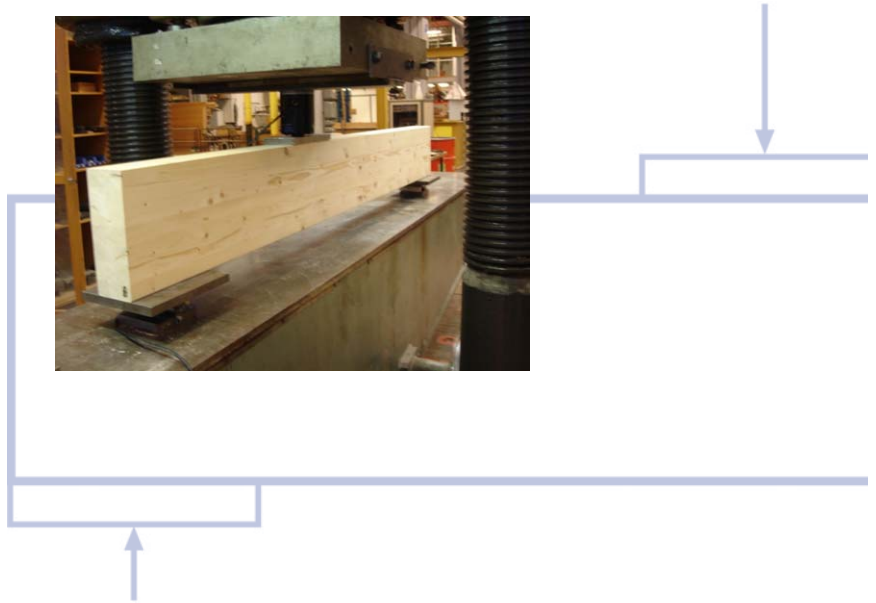
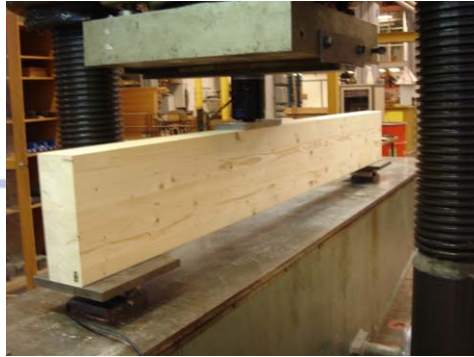




LUND
UNIVERSITY



TRÄS SKJUVHÅLLFASTHET OCH LIMTRÄBALKARS TVÄRKRAFTSKAPACITET - Provningar och beräkningar

DANIEL ANDERSON och JOHAN ODÉN

Structural
Mechanics

Master's Dissertation

Department of Construction Sciences
Structural Mechanics

ISRN LUTVDG/TVSM--09/5159--SE (1-107)
ISSN 0281-6679

TRÄS SKJUVHÅLLFASTHET
OCH LIMTRÄBALKARS
TVÄRKRAFTSKAPACITET
- Provningar och beräkningar

Master's Dissertation by
DANIEL ANDERSON och JOHAN ODÈN

Supervisors:

Per Johan Gustafsson, Professor
och Susanne Heyden, PhD
Div. of Structural Mechanics

Arne Emilsson
Limträteknik AB, Falun

Roberto Crocetti
Töreboda-Moelven AB, Töreboda

Examiner:

Kent Persson, PhD
Div. of Structural Mechanics

Copyright © 2009 by Structural Mechanics, LTH, Sweden.
Printed by KFS I Lund AB, Lund, Sweden, June, 2009.

For information, address:
Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: <http://www.byggmek.lth.se>

Förord

Denna rapport skrevs som examensarbete vid Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Byggnadsmekanik, och i samarbete med Limträteknik AB i Falun samt Töreboda-Moälven AB i Töreboda. Uppkomsten av problemformuleringen till arbetet härstammar från diskussioner med Arne Emilsson på Limträteknik AB och Prof. Per Johan Gustafsson.

Vi skulle vilja tacka personalen på Byggnadsmekanik, och särskilt våra handledare TeknD. Susanne Heyden och Prof. Per Johan Gustafsson, för all hjälp under arbetets gång och stöd till att färdigställa detta examensarbete.

Lund, maj 2009

Daniel Anderson Johan Odén

Abstract

Following changes on a European level, there are plans to also in Sweden reduce the characteristic value of shear strength of glued-laminated timber. In Sweden, a decrease of approximately 30% from a characteristic value of 4.0 MPa (for glulam L40) to 2.5 or 3.0 MPa is planned. This would mean that wood would lose competitiveness against other construction materials such as steel and concrete.

The objective of this work was primarily to, through calculations and shear tests, try to clarify whether a reduction in the characteristic value is justified. The tests included the shear capacity of standard shear strength test specimens and tests of shearing force capacity in glulam beams.

The European standard method for determining shear strength of wood is denoted EN408. This method uses glue to attach the load plates of steel onto the test specimen. In this work, two modified test methods have been evaluated: "EN408-skruv" and "EN408-krycka." These alternatives were chosen in order to avoid the risk of fracture in the glue joints and to achieve more pure state of shear stress. In total, 16 material tests were performed. These consisted of specimens of rectangular and I-shaped cross sections of glued laminated wood, L40, and resulted, respectively, in mean shear strengths of 4.2 MPa and 7.1 MPa. The width of the rectangular cross section was 115 mm. The I-section was manufactured by milling the rectangular cross section, and had a web width of 55 mm.

Measurements and calculations of the shearing force capacity of beams were performed to investigate the influence of cross-sectional shape (rectangular and I- cross- section), compressive or tensile stress perpendicular to the beam, an overhang and the effect of bending moment at the middle support in a continuous beam with three supports. The results showed for the rectangular section a mean shear strength of 4.6 MPa and for the I-cross- section 6.1 MPa. Normal stress perpendicular to the beam had, as well as an overhang, little or no impact. The shearing force capacity at a middle support was increased by about 20%. Each test series included only 4 nominally equal specimens. However, with an assumption that the characteristic five percent fractile is 0.67 times the mean value, the reduction of the characteristic value from 4.0 MPa to about 3.0 MPa may be justified for the rectangular cross section, but not for a beam with an I- cross- section.

Sammanfattning

Mot bakgrund av förändringar på europeisk nivå, finns det planer på att också i Sverige sänka det normmässiga värdet på träs skjuvhållfasthet. I Sverige planeras en sänkning med ca 30 % från ett karakteristiskt värde på 4,0 MPa (avser limträ L40) till 2,5 eller 3,0 MPa. Detta skulle innebära att trä förlorar i konkurrenskraft mot andra konstruktionsmaterial som stål och betong.

Målet med detta arbete var primärt att genom beräkningar och provningar försöka klarlägga om en sänkning av normvärdet är befogad. Provningarna omfattade materialprovningar av träs skjuvhållfasthet och balkprovningar av tvärkraftskapacitet.

Standardmetoden EN408 användes för att bestämma träs skjuvhållfasthet. I denna metod användes lim för att fästa belastningsplattor av stål på provkroppen. I detta arbete har två modifierade provningsalternativ testats: ”EN408-skruv” och ”EN-408-krycka”. Dessa alternativ valdes för att ta bort risk för limfögbrott och för att få ett jämnare och mer renodlat skjuvspänningstillstånd. Totalt gjordes 16 materialprovningar. Dessa avsåg rektangulära tvärsnitt och I-tvärsnitt av limträ L40 och gav medelskjuvhållfastheterna 4,2 MPa respektive 7,1 MPa. Det rektangulära tvärsnittet hade bredden 115 mm och I-tvärsnittet hade livtjockleken 55 mm och var tillverkat genom fräsning av rektangulärt 115 mm tvärsnitt.

Provningar och beräkningar av balkars tvärkraftskapacitet gjordes för att undersöka inverkan av tvärsnittsform (rektangulärt tvärsnitt och I-tvärsnitt), inverkan av tryckande och dragande normalspänning vinkelrätt balken, inverkan av överkragning vid upplag och inverkan av böjmoment vid inre stöd i en kontinuerlig balk. Resultaten visade för rektangulärt tvärsnitt medelskjuvhållfastheten 4,6 MPa och för I-tvärsnitt 6,1 MPa. Tryckande och dragande normalspänning hade, liksom överkragning, endast liten eller ingen inverkan. Tvärkraftskapaciteten vid ett inre stöd var förhöjd med ca 20 %.

Varje provserie omfattade endast 4 nominellt lika provningar. Emellertid, med ett schablonmässigt antagande om att det karakteristiska 5 % fraktilvärdet är 0,67 gånger medelvärdet fås att sänkning av det karakteristiska värdet från 4,0 MPa till ca 3,0 MPa kan vara befogad för rektangulära tvärsnitt, men knappast för I-tvärsnitt.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund, syfte och avgränsningar	1
1.1.1	Bakgrund.....	1
1.1.2	Syfte	1
1.1.3	Avgränsningar.....	2
1.1.4	Metodik.....	2
1.2	Om trä, skjuvning och limträ.....	3
1.2.1	Allmänt om träs struktur	3
1.2.2	Skjuvspänning.....	4
1.2.3	Limträ.....	6
2	En inledande litteraturstudie.....	7
2.1	Normer om skjuvning.....	7
2.2	Allmänt om beräkning av träs bärförmåga.....	8
2.3	Brottkriterium vid fleraxlig spänning.....	9
2.4	Spänningskoncentrationer	13
2.5	Weibulls teori och storlekseffekt.....	14
2.5.1	Storlekseffekt	15
2.5.2	Svagaste länken-teori	15
3	Standardmetoden för skjuvhållfasthetsprovning – beskrivning, analys och modifieringar.....	17
3.1	Introduktion.....	17
3.2	Allmänt om standardprovningmetoden EN408.....	17
3.3	Spänningsanalys och diskussion om EN408.....	19
3.3.1	Limförband – ojämnt fördelad skjuvspänning.....	21
3.3.2	Normalspänning vinkelrätt fibrerna.....	23
3.3.3	Påverkan på resultat i EN408 av brott i limfogen.....	24
3.4	Beskrivning och analys av EN408- skruv och EN408- krycka.....	24
3.4.1	Beskrivning av EN408 med skruvar	25
3.4.2	Beskrivning av EN408 med vinklade stål.....	29
3.5	Beräkning med Norris-Mckinnons brottkriterium	33

4	Materialprovning av limträskjuvhållfasthet	35
4.1	Introduktion	35
4.2	Provmaterial, provplan, utrustning och provuppställningar	35
4.2.1	Provmaterial	35
4.2.2	Provplan	36
4.2.3	Beskrivning av provningsutrustning och provuppställningar	36
4.3	Provningsresultat vid prov enligt EN408- skruv	39
4.4	Provningsresultat vid prov enligt EN408- krycka	42
4.5	Sammanställning av resultatet från provningar och beräkningar	43
5	Provning och analys av limträbalkars tvärkraftskapacitet	47
5.1	Introduktion	47
5.2	Diskussion inför val av provuppställning	47
5.3	Provmaterial, provplan, utrustning och provningsgenomförande	49
5.3.1	Provmaterial	49
5.3.2	Provplan	49
5.3.3	Beskrivning av provningsutrustning	49
5.4	Antaganden och metod vid spänningsanalyser med FEM	50
5.5	Balkserie 1, tvåstödsbalk med rektangulärt tvärsnitt	51
5.5.1	Introduktion	51
5.5.2	Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt BKR	51
5.5.3	Spänningsanalys med FEM	53
5.5.4	Provningsresultat	55
5.6	Balktyp 2: Tvåstödsbalk med I-tvärsnitt	58
5.6.1	Introduktion	58
5.6.2	Provningsuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt norm ..	58
5.6.3	Spänningsanalys med FEM	60
5.6.4	Provningsresultat	61
5.7	Balktyp 3: Tvåstödsbalk med I-tvärsnitt och överkragning	65
5.7.1	Introduktion	65
5.7.2	Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet	65
5.7.3	Spänningsanalys med FEM	67

5.7.4	Provningresultat.....	68
Balktyp 4:	Tvåstödsbalk med I-tvårsnitt och tryckkraft vinkelrätt fiber.....	71
5.7.5	Introduktion.....	71
5.7.6	Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt norm	71
5.7.7	Spänningsanalys med FEM.....	74
5.7.8	Provningresultat.....	75
5.8	Balktyp 5: Tvåstödsbalk med I-tvårsnitt och dragkraft vinkelrätt fiber.....	78
5.8.1	Introduktion.....	78
5.8.2	Uppställning.....	78
5.8.3	Spänningsanalys med FEM.....	80
5.8.4	Provningresultat.....	81
5.9	Balktyp 6: Trestödsbalk med I-tvårsnitt.....	84
5.9.1	Introduktion.....	84
5.9.2	Uppställning.....	85
5.9.3	Spänningsanalys med FEM.....	87
5.9.4	Provningresultat.....	89
5.10	Sammanställning av resultat och diskussion från balkprovningar och beräkningar.....	92
6	Avslutande jämförelse, slutsatser och kommentarer	95
6.1	Sammanställning av skjuvhållfasthet enligt material- och balkprovningarna ...	95
6.2	Slutsats om metod för provning av träets skjuvhållfasthet	96
6.3	Slutsatser om inverkan av en balks utformning och upplagsförhållanden.....	96
6.4	Slutsats om undersökta brottkriterier	98
6.5	Slutsats om limträskjuvhållfasthet.....	98
7	Förslag på fortsatt arbete	101
8	Referenser	103

1 Introduktion

1.1 Bakgrund, syfte och avgränsningar

1.1.1 Bakgrund

Mot bakgrund av förändringar på europeisk nivå, finns det planer på att också i Sverige sänka det normmässiga värdet på träskjuvhållfasthet. I Sverige planeras en sänkning med ca 30 % från ett karakteristiskt värde på 4,0 MPa (avser limträ) till 2,5 eller 3,0 MPa. Detta skulle i så fall innebära att trä förlorar i konkurrenskraft mot andra konstruktionsmaterial som stål och betong. Det finns därför ett behov av att klarlägga om en sådan sänkning är befogad och att undersöka om de nuvarande grova metoderna för beräkning av balkars bärförmåga med hänsyn till tvärkraftsbrott kan förfinas.

Det konventionella sättet att bestämma karakteristisk skjuvhållfasthet för konstruktionsvirke, kallad EN408, jämförs i denna rapport med två andra alternativ. De aktuella träprovkropparna har två sorters tvärsnitt, rektangulärt respektive I-tvärsnitt, vars olika egenskaper även provas i balktester. I dessa provningar av limträbalkar, undersöks främst hur olika spänningar vinkelrätt fibrerna som verkar samtidigt med en skjuvspänning påverkar träets skjuvhållfasthet.

