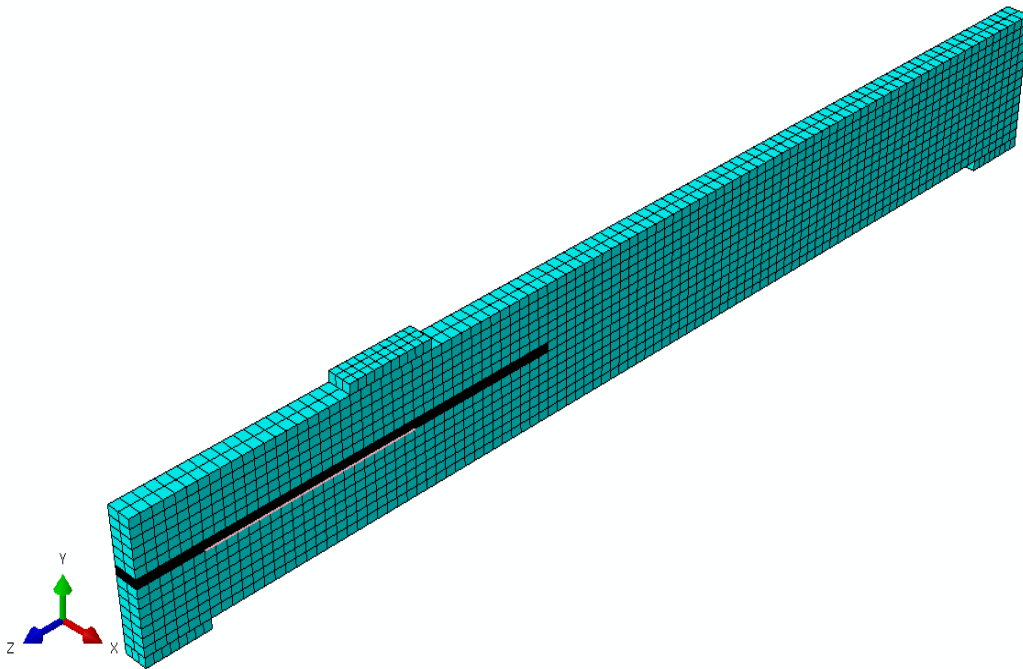




Sprickor i träkonstruktioner

Finita element modellering

Slutrapport



Sven Berg

Luleå Tekniska Universitet

Sammanfattning

Sprickor i träkonstruktioner för byggändamål är vanliga. De flesta sprickor orsakas av cykliska förändringar i temperatur och relativ fuktighet, vilket resulterar i krympning och svällning av trä och därigenom inducerade spänningar i strukturen. Hur dessa sprickor påverkar träets styrka, särskilt skjuvhållfastheten, är inte väl förstått. Emellertid är det rimligt att förvänta sig att sprickor har en inverkan på skjuvhållfastheten eftersom de företrädesvis löper längs balkarna i fiberriktningen och limfogen. Syftet med denna studie var att undersöka bärförmåga av spruckna limträbalkar och att hitta en modell som kan förutsäga balkarnas brottlast på grund av sprickor. Trepunkts-böjprov är ett vanligt experiment för att testa styrkan i träbalkar. I detta arbete utfördes experimentella tester med limträbalkar i olika storlekar med för-tillverkade sprickor. En ortotropisk-elastisk finita element modell och XFEM-metoden användes för att simulera balkarnas sprickinitiering och att uppskatta dess bärförmåga. Validering gjordes genom numeriska simuleringar av det mekaniska uppträdandet vid trepunkts-böjning av limträbalkar med olika sprickplaceringar. Brottbelastningen registrerades och jämfördes med den experimentella brottlasten. Resultaten av simuleringarna överensstämmer väl med de experimentella resultaten.



Organisation: TräCentrum Norr	Författare:	Utgåva: 1.0	Status: Klar
Dokumenttyp: Slutrapport delprojekt	Filnamn: Slutrapport Sprickor_i_balkar_FE.doc	Datum 2014-06-09	Sida: 3(18)

