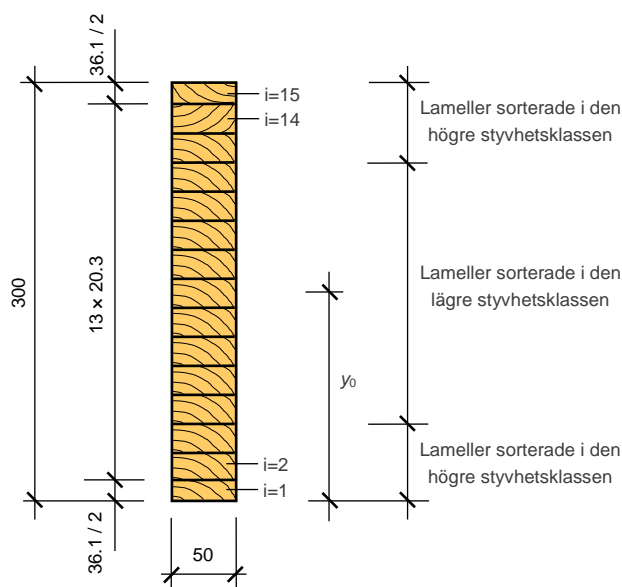
Beräkning av teoretisk böjstyvhet baserat på tvärsnittsdata för simulerad balk

Som beskrivits i det första stycket i avsnittet *Mätresultat* ovan sorterades 96 % av de sidbrädor som ingick i undersökningen i klassen C24. För var och en av dessa brädor levererades en beräknad

axiell dynamisk elasticitetsmodul som sedan korrigerades till ett värde motsvarande jämviktsfuktkvoten 12 %. Detta korrigerade värde dokumenterades, vilket innebar att den axiella dynamiska elasticitetsmodulen vid jämviktsfuktkvoten 12 % var känd för var och en av de 15 lameller som slumpmässigt valdes ut för att ingå i en simulerad balk. Därigenom var det således möjligt att beräkna en teoretisk böjstyvhetsmodul för en simulerad balk. Lamellerna i en sådan balk numrerades från $i=1$ till $i=15$, där den nedersta lamellen gavs nummer $i=1$ och den översta nummer $i=15$, se Figur 4. Avståndet från balkens underkant till det neutrala lagret, dvs. till den position i tvärsnittet där normalspänningen vid böjning i balkens styva riktning var lika med noll, betecknades y_0 , se Figur 4, och beräknades med uttrycket

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{15} E_{a,12\%,i} \cdot A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^{15} E_{a,12\%,i} \cdot A_i} \quad (1)$$

där $E_{a,12\%,i}$ är axiell dynamisk elasticitetsmodul för lamell nr i vid 12 % fuktkvot, A_i är tvärsnittsarean för lamell nr i , och y_i är avståndet från balkens underkant till tyngdpunkten för tvärsnittsytan för lamell nr i .



Figur 4. Balkutformning för simulerade balkar. Lamellerna numreras från $i=1$ i underkant balk till $i=15$ i överkant balk. Beteckningen y_0 avser avståndet från balkens underkant till balktvärsnittets neutrala lager vid böjning i balkens styva riktning.

Balkens teoretiska böjstyvhetsmodul EI vid böjning i balkens styva riktning kunde sedan beräknas genom att utnyttja Steiners sats:

$$EI = \sum_{i=1}^{15} E_{a,i} \cdot \left[\frac{b \cdot t_i^3}{12} + A_i \cdot (y_i - y_0)^2 \right] \quad (2)$$

där EI uttrycker en teoretisk böjstyvhet beräknad vid böjning i balkens styva riktning, b är balkens och lamellernas bredd vilken i denna undersökning valts till 50 mm, och t_i är tjockleken för lamell nr i . Övriga storheter definieras i anslutning till ekvation (1).

Den teoretiska elasticitetsmodulen, $E_{b,teor,12\%}$, vid böjning i balkens styva riktning och vid 12 % fuktkvot kunde sedan beräknas som

$$E_{b,teor,12\%} = \frac{12 \cdot EI}{b \cdot h^3} \quad (3)$$

där h är balkens totala höjd, dvs. 300 mm.

Prediktion av lokal böjstyvhet hos en simulerad balk

I avsnittet *Bakgrund* anges att hållfasthetsklassning av såväl konstruktionsvirke som LVL-balkar bl.a. baseras på att den lokala elasticitetsmodulen beräknad vid böjning på högkant skall uppnå ett förutbestämt medelvärde. Bestämning av lokal elasticitetsmodul för en enskild balk eller enskilt virkesstycke skall därvid ske genom fyrpunktsböjning enligt EN 408 (2010). Vid sådan provning påverkas den lokala elasticitetsmodulen av lokala försvagningar som t.ex. förekomst av kvistar eller fiberstörningar. Då den teoretiska elasticitetsmodulen vid böjning, $E_{b,teor,12\%}$, beräknas enligt ekvation (1)–(3) beaktas inte de lokala effekterna av sådana lokala försvagningar. Dessutom är den elasticitetsmodul som uppmäts vid "knackning" av ett virkesstycke oftast ca 10 % högre än den elasticitetsmodul som uppmäts vid fyrpunktsböjning (Larsson *et al.* 1998). Nämnda förhållanden innebär att $E_{b,teor,12\%}$ ger en överskattning av den lokala böjelasticitetsmodulen jämfört med de värden som erhålls vid verklig balkprovning enligt EN 408 (2010). I den fortsatta framställningen används beteckningen $E_{b,408}$ för värden som vid sådan provning erhålls för den lokala elasticitetsmodulen vid böjning.

För att korrekt kunna prediktera en lokal styvhet för simulerat tillverkade balkar måste en relation mellan $E_{b,teor,12\%}$ och $E_{b,408}$, även det senare värdet beräknat för 12 % fuktkvot, uppskattas. Detta kan göras med hjälp av de 19 balkar som tillverkades i den våtlimningsundersökning som genomfördes 2010–2012 och vars resultat rapporterats av Serrano *et al.* (2011) och Serrano *et al.* (2014). I den förstrnämnda rapporten redovisas en uppmätt lokal elasticitetsmodul, $E_{b,408}$, vid en genomsnittlig fuktkvot på 15.5 %. Dessa värden har här sedan korrigeras till jämviktsfuktkvoten 12 %. Såväl uppmätta ($E_{b,408,15.5\%}$) som korrigerade värden ($E_{b,408,12\%}$) redovisas i Tabell 3.