Som en del i arbetet ingår att utforma eller välja någon provningsmetod och att göra spänningsanalys av aktuell provkropp. I en balk är tvärkraften och därmed skjuvspänningarna normalt störst vid balkens upplag. Med nuvarande beräkningsmetoder predikteras skjuvbrott på enkelt sätt från enbart storleken av nominell skjuvspänning. Sammanställning av tidigare resultat samt jämförelser mellan experimentella provningar, beräkningsanalyser (Abaqus) och dagens byggnormer förväntas ge information om huruvida det är befogat att sänka normmässigt värde på träskjuvhållfasthet.

1.1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är primärt att genom materialprovningar av limträskjuvhållfasthet och provningar av limträbalkars tvärkraftskapacitet, försöka klarlägga ifall en sänkning av normvärdet på skjuvhållfastheten för limträ är befogad. Speciellt kommer inverkan av drag- och tryckspänning tvärs fiberriktningen i balken att undersökas. Ett annat syfte är att utvärdera hur bra tre olika beräkningsmetoder, där olika spänningsberäkningsmetoder och brottkriterier används, kan förutsäga balkbrott. Dessutom syftar arbetet till att föreslå en ny, förbättrad metod för testning av skjuvhållfasthet hos trä

1.1.3 Avgränsningar

I detta arbete avgränsas resultatet av att träprovkropparna:

- Endast är utsatta för kortvarig belastning.
- Har jämn fuktkvot genom hela tvärsnitten, pga konstant klimat.
- Består av en typ av limträ, nytillverkat och därför fritt från ev torksprickor.
- För materialprovning tillverkade i limträ av en dimension: $B \times H = 115 \times 125 \text{ mm}^2$.
- För balkprovning tillverkade i limträ av en dimension: $B \times H = 115 \times 315 \text{ mm}^2$.
- I finita elementberäkningarna modellerats som ett linjärelastiskt ortotrop material i två dimensioner.

1.1.4 Metodik

Arbetet består dels av materialprovningar, där syftet är att bestämma skjuvhållfastheten hos trä utsatt för så renodlat skjuvspänningstillstånd som möjligt, och dels av balkprovningar där tvärkraftskapaciteten för balkar bestäms för några olika konfigurationer.

En spänningsanalys med finita elementmetoden har utförts för standardmetoden för materialprovning, EN408. Den påvisar normalspänning tvärs fiberriktning och en ojämn skjuvspänningsfördelning, vilket inte är önskvärt. Efter finita elementanalys av spänningsfördelningen i några uppställningar som förväntas ge renare och jämnare skjuvspänningstillstånd valdes två alternativa testmetoder ut. Dessa användes för att mäta skjuvhållfastheten för ett antal träprovkroppar. Provresultaten jämfördes med beräkningsresultat för tre olika metoder (konventionell handräkningsmetod och finita elementmetoden med två olika brottkriterier) för att undersöka hur väl dessa kunde förutspå brottet.

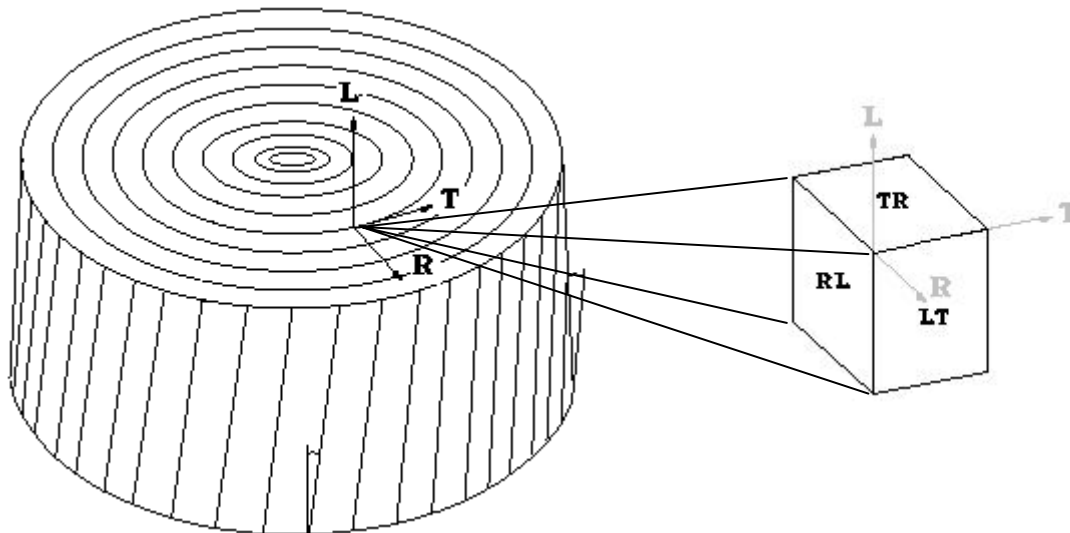
Balkprovningar har utförts för ett antal olika fall. Uppställningarna utformades så att balkarna utöver skjuvspänning utsattes för bl.a. drag resp. tryck tvärs fiberriktningen, och samtidigt moment. Balkarna hade också olika tvärsnittsform, rektangulärt tvärsnitt eller I-tvärsnitt. Inga av dessa parametrar beaktas i dagens svenska byggnormer. Provningarna utfördes för att utröna om dessa parametrars trots allt har inverkan på en balks tvärkraftskapacitet. Provningsresultaten jämfördes med tre olika beräkningsmetoder (konventionell handräkningsmetod och finita elementmetoden med två olika brottkriterier) för att undersöka hur väl dessa kunde förutspå brottet.

1.2 Om trä, skjuvning och limträ

1.2.1 Allmänt om träs struktur

Trä är ett heterogent anisotropt material i både mikroskopisk och i makroskopisk skala. Den heterogena uppbyggnaden består i årsringarna, som längs stammens riktning ger en viss symmetri. Undantagen i symmetrin är de kvistar och snedfibrihet som förekommer samt de varierande egenskaperna mellan vår- och höstved. (Bengt Johannesson, 1984 [1])

Trädstammen kan förenklat betraktas som en cylinder med centrumlinjen längs märengens mitt. Många av träs egenskaper beror på denna cylindersymmetri. För att enklare förstå symmetriplanen kan en liten kub utskuren från stocken betraktas, se Figur 1. Kuben är tillräckligt liten för att kunna anse att årsringarna är "raka" (årsringarnas krökningsradie \gg kubens sidlängd). De tre inbördes ortogonala materialriktningarna är då, enligt Figur 1 nedan, med benämningarna L, R resp. T, parallellt fibrerna, parallellt cylinderns radie och tangentiellt.

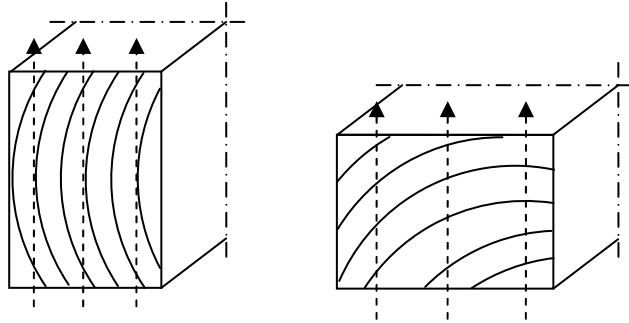


Figur 1: Symmetriplan.

Dessa tre riktningar har olika hållfasthetsegenskaper. Träs deformationsbeteende är av linjär elastisk karaktär med sprött brott vid dragning och plastiskt brott vid tryck. Det senare på grund av att fibrerna knäcks och/eller trycks samman. Den mer markanta skillnaden i hållfasthet är mellan L-riktningen och å andra sidan R- och T-riktningarna. Hållfastheten är flera gånger större vid belastning parallellt fibrerna än vad den är vinkelrätt, speciellt vid dragning. Enligt Bengt Johannesson i "*Brottkriterier för trä*" [1] ger förekomsten av störningar i strukturen i form av tex kvistar, snedfibrihet och kådlåpor emellertid osäkerhet vid bestämning av träs hållfasthetsegenskaper. Den största svårigheten anses ligga i att variationen av störningar i strukturen är stor mellan olika virkesbitar. De konventionella brottkriterierna som används i praktiken baseras på ett

deterministiskt tänkande, vilket leder till att en enskild provkropp med ”dåliga” mätvärden påverkar en hel population när hållfasthetsegenskaperna fastställs statistiskt.

Det finns ytterligare ett problem när teori för hållfasthetsberäkning av trä kopplas till verkligheten. De flesta brottkriterier förutsätter att orienteringen av L-, R- och T-riktningarna är kända. Men den varierande orienteringen av dessa riktningar orsakar, för virke som används i praktiken, att de inte är lika väldefinierade som i fallet med en liten kub, se Figur 2.

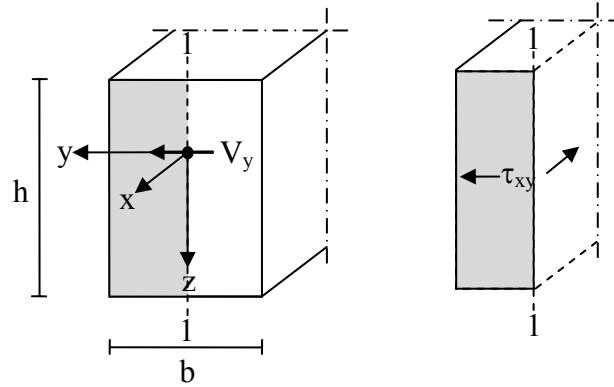


Figur 2: Problem vid definiering av vinkelrätt fiberriktningen.

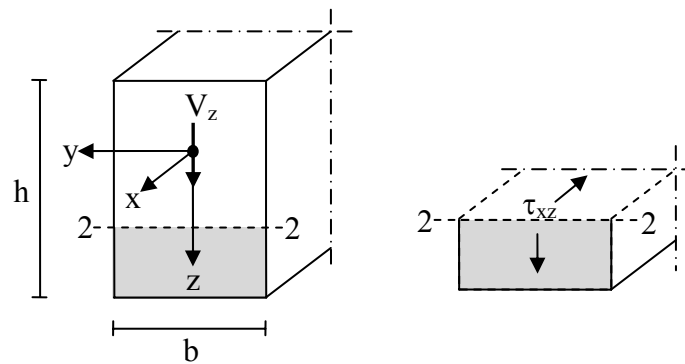
1.2.2 Skjuvspänning

Skjuvning kan ske i tre plan och motsvarande skjuvpåkänningar betecknas τ_{rl} , τ_{tl} och τ_{rt} . De två första avser längsskjuvning och den sista tvärskjuvning, som ibland även benämns rullskjuvning. Hållfastheten τ_{rl} motsvarar att brottytan huvudsakligen ligger i den lösa vårveden och blir därför lägre än τ_{tl} , men i praktiken kan det vara svårt att avgöra i vilken av de två längsskjuvriktningarna som påkänningarna kommer att verka, därför borde det mest naturliga vara att använda det lägsta värdet. Längsskjuvhållfastheten motsvarar då att $f_v = f_{v,rl}$.

I varje balksnitt ska villkoret $\tau \leq f_v$ uppfyllas. Vid rektangulära tvärsnitt kan man enligt Olle Carling i ”Dimensionering av träkonstruktioner” [2] anta att skjuvspänningarna är jämnt fördelade över snitt som är parallella med rektangelns sidor. För ett tvärsnitt som utsätts för en tvärkraft V_y (Figur 3) eller V_z (Figur 4) kan man med linjärelastisk balkteori beräkna skjuvspänningen τ_{xy} i snittet 1-1 och skjuvspänningen τ_{xz} i snittet 2-2 enligt ekvation 1.2-1 respektive 1.2-2. De övrigt ingående variablerna är yttröghetsmomentet, I , och det statiska momentet, S , i aktuella riktningar.



Figur 3: Skjuvspänning orsakad av en tvärkraft V_y .



Figur 4: Skjuvspänning orsakad av en tvärkraft V_z .

$$\tau_{xy}(y) = \frac{V_y}{I_z h} S_z(y)$$

Ekvation 1.2-1

$$\tau_{xz}(z) = \frac{V_z}{I_y b} S_y(z)$$

Ekvation 1.2-2

Den resulterande skjuvspänningen i aktuell punkt får man genom vektoriell addition:

$$\tau = \sqrt{(\tau_{xy})^2 + (\tau_{xz})^2}$$

Ekvation 1.2-3

För kvadratiska och rektangulära tvärsnitt med $V_y = V$ och $V_z = 0$ eller $V_y = 0$ och $V_z = V$ ger ekvation 1.2-3:

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{A}$$

Ekvation 1.2-4

Enligt konventionella dimensioneringsmetoder får man bortse från laster som angriper närmare än balkhöjden från balkens upplag, dvs. skjuvspänningen som uppstår från en tvärkraft beräknas i ett snitt i balken med ett avstånd som motsvarar balkhöjden utifrån centrum av upplaget. Bakomliggande orsak är att man genom försök har kunnat konstatera att punktlaster nära ett upplag ger upphov till betydligt högre tvärkraftskapacitet än motsvarande skjuvspänningar som beräknas med balkteori enligt ekvation 1.2-4 ovan. Detta beteende förklaras med den så kallade *tvåbalksteorin* som innebär att balken antas ha en skjuvvek zon i närheten av upplaget och i höjd med neutrallagret. Skjuvdeformationer i detta område fördelar då om skjuvspänningarna över hela tvärsnittet. Dessutom är skjuvhållfastheten volymberoende och genom att den skjuvkraftspåverkade virkesvolymen blir mindre ju närmare upplaget lasten angriper bidrar detta till att minska inverkan av lasten. Vidare kan de tryckspänningar vinkelrätt fibrerna som finns nära ett upplag ha gynnsam effekt på materialets skjuvspänningskapacitet.

1.2.3 Limträ

Genom att limträ är uppbyggt av många lameller av konstruktionsvirke ökas spridningen av defekter, vilket gör att limträ är ett mindre inhomogent material än konstruktionsvirke. I Sverige tillverkas limträ normalt i hållfasthetsklassen L40 och kallas L-trä om det har minst fyra lameller och tillverkas med metoder som är certifierade av Svensk Limträkontroll. Limträ som har färre än fyra lameller tillverkas och kontrolleras även det med samma rutiner som för L-trä, men kallas istället limmat konstruktionsvirke. Detta limträ har samma egenskaper som L-trä utom vad gäller hållfastheten som är något lägre. (Limträhandbok, 2001 [3]) Det material som behandlas i denna rapport är uteslutande L-trä som, i konstruktioner, används mer än limmat konstruktionsvirke.