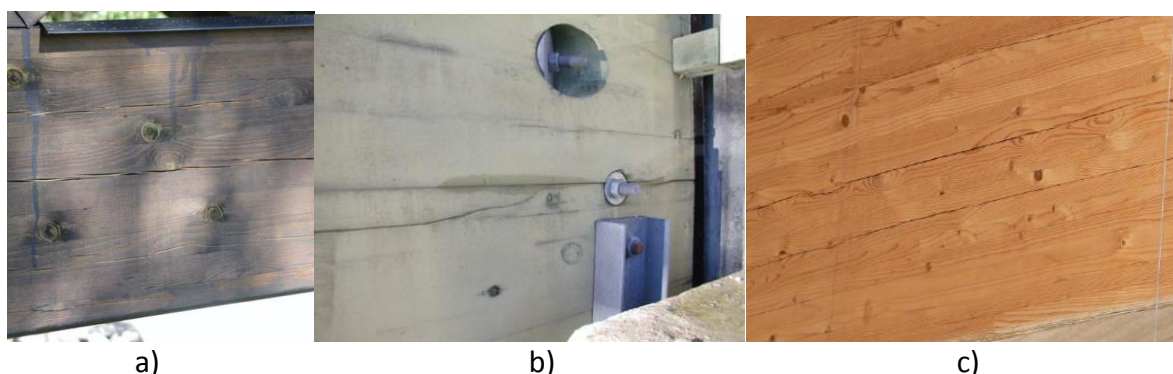
Innehållsförteckning

Innehåll

1 Inledning	4
1.1 Bakgrund	5
1.2 Syfte och mål	5
2 Metoder och genomförande	6
2.1 Teoretisk belastningsberäkning och material	6
2.2 Elastiska egenskaper	7
2.3 Extended Finita Element Method (XFEM)	7
2.4 Spricka kriterier och energier initiering	7
3 Kalibrering och valideringsexperiment	8
3.1 kalibrerings experiment	8
3.2 Valideringsexperiment	9
3.3 Simuleringsmodeller	10
3.4 Simuleringsmodell	10
4 Resultat	11
4.1 Sprickors inflytande på last	11
4.2 Sprickinitiering och kalibrering	11
4.3 Simulerad belastning	12
5 Slutsatser	13
Bilagor	14
9 meter balk (bilder)	14
5 meter balk (bilder)	17

1 Inledning

Trä är ett biokompositmaterial med en struktur som är består av porösa celler. Egenskaperna för trä som material är till stor del på grund av sin mycket organiserade struktur i flera hierarkiska nivåer. Skillnader i de hierarkiska nivåerna är mycket viktiga och ger förklaringar på de olika egenskaper (t.ex. anisotropi, hygroskopi), som trä har. Ett karakteristiskt drag för trä är att de flesta av dess egenskaper har en variation mellan de tre huvudriktningar, dvs. i radiell (R), tangentiell (T) och longitudinella (L) riktning. Den radiella axeln är orienterad i riktningen för strålarna (ray), den tangentiella axeln i riktningen av årsringarna och den längsgående axeln i riktningen för trakeiderna. Elasticitetsmodulen i den longitudinella riktningen är ungefär en storleksordning högre än de två andra riktningar. Naturliga variationer i den fibrösa strukturen hos trämaterial, som kvistar och snedvridenhet kommer att resultera i en förlust av styrka och elastiska egenskaper hos det sågade virket. Ett sätt att motverka denna effekt är att parallellaminera sågade trävaror och genom detta skapa ett "mer homogent" material, så kallat limträ. Jämfört med sågat virke och andra konstruktionsmaterial, har limträ flera olika fördelar som inkluderar storlek, arkitektoniska effekter och förmågan att variera tvärsektioner (woodhandbook 2010). I figur 1 ses limträ som utsatt för dimensionsförändringar och sprickbildning på grund av förändringar i fuktinnehåll. Dimensionsförändringar i lameller varierar med fiberorientering och med olika årliga orienteringar i tvärsektion. Sprickor i limträ kan påverka lastkapacitet, beroende på sprickans djup, längd och plats. Hur dessa parametrar påverkar lastkapacitet av balken är inte klarlagt. Emellertid är det rimligt att förvänta sig att sprickor har en inverkan på skjuvhållfastheten eftersom de företrädesvis löper längs balkarna i fiberriktningen och limfogar.

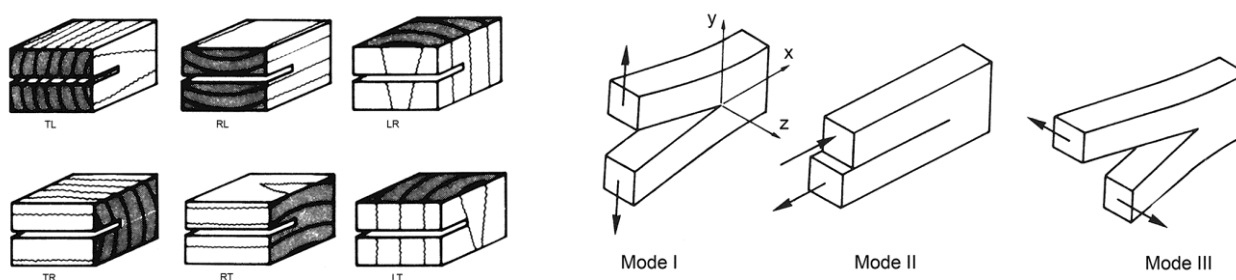


Figur 1 Exempel på sprickbildning i limträ. a) Brobalk med 1-3 m långa sprickor b) Brobalk med 0.5-2 m långa sprickor c) sprickor i takbalk.

Användningen av finita element (FE) modellering är ett viktigt verktyg i design och utveckling av produkter, konstruktion och för en bättre förståelse av materialbeteende. Sprickor är i grunden mycket olinjära. I FE-modellering antas trä vara cylindrisk ortotropiskt med de tre huvudriktningarna (R,T,L). I brottmekanik kommer ortotropin att ge sex spricktillväxtriaktningar, Figur 2. Systemen för spricktillväxt indikeras som TL, RL, LR, TR, RT

och LT, där den första bokstaven anger riktningen för normalen till sprickplanet och den andra bokstaven hänvisar till riktningen av spricktillväxten (Silva et al. 2007).