För de 19 balkar som ingick i våtlimningsundersökningen kunde värden för $E_{b,teor,12\%}$ beräknas enligt ekv. (1)–(3), eftersom såväl axiell dynamisk elasticitetsmodul i rätt tillstånd som positionen för varje lamell som användes i balkarna var kända. För att beräkna $E_{b,teor,12\%}$ var det dock nödvändigt att korrigera varje lamells uppmätta axiella elasticitetsmodul i rätt tillstånd till ett värde som motsvarade jämviktsfuktkvoten 12 %. Detta kunde göras genom att utnyttja resultaten från Oscarsson *et al.* (2011) och Unterwieser och Schickhofer (2007), se avsnittet *Tidigare undersökningar* ovan. Enligt Oscarsson *et al.* (2011) ökade den axiella elasticitetsmodulen med i genomsnitt 20 % då fukttinnehållet i de undersökta sidbrädeslamellerna minskade från rätt tillstånd till 13 %. Om uttorkning istället hade skett till 12 % hade den axiella elasticitetsmodulen ökat med 21.5 %. I

undersökningen av Unterwieser och Schickhofer (2007) blev motsvarande ökning 15 %, men då studerades såväl sidobräder som centrumutbyte. Resultaten från den senare undersökningen kan dock tyda på att den ökning på 21.5 % som erhöles med utgångspunkt från Oscarsson *et al.* (2011) kan vara i överkant. Vid beräkning av $E_{b,teor,12\%}$ för de 19 balkarna valdes därför att räkna med att den axiella dynamiska elasticitetsmodulen för balkarnas lameller ökade med 20 % vid uttorkning från rätt tillstånd till jämviktsfuktkvoten 12 %. Värderna för $E_{b,teor,12\%}$ som beräknats med dessa förutsättningar redovisas i Tabell 3.

Tabell 3. Elasticitetsmoduler vid böjning av de 19 balkar som ingick i den våtlimningsundersökning som genomfördes 2010–2012: $E_{b,408,15.5\%}$ (kolumn 2) avser lokal elasticitetsmodul baserad på mätdata vid verklig balkböjning enligt EN 408 (2010) vid fuktkvot 15.5 %; $E_{b,408,12\%}$ (kolumn 3) avser en justering av värdet i kolumn 2 till jämviktsfuktkvoten 12 %; $E_{b,teor,12\%}$ (kolumn 4) avser en teoretisk elasticitetsmodul beräknad enligt ekv. (1)–(3) för böjning och under förutsättningen att den axiella dynamiska elasticitetsmodulen för en lamell ökar med 20 % vid uttorkning från rätt tillstånd till jämviktsfuktkvoten 12 %.

Balk nr	$E_{b,408,15.5\%}$ [GPa]	$E_{b,408,12\%}$ [GPa]	$E_{b,teor,12\%}$ [GPa]
B2	13.75	14.23	17.30
B3	13.45	13.92	16.65
B4	14.57	15.08	16.68
B5	15.20	15.73	17.86
B6	14.21	14.71	16.20
B7	14.50	15.01	17.30
B8	14.02	14.51	16.93
B10	14.81	15.33	18.13
B11	14.35	14.85	17.14
D1	14.16	14.66	16.87
D3	13.29	13.76	15.50
D4	14.39	14.89	16.43
D5	13.84	14.32	17.06
D6	13.08	13.54	15.14
D7	14.60	15.11	17.30
D9	13.71	14.19	16.57
D10	14.42	14.92	17.24
D11	14.63	15.14	17.08
D12	13.63	14.11	16.31
Medelvärden:	14.14	14.63	16.83

Med utgångspunkt från de medelvärden som gäller vid jämviktsfuktkvot och som redovisas i Tabell 3 kan relationen mellan teoretisk beräknad elasticitetsmodul vid böjning, $E_{b,teor,12\%}$, och lokal elasticitetsmodul beräknad med mätdata från verklig balkböjning enligt EN 408, $E_{b,408,12\%}$, uttryckas som

$$E_{b,408,12\%} = \frac{E_{b,teor,12\%}}{1.15} \quad (4)$$

För en simulerat tillverkad balk med en fuktkvot på 12 % innebär ekvation (4) att den lokala elasticitetsmodul som skulle erhållas vid en tänkt böjprovning enligt EN 408 (2010), och som kan betecknad $E_{b,408,sim}$, kan predikteras genom att den simulerade balkens teoretiskt beräknade elasticitetsmodul vid böjning, $E_{b,teor,12\%}$, divideras med faktorn 1.15, dvs.

$$E_{b,408,sim} = \frac{E_{b,teor,12\%}}{1.15} \quad (5)$$

Böjstyvhets medelvärde vid simulerad balkproduktion

Krav på lokal böjstyvhet för Kerto-balkar och konstruktionsvirke

Kravet på materialstyvhet för såväl LVL-balkar som konstruktionsvirke innebär att de balkar respektive virkesstycken som produceras enligt ett visst certifikat eller sorteras till en viss hållfasthetsklass skall uppfylla ett angivet medelvärde för en lokalt bestämd elasticitetsmodul i böjning. Enligt certifikatet för tillverkning av Kerto-balkar (VTT 2016) skall detta medelvärde uppgå till 13.8 GPa, och för konstruktionsvirke som sorteras i klassen C24 skall medelvärdet enligt EN 338 (2016) vara 11.0 GPa. För konstruktionsvirke gäller dock att virke får sorteras till en viss C-klass om medelvärdet för balkarnas lokala elasticitetsmodul i böjning uppnår ett värde som enligt EN 384 (2016), avsnitt 5.5.2.1, motsvarar 95 % av det medelvärde som enligt EN 338 (2016) gäller för den aktuella C-klassen. För virke som sorteras till C24 är det därför tillräckligt om medelvärdet för den lokala elasticitetsmodulen i böjning uppnår värdet

$$0.95 \times 11 = 10.45 \text{ GPa.} \quad (6)$$

Simulerad tillverkning av en typ av balk med lameller av sidobräder

För att bedöma vilket medelvärde som kan uppnås för lokal böjstyvhet i sidobräddebalkar som tillverkas av lameller vars styvhetssegenskaper motsvarar de lameller som sorterades i klass C24 vid den ovan beskrivna sorteringen i Hästveda, simulerades tillverkning av ett stort antal balkar. Simuleringen baserades på att den axiella dynamiska elasticitetsmodulen för varje sorterad lamell hade korrigerats till en fuktkvot på 12 %. Avsikten med den simulerade tillverkningen var att undersöka möjligheterna att producera sidobräddebalkar vars medelvärde för lokal böjstyvhet uppnår minst samma värde som motsvarande medelvärde för Kerto-balkar, dvs. 13.8 GPa.