2 En inledande litteraturstudie

2.1 Normer om skjuvning

De europeiska standarderna EN338 och EN384 anger hållfasthetsvärden för olika virkesklasser. Man placerar ett visst virke i en böjhållfasthetsklass, baserat på dess elasticitetsmodul och densitet. Karakteristisk skjuvhållfasthet beräknas genom Ekvation 2.1-1.

$$f_{v,k} = 0,2 \cdot f_{m,k}^{0,8}$$

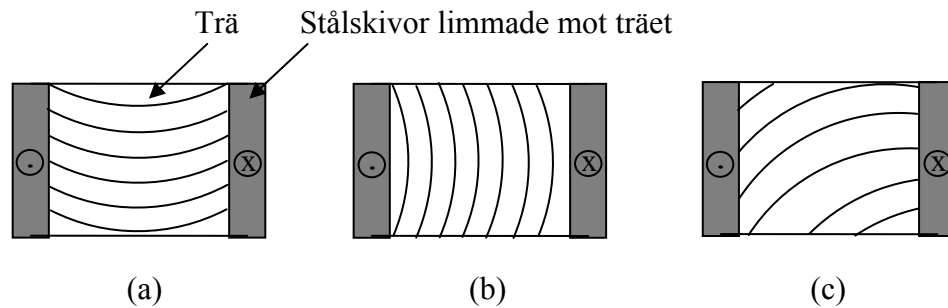
Ekvation 2.1-1

dock max 3,8 MPa. Uttrycket indikerar att skjuvhållfastheten ($f_{v,k}$) ökar med ökad böjhållfasthet ($f_{m,k}$), och därigenom med ökad densitet, upp till $f_{m,k} = 40$ MPa. I motsats till detta använder den tyska normen DIN1052 ett konstant värde på skjuvhållfastheten, oberoende av hållfasthetsklass. Det innebär i jämförelse att upp till klass C24 är skjuvhållfastheten högre i DIN1052, än i EN338, samt att över klass C 30 innehåller den tyska normen lägre värden än i EN338. Orsaken till detta är att i DIN1052 argumenteras det för att högre densitet inte konstaterat har en positiv effekt, samt att en högre kvistandel i de lägre klasserna leder till bättre skjuvhållfasthet. Anhängare av den tyska normen menar att det inte finns tillfredställande testmetoder som tar hänsyn till faktorer som dimensionerna på tvärsnittet, sågsnitt och sprickor.

Poussa-Tukiainen skriver i sin rapport ”Experimental study of compression and shear strength of spruce timber” [4] att det finns testresultat som tyder på att skjuvkapaciteten är praktiskt taget oberoende av virkesklass och att tyska provningsresultat gav samma karakteristiska skjuvhållfasthet på 3,8 MPa vare sig det gällde C18 eller C30 (gran). De fann t.o.m. att i enstaka fall var värdet högre vid lägre klasser. Resultaten från testerna som utfördes visade att den karakteristiska skjuvhållfastheten var 3,9 MPa för gran och 4,2 MPa för furu. Försök utfördes även på balkar med I-tvärsnitt och resultaten visade, för båda träslagen, 60 % högre värden för ett I-tvärsnitt jämfört med skjuvhållfasthetsprovning av ett rektangulärt tvärsnitt enligt standardprovmetoden EN408.

Den europeiska standarden EN408 beskriver en testmetod för provning av skjuvhållfasthet. Denna publicerades efter EN338 resp. EN384. Försök enligt EN408 har gjorts av *Denzler-Glos* i ”Determination of shear strength values according to EN408” [5] i syfte att jämföra resultatet med tidigare karakteristiska värden enligt EN338 och EN384. De hade 382 provbitar av gran (*Picea abies*) som undersöktes enligt EN408. Virket var från sex olika ursprung som är representativa för virke som används i Tyskland. Bitarna indelades i grupper beroende på densitet (klasstillhörighet), årsringsorientering och kvistandel. Totalt 260 felfria provbitar förbereddes och delades in i undergrupper

motsvarande hållfasthetsklasserna i EN338, i enlighet med bestämmelserna om densitet i EN384. De tre olika sågsnitten radiellt, tangentiellt och 45 graders vinkel (Figur 5) fördelades jämt över de fem undergrupperna. De övriga provbitarna testades separat, 20 st innehöll märe och 102 st innehöll kvistar.



- ⊙ Stålskiva som är dragbelastad
- ⊗ Stålskiva som är tryckbelastad

Figur 5: Årsringsorientering bland provbitarna. (a) radiellt, (b) tangentiellt, (c) blandad orientering. Provkropparnas tvärsnittsarea är 32 x 55 mm², längd 300 mm.

Endast de provbitar där brottet skedde tillfredställande inkluderades i resultatet av undersökningen. Brott i limfogen godkändes tex inte. Sett över alla fem undergrupper och sågsnitt landade medelvärdet av skjuvhållfastheten på 5,5 MPa med lägsta värdet på 3,0 MPa. 5 %- fraktilen var 4,0 MPa. Provbitar som hade årsringarna orienterade radiellt visade sig ha högst skjuvhållfasthet, medelvärden från ca 5 MPa till ca 7 MPa, beroende av densitet. Bitar med blandad orientering, en vinkel på 45 grader, hade marginellt högre hållfasthet än de med tangentiella årsringar. Förklaringen till att de radiella provbitarna visade högst värden kan vara att skjuvkapaciteten är högre i den så kallade höstveden än i vårveden. I provbitarna med tangentiell och blandad orientering på årsringarna sker skjuvningen i större andel vårved än i fallet med radiellt orienterade årsringar.

Resultatet från *Denzler-Glos* tester visade att densiteten i sig hade positiv inverkan på skjuvhållfastheten. Men inom varje hållfasthetsklass, enligt EN338, var variationen stor i uppmätt densitet och testad skjuvhållfasthet. Pga. den stora variationen kunde tillförlitliga resultat på att högre hållfasthetsklasser (och därmed högre densitet) skulle ha högre skjuvhållfasthet inte fastställas.

2.2 Allmänt om beräkning av träs bärförmåga

En träkonstruktions bärförmåga beror på många faktorer, förutom de som nämnts tidigare, och är svår att bestämma med stor noggrannhet. Det finns ett flertal olika brotteorier, men de syftar alla till att försöka återspegla träets egentliga egenskaper. Själva brottförloppet är en process som under en kortare eller längre tid påverkar träfibren, vilka reagerar olika beroende på om de belastas med drag, tryck eller

skjuvning. Brottet initieras på makronivå av lokalt höjda spänningar orsakade av defekter i virket. Variationen på dessa defekter bidrar till problemen med att kunna bestämma kvaliteten och de hållfasthetsvärden som används blir då ett medelvärde över området i det aktuella brottsnittet.

Karaktären på träs brottprocess vid tryckbelastning är ett elastiskt-plastiskt beteende, speciellt vinkelrätt fibrerna. Egenskaperna varierar med träslag, men åtminstone svensk gran och furu har sådant beteende vid tryckbelastning. Utsätts rent kvistfritt trä däremot för dragning passar *Griffith's sprödbrottsteori* bättre. Den innebär att det finns initiella små sprickor som snabbt utvidgas när belastningen uppnår kritiska värden. Svaga fibrer slits av först och omfördelar belastningen till de omgivande starkare fibrerna som även de når maximal kapacitet. Brottförloppet liknar det som händer i större skala, fast då verkar defekter såsom kvistar, kådlåpor, torksprickor o.s.v. som brottutlösande faktorer.

Hållfasthetsvärden som tagits fram i försök är normalt en medelhållfasthet beräknad över en plan yta. Detta utgör endast en formell brottyta, för det är mer vanligt att ytan är mycket ojämn. Det innebär att det framtagna hållfasthetsvärdet endast är ett medelvärde, inte det verkliga värde som kan uppnås lokalt i små delar av brottytan. Som nämnts i tidigare kapitel är träs struktur och materialets huvudriktningar L, R och T varierande i tex en balk. Detta medför, som ett exempel, att spänningarna vid böjning av en balk inte är parallella med fibrerna, utan det förekommer snarare ett tredimensionellt spänningsfält.

2.3 Brottkriterium vid fleraxlig spänning

Med fleraxlig påkänning brukar för ortotropa material som trä menas att det förekommer spänningskomponenter i mer än en av materialets huvudriktningar. När det gäller trä måste påkänningarna ställas mot de olika hållfasthetsvärdena för de tre materialriktningarna vilket leder till att sambanden blir mer komplicerade än vid beräkningar med tex stål. Exempel på ett uttryck för problem av flerdimensionell karaktär är det som *Hankinson* föreslog för att uppskatta tryckhållfastheten f_{α} vid en tryckspänning, $\sigma_{\alpha c}$, med en vinkel, α , mot fibrerna, se Ekvation 2.3-1 nedan.

$$f_{\alpha c} = \frac{f_{1c} \cdot f_{2c}}{f_{1c} \cdot (\sin^2 \alpha) + f_{2c} \cdot (\cos^2 \alpha)}$$

Ekvation 2.3-1

där brottvillkoret är $\sigma_{\alpha c} \leq f_{\alpha c}$. Beteckningarna f_1 och f_2 är tillhörande hållfasthet i materialriktning 1 respektive materialriktning 2 (L, R eller T, se Figur 1).

Jenkins föreslog ett mer generellt uttryck där en spänning i vinkel mot fibrerna komponentuppdelas och var för sig jämförs med motsvarande hållfasthetsvärde, se Ekvation 2.3-2 nedan.

$$\begin{cases} \sigma_1 \leq f_1 \\ \sigma_2 \leq f_2 \\ \sigma_{12} \leq f_{12} \end{cases}$$

Ekvation 2.3-2

Indexen på spänningarna, σ , och hållfastheterna, f , står för de aktuella riktningarna L, R eller T och skjuvspänningen, σ_{12} , i motsvarande plan för de valda materialriktningarna.

Norris-McKinnon föreslog ett kriterium för 2-axiellt spänningstillstånd, Ekvation 2.3-3, nedan:

$$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$$

Ekvation 2.3-3

Resultat från försök gav, enligt Bengt Johannesson i "*Brottkriterier för trä*" [1], bra överensstämmelse med Ekvation 2.3-3 ovan och Norris vidareutvecklade den med utgångspunkt från *Hencky, Hüber, von Mises flytvillkor*. Det innebär att töjningsenergitätheten i en punkt i materialet kan delas upp i en del som kommer av volymändring och en del som kommer av formändring. Enligt Hencky, Hüber, von Mises flytvillkor börjar ett material flyta när töjningsenergitätheten, pga formändring i en punkt, uppnår ett kritiskt värde. Problemet var dock att trä antogs vara ett linjärt elastiskt isotropt material, vilket är en grov förenkling av träs verkliga struktur. Trots denna förenkling tar uttrycket till en viss del hänsyn till träs anisotropa karaktär. Genom att ställa formändringsenergierna vid enaxliga påkänningar i relation till formändringsenergin vid sammansatta påkänningstillstånd erhålls för tre dimensioner Ekvation 2.3-4 nedan.

$$\begin{cases} \frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{f_1 \cdot f_2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1 \\ \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{f_3^2} - \frac{\sigma_2 \cdot \sigma_3}{f_2 \cdot f_3} + \frac{\sigma_{23}^2}{f_{23}^2} = 1 \\ \frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_3^2}{f_3^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_3}{f_1 \cdot f_3} + \frac{\sigma_{13}^2}{f_{13}^2} = 1 \end{cases}$$

Ekvation 2.3-4

Ekvation 2.3-4 innehåller σ_i som anger spänningskomponenterna i träs huvudriktningar och f_i som är motsvarande hållfasthetsvärden vid enaxlig belastning. Vid ett

tvådimensionellt spänningstillstånd gäller $\sigma_3 = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$ vilket leder till att Ekvation 2.3-4 förenklas väsentligt.

Ett annat brottkriterium vid plant spänningstillstånd anges av *Greszczuk*, som även han använder Hencky, Hüber, von Mises flytvillkor fast kompletterad med en faktor K som tar hänsyn till skivans anisotropi, se Ekvation 2.3-5.

$$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} - K \cdot \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{f_1 \cdot f_2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$$

där

$$K = \frac{E_1 \cdot (1 + \nu_{12}) + E_2 \cdot (1 + \nu_{21})}{\sqrt{2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (1 + \nu_{21})(1 + \nu_{12})}}$$

Ekvation 2.3-5

Tex har faktorn K värdet 2,5 för trä och 1 för plywood.

Enligt Bengt Johannesson användes tidigare Hankinsons uttryck (Ekvation 2.3-1) för bestämning av tillåten tryckpåkänning av de svenska byggnormerna, men ersattes av följande ekvation, Ekvation 2.3-6 nedan, där brottkriteriet är $\sigma_{\alpha c} \leq f_{\alpha c}$ och index 1 respektive 2 står för materialriktningarna.

$$\sigma_{\alpha c} = \sigma_{1c} \cdot (1 - \sin \alpha) + \sigma_{2c} \cdot \sin \alpha$$

Ekvation 2.3-6

Jämfört med Hankinsons formel ger Ekvation 2.3-6 en relativt bra approximation vid tryckspänningar, men dålig vid dragspänningar, enligt Bengt Johannesson.