Det finns tre sätt att ansätta en kraft för att göra det möjligt för en spricka att propagera, figur 2. Mode I representerar en spricka som öppnas på grund av dragspänning vinkelrätt mot planet av sprickan. Mode II är då en spricka uppkommer på grund av "i planet skjuvspänningar". Mode III är då sprickan uppkommer på grund av tvär-skjuvspänning. Eftersom sprickor i trä generellt växer i fiberriktningen, oberoende av både den ursprungliga orienteringen i sprickan och mode mix, så är spricktillväxt längs fibrerna oftast den primära fokusen.



Figur 2. Träets sex huvudriktningarna vid sprickundersökningar (höger) och de olika "brottfallen" (vänster)

1.1 Bakgrund

Det finns behov av att undersöka och prova om skjuvhållfastheten påverkas av sprickor i limträbalkar och i så fall hur mycket. Sprickor i limträbalkar nedsätter hållfastheten men det är okänt hur stor nedsättningen blir med hänsyn till sprickdjup, spricklängd, sprickplacering etc. I den nya svenska varianten av Eurokod 5 för dimensionering av limträ används en k_{cr} -faktor=0.67, som nu är uppgraderat till ca 0.8 (balkar inomhus), för att sänka tillåten skjuvspänning p.g.a. inverkan av eventuella sprickor. Det antas att det är främst skjuvhållfastheten som påverkas av sprickor eftersom sprickorna löper företrädesvis i fiberriktningen. Denna faktor innebär en sänkning jämfört med den tidigare använda svenska byggnormen.

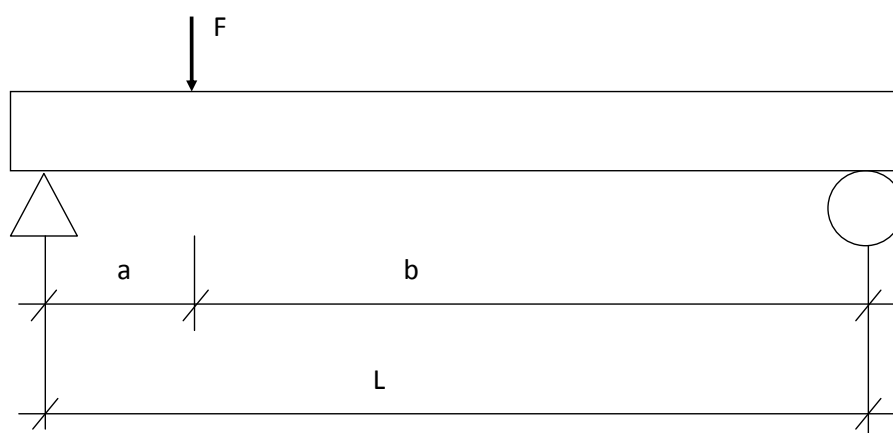
1.2 Syfte och mål

Syftet med denna studie var att undersöka bärförmåga av spruckna limträbalkar och att hitta en modell som kan förutsäga brottbelastning av balkar på grund av sprickor. XFEM och en ortotropisk elastisk FE-modell kalibrerades med hjälp av brottenergierna Trepunkts böjprov på 5 och 9 meter långa limträbalkar med förtillverkar sprickor användes för kalibrering och utvärdering.

2 Metoder och genomförande

2.1 Teoretisk belastningsberäkning och material

Experimenten genomfördes på svenskt limträ CE L40c av gran (*Picea abies* (L.) Karst.). Balkarna hade en genomsnittlig fukthalt på 12 % och konstruerades med hjälp av 14 lameller som limmades med Melamin Urea formaldehyd lim, (Casco 1247/2526). De teoretiska böj- och skjuvbrottbelastningarna bestämdes med konventionella beräkningsmetoder. För beräkningarna användes en maximal skjuvspänning av 4 MPa (Pousette och Ekevad 2012). Om belastningen anbringas enligt figur 3, kan den teoretiska belastningen bestämmas enligt nedan (figur 3 och ekv. 1).



Figur 3. Schematisk presentation av en balk med parametrar för teoretisk belastningsberäkningar.

Om hela tvärsnittet är A , och skjuvhållfastheten är f_s fås följande brottlast F_b :

$$F_b = \frac{A \cdot f_s}{1.5} \frac{L}{b} \quad (1)$$

2.2 Elastiska egenskaper

Linjära relationer används ofta vid modellering av trä. I denna studie användes en ortotropisk elastisk modell. Hookes lag för ett ortotropiskt material kan skrivas som,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{RL}}{E_R} & \frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{RT} \end{bmatrix} \quad (2)$$

där E_R , E_T och E_L är Youngs modul i R-riktningen, T-riktningen och L-riktningen. G_{RT} , G_{TL} och G_{LR} är skjuvmodulen i RT-riktningen, TL-riktningen och LR-riktningen. De elastiska egenskaper som används i denna undersökning har hämtats från Eurocode 5 (1999), Tabell 1.

Tabell 1. Elastiska parametrar för limträbalkar enligt Eurokod 5 (1999).