En inledande simulering baserades på att alla lameller användes för att tillverka balkar utformade på i princip samma sätt som de balkar som tillverkades i det våtlimningsprojekt som genomfördes vid Linnéuniversitetet under åren 2010–2012, dvs. med 3+3 ytterlameller och 9 innerlameller, se Figur 4. Lamellerna sorterades således i två styvhetsklasser där lameller i den högre styvhetsklassen användes som ytterlameller och lameller i den lägre styvhetsklassen användes som innerlameller.

Eftersom sex femtondelar av alla lameller användes som ytterlameller gick styvhetsgränsen mellan ytter- och innerlameller vid den övre 40-procentsfraktilen i den fördelningskurva som i Figur 3 visas över lamellernas axiella dynamiska elasticitetsmodul.

Vid balktillverkning där ytterlameller är av en högre kvalitet än innerlameller är det angeläget att tjockleken hos lamellerna optimeras så att borthyvlning av styva ytterlameller minimeras i samband med att limmade balkar hyvlas ner till slutlig dimension. I den aktuella simuleringen antogs lamellernas genomsnittliga tjocklek vara 20.3 mm vid en fuktkvot på 12 %, se Figur 4. I en löpande produktion skulle detta innebära att drygt 2 mm skulle behöva hyvlas bort vid vardera ytterkanten av balktvärsnittet för att den slutliga balkhöjden skulle bli 300 mm.

För varje simulerad balk beräknades $E_{b,teor,12\%}$ enligt ekvationerna (1)–(3), varefter $E_{b,408,sim}$ kunde beräknas enligt ekvation (5). För 10000 simulerade balkar erhöles ett medelvärde för $E_{b,408,sim}$ som uppgick till 12.9 GPa, dvs. ett medelvärde som var lägre än det som gäller för Kerto-balkar.

Simulerad tillverkning av två typer av balkar med lameller av sidobräder

Av föregående avsnitt framgår att sidbrädesbalkar med styvhetssegenskaper motsvarande Kerto-balkens inte kunde uppnås om alla lameller användes för tillverkning av sidbrädesbalkar med 300 mm balkhöjd och med 3+3 ytterlameller och 9 innerlameller. För att nå högre balkstyvhet krävdes att styvhetsegenskaperna hos ytterlamellerna förbättrades. Detta kunde åstadkommas genom att gränsen mellan lamellernas båda styvhetsklasser flyttades till en högre fraktil i fördelningskurvan, dvs. genom att antalet bräder i den övre styvhetsklassen minskades. En sådan åtgärd innebar samtidigt att antalet lameller i den lägre styvhetsklassen ökades, vilket fick till följd att alla lameller i den lägre styvhetsklassen inte kunde användas för tillverkning av sidbrädesbalkar med hög styvhet. Dessa överflödiga lameller användes istället för simulerad tillverkning av balkar med styvhetssegenskaper motsvarande C-klassat konstruktionsvirke.

Parallell tillverkning av de två balktyper som beskrivs ovan simulerades. Balkar med bättre styvhetssegenskaper benämns i den fortsatta framställningen *SB-balkar*, medan balkar med sämre styvhetssegenskaper benämns *C-balkar*. *SB-balkarna* utformades med 3+3 ytterlameller och 9 innerlameller, se Figur 4, medan *C-balkarna* bestod av 15 stycken innerlameller. Samtliga lameller antogs ha tjockleken 20.3 mm vid 12 % fuktkvot. Egenskaperna för respektive balk-klass var beroende av vid vilken fraktil som gränsen mellan ytter- och innerlameller drogs i histogrammet över fördelningen för lamellernas axiella dynamiska elasticitetsmodul, se Figur 3. Fraktilen för denna gräns var i sin tur beroende av relationen mellan antalet tillverkade balkar av respektive typ.

Simulerad och parallell tillverkning av *SB-balkar* och *C-balkar* omfattade 90 olika simuleringar där andelen tillverkade *C-balkar* betecknades x och där denna andel varierades från $x=1\%$ till $x=90\%$, i steg om 1 %. Var och en av de 90 simuleringarna omfattade tillverkning av totalt 10000 balkar. Varje sådan simulering genomfördes enligt följande:

1. Alla de 2864 lameller som sorterades i klass C24 vid sorteringen i Hästveda utnyttjades.
2. Andelen tillverkade *C-balkar* sattes till $x\%$.

3. Andelen tillverkade *SB-balkar* betecknades y % och beräknades som

$$y = (100 - x). \quad (7)$$

4. Andelen innerlameller, dvs. lameller som användes i *C-balkar* och som innerlameller i *SB-balkar*, uttrycktes i % och beräknades som

$$Andel_{innerlameller} = \frac{x \cdot 15 + y \cdot 9}{15}. \quad (8)$$

5. Andelen ytterlameller, dvs. lameller som användes i de yttre delarna av *SB-balkar*, uttrycktes i % och beräknades som