Med Ekvation 2.3-6, så erhålls ytterligare ett brottkriterium genom komposantuppdelning, som jämförs med respektive hållfasthetsvärde dvs. enligt Ekvation 2.3-2. Uppdelningen ger hållfasthetsvärdet, f_{α} :

$$f_{\alpha} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_1 / (\cos^2 \alpha) \\ f_2 / (\sin^2 \alpha) \\ f_{12} / \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{array} \right.$$

Ekvation 2.3-7

Används en spänningsuppdelning, likt uppdelningen av hållfastheten ovan, i Norris-McKinnon formel, Ekvation 2.3-3, så erhålls ett uttryck som beskriver kantböjspänningen i limträbalkar med snett skurna lameller, se Ekvation 2.3-8 nedan.

$$f_{\alpha} = \frac{f_1}{\sqrt{(\cos \alpha)^4 + \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \cdot (\sin \alpha)^4 + \left(\frac{f_1}{f_{12}}\right)^2 \cdot (\sin \alpha)^2 \cdot (\cos \alpha)^2}}$$

Ekvation 2.3-8

Ekvation 2.3-8 används för att bestämma tillåtna spänningar, bl.a. tillåten skjuvspänning (f_{12}) som är bestämd med att en viss mängd sprickor kan förekomma vid balkändar. Det innebär i praktiken att tillåtet värde på tryckspänningen f_{α} blir för lågt. *Möhler och Hemmer* gjorde försök som visade att dubbla tillåtna värdet på skjuvspänningen bör användas i Ekvation 2.3-7, dvs. $2 \cdot f_{12}$ sätts in istället för f_{12} . Enligt Bengt Johannesson bör Ekvation 2.3-8 ge relativt korrekt resultat värde under förutsättning att skjuvhållfastheten f_{12} inte reduceras med hänsyn till förekomst av eventuella torksprickor.

Teknologlaborationer vid CTH, Byggnadsmaterial 1972-1976 på helrent furuvirke med olika vinklar mellan kraft- och fiberriktning visade att samtliga ekvationer ovan gav god överensstämmelse med provresultatet, förutom den ekvation som användes tidigare i svenska byggnormer, Ekvation 2.3-6. Bäst resultat gav Ekvation 2.3-7, samt att $2 \cdot f_{12}$ gav bättre resultat än f_{12} i Ekvation 2.3-8. De värden som användes i detta uttryck var 8 resp. 16 MPa.

I Eurocode 5 [6] står det beskrivet att vid tryckspänning i en vinkel mot fibrerna bör ett uttryck som är snarlikt Hanksinsons formel användas. Skillnaden dem emellan är endast en faktor som tar hänsyn till spänningarna vinkelrätt fibrerna.

Goodman och Bodig skapade en metod som bestämmer tryckhållfastheten i generell vinkel mot fibrerna. Skillnaden från tidigare uttryck är att här tog man hänsyn till hur påkänningen förhåller sig till både fiberriktningen och årsringarna. De föredrog även att utgå från Hankinsons formel, där fördelen var att skjuvhållfastheten ingick. Hållfastheten f_{θ} blir då enligt Ekvation 2.3-9.

$$f_{\theta\theta} = \frac{f_{\theta}}{(\sin\theta)^2 + \frac{f_{\theta}}{f_1} \cdot (\cos\theta)^2}$$

där

$$f_{\theta} = \frac{f_2 - f_3}{90} \cdot \theta + f_3 - K \cdot \sin 2\theta \cdot \left(\frac{f_2 + f_3}{2}\right)$$

Ekvation 2.3-9

θ = vinkel mellan spännings- och fiberriktning

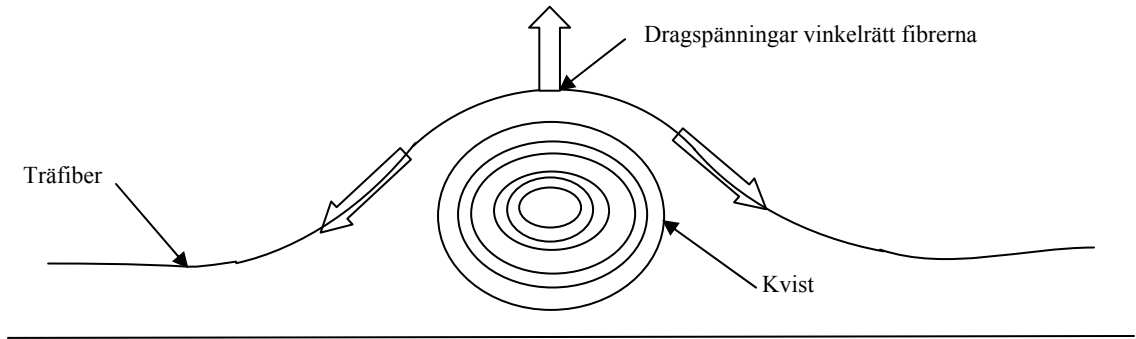
θ = vinkel mellan spännings- och tangenten till årsringarnas riktning

K = konstant som bestäms ur försök med hänsyn till tryckhållfasthetens f_{θ} variation med vinkeln θ ($= 90^{\circ}$). K bestäms för $\theta = 45^{\circ}$

I försök med träarten Douglas- Fir fann Goodman och Bodig god överensstämmelse med teorin och enligt Bengt Johannesson bör Ekvation 2.3-9 även ge bra resultat vid dragprov, speciellt eftersom trä har spröda brott och då ger väldefinierad brottlast.

2.4 Spänningskoncentrationer

Spänningskoncentrationer förekommer i praktiken i alla konstruktioner, även i enkla sådana erhålls koncentrationer exempelvis vid upplagen. Förutom dessa ställen kan situationen även bli allvarlig om balken utformats med urtag vid upplagen, håltagningar eller vid störningar i materialet såsom runt kvistar osv., se Figur 6 på nästa sida.



Figur 6: Dragspänningar som verkar på en träfiber, vid en kvist i underkanten av en balk.

De geometriska förändringarna orsakar spänningskoncentrationer med dragpåkänningar vinkelrätt fibrerna som resultat och eftersom trä har dålig hållfasthet i denna riktning kan lätt sprickbrott uppstå, även vid låga laster.

För att kunna beakta betydelsen av uppträdande spänningskoncentrationer införs ett måttetal av någon form. Det handlar då om en elasticitetsteoretisk lösning av differentialekvationer. I allmänhet antas trä vara ett linjärt elastiskt material, men emellertid kan en uppsprickning på mikronivå anta icke-linjärt beteende precis när brottet börjar. Förutom detta är materialet även viskoelastiskt med betydande krypegenskaper. Spänningskoncentrationsproblemet kan lösas på olika sätt. Ett sätt är genom linjär elastisk beräkning där spänningskoncentrationsfaktorer tas fram och används som måttetal på hur stor belastningen är. Ett annat sätt är att undersöka brottutvecklingen genom att utnyttja en icke-linjär viskoelastisk modell för träets egenskaper vid brottstället. Vid stora belastningar måste träs plasticeringsegenskaper beaktas även vid bestämning av spänningskoncentrationsfaktorerna. Ett alternativ till att ta fram lösningar till dessa problem är att använda tex *finita element metoden (FEM)*, vilket valts i de beräkningar som utförts till denna rapport.

2.5 Weibulls teori och storlekseffekt

I arbetet som presenteras i denna rapport göres inte beräkning enligt Weibulls teori. Emellertid hänvisas ofta till denna teori vid diskussion om träs hållfasthet och därför ges här en kort introduktion.

Teorin framtog pga. att bärförmågan som togs fram vid försök inte överrensstämde med beräknade värden från olika tidigare teorier. Weibulls teori använder sannolikhetsteori som grund för en brotteori som tar hänsyn till att det finns lokala defekter i materialet, vilka kan vara kvistar och andra felaktigheter. Teorin är avsedd för spröda isotropa och statistiskt homogena material. Brott sker i den mest kritiska defekten i materialet. Teorin fungerar inte på material vilka kan plasticeras pga. kraften kan omfördelas och tillåta en högra belastning.

Eftersom trä innehåller defekter kommer volymen av materialet vara en viktig faktor. Vid stor volym kommer sannolikheten för felaktigheter att vara stor jämfört med en liten volym. Weibulls brotteori har som utgångspunkt att materialets hållfasthet har en viss fördelningskurva.

$$S = 1 - e^{-(\sigma/\sigma_0)^m}$$

Ekvation 2.5-1

S är sannolikheten för brott av en provkropp med spänningen σ och σ_0 är tillhörande materialparameter. m är en materialkonstant som kallas för formfaktor. Denna ekvation är tillämpbar för provkroppar med jämnt fördelad spänning.

2.5.1 Storlekseffekt

Weibull-teorin används ofta vid analyser av träkonstruktioner där volymeffekten har inverkan på hållfastheten. Därför tas det hänsyn till hur spänningsfördelningen ser ut för den belastade konstruktionen.

Enligt Johannesson [1] har Liu utvecklat en metodik för att bestämma skjuvhållfastheten för träbalkar. Liu utgår ifrån Ekvation 2.5-1 och utvecklar den till Ekvation 2.5-2 nedan.

$$S = 1 - e^{-B}$$

Ekvation 2.5-2

$$B = \beta V \left(\frac{\tau_0}{W_0} \right)^m$$

Ekvation 2.5-3

τ_0 är en referensspänning och β beror på tvärkraftsfördelningen längs balken.

W_0 i Ekvation 2.5-3 förutsätter en parabelformad skjuvspänningsfördelning och är således inte en konstant som m . Experiment gjorda av Lui har visat en god överensstämmelse mellan hans teori och försök gjorda av tex Longworth.

2.5.2 Svagaste länken-teori

Sannolikheten för ett brott i länken i kedjan med antalet n länkar är s_i . Sannolikheten för att ingen länk i kedjan går till brott blir då $P=(1-s_1) \cdot (1-s_2) \cdot \dots \cdot (1-s_n)$. Vilket ger att sannolikheten för att ett brott i kedjan är $1-P$. Med detta samband kan det lätt förstås att en större balk med fler defekter minskar hållfastheten eftersom sannolikheten för att en defekt med låg hållfasthet finns i balken ökar.

3 Standardmetoden för skjuvhållfasthetsprovning – beskrivning, analys och modifieringar

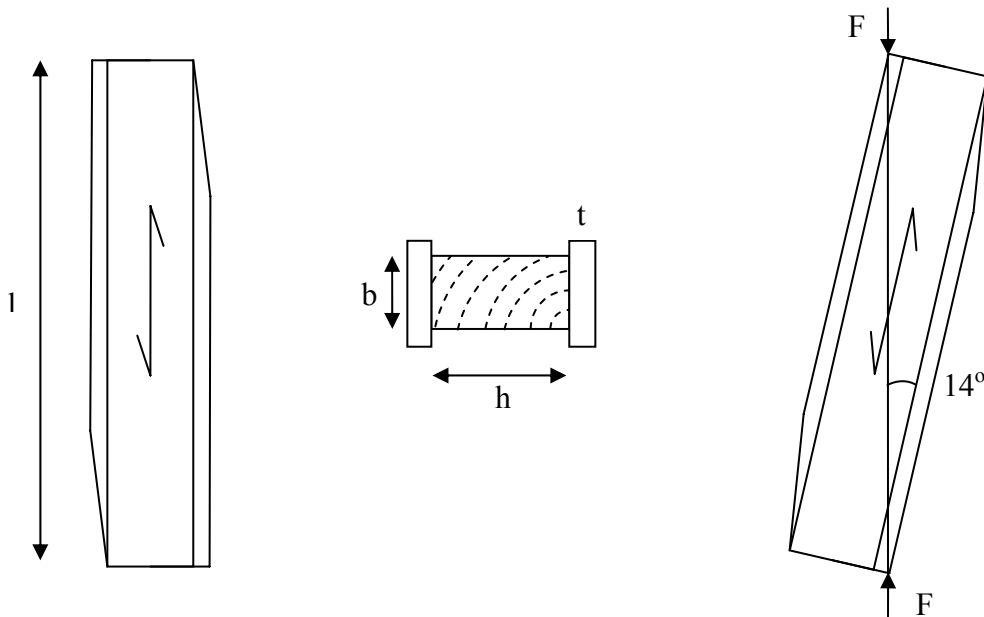
3.1 Introduktion

I detta kapitel beskrivs och diskuteras först den europeiska standardmetoden för materialprovning av träs skjuvhållfasthet. Metoden har beteckningen ”prEN408:2003” [7]. Mot bakgrund av diskussionen om EN408 föreslås två modifierade skjuvprovningmetoder. De kallas här ”EN408- skruv” och ”EN408- krycka”. Diskussionerna om metoderna innefattar spänningsanalyser med finita elementmetoden, FEM.

I kapitel 4 redovisas användning av de två modifierade metoderna vid tillämplad provning av limträskjuvhållfasthet.

3.2 Allmänt om standardprovningmetoden EN408

EN408 är benämningen på den standardiserade provmetoden för att bestämma skjuvhållfastheten i trä. Den består förenklat av två stålplattor som limmas fast på trästycket som ska provas. Vid provningen belastas plattorna med två motriktade krafter enligt Figur 7. Limmet som rekommenderas i EN408 är ett tvåkomponent epoxylim som efter behandling av både trä- och ståltyorna ska ge en tillräckligt stark limfog. Själva träbiten ska vara 300 mm lång, 32 mm bred och 55 mm hög. Stålplattorna bör vara 10 mm tjocka, med en reservation att det kan behövas tjockare plattor vid starkare träslag. En liten tolerans på måtten finns, men endast så att vinkeln mellan nominell fiberriktning och lasternas riktning förblir 14° , se Figur 7.



Figur 7, Beskrivning EN408

Provbiten tillsammans med stålplattorna monteras på så sätt att linjelasterna F är jämnt fördelade över plattornas bredd. Som nämnts tidigare vinklas provkroppen så att vinkeln mellan F och den longitudinella axeln blir 14°.

Mätutrustningen ska kunna mäta med 1 % noggrannhet av lasten som provkroppen utsätts för, och kunna mäta laster som är mindre än 10 % av maximala lasten, med en noggrannhet av 0,1 % av densamma. Belastningshastigheten skall vara sådan att provkroppens maximala kapacitet nås inom 300 s, med ± 120 s marginal. Belastningshastighet så att brottet sker efter ca 300 s bestäms genom preliminära provningar. Skulle brott ske i limfogen betraktas provningsresultatet som giltigt endast om brottytan i limmet är mindre än 20 % av den totala brottytan.

Provkropparnas skjuvhållfasthet beräknas med Ekvation 3.2-1 nedan.

$$f_v = \frac{F_{max} \cdot \cos 14^\circ}{l \cdot b}$$

Ekvation 3.2-1

I rapporteringen från testerna ska det anges:

- Beskrivning av provbitarna, specifikation och kvalitet på träet, träsort, densitet, avvikelser från specifikationerna, hållfasthetsänkande egenheter och storlek på defekter.
- Storlek på provbitarna. Gäller provningarna limträ specificeras det använda limmet, orienteringen och antal lameller.
- Land, region eller sågverk som timret kommer ifrån. Vid limträ anges fabriken som virket kommer ifrån.
- Metod som användes när provkropparna valdes ut.
- Övrig information som kan ha påverkat provresultatet.