Elastiska parametrar	E_L	E_R	E_T	G_{TL}	G_{LR}	G_{RT}
Värde [MPa]	12000	360	360	720	720	108

2.3 Extended Finita Element Method (XFEM)

XFEM föreslogs först av Belytschko och Black (1999). Det är en förlängning av den konventionella finita elementmetoden och gör det möjligt att använda lokala anrikningsfunktioner (Melenk och Babuska 1996). I denna undersökning används linjär elastisk brottmekanik (LEFM) med virtuellsprickförslutningsteknik (VCCT).

2.4 Spricka kriterier och energier initiering

Initieringen av spricktillväxt bygger på energi och inträffar när en förutbestämd spricka börjar växa. De spricktillväxtfunktioner som är tillgängliga i Abaqus är en potensfunktion, BK och Reeder. Reeder funktionen användes i denna undersökning, ekvation (4).

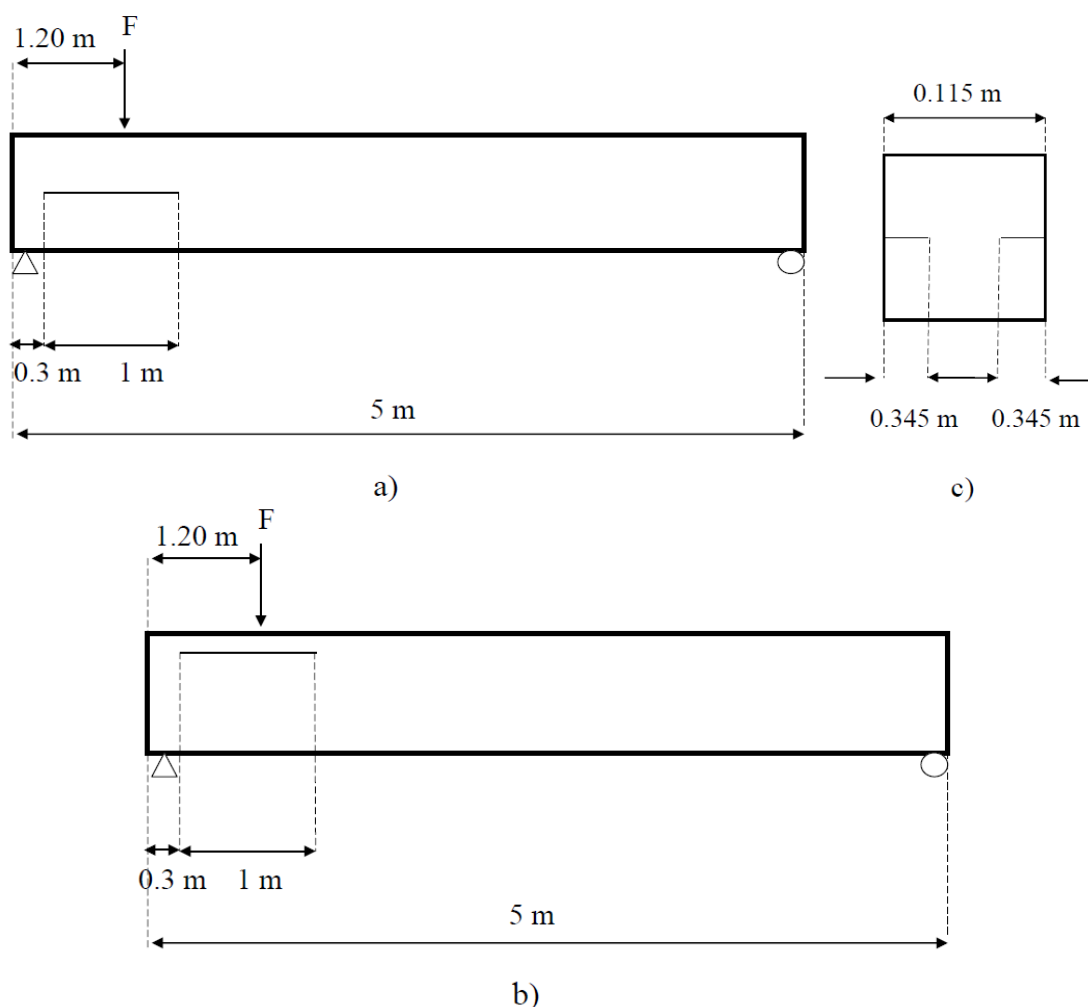
$$G_{equivC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} - G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta + (G_{III} - G_{IIC}) \left(\frac{G_{III}}{G_{II} + G_{III}} \right) \left(\frac{G_{II} - G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta, \quad (4)$$

där G_{equivC} motsvarar brottenergens frisättningshastighet. G_{IC} , G_{IIC} och G_{III} är Mode I, II och III kritiska brottenergens frisättningshastighet för uppkomsten av en spricka. η är en exponent, denna varierades men gav ingen signifikant skillnad i resultat så den sattes till 1. Brottenergierna togs från Haller och Putzger (2005), där $G_{IC} = 179 \text{ J/m}^2$ och G_{IIC} , sattes till 737 J/m^2 .