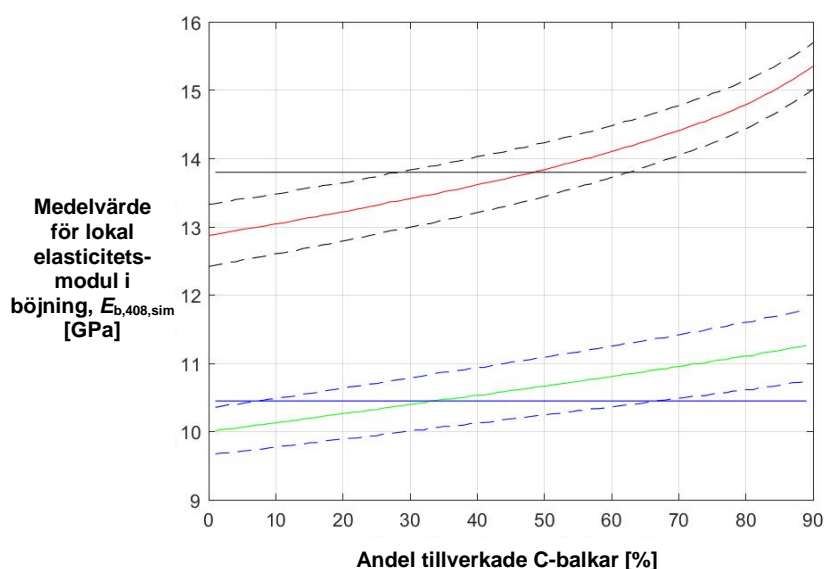
$$Andel_{ytterlameller} = \frac{6 \cdot y}{15}. \quad (9)$$

Andelen ytterlameller enligt ekvation (9) definierade också den övre fraktil som enligt histogrammet i Figur 3 utgjorde gränsen mellan ytter- och innerlameller.

6. Tillverkning av en *C-balk* simulerades genom att 15 lameller som enligt punkt 4–5 definierats som "innerlameller" valdes ut slumpmässigt och gavs en slumpmässig placering i *C-balkens* tvärsnitt.
7. För den simulerade *C-balken* beräknades en teoretisk elasticitetsmodul i böjning, $E_{b,teor,12\%}$, enligt ekvationerna (1)–(3).
8. Den lokala elasticitetsmodul, $E_{b,408,sim}$, som skulle erhållas för den simulerade *C-balken* vid en tänkt böjprovning enligt EN 408 (2010) beräknades enligt ekvation (5) och dokumenterades.
9. De 15 slumpmässigt utvalda innerlamellerna lades tillbaka bland de lameller som enligt punkt 4–5 definierats som innerlameller.
10. Proceduren för tillverkning och beräkning av en *C-balkar* enligt punkt 6–9 upprepades $(\frac{x}{100} \cdot 10000)$ gånger.
11. För tillverkade *C-balkar* beräknades medelvärde och standardavvikelse för $E_{b,408,sim}$.
12. Tillverkning av en *SB-balk* simulerades genom att
- 6 lameller som enligt punkt 5 definierats som "ytterlameller" valdes ut slumpmässigt och gavs en slumpmässig placering som ytterlameller i *SB-balkens* tvärsnitt, och
 - 9 lameller som enligt punkt 4–5 definierats som "innerlameller" valdes ut slumpmässigt och gavs en slumpmässig placering som innerlameller i *SB-balkens* tvärsnitt.
13. För den simulerade *SB-balken* beräknades en teoretisk elasticitetsmodul i böjning, $E_{b,teor,12\%}$, enligt ekvationerna (1)–(3)

14. Den lokala elasticitetsmodul, $E_{b,408,sim}$, som skulle erhållas för den simulerade *SB-balken* vid en tänkt böjprovning enligt EN 408 (2010) beräknades enligt ekvation (5) och dokumenterades.
15. De 6 slumpmässigt utvalda ytterlamellerna och de 9 slumpmässigt utvalda innerlamellerna lades tillbaka bland de lameller som enligt punkt 4–5 definierats som ytter- resp. innerlameller.
16. Proceduren för tillverkning och beräkning av *SB-balkar* enligt punkt 12–15 upprepades $(\frac{y}{100} \cdot 10000)$ gånger.
17. För tillverkade *SB-balkar* beräknades medelvärde och standardavvikelse för $E_{b,408,sim}$.

Resultaten från de totalt 91 genomförda simuleringarna av parallell tillverkning av *SB-balkar* och *C-balkar* redovisas i Figur 5. På den horisontella axeln anges andel tillverkade balkar av den lägre kvaliteten, dvs. andel *C-balkar*. I det ovanstående betecknas denna andel x . På den vertikala axeln anges medelvärde för lokal elasticitetsmodul i böjning, $E_{b,408,sim}$. Den röda kurvan visar hur detta medelvärde varierar för tillverkade *SB-balkar*, dvs. för balkar med högre kvalitet. Den gröna kurvan illustrerar hur motsvarande medelvärde varierar för tillverkade *C-balkar*. De streckade linjerna markerar de beskrivna medelvärdenas respektive standardavvikelse. Den horisontella svarta linjen anger krav på medelvärde för Kerto-balkar (13.8 GPa) och den horisontella blåa linjen anger motsvarande krav för konstruktionsvirke i klass C24 (10.45 GPa).



Figur 5. Medelvärde för lokal elasticitetsmodul i böjning, $E_{b,408,sim}$, som funktion av andel tillverkade C-balkar. Röd kurva avser *SB-balkar*, och grön kurva avser *C-balkar*. Streckade linjer illustrerar standardavvikelser. Övre horisontell linje (svart linje) motsvarar krav på medelvärde för Kerto-balkar. Nedre horisontell linje (blå linje) motsvarar krav på medelvärde för konstruktionsvirke i klass C24.

Korsningspunkten för den röda kurvan och den horisontella svarta linjen i Figur 5 motsvarar den punkt där medelvärdet för *SB-balkarnas* lokala elasticitetsmodul i böjning är lika stort som kravet på motsvarande medelvärde för Kerto-balken. Denna korsningspunkt erhålls när andelen tillverkade *C-balkar* är 48 %. Detta innebär att en baltillverkning som baseras på råvara motsvarande de sidobränder som sorterades i Hästveda resulterar i att 52 % av produktionen utgörs av *SB-balkar* med en styvhet som motsvarar Kerto-balkens, medan resterande 48 % av produktionen består av *C-balkar* som med avseende på styvhet uppfyller krav på konstruktionsvirke i klass C24.