Vad gäller provmetoden anges följande:

- Testmetod som används.
- Temperatur och relativ fuktighet vid provtillfället.
- Beskrivning av lastanordningen, test- och mätutrustningen.
- Övrig information som kan ha påverkat provresultatet.

Följande information ska anges för var och en av provbitarna:

- Fuktinnehåll vid provtillfället.
- Densitet.
- Verkliga dimensioner.
- Elasticitetsmodul och/eller hållfasthetsvärden.

- Placering och brottmod. Ingår några limytor i brottytan dokumenteras detta.
- Tid det tar till att uppnå maximal last.
- Övrig information som kan påverka användandet av testresultatet.

3.3 Spänningsanalys och diskussion om EN408

Abaqus är ett finita element (FEM) beräkningsprogram som används främst för strukturberäkningar. Med dess pre- och postprocessor, Abaqus CAE, kan geometrier med elementnät skapas och resultaten analyseras. I beräkningarna till denna studie skapas geometrierna av 2 dimensionella skivelement.

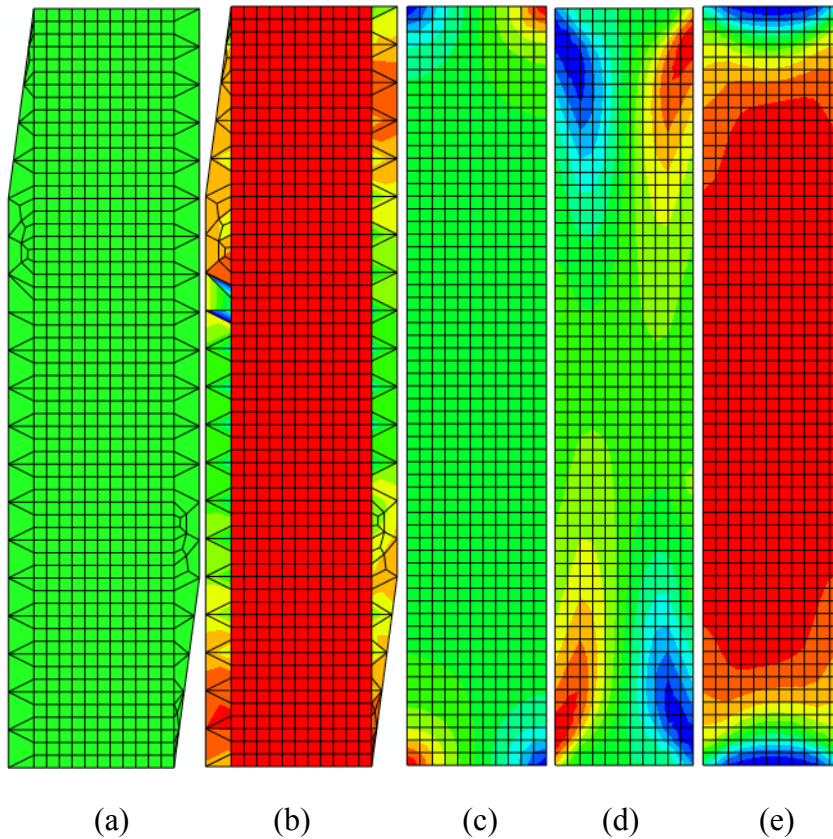
Vid FEM-analyser i Abaqus av EN408 modellerades träkroppen och stålplattorna som om de var sammansatta med ett oeftergivligt limförband. Provkroppen i sin helhet är alltså modellerad i ett stycke, Figur 8 a, indelat i tre delar med två olika materialtillhörigheter, Figur 8 b. Trädelarna i provkroppen är de som skulle undersökas och tilldelades därför en finare elementindelning.

Träet modellerades som ett linjärt elastiskt ortotrop material med materialparametrar enligt Tabell 1. Indexen l, t och r betecknar huvudriktningarna longitudinellt, tangentiellt respektive radiellt.

Elasticitetsmodul	Skjuvmodul	Poissons tal
$E_t=500 \text{ N/mm}^2$	$G_{tr}=60 \text{ N/mm}^2$	$\nu_{tr}=0,3$
$E_r=800 \text{ N/mm}^2$	$G_{tl}=700 \text{ N/mm}^2$	$\nu_{tl}=0,02$
$E_l=14000 \text{ N/mm}^2$	$G_{rl}=600 \text{ N/mm}^2$	$\nu_{rl}=0,02$

Tabell 1: Träets egenskaper i Abaqusmodell (PJ Gustafsson, Erik Serrano).

Stålet modellerades som ett linjärt elastiskt isotropt material med elasticitetsmodulen 210 GPa och tvärkontraktionstalet 0,3. Träkroppen frilades och spänningarna vinkelrätt fibrerna (Figur 8 c), längs fibrerna (Figur 8 d) samt skjuvspänningarna (Figur 8 e) analyserades. Lasterna är applicerade som punktlaster med 14 graders vinkel gentemot fiberriktningen, vilket syns på spänningsfördelningarna i Figur 8 som är symmetriska över provkroppens diagonal. Randvillkoren i modellen valdes så att verkligheten efterliknades samt så att stelkroppsrörelse undviks.



Figur 8 a-e: Uppställning av Abaqusmodell.

Figurer, med skala över aktuella spänningar och applicerad last, redovisas i senare kapitel.

Figur 8 a visar att modellen i Abaqus gjordes i ett stycke, dvs. fullständig samverkan mellan träet och stålplattorna och utan någon eftergivlighet i limfogen.

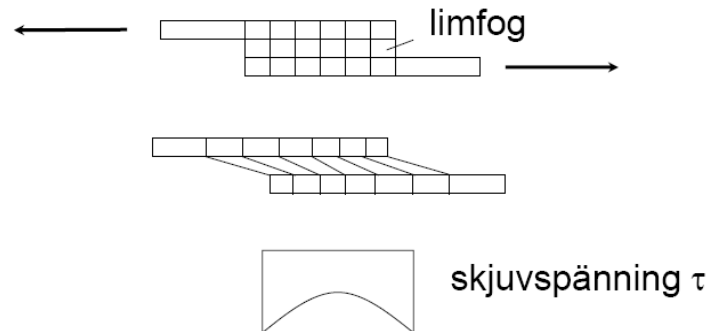
Figur 8 b visar att pga att spänningsskillnaden i ståldetaljerna och i träet är stor, måste själva träkroppen friläggas för att kunna utvärdera dess spänningsfördelning.

Figur 8 c-e visar spänning vinkelrätt fibrerna (σ_{\perp}), parallellt fibrerna (σ_{\parallel}) respektive skjuvspänning (τ). Färgskalan visar positiv spänning som blått (drag) och negativ som rött (tryck).

I Figur 8 d syns det hur koncentrerade spänningarna i längdled blir, vilket är typiskt för ett limförband.

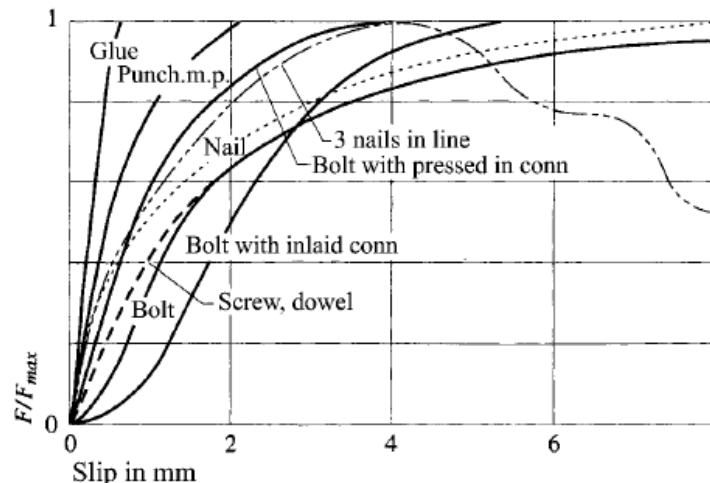
3.3.1 Limförband – ojämnt fördelad skjuvspänning

Problemet med EN408, så som den ser ut idag, är att spänningskoncentrationer uppstår vid ändarna på stålplattorna. En enkel beskrivning av hur skjuvspänningarna i en limfog fördelar sig visas i Figur 9 nedan. Detta misstänks leda till att brottet initieras genom att sprickor uppstår tidigt.



Figur 9: Skjuvspänning i limförband.

Lim är, i jämförelse med andra, ett mycket styvt förband som ger små förskjutningar vid belastning, se Figur 10 nedan. Detta ger upphov till spänningskoncentrationer vid ändarna av stålplattorna i EN408, vilket även konstaterades i spänningsanalyserna med hjälp av Abaqus i detta avsnitt.



Figur 10: Jämförelse av last-deformationssamband för olika sorters förband (SBI 194 [8]).

3.3.1.1 EN408 med skruvförband

Lösningen på problemet med ojämn skjuvspänning är att på något sätt försöka fördela spänningarna bättre över träkroppens långsida än vad limförbandet i EN408 gör. I de provningar som görs till denna rapport används istället skruvar som är tänkta att fördela spänningarna bättre än vad lim skulle göra. Fördelningen av skruvar över långsidan kan justeras för att på så sätt låta mer skjuvspänning verka på halva sträckan, men i de

aktuella provningarna användes vartannat hål för att få spänningarna utspridda över längre sträckor. I början av belastningen förväntas skruvarna ”rätta till sig” och på så sätt inte verka lika styvt som ett limförband utan istället fördela spänningarna bättre.

I Abaqusberäkningarna modelleras skruvförbanden som ett tunt skikt med en uppskattad skjuvmodul. Enligt SBI:s ”Träkonstruktioner - Forbindelser” [8] beräknas en skruv ha kapacitet enligt Ekvation 3.3-1 nedan:

$$F_{tv,k} = 70 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{1 + k_{2,\alpha}}{2}} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{240}}$$

Ekvation 3.3-1

Skruvarna som används i provningarna har en diameter på 4,5 mm och är 45 mm långa. Det ger tvärkraftskapacitet, $F_{tv,k}$, per skruv på:

$$F_{tv,k} = 70 \cdot 4,5^2 \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,228}{2}} \cdot \sqrt{\frac{640}{240}} = 2475 \text{ N}$$

där $k_{2,\alpha} = 0,45 \cdot 8 \cdot d^{-1,5} = 0,45 \cdot 8 \cdot 4,5^{-1,5} = 1,228$.

För att få fram en uppskattning på hur många skruvar som krävs för att klara de belastningar som provkropparna kommer att utsättas för, används det karakteristiska grundvärdet för längsskjuvning, $f_{v,k}$, för L40 som är 4 MPa:

$$\frac{\text{area} \cdot f_{vk}}{2475} = \frac{0,115 \cdot 0,582 \cdot 4 \cdot 10^6}{2475} = 108 \text{ st}$$

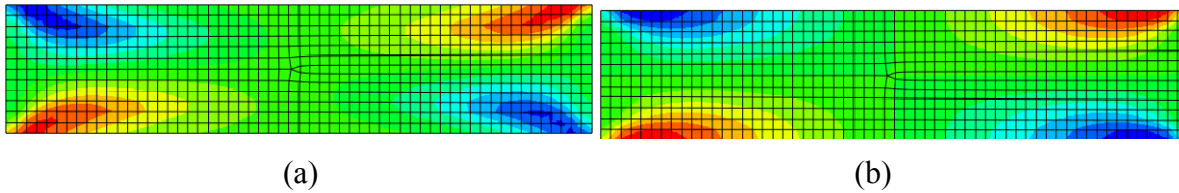
Följs en normal spänning-töjningskurva för stål, uppskattas lutningen på linjen upp till brott vara 1100 N/mm. Skjuvmodulen för skruvförbandet beräknas sedan enligt Ekvation 3.3-2:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{n \cdot k \cdot t}{l \cdot b} = \frac{108 \cdot 1100 \cdot 1}{582 \cdot 115} = 1,77 \text{ N/mm}^2$$

Ekvation 3.3-2

där tjockleken t i Abaqusmodellerna har valts till 1 mm. På ståldetaljerna har emellertid totalt 300 hål förberetts ifall skruvförbandet behöver förstärkas med fler skruvar. Om så är fallet motsvarar det att skruvförbandet har en skjuvmodul, G , på 2,47 MPa.

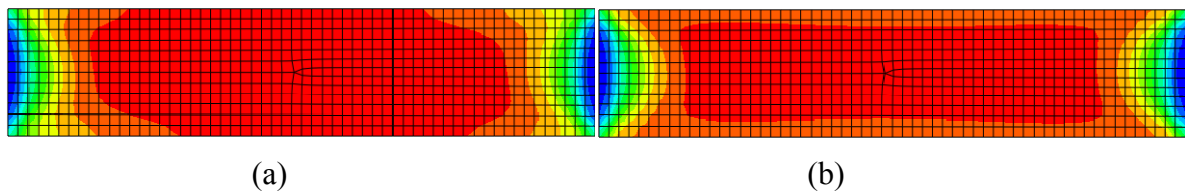
Vid en jämförelse av de beräknade spänningsfördelningarna i längdled, syns skillnaden mellan limförbandet, Figur 11a och skruvförbandet, Figur 11b.



Figur 11: Jämförelse av längsgående spänning mellan lim- (a) och skruvförband (b) (Abaqus).

Med ett skruvförband verkar spänningarna på längre sträckor av träkroppens långsidor och ger inte upphov till lika lokala spänningsskillnader som det finns i limförbandet.

En jämförelse av skjuvspänningen mellan de båda förbanden visas i Figur 12 nedan:



Figur 12: Jämförelse av skjuvspänning mellan lim- (a) och skruvförband (b) (Abaqus).

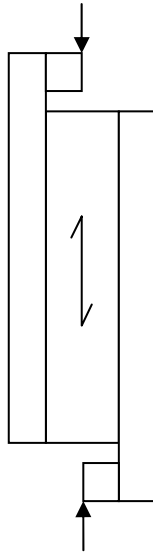
Figur 11 och figur 12 visar endast en jämförelse av spänningar för de olika metoderna. För storlek på de aktuella spänningarna hänvisas till kapitel 4.

I de provningar som utfördes till denna rapport ingår EN408 med skruvförband, i texten benämnd som EN408-skruv, vars beskrivning återfinns i avsnitt 3.4.1.