3 Kalibrering och valideringsexperiment

3.1 kalibrerings experiment

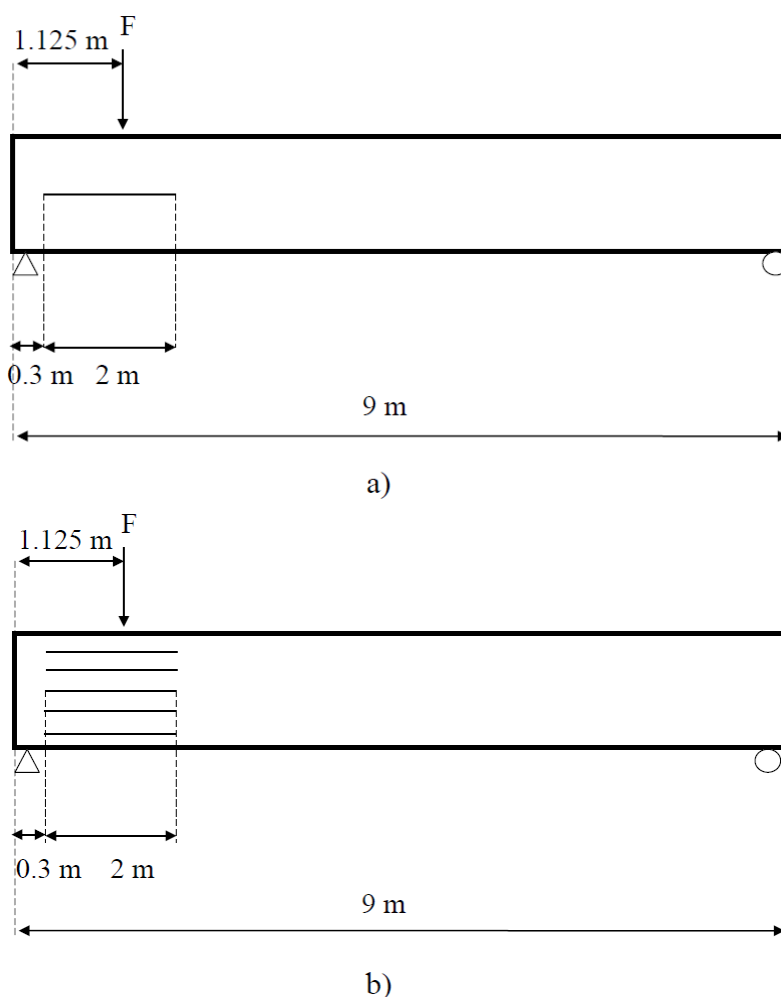
Kalibreringsexperimenten utfördes med hjälp av sex limträbalkar med måtten 5000x115x630 mm (längd x bredd x höjd). Två olika fall av förproducerade sprickor sattes upp och testades i ett trepunkts-böjprov. En 1 meter lång spricka (2,5 mm tjock) gjordes med en cirkelsåg, denna började 0,3 m från kanten. Sprickan sågades (från båda sidor) till ett 30 %igt djup av den totala tjockleken, totalt 60 % av balkens tjocklek. Två olika uppsättningar av sprickor testades med tre olika balkar vardera. Experiment 1, en spricka i botten av lamell nr. 7. Experiment 2, en spricka i mitten av lamell nr. 3, figur 4. Lasten applicerades som en 0,4 m fördelad last, 1,2 m från änden. Stöden var 0,4 m långa.



Figur 4. Balkgeometri och sprickplacering av 5 m limträbalk. En 1 m lång förproducerad spricka **a)** Experiment 1, spricka i mitten, och **b)** experiment 2, spricka toppen. **c)** Ändvy på balk som visar sprickdjup.

3.2 Valideringsexperiment

Valideringsexperimenten utfördes med hjälp av sex limträbalkar med dimension 9000x115x630 mm (längd x bredd x höjd). Balkarna var försedda med förtillverkade sprickor och testades med trepunkts-böjtest. Lasten applicerades som en 0,4 m fördelad last, 1.125 m från änden. En 2 m lång spricka sågades, med en cirkelsåg, med början 0,3 m från kanten. Sprickan sågades till 30 % djup från båda sidor. Stöden var 0,3 m lång. Två olika uppsättningar av sprickor testade med tre balkar vardera. Experiment 3 hade en spricka på den nedre kanten av lamell nr. 7 och experiment 4 utfördes med sprickor i lamellerna 3, 5, 7, 10 och 12, figur 5.