Jämförelse av egenskaper: Kerto- och SB-balk

I beskrivningen ovan redovisas hur ett råmaterial bestående av sågfallande sidobränder av gran från södra Sverige kan utnyttjas för tillverkning av balkar i två styvhetsklasser. De styvare balkarna, ovan benämnda *SB-balkar*, uppfyller samma krav på styvhet som Kerto-balkar. Nedan görs en bedömning av i vilken utsträckning som *SB-balkars* övriga egenskaper kan anses vara likvärdiga med Kerto-balkars egenskaper. De egenskaper som jämförts är (beteckningar enligt certifikat (VTT 2016) för Kerto-balken)

- lokal elasticitetsmodul vid balkböjning på högkant, $E_{0,mean}$,
- böjhållfasthet vid balkböjning på högkant med balkhöjd $h=300$ mm, $f_{m,0,edge,k}$,
- skjuvhållfasthet vid skjuvbelastning på högkant, $f_{v,0,edge,k}$, och
- tryckhållfasthet vinkelrätt fibrerna, motsvarande upplagstyck för Kerto-balk belastad på högkant, $f_{c,90,edge,k}$.

För Kerto-balkar kan karakteristiska värden för dessa egenskaper erhållas från aktuellt certifikat (VTT 2016). När det gäller motsvarande värden för *SB-balkar* har i avsnittet *Böjstyvhetsens medelvärde vid simulerad balkproduktion* ovan konstaterats att det är möjligt att uppnå ett medelvärde för lokal elasticitetsmodul vid böjning som motsvarar det som gäller för Kerto-balken, dvs. $E_{0,mean}=13.8$ GPa.

Beträffande *SB-balkarnas* karakteristiska hållfasthet vid böjning på högkant med balkhöjd $h=300$ mm kan en uppskattning göras med hjälp av resultaten från det våtlimningsprojekt som genomfördes vid Linnéuniversitetet under åren 2010–2012. I Tabell 3 ovan redovisas resultat från böjprovningar enligt EN 408 (2010) utförda inom nämnda våtlimningsprojekt. Dessa böjprovningar omfattade 19 balkar med balkhöjd $h=300$ mm. I Tabell 3, kolumn 2, redovisas provningsresultat för balkarnas lokala elasticitetsmodul vid böjning, uppmätt vid en genomsnittlig fuktkvot på 15.5 %. Denna information presenterades i Serrano *et al.* (2011). I Tabell 3, kolumn 3, har värdena korrigerats till jämviktsfuktkvoten 12 %, vilket resulterat i att medelvärdet för den lokala böjelasticitetsmodulen beräknats till $E_{b,408,12\%,mean}=14.63$ GPa. Den karakteristiska hållfastheten vid böjning på högkant, för balkhöjd $h=300$ mm, uppgick för de 19 balkarna till $f_{m,0,k,vätt}=45.4$ MPa (Serrano *et al.* 2014). Genom att anta att det förhållande som i våtlimningsprojektet erhölls mellan lokal elasticitetsmodul vid böjning

och böjhållfasthet på högkant även är tillämpligt för *SB-balkar* kan en böjhållfasthet för *SB-balkarna*, $f_{m,0,k,SB}$, uppskattas till

$$f_{m,0,k,SB} = f_{m,0,k,våtl} \cdot \frac{E_{0,mean}}{E_{b,408,12\%,mean}} = 45.4 \cdot \frac{13.8}{14.63} = 42.8 \text{ MPa}, \quad (10)$$

dvs. en hållfasthet som är något lägre än hållfastheten för Kerto-balkar. Den senare hållfastheten uppgår till $f_{m,0,edge,k}=44$ MPa (VTT 2016).

När det gäller skjuvhållfasthet respektive hållfasthet för upplagstryck vinkelrätt fiberriktningen är det rimligt att anta att *SB-balkarna* har egenskaper som är något sämre än motsvarande egenskaper för limträbalkar. Detta beror på att årsringarnas krökning är större i centrumutbyte än i sidobrädor och att sådan krökning har en "armerande" verkan då lameller belastas i skjuvning och vid upplagstryck.

Enligt limträstandarden EN 14080 (2013) är den aktuella skjuvhållfastheten konstant, $f_{v,g,k}=3.5$ MPa, oavsett hållfasthetsklass för limträbalkar. Detsamma gäller för upplagstryck vinkelrätt fiberriktningen där karakteristiska värdet för denna hållfasthet anges till $f_{c,90,g,k}=2.5$ GPa. Mot bakgrund av vad som anges i föregående stycke kan det antas att motsvarande värden för *SB-balkarna* är något lägre. En sammanställning av styvhets- och hållfasthetsvärden för Kerto-balkar och motsvarande predikerade värden för *SB-balkar* redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Sammanställning av styvhets- och hållfasthetsvärden enligt certifikat för Kerto-balkar, samt motsvarande predikerade värden för *SB-balkar*.

Egenskap	Kerto-balkar		SB-balkar	
	Beteckning enl. certifikat ²⁾	Värde	Beteckning	Värde
Lokal elasticitetsmodul vid böjning på högkant [GPa]	$E_{0,mean}$	13.8	$E_{0,mean}$	13.8
Böjhållfasthet vid böjning på högkant ¹⁾ [MPa]	$f_{m,0,edge,k}$	44	$f_{m,0,k,SB}$	42.8
Skjuvhållfasthet vid belastning på högkant [MPa]	$f_{v,0,edge,k}$	4.1	$f_{v,g,k}$ ³⁾	≤ 3.5
Tryckhållfasthet (upplagstryck) vinkelrätt fiberriktn. [MPa]	$f_{c,90,edge,k}$	6.0	$f_{c,90,g,k}$ ³⁾	≤ 2.5

- 1) Böjhållfastheten avser balkar med balkhöjd $h=300$ mm.
- 2) Certifikat utfärdat av VTT (2016).
- 3) Beteckning enligt limträstandarden, EN 14080 (2013).

Av Tabell 4 framgår att *SB-balkarnas* styvhet och hållfasthet vid böjning är jämförbara med Kerto-balkens. Däremot är skjuvhållfastheten något lägre medan hållfastheten vid upplagstryck är väsentligt lägre. Det sistnämnda beror sannolikt på att limfogarnas vertikala orientering i Kerto-balken ger en "armeringseffekt" som höjer hållfastheten vid upplagstryck.