3.3.2 Normalspänning vinkelrätt fibrerna

Ett annat problem med att prova skjuvhållfastheten enligt EN408 är, att i och med vinkeln på lasterna, finns det lastkomponenter även vinkelrätt fibrerna. Trä klarar dragkrafter vinkelrätt fibrerna dåligt och ifall det förekommer sådana skapas det lätt sprickor som kan initiera brott mycket tidigare än vad som hade skett vid rena skjuvlaster. Ifall det istället uppkommer tryck vinkelrätt fibrerna visar beräkningar att skjuvkapaciteten i träet ökar något, vilket även det kan ge missvisande provresultat. Spänningarna vinkelrätt fibrerna kan ses i Figur 8 c.

I försök att få så ren skjuvbelastning i träkroppen som möjligt, ska även ett alternativ till EN408 testas. Alternativet går ut på att två vinklade ståldetaljer fästs i provkroppen och som sedan belastas vertikalt, längs med träets fibrer. En schematisk bild visas i Figur 13 och beskrivningen av det färdiga alternativet som användes i provningarna, med bl.a. exakta mått, finns i kapitel 3.4.2.



Figur 13: Uppställning vinklade stål.

Även här fästs träkropparna med skruvar i stålprofilerna istället för att limmas fast.

3.3.3 Påverkan på resultat i EN408 av brott i limfogen

I beskrivningen av standardprovningmetoden EN408 står det att ifall brottet sker i limfogen är resultatet ogiltigt och ska inte tas med i sammanställningen över provningen. Maximalt 20 % av brottytan får finnas i limfogen och är det större yta än det så räknas inte resultatet. Detta kan betyda att provbitar med hög skjuvhållfasthet inte kommer med i sammanställningen. Orsaken till varför brottet i för stor utsträckning har skett i limfogen kan teoretiskt vara att limfogen inte var utförd tillfredställande enligt gällande föreskrifter i provningmetoden. Alternativt kan det bero på att träkroppen hade högre skjuvhållfasthet än vad provningmetoden var utformad efter. Genom att systematiskt utesluta dessa enskilda provresultat, riskeras hela sammanställningen över provningen påverkas och visa på lägre skjuvhållfasthet hos populationen.

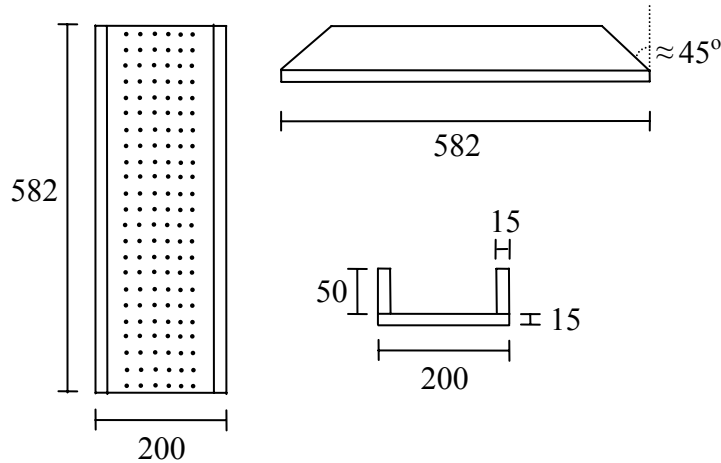
3.4 Beskrivning och analys av EN408- skruv och EN408- krycka

De två olika uppställningarna, EN408 med skruvar och alternativet med vinklade stålkryckor beskrivs i detta kapitel. De båda uppställningarna för provning av skjuvhållfasthet analyseras genom finita elementberäkningar. I dessa uppställningar testas träkroppar med rektangulärt- respektive I-tvärsnitt, med samma förhållande på tvärsnittens mått som används senare i kapitel 5.

Själva materialprovningarna redovisas i kapitel 4.

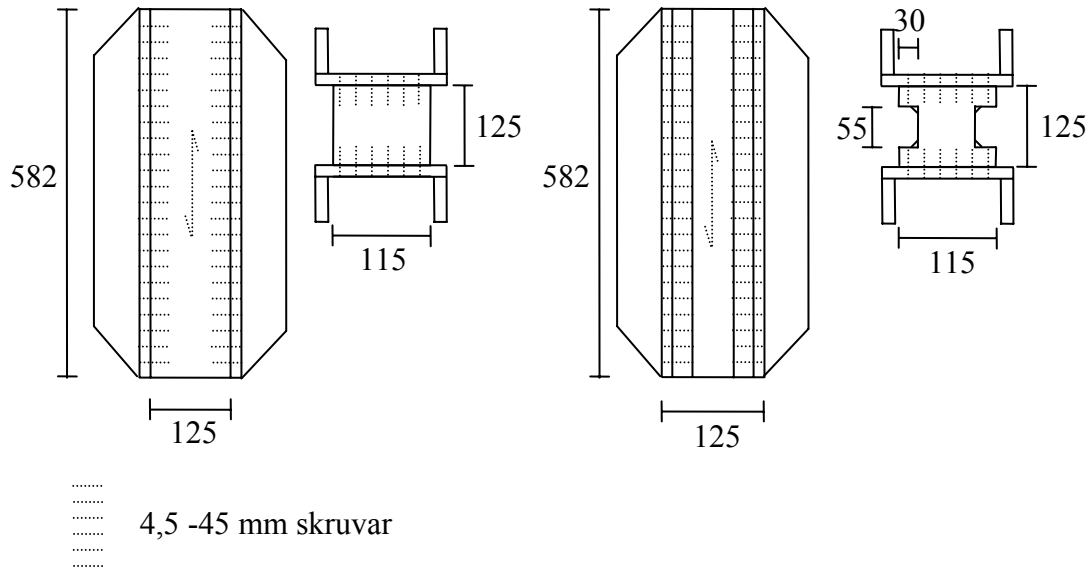
3.4.1 Beskrivning av EN408 med skruvar

De 15 mm tjocka stålplattorna (S355) är förstärkta med två flänsar av samma tjocklek som är 50 mm höga, se Figur 14. Dessa stålplattor kan fästas på vardera sidan om trækropparna med totalt 300 st skruvar, men i de yttersta raderna vid långsidorna används endast vartannat hål pga. risken för sprickor. Skruvarna mäter 4,5 mm i diameter och är 45 mm långa vilket kan orsaka att träet spricker då avståndet till kanten är litet. Provkroppen belastas sedan i stålplattorna, som vinklas så att provkroppens diagonal står lodrätt i testanordningen.



Figur 14: Beskrivning ståldetaljer EN408 med skruvar.

Fyra träbitar med rektangulärt tvärsnitt och fyra med I-tvärsnitt ska testas för att se om, eller hur, detta påverkar resultatet. Träbitarna med rektangulärt tvärsnitt har måtten $b \times h \times l = 115 \times 125 \times 582$ mm och på de fyra resterande med I-tvärsnitt har 55×30 mm tagits bort på respektive sida, se Figur 15. I samma figur visas mått, hur ståldetaljerna fästs in med skruvar i trækropparna och hur djupt dessa går. På I-tvärsnitten har kvartsstavar limmats fast i hörnen mellan flänsarna och livet. Detta för att förhindra att brott sker i övergången mellan fläns-liv, istället för i livet. I de senare balktesterna, se kapitel 5, har I-tvärsnitten liknande form, dvs. med en jämnare övergång mellan flänsarna och livet.



Figur 15: Uppställning EN408 med skruv.

3.4.1.1 Beräkning av spänningar i det rektangulära tvärsnittet

För att få överskådligt resultat redovisas spänningarna normerade mot medelskjuvspänningen. Den last som används i Abaquissimuleringen motsvarar

$$\tau_{medel} = \frac{tvärkraft}{area} = \frac{V}{L \cdot B} = 1 \text{ N/m}^2.$$

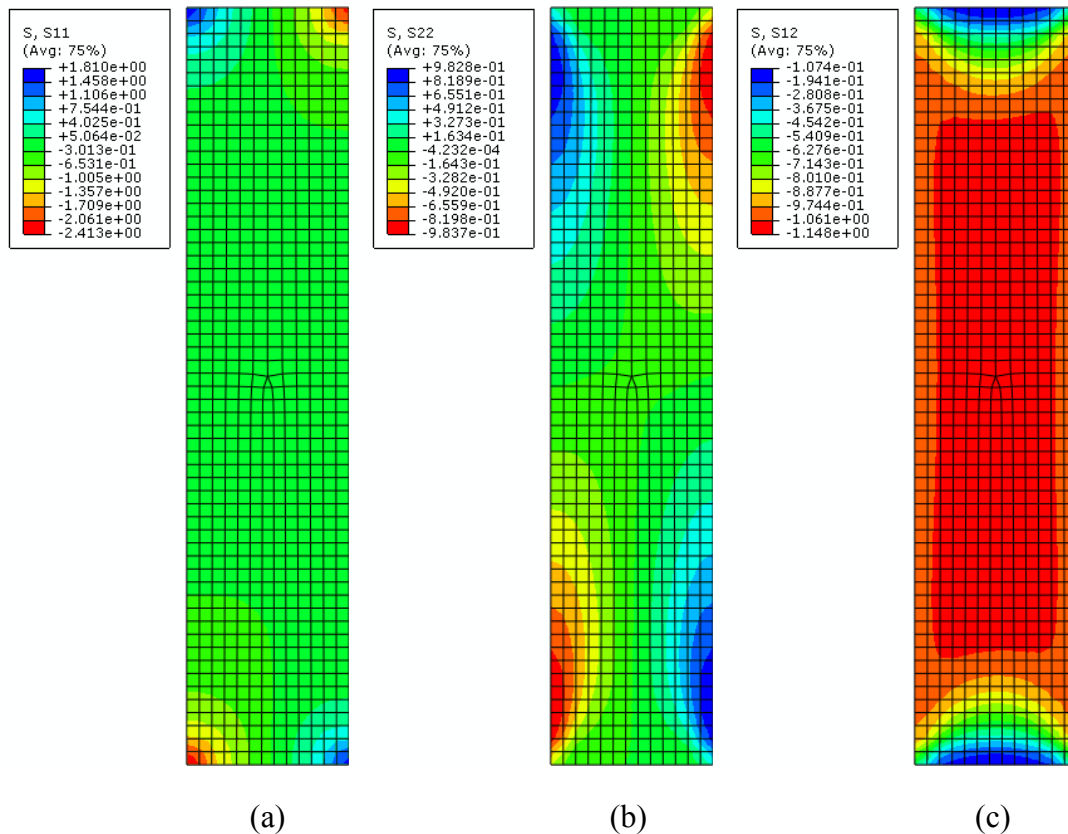
Ekvation 3.4-1

Ekvation 3.4-1 ger en skjuvlast, $V = 1 \cdot 0,582 \cdot 0,115 = 0,06693 \text{ N}$.

I beskrivningen av EN408 är lasterna vinklade 14° i förhållande till de längsgående fibrerna, vilket i denna uppställning motsvaras av $14,9^\circ$. Detta beror på att ståldetaljerna är vardera 5 mm tjockare än vad som rekommenderats till träkroppar som har måtten $b \times h \times l = 32 \times 55 \times 300 \text{ mm}$. Längderna på träkropparna som testas i denna studie är 582 mm, vilket även det skiljer sig från standardmåtten i EN408. De vinklade lasterna som appliceras i modelleringen har då storleken 0,06926 N.

Figur 16 c på nästa sida redovisar skjuvspänningarna i förhållande till medelskjuvspänningen (Ekvation 3.4-1) i respektive punkt, och i det värst utsatta området är spänningen 1,148 gånger högre än medelskjuvspänningen enligt beräkningarna i Abaqusmodellen. För att få en jämförelse med hur stor spänning detta motsvarar, kan man låta den maximala skjuvspänningen anta det karaktäristiska normvärdet för L40 längsskjuvning i BKR, vilket är 4 MPa. Detta leder till att tillhörande medelskjuvspänning vid brott är $\frac{4}{1,148} = 3,48 \text{ MPa}$.

Figur 16 a och Figur 16 b, med spänningarna i x- respektive y-led, visar att det endast förkommer ren skjuvspänning i ungefär en tredjedel av träkroppens volym. Spänningarna i x-led befaras vara högre än träets hållfastheter i respektive riktning, men skruvarna når minst 30 mm in från varje sida och kommer att ”armera” träet så att brott pga tvärspänningen inte kommer ske i dessa områden.

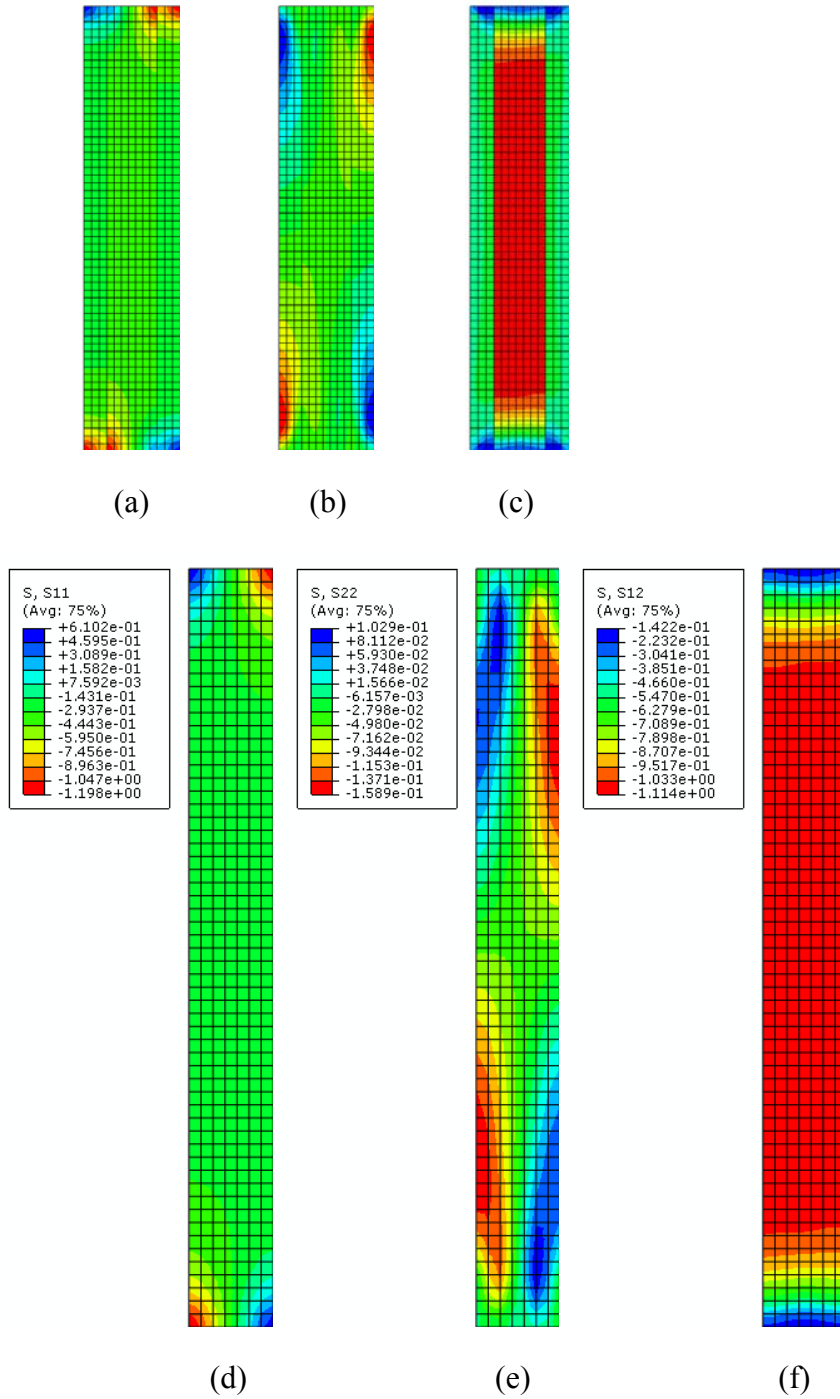


Figur 16 a-c: Spänningsfördelning rektangulärt tvärsnitt (Abaqus).