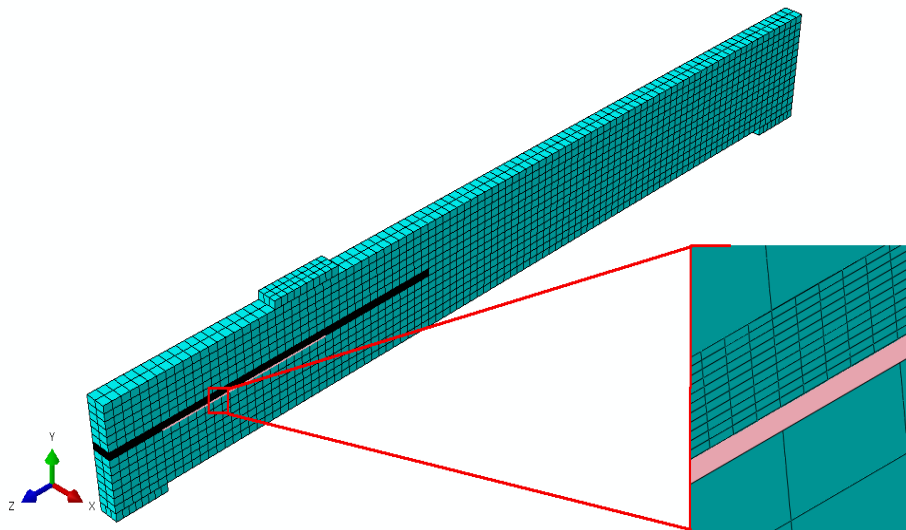
Figur 5. Balkgeometri och spricklågen för 9 m balk. En 2 m lång förproducerade spricka **a)** Experiment 1, central spricka och **b)** experiment 2, flera sprickor.

3.3 Simuleringsmodeller

FE-modellerna som användes för kalibrering och validering hade en kombination av första ordningen och andra ordningens reducerade element (CD3R och C3D20R). Tidssteget var satt till 0,025 sekunder och simuleringen fortsatte tills en spricka hade börjat propagera. I figur 6 ses modellen av den spruckna balken. Lasten applicerades med hjälp av förskjutningskontroll. Stödet modelleras som elastiskt med hjälp av en materialmodell som motsvarar stål. Alla numeriska simuleringar utfördes med FE-koden Abaqus 12,2.

3.4 Simuleringsmodell

Limträmodell för 5 metersbalken är skapad av separata delar med dimensionen 1000x45x115 mm (längd x höjd x bredd). De enskilda delarna var fästa vid varandra med hjälp av "tie-villkor". De delar där sprickor modelleras användes första ordningens reducerade element, 12 i höjd och 20 i bredd. De delar där ingen spricka modellerades användes andra ordningens reducerade element, en i höjd och två i bredd. 9-metersmodellerna sattes upp på samma sätt, men med hjälp av separata delar av storleken 1500x45x115 mm (längd, höjd och bredd). I 5 m limträbalksmodellen användes totalt 50798 element och 82102 noder, varav 48048 linjära element. I 9 m limträbalksmodellen användes totalt 86452 element och 142628 noder, därav 81438 linjära element.



Figur 6. Finita element modellen med fint mesh runt sprickan.

4 Resultat

4.1 Sprickors inflytande på last

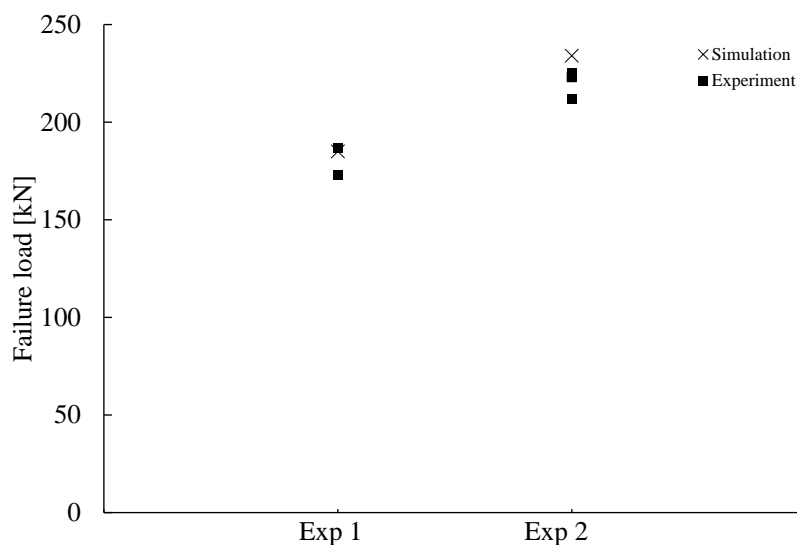
I den experimentella delen av undersökningen testades balkar med olika sprickor, där 60 % av tjockleken av balken avlägsnades. Tabell 2 visar brottlasten och den procentuella belastningsminskningen jämfört med teoretiskt beräknade värden. Läget för pålastningen och spricklängder kan ses i figurerna 3 och 4. Tabell 2 visar också att en spricka i mitten av balkarna reducerar lastkapaciteten till 70-80% av en hel balk. Sprickor högre upp i balken, vid lamell 3, minskar bärigheten till 90 % av en hel balk. 9 m balken med flera sprickor har en bärighet på 70 %, vilket inte är mycket lägre jämfört med en central spricka.

Tabell 2. Experimentella brottlastresultat och en jämförelse med teoretiskt beräknade värden.