I genomförandet av den aktuella förstudien har Simon Nygren, teknikutvecklare på byggmodultillverkaren Flexator, Anneberg, intervjuats när det gäller vilka egenskaper som är

relevanta att jämföra mellan Kerto-balkar och *SB-balkar* (Nygren 2017). Vid Flexators tillverkning används årligen ca 600 m³ Kerto-balk och den egenskap som enligt Nygren är helt avgörande vid dimensionering är elasticitetsmodulen vid böjning, dvs. deformationsegenskaperna vid brukslast. Hållfasthet vid böjning är däremot ytterst sällan avgörande.

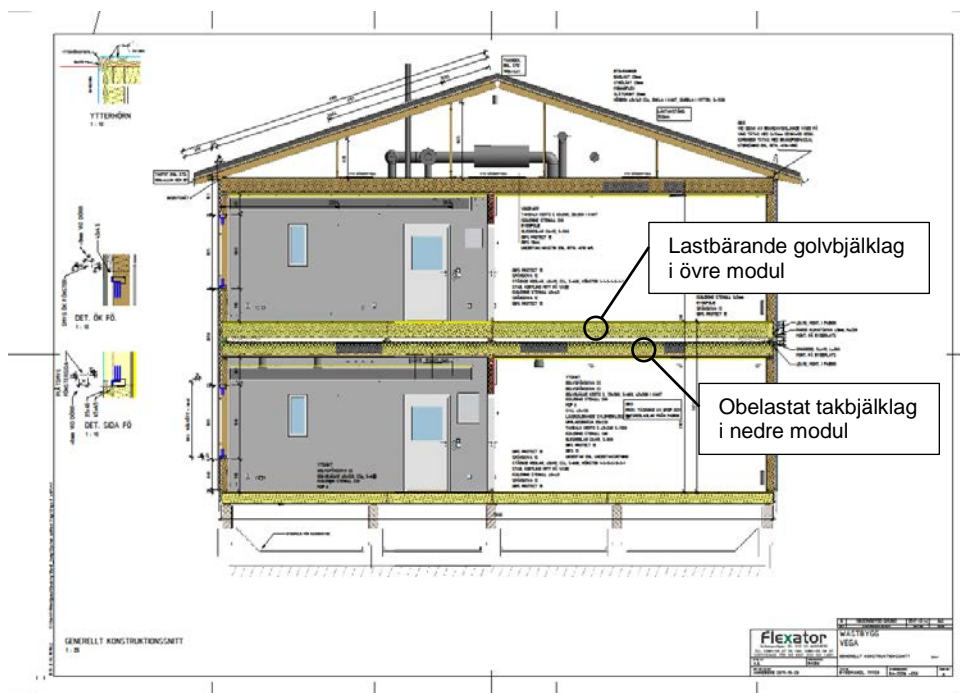
Beträffande hållfasthet vid upplagstryck gäller att Kerto-balkars upplag i stort sett alltid utgörs av konstruktionsvirke vars tillåtna upplagstryck är väsentligt lägre än Kerto-balkens, vilket innebär att Kerto-balkens höga kapacitet vid tryck vinkelrätt fiberriktningen därför inte kan utnyttjas. För korta balkar kan det förekomma att tvärkraftskapaciteten, dvs. skjuvhållfastheten, blir avgörande.

Marknadssegment för sidobräddebalkar

Ett intressant segment för användning av *SB-balkar* är tillverkning av byggmoduler på fabrik. I sådana konstruktioner är Kerto-balkar vanligt förekommande och det skulle därför kunna vara intressant att istället använda *SB-balkar* med styvhet och hållfasthet som motsvarar Kerto-balkens.

Vid produktion av moduler förekommer också att Kerto-balkar används i konstruktioner där lasterna inte är större än att de skulle kunna bäras av C-klassat konstruktionsvirke. Orsaken till att Kerto-balkarna ändå används är att den erforderliga balkhöjden, av produktions-, transport- och montagemässiga skäl, överstiger 245 mm och att tillgången på C-klassat konstruktionsvirke i sådana dimensioner kan vara mycket begränsad.

För att få en uppfattning om hur stora volymer Kerto-balk som årligen skulle kunna ersättas med *SB*- resp. *C-balkar* har produktionen av moduler i Flexators fabrik i Anneberg studerats. Flexator tillverkar moduler som används i 1- eller 2-våningsbyggnader. I moduler avsedda för 1-våningsbyggnader dimensioneras takkonstruktionen för t.ex. egentyngd, snö- och vindlaster samt laster som kan förekomma vid transporter och montage. I moduler som istället används i botteväningen i 2-våningsbyggnader dimensioneras takkonstruktionen endast för egentyngder samt laster som uppstår vid transport och montage, eftersom de nyttiga laster som uppstår på mellanbjälklaget bärs av bjälklagskonstruktionen i den modul som används på den andra våningen. En sektion av en 2-våningsbyggnad visas i Figur 6.



Figur 6. Exempel på byggnad bestående av två moduler i två våningar.

Erforderliga volymer Kerto-balk som årligen förbrukas i Flexators produktion är beroende av om produktionen domineras av 1- eller 2-våningsmoduler. Detta kan variera över tid. I Tabell 5 redovisas de volymer som skulle förbrukas om produktionen enbart bestod av 1-våningsbyggnader (kolumn 2) om produktionen enbart bestod av 2-våningsbyggnader (kolumn 3), samt om produktionen bestod till 50 % av 1-våningsbyggnader och till 50 % av tvåvåningsbyggnader (kolumn 3). Enligt tabellen uppgår den årliga förbrukningen av Kerto-balkar till 700–800 m³.

Tabell 5. Årlig förbrukning av Kerto-balkar vid olika produktionsalternativ vid Flexators fabrik i Anneberg.

Dimension Kerto-balk [mm]	Volym Kerto-balk vid produktion av enbart 1-våningsbyggnader [m ³]	Volym Kerto-balk vid produktion av enbart 2-våningsbyggnader [m ³]	Volym Kerto-balk vid produktion av lika volymer 1- och 2- våningsbyggnader [m ³]
75x300		297	150
63x300	200	100	150
45x300		71	35
33x300	105		55
45x260		124 ¹⁾	60
45x220	402	201	300

1) Kerto-balkar som kan ersättas med C-balkar p.g.a. små laster i bruks- och brottstadierna.