3.4.1.2 Beräkning av spänningar i I-tvärsnittet

Fyra av provkropparna har I-tvärsnitt, med måtten på livet $b \times h = 55 \times 55$ mm, se Figur 15. Denna provning görs för att se ifall det blir någon skillnad i resultatet pga tvärsnittets utformning. I de senare balktesterna används nästan uteslutande balkar med I-tvärsnitt och därför kontrolleras de även i denna provning. Lasterna som används i beräkningarna har en storlek på 0,03201 N i y-led och 0,008517 N i x-led. Dessa motsvarar en last på 0,033124 N som angriper med en vinkel på $14,9^\circ$ i förhållande till de längsgående fibrerna. Storlekarna på lasterna är valda på samma sätt som i föregående beräkning, för att få en jämförelse med en medelskjuvspänning. Spänningsanalysen visar att det mest utsatta området upplever 1,114 gånger medelskjuvspänningen och likt beräkningarna i avsnittet tidigare blir medelskjuvspänningen vid brott $\frac{4}{1,114} = 3,59$ MPa.

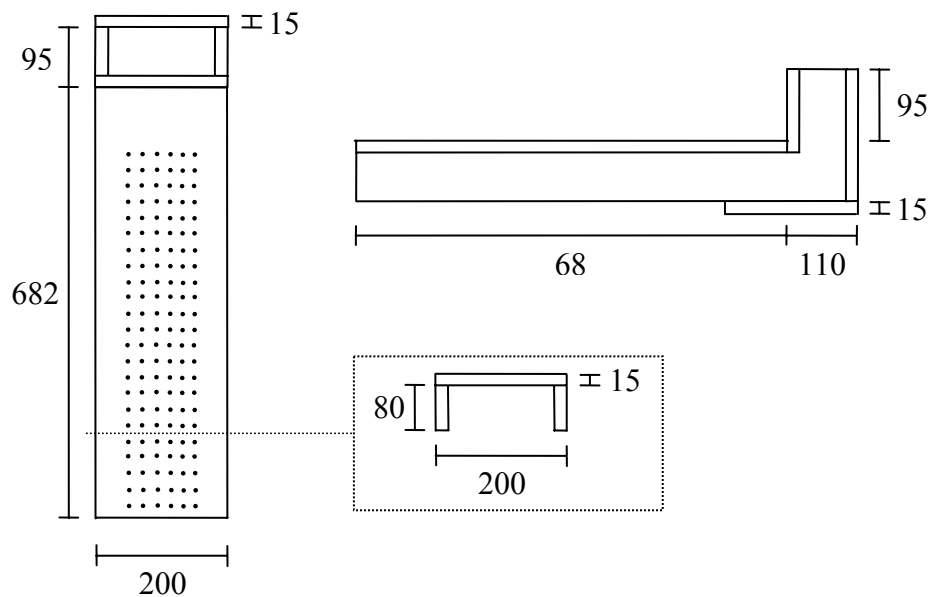
Figur 17 a-c visar spänningsfördelningarna i respektive riktning samt skjuvning, när hela uppställningen är med (inklusive I-tvårsnittets flänsar). Ståldetaljerna är dimensionerade att klara de laster som krävs, så endast spänningarna i träets liv är intressant att studera och resultatet från de beräkningarna visas i Figur 17 d-f.



Figur 17 a-f: Spänningsfördelning I-tvårsnitt EN408 (Abaqus).

3.4.2 Beskrivning av EN408 med vinklade stål

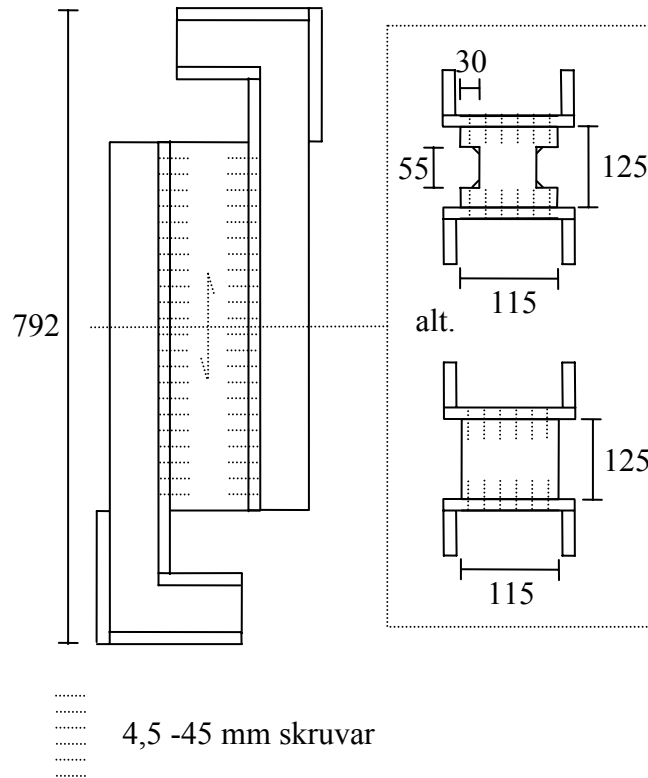
De två ståldetaljerna fästs likadant som i EN408- skruv, med skruvar som förband mellan ståldetaljerna och träkropparna. Till skillnad mot det tidigare testet appliceras lasten parallellt med de längsgående fibrerna med hjälp av de vinklade ståldelarna som räcker 95 mm in över ändarna på träkroppen. De vinklade stålen består av hopsvetsade 15 mm plåtar, av S355 kvalitet, som tillsammans bildar en U-profil, se Figur 18. Själva vinkeln är förstärkt av ytterligare en 15 mm plåt för att styva upp flänsarnas yttre hörn och därmed motverka vippning i desamma. I de yttre hörnen sitter även plåtar för att lättare kunna hantera provkroppen och dess ståldetaljer vid själva testgenomförandet. Exakt beskrivning av ståldetaljernas mått osv. visas i Figur 18.



Figur 18: Beskrivning vinklade ståldetaljer.

De båda ståldetaljerna har totalt 300 förborrade 5 mm hål. Skruvarna som används för att fästa träkroppen har en diameter på 4,5 mm och är 45 mm långa, vilket kommer att leda till att det eventuellt förekommer ett litet glapp mellan stålet och skruvarna. Vid början av belastningen förväntas dessa glapp försvinna då lasten efterhand fördelar sig jämnt över samtliga skruvar.

När ståldetaljerna är fastsatta i träkroppen (Figur 19), appliceras lasterna lodrätt mitt för varandra på respektive del.

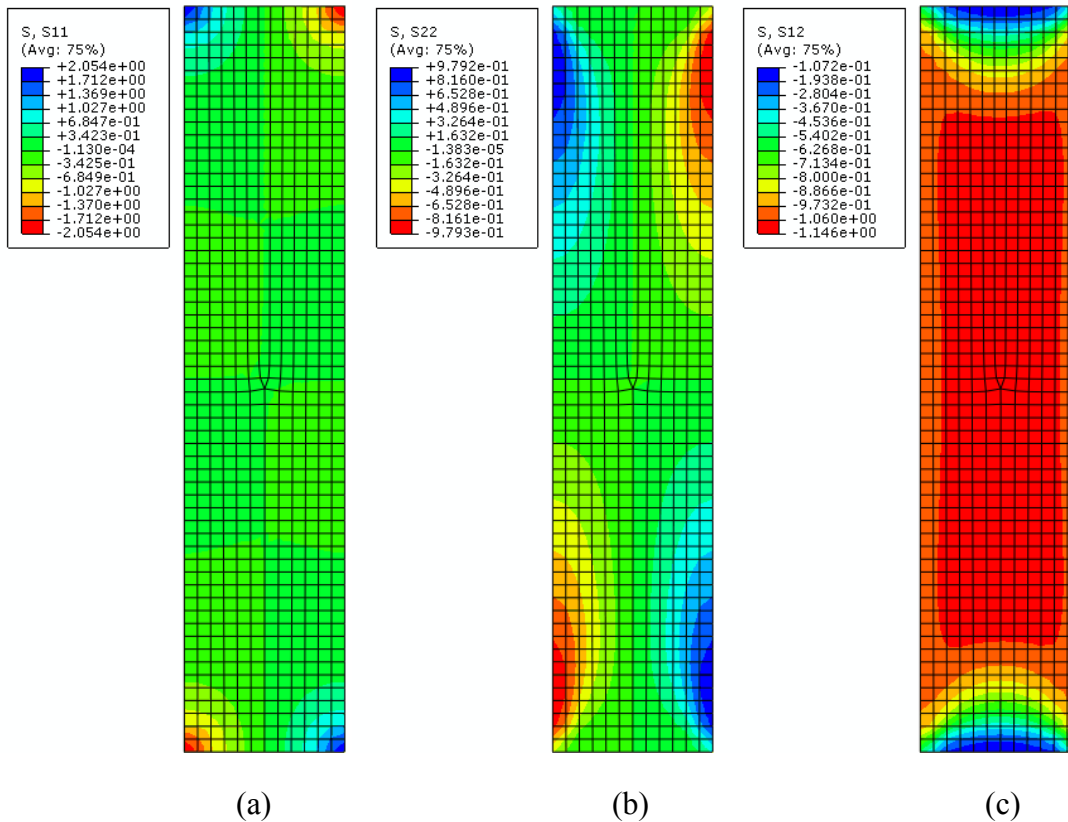


Figur 19: Uppställning med vinklade stål.

3.4.2.1 Beräkning av spänningar i det rektangulära tvärsnittet

Beräkningarna på provningarna med de vinklade stålen utförs likt de tidigare nämnda beräkningarna. Skillnaden från de tidigare provningarna är bland annat att lasterna förs på lodrätt på träkroppen med de vinklade ståldetaljerna. De har utformats i försök att få mer ren skjuvspänning i träkroppen, men det förekommer fortfarande krafter vinkelrätt fibrerna på grund av det moment som skapas av excentriciteten mellan den punkt där lasten angriper och träkroppens kant, där skruvarna överför lasten. I Abaqus används samma materialparametrar som tidigare (Tabell 1). Skruvförbandet modelleras likadant som tidigare.

Likt de tidigare provningarna med uppställningen som liknar EN408 redovisas spänningarna i relation till medelskjuvspänningen. Den last som applicerades på de fyra provkropparna med rektangulärt tvärsnitt är 0,06693 N.

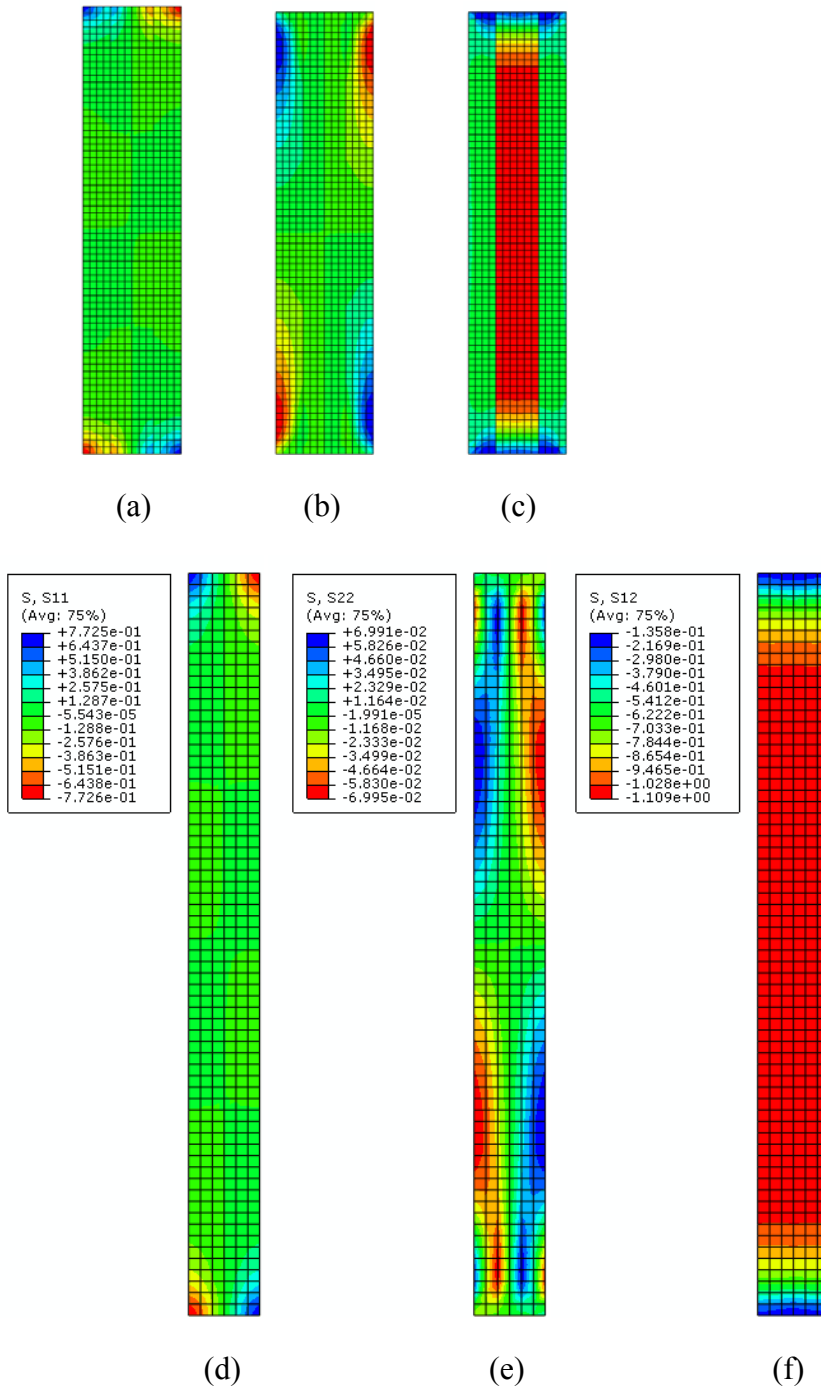


Figur 20 a-c: Spänningsfördelning i det rektangulära tvärsnittet med vinklade stål (Abaqus).