Exp.	Balk längd (m)	Lastläge (m)	Spricka start-slut (m)	Spricka i Lamell nr.	Brottlast (N) och variation	Brottläge (lamell nr.)	Brottlast (%)
1	5	1.20	0.3-1.5	7	180±11	7	72±5
2	5	1.20	0.3-1.5	3	220±8	3	88±3
3	9	1.125	0.3-2.3	7	182±16	7	83±5
4	9	1.125	0.3-2.3	3,5,7,10,12	159±14	7,3	73±6

4.2 Sprickinitiering och kalibrering

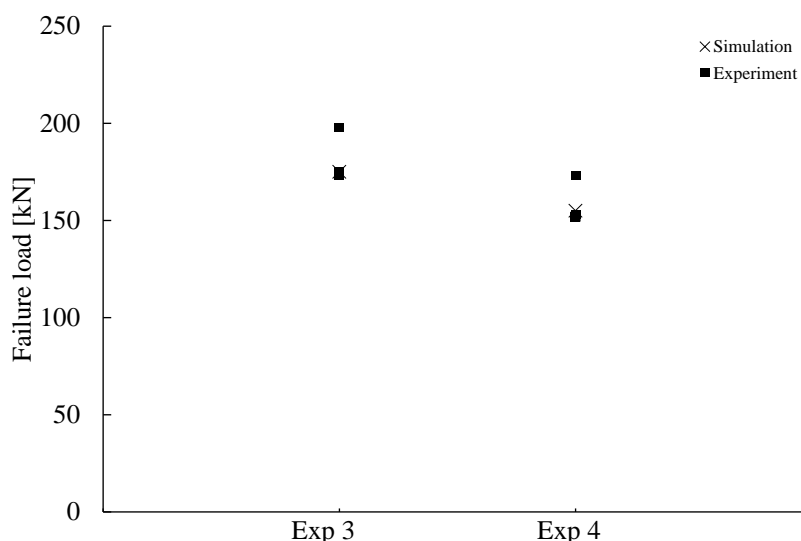
I FE-modellen behövs sprickenergier för att kunna simulera sprickinitieringen/propagering. Mode I och Mode II energier hittas i litteraturen medan Mode III inversmodellerades med hjälp av resultaten från experiment med 5 metersbalkarna. Mode III visade sig vara 1500 J/m². Detta värde ligger nära resultatet av Ehart *et al.* (1999), dvs. att Mode III är 6-7 gånger högre än Mode I. Figur 7 visar de simulerade resultaten tillsammans med de experimentella resultaten för 5 metersbalken.



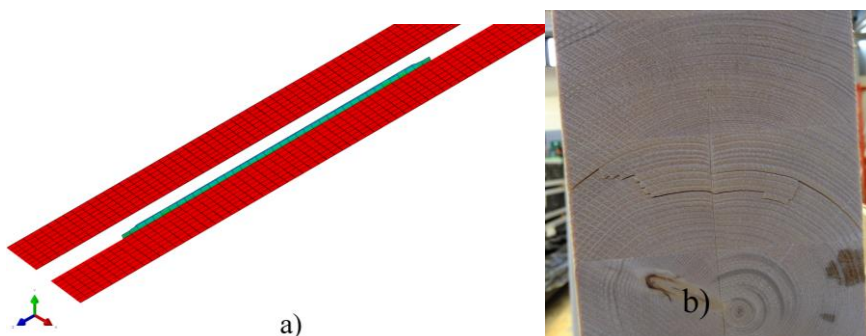
Figur 7. Experimentella värden för brottlasten för 5 metersbalken tillsammans med de kalibrerade brottlasterna från simuleringarna.

4.3 Simulerad belastning

För att validera FE-modellen simulerades experimenten med 9 metersbalkarna. Försök 3 och 4 var en spricka i lamell nr. 7 och flera sprickor i olika lameller. Figur 8 visar att de simulerade resultaten ligger inom den experimentella variationen, men i underkant. För simuleringen av experiment 4, inträffade sprickbildning endast i lamell nr. 7. De experimentella sprickorna inträffade i tre lameller, i lamell 3 och 7, endast lamell 3 och endast lamell 7. Den simulerade sprickan började propagera i RT- riktning, se figur 9a. De flesta av sprickorna från experimenten visade ett liknande beteende som visas i figur 9b.



Figur 8. Experimentella värden för brottlasten för 9 metersbalken tillsammans med de simulerade brottlasterna.



Figur 9. a) sprickutbredning, med användning XFEM är i RL och RT riktning. b) sprickorna i experimenten visar liknande beteende.

Organisation: TräCentrum Norr	Författare:	Utgåva: 1.0	Status: Klar
Dokumenttyp: Slutrapport delprojekt	Filnamn: Slutrapport Sprickor_i_balkar_FE.doc	Datum 2014-06-09	Sida: 13(18)

5 Slutsatser

En ortotropisk elastisk modell med XFEM för spricktillväxtinitiering undersöktes med avseende på dess förmåga att producera tillförlitliga brottlaster. Simuleringar av spricktillväxt på trepunkts-böjtest på limträbalkar med längden 5 och 9 m utfördes. Experimenten användes för att kalibrera och validera simuleringsmodellen. Resultaten visar att modellen kan förutsäga brottlasten med god överensstämmelse. Lastreduktionen när 60 % av bredden tagits bort är 70-90 %, beroende på lastfall. Enligt dessa resultat, bör mindre djupa sprickor i limträbalkar innebära en lägre lastreduktion och därför vara mindre farliga.