Investeringsbehov och marginalkostnader för produktion av balkar av sidobräder

Det finns ett flertal leverantörer av nyckelfärdiga anläggningar för limträproduktion. Många är samma leverantörer som till anläggningar för tillverkning av korslimmade träskivor (Cross-Laminated Timber, CLT). Det handlar om samma typ av utrustning i båda fallen:

- intag för ströade eller paketlagda virkespaket,
- hyvel och någon form av hållfasthetssortering (t.ex. Precigrader eller likvärdig),
- enklare form av fingerskarv eller stumskarvning (ände mot ände),
- limpåföring och -press, och
- härdningszon samt slutlig dimensionshyvling.

Det är en fördel om anläggningen ligger vid ett sågverk då man kan utnyttja sågverkets resurser såsom truckar, panna, hantering av spill samt sågverkets organisation såsom arbetsledning, planering, underhåll, utlastning m.m. Vid en placering på ett sågverk är det dessutom möjligt att i större utsträckning ta in ströade virkespaket direkt från torkarna. Normalt faller det cirka 25–30 % sidobrädor vid sågning på ett sågverk som sågar normaltimmer (18 cm och grövre). Om t.ex. bräder med tjocklek 22 mm tas ut till balkproduktion handlar det om ca 10 %, dvs. ca 20 000 m³ vid ett normalstort gransågverk som har en årsproduktion på ca 200 000 m³.

Det går att komma över viss del begagnade maskiner till en anläggning för tillverkning av *SB-balkar*. Exempelvis har WP Glulam nyligen lagt ned sin produktion i Ljungaverk där företaget tillverkade balkar mot den japanska marknaden. De tillverkade balkar från 24 mm virke och de hade den utrustning som behövs för en tillverkning av limmade balkar. Dock är deras pressar begränsade till en balklängd på maximalt 6 meter.

Flaskhalsen i produktionen är limpåföring och pressning. Hastighet på hyvlingen och materialflöde blir relativt låg vilket talar för att man skulle kunna hitta begagnade maskiner just för intag och hyvling.

En rimlig dimensionering för en anläggning som skall tillverka balkar av sidobräder ligger på minst 10 000 m³ per skift. Det motsvarar en kapacitet på 70 m/min (17 st/min) i hyvlingshastighet och pressning av 20–25 balkar per timme (100×300×12000 mm). Detta motsvarar ett anläggningsutnyttjande på 70 % vilket är normalt för en likvärdig anläggning.

Som framgår i genomförda utprovningar så kan man, om man tar ut sågfallande sidobrädor, få ut ca 52 % av *SB-balk* som kan ha likvärdiga egenskaper som Kerto-balken och 48 % kan bli konstruktionsbalk motsvarande C24. Här kan man välja två strategier. Finns inte betalningsmöjligheter för C24 (som blir dyrare än vanligt konstruktionsvirke men kan erbjuda andra dimensioner än konstruktionsvirke) kan man låta bli dessa och göra precis som nu och sälja sidobrädor med lägre E-modul som läkt, emballagevirke eller råspont. Finns däremot betalningsförmågan för balkar motsvarande C24 och som eventuellt också kan tillverkas med större dimensioner än vad som är möjligt att erhålla med sågat konstruktionsvirke, kan man välja att även

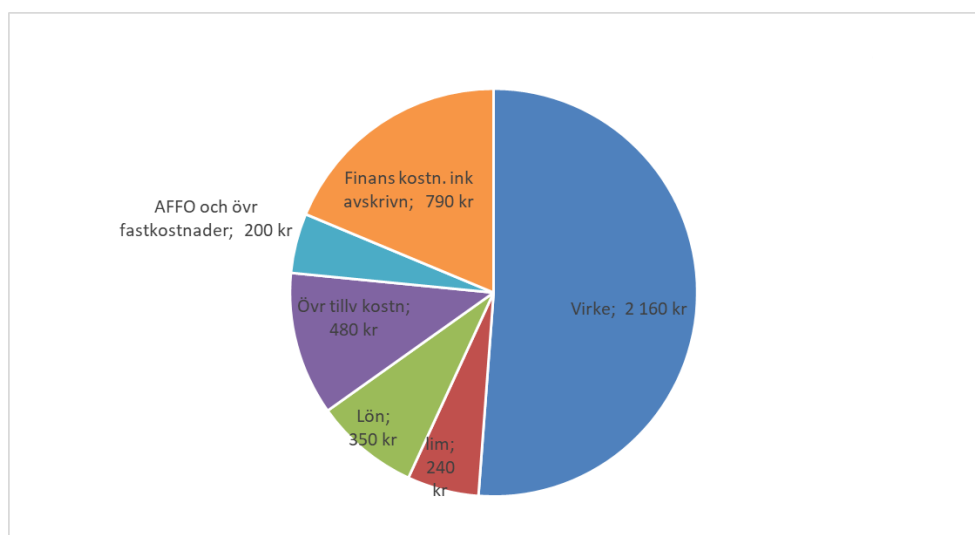
SMART HOUSING SMÅLAND

limma sidbrädor med lägre E-modul till balkar. Troligen påverkar valet av strategi inte hela anläggningens kapacitet. Om man väljer att inte limma sidbräder med lägre E-modul till konstruktionsbalk fås en ökad beläggning i hyvling och sortering, men detta skulle kunna hanteras eftersom dessa processteg inte är flaskhalsar i produktionen.

En för liten volym bedöms inte klara de fasta kostnaderna och uppstartskostnaden som finns för att sälja in en ny produkt som *SB-balken* faktiskt är. För att nå en rimlig avkastning bör man sikta på produktion i tvåskift och upp mot 20 000 m³. Det finns skalfördelar i detta och en större volym skulle rimligtvis ge en lägre tillverkningskostnad speciellt om det finns virke till denna volym att tillgå,

Kostnaden för sidbräder för tillverkning av *SB-balk* fluktuerar kraftigt beroende på generella efterfrågan av denna typ av bräder. Sidbräder är en konsekvensprodukt vid gransågverken och sågning sker i huvudsak utifrån målsättningen att ta ut så mycket konstruktionsvirke som möjligt ur centrumutbytet av stocken. Därmed är tillgången på sidbrädor avhängigt hur mycket konstruktionsvirke som tas fram. En stor efterfrågan på sidbräder från till exempel emballageindustrin medför att priserna stiger kraftigt och tvärtom vid låg efterfrågan. Dimensionen 22 mm är vanlig på sidbrädor och skulle passa bra till tillverkning av *SB-balk*. Priser som förutsatts i nedanstående kostnadsfördelning är 1600 kr/m³ med åtgångstal på 1.35, dvs. 1.35 m³ brädor med tjocklek 22 mm går åt för att tillverka 1 m³ *SB-balk*.

Förutom virke är finansiella kostnader och avskrivningar en stor post. Denna kalkyl, se Figur 7, baseras på 60 miljoner kr för investeringar med en avskrivningstid på 10 år samt 3 % ränta. Med en mindre investering blir kalkylen självfallet bättre.



Figur 7. Kostnadsfördelning vid tillverkning av 10 000 m³ *SB-balk* med investering på 60 Mkr. Den totala kostnaden för att ta fram *SB-balk* integrerat vid ett normalstort sågverk ligger i detta fall på drygt 4200 kr/m³.

Är det då lönsamt att investera för att tillverka *SB-balkar*?

Med en ökad efterfråga från hustillverkare, och då framförallt från volymhusföretag där Kerto-balkar används flitigt, finns förutsättningar att nå förutsatta volymer. Bara hos Flexator är behovet ca 700 m³/år, vilket har redovisats i föregående kapitel.

Beroende på volymer och investering hamnar kostnaden för att ta fram en *SB-balk* på ca 3700–4300 kr/m³. För att nå lönsamhet måste snittpriset på en *SB-balk* hamna på minst 4 500 kr, vilket är fullt rimligt.

Viktigaste resultat

Resultaten från studien visar att drygt 50 % av de sidbräder som förväntas falla vid sågverksproduktion i södra Sverige kan användas för tillverkning av limmade balkar med styvhetsgenskaper som motsvarar LVL-balkar av typen Kerto. Resterande bräder, med lägre styvhet, kan antingen limmas till balkar med styvhet motsvarande konstruktionsvirke av klass C24, eller säljas som läkt, råspont eller emballage. En investerings- och kostnadskalkyl visar att det är möjligt att få lönsamhet i en tillverkning med det beskrivna produktsortimentet.

Slutsatsen är att en tillverkning av limmade balkar av sidbräder skulle vara lönsam och kunna bidra till att minska materialkostnaderna vid industriell trähustillverkning.

Fortsättning

Den genomförda studien baseras bl.a. på resultat från en balkundersökning som genomfördes under åren 2010–2012. Denna tidigare undersökning baserades på lameller från endast ett enskilt sågverk beläget i Långasjö i östra Småland där virkeskvaliteten anses vara hög. Det senare har styrkts genom den nu genomförda undersökningen, eftersom medelstyvheten för de sidbräder som ingick i den tidigare undersökningen var högre än medelstyvheten för de sidbräder som ingått i den undersökning som redovisas i denna rapport. Skillnaden i styvhet behöver dock inte enbart bero på skillnader i virkets geografiska ursprung. En annan bidragande orsak skulle kunna vara sidbrädernas längd. I den undersökning som genomfördes 2010–2012 användas endast sidbräder med längden 5400 mm, medan den nu genomförda undersökningen baserats på bräder med längder varierande mellan 3300–4500 mm. För att kunna såga sidbräder med långa längder krävs rakar stockar, dvs. stockar med förhållandevis hög kvalitet, och det är sannolikt att sådana stockar även ger virke med hög kvalitet. Avsikten är därför att komplettera det virke som använts i denna undersökning med sidbräder med längder ≥ 5400 mm. Detta kan innebära att den mängd sidbräder som kan användas för tillverkning av balkar med styvhetsgenskaper motsvarande Kerto-balken kan ökas utöver de dryga 50 % som beräknats i denna undersökning.

SMART HOUSING SMÅLAND

Referenser

- Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber: Its nature and behaviour*. 2nd edition, E & FN Spon, London, UK.
- EN 338 (2016). *Structural Timber – Strength classes*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 384 (2016). *Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 408 (2010 + A1:2012). *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 14080 (2013). *Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- EN 14374 (2004). *Timber structures – Structural laminated veneer lumber – Requirements*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Esping, B., Salin, J.-G. and Brander, P. (2005). *Fukt i trä för byggindustrin – Fuktegenskaper, krav, hantering och mätning*. SP Träteknik, publ. nr SP INFO 2005:24, s. 75.
- Nygren, S. (2017). Flexator AB, Anneberg, Sweden. Personal communication 2017-12-19.
- Lantmäteriet (2018). *Kartsök och ortnamn*. <https://kso.etjanster.lantmateriet.se/> [2018-03-28].
- Larsson, D., Ohlsson, S., Perstorper, M. and Brundin, J. (1998). *Mechanical properties of sawn timber of Norway spruce*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56(5):331–338.
- Oscarsson, J., Olsson, A., Johansson, M., Enquist, B. and Serrano, E. (2011). *Strength grading of narrow dimension of Norway spruce side boards in the a wet state using first axial resonance frequency*. *International Wood Products Journal*, 2(2):118–124.
- Perstorper, M. (2017). Dynalyse AB, Partille, Sweden. Personal communication.
- Serrano, E., Blixt, J., Enquist, B., Källsner, B., Oscarsson, J. (ed.), Petersson, H. and Sterley, M. (2011). *Wet glued laminated beams using side boards of Norway spruce*. Report No. 5, School of Engineering, Linnæus University, Växjö, Sweden.
- Serrano, E., Oscarsson, J., Sterley, M. and Enquist, B. (2014). *Green-glued products in structural applications*. In: Aicher *et al.* (eds.), *Materials and Joints in Timber Structures*, RILEM Bookseries 9, pp. 45–55.
- Unterwieser, H. and Schickhofer, G. (2007). *Pre-grading of sawn timber in green condition*. Proceedings of 1st Conference of COST Action E53 – Quality Control for Wood and Wood Products, Warsaw, Poland, 15–17 October 2007. European Science Foundation.

Innovationsmiljöns finansiärer och koordinators