Alla experiment gav instabila sprickor och XFEM kan inte simulera detta fenomen. Emellertid, när det gäller initiering av sprickorna är XFEM tillräcklig. Kalibrering och validering har gjorts med hjälp av två balklängder (5 och 9 m) och en tvärsnittsarea. Om modellen kan förutsäga brottlast på limträbalk av andra dimensioner är osäkert och borde testas.

Även 3 m balkar med samma tvärsnitt som 5 och 9 m balkarna testades. Men då dessa balkar förmodligen inte kan klassificeras som långa slanka (så att klassisk balkteori kan användas) så avbröts försöken.

Tidigare har experiment på kortare balkar gjorts. Där sågade man en spricklängd som var hela balkens längd och mestadel på ena sidan. Modellen i denna rapport har inte kunnat prediktera dessa balkars brottlast. Huruvida detta beror på att experimenten utfördes på ett annat sätt. T.ex. om balken har klämt ihop spricksidan och ett annat sprickinitieringsfenomen inträffat eller om modellen inte funkar för kortare balkar etc. går inte att bedöma (då författaren inte var med i de första experimenten).

Bilagor

9 meter balk (bilder)

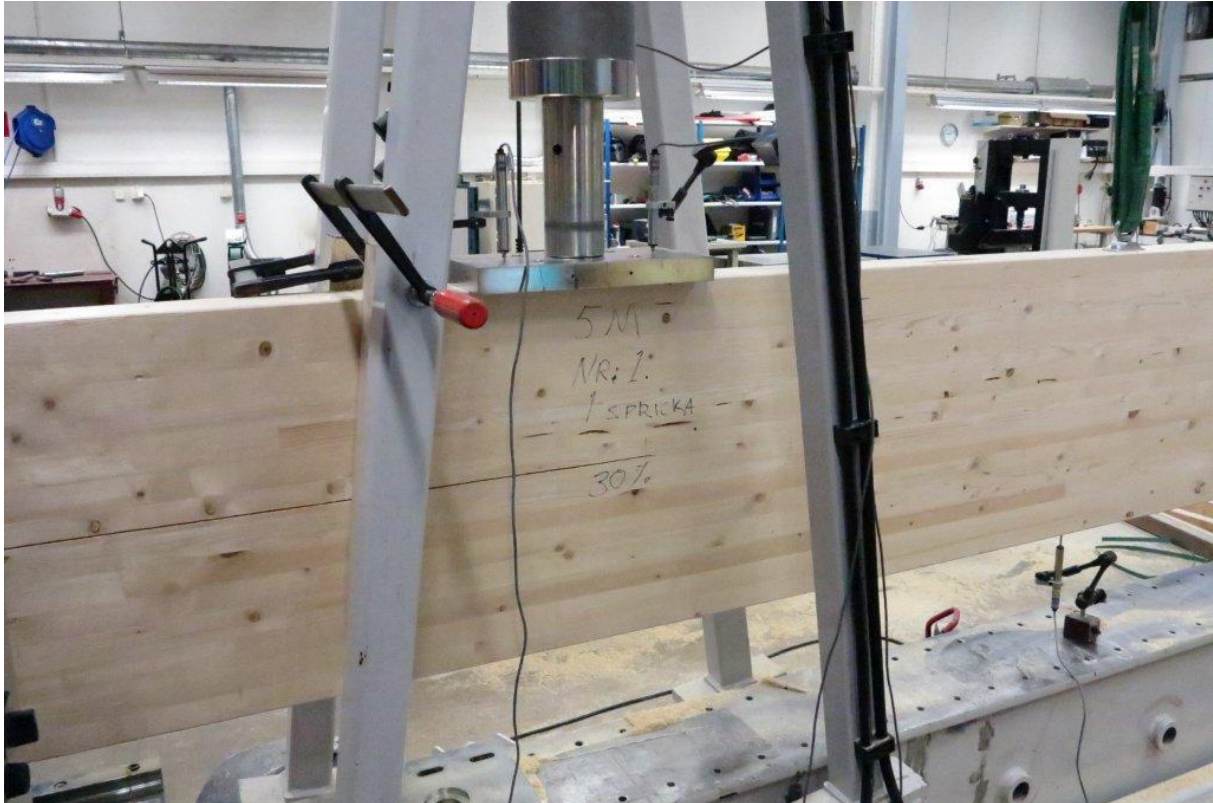


Organisation: TräCentrum Norr	Författare:	Utgåva: 1.0	Status: Klar
Dokumenttyp: Slutrapport delprojekt	Filnamn: Slutrapport Sprickor_i_balkar_FE.doc	Datum 2014-06-09	Sida: 15(18)





5 meter balk (bilder)



Om TräCentrum Norr

TräCentrum Norr finansieras av de deltagande parterna tillsammans med medel från Europeiska Regionala Utvecklingsfonden (Mål 2), Länsstyrelsen i Norrbottens län samt Region Västerbotten.

Deltagande parter i TräCentrum Norr är: Lindbäcks Bygg AB, Holmen Timber, Martinsons Trä AB, SCA Forest Products AB, Norra Skogsägarna, Setra Group AB, Sågverken Mellansverige, SÅGAB, Sveaskog AB, Luleå tekniska universitet, Skellefteå kommun och Piteå kommun.



En investering för framtiden