Figur 20 a-c visar spänningarna i x- och y-led respektive skjuvspänningarna. Det mörkröda partiet i mitten av Figur 20 c beskriver att skjuvspänningarna där är 1,146 gånger högre än medelskjuvspänningen. Låter man brottspänningen motsvara vad det mest utsatta området känner av, beräknas en tillhörande medelskjuvspänning på $\frac{4}{1,146} = 3,49 \text{ MPa}$.

3.4.2.2 Beräkning av spänningar i I-tvärsnittet

Beräkningarna för I-tvärsnitten följer de tidigare beräkningarna med Abaqus. Skillnaden är att träkroppen är uppdelad i två olika bredder, vilket anges i sektionstilldelningen i programmet. Bilderna nedan visar tydligt hur spänningarna skiljer sig över de två olika bredderna i tvärsnittet. Det intressanta partiet i dessa beräkningar/provningar är livet, som friläggs från flänsarna för att få ett tydligare resultat. Ett exempel på skillnaden före och efter friläggningen blir tydligt då Figur 21 b jämförs med Figur 21 e. I den senare syns fördelningen av livets spänningar i längdled tydligare.



Figur 21 a-f: Spänningsfördelning I-tvårsnitt med vinklade stål (Abaqus).

Resultaten av Abaqusberäkningarna från båda uppställningarna påminner väldigt mycket om varandra. Även i uppställningen med de vinklade stålen är den maximala skjvupåkänningen runt 1,1 gånger medelskjuvspänningen i de mest utsatta områdena, se Figur 21 f. Den maximala skjuvspänningen på 1,109 gånger medelvärdet, motsvaras av en medelskjuvspänning vid brott på $\frac{4}{1,109} = 3,61 \text{ MPa}$.

3.5 Beräkning med Norris-Mckinnons brottkriterium

Resultaten från beräkningarna med Abaqus och de karakteristiska värdena för respektive riktning som finns angivna i BKR, används i Norris-Mckinnons brottvillkor för att få fram den beräknade brottlasten. Spänningarna i x- och y-led, respektive skjivspänningarna i varje nodpunkt används för att dels få fram hur mycket last som appliceras innan brottvillkoret är uppfyllt, dels i vilken nodpunkt som brottet sker. Ett exempel:

Spänningarna i en nodpunkt nr 1476 enligt EN408- krycka med I-tvårsnitt är 0,001532 Pa; 0,070193 Pa resp. – 1,10615 Pa. Dessa värden är resultatet av att en last på 0,03201 N verkar på provkroppen. Insatt i Norris-Mckinnons formel, Ekvation 2.3-3, erhålls

$$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = \frac{0,001532^2}{(23 \cdot 10^6)^2} + \frac{0,070193^2}{(0,5 \cdot 10^6)^2} + \frac{-1,10615^2}{(4 \cdot 10^6)^2} = 1,0383 \cdot 10^{-13}$$

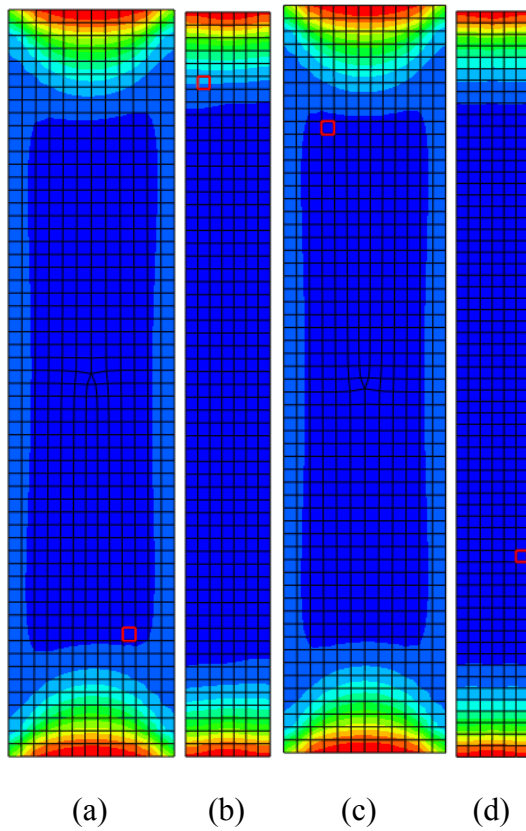
Ekvation 3.5-1

Kvoten som erhålls av ekvationen är i kvadrat, så för att få ut vilken brottlast som den aktuella nodpunkten klarar, delas den applicerade lasten (0,03201 N) med roten ur kvoten enligt:

$$\frac{P_{\text{aktuell}}}{\sqrt{(kvot)}} = \frac{0,03201}{\sqrt{1,0383 \cdot 10^{-13}}} = 99,34 \text{ kN}$$

Ekvation 3.5-2

Denna last är enligt Norris-Mckinnons brottvillkor den maximala kapaciteten i nod nummer 1476. Samma operation genomförs för samtliga nodpunkter i respektive uppställning och resultatet redovisas i avsnitt 4.5. I vilka nodpunkter som brott sker, i de olika uppställningarna och tvärsnitt, visas i Figur 22 nedan.



Figur 22: Hårdast utsatta element (Abaqus).

- a) EN408- skruv, rektangulärt tvärsnitt
- b) EN408- skruv, I-tvärsnitt
- c) EN408- krycka, rektangulärt tvärsnitt
- d) EN408- krycka, I-tvärsnitt

4 Materialprovning av limträsk skjuvhållfasthet

4.1 Introduktion

I detta kapitel redovisas provningar av limträsk skjuvhållfasthet med de två metoderna EN408- skruv och EN408- krycka. Dessa metoder är beskrivna i avsnitt 3.4 och visade i figurerna 15 och 19. Provningar gjordes med två olika geometriska utformningar av provkropparna: dels med rektangulärt tvärsnitt, dels med I-tvärsnitt. Totalt gjordes 16 provningar: fyra nominellt lika provningar för varje kombination av tvärsnittsform och provningsmetod.

4.2 Provmaterial, provplan, utrustning och provuppställningar

4.2.1 Provmaterial





Limträet, av kvalitet L40, levererades av Långshytte Limträ AB (Setra) och förvarades i laborationshallen fram till provningstillfället. Allt trä täcktes av och fick acklimatisera sig med rådande klimat i laborationshallen. Provkropparna var av homogent limträ, vilket betyder att samtliga lameller är av samma kvalitet. Densiteten bestämdes genom att torka ut fyra träbitar, som tagits från fyra slumpmässigt valda provkroppar, i 105 ° C tills att träbitarnas vikt inte ändrades. Temperatur och relativ fuktighet i laborationshallen loggas kontinuerligt och lästes av under de aktuella provningsdagarna. Beräknade värden för de fyra träbitarna samt klimatmätningarna redovisas i Tabell 2.

Ursprung (balknr.)	1.4	2.2	3.1	6.1
Volym	0,001772 m ³	0,001240 m ³	0,001327 m ³	0,000677 m ³
Vikt (fuktig)	823,2 g	508,1 g	623,2 g	345,3 g
Vikt (torr)	738,7 g	461,5 g	563,4 g	312,4 g
Densitet (fuktig)	464,6 kg/m ³	409,7 kg/m ³	469,6 kg/m ³	510,1 kg/m ³
Densitet (torr)	416,9 kg/m ³	372,2 kg/m ³	424,6 kg/m ³	461,4 kg/m ³
Fukthinnehåll	47,7 kg/m ³	37,5 kg/m ³	45,0 kg/m ³	48,5 kg/m ³
Fuktkvot	11,4 %	10,1 %	10,6 %	10,5 %
Medeldensitet	463,5 kg/m³			
Medelfuktkvot	10,7 %			
Medeltemperatur, genomsnittlig	18,8 °C			
Relativ fuktighet, genomsnittlig	29,3 %			

Tabell 2: Klimatdata och densitetsberäkning.

4.2.2 Provplan

I tabell 3 nedan visas en sammanställning över provningarna som genomfördes.

Uppställning	Tvärsnitt	Längd	Höjd*	Bredd*	Antal
EN408-skruv 1.1-1.4		582 mm	125 mm	115 mm	4
EN408-skruv 2.1-2.4		582 mm	125/ 55 mm	115/ 55 mm	4
EN408-krycka 3.1-3.4		582 mm	125 mm	115 mm	4
EN408-krycka 4.1-4.4		582 mm	125/ 55 mm	115/ 55 mm	4

Tabell 3: Sammanställning över provplanen.

*Alternativt mått syftar på livet i I-tvärsnitten

4.2.3 Beskrivning av provningsutrustning och provuppställningar

Belastningsmaskinen, av märket Man, har en maxkapacitet på 10000 kN. Maskinens hydraulik har byggts om och styrs med dator (se till höger i Figur 23).



Figur 23: Provningsutrustning.

Under arbete pressar hydraulkolven vagn och provkropp upp mot mothållet, som syns i övre kanten på bilden ovan. Detta mothåll kan även justeras i höjddled på dess två gängade pelare. Vid provning anges vilken hastighet som hydraulkolven ska höjas med. I beskrivningen av standardutförandet av EN408 står det att brott ska ske inom 300 sekunder, \pm 120 sekunder. Belastningshastigheten i fallen med EN408- skruv och EN408- krycka bestämdes efter testförsök med träkroppar som hade samma mått.

4.2.3.1 Uppställning – EN408- skruv

Underst placeras lastcellen, vars ovansida är välvd och därmed ger en väldefinierad lastpunkt. På den välvda sidan läggs sedan en 20 mm tjock stålplatta, som på ovansidan har ett 5 mm urfräst spår. Ovanpå testkroppen finns en likadan stålplatta med spår, samt ytterligare en halvsfär så att lasterna endast verkar vertikalt. De urfrästa spåren gör det möjligt att med hjälp av vattenpass få provkroppen att stå så att diagonalen, mellan de belastade hörnen, blir mitt över varandra. I yttersta raden på långsidorna sitter det skruvar i endast vartannat hål för att undvika att träet spricker upp. Dessa hål förborras även pga. att de sitter närmast kanten. För uppställningen se Figur 24 nedan.



Figur 24: Uppställning EN408- skruv.

Belastningshastigheten väljs efter vad som rekommenderats i EN408, alltså så att brott sker 300 sekunder efter start, \pm 120 sekunder.

4.2.3.2 Uppställning – EN408- krycka

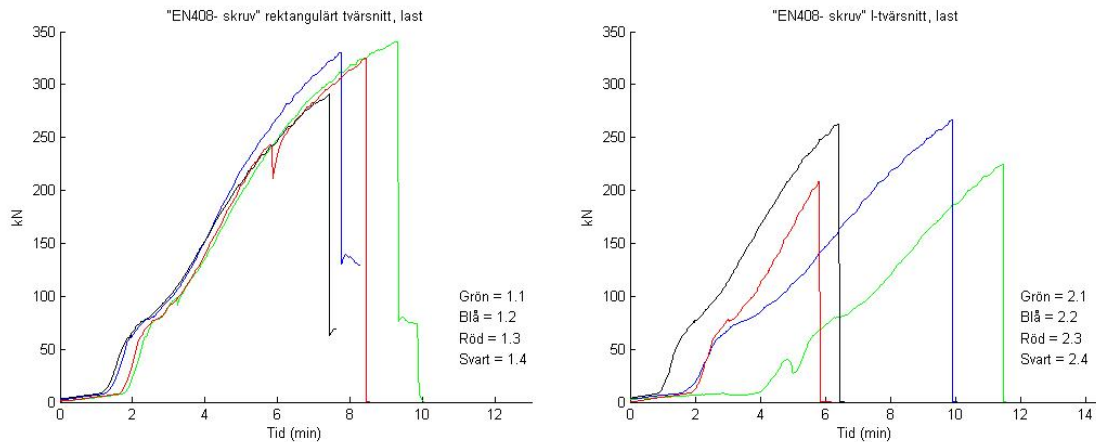
Underst placeras lastcellen, på vilken provkroppens nedre vinkel vilar. Den välvda ovansidan på lastcellen angriper mitt under själva träbitens mitt och anses vara fullt ledad. Provkroppens övre vinkel är även den ledad då det finns en halvsfär av stål som för in lasten. Uppställningen visas i Figur 25 nedan. Även denna gång används endast hälften av skruvarna i de yttersta hålen på långsidorna för att undvika att kanten på träkroppen klossas bort. Belastningshastigheten är likt de tidigare provningarna, cirka 300 sekunder till brott.



Figur 25: Uppställning EN408- krycka.

4.3 Provningsresultat vid prov enligt EN408- skruv

Resultaten från de åtta provningarna med uppställning enligt avsnitt 4.2.3.1, EN408-skruv, redovisas i Figur 26 nedan. Belastningshastigheten var 1,8 mm/min. Provkropparna 2.1 och 2.2 belastades 0,9 resp. 1,2 mm/min.



Figur 26: Last som funktion av tiden vid prov enligt EN408- skruv (kN).

Värden på brottlasterna redovisas i Tabell 4 nedan.

□ Prov nr:	Brottlast (kN)	I Prov nr:	Brottlast (kN)
1.1	341	2.1	225
1.2	331	2.2	266
1.3	325	2.3	208
1.4	291	2.4	262
Medelbrottlast:	322	Medelbrottlast:	240,25
Max spridning:	(-31)	Max spridning:	(-32,25)
Standardavvikelse:	21,7	Standardavvikelse:	28,3

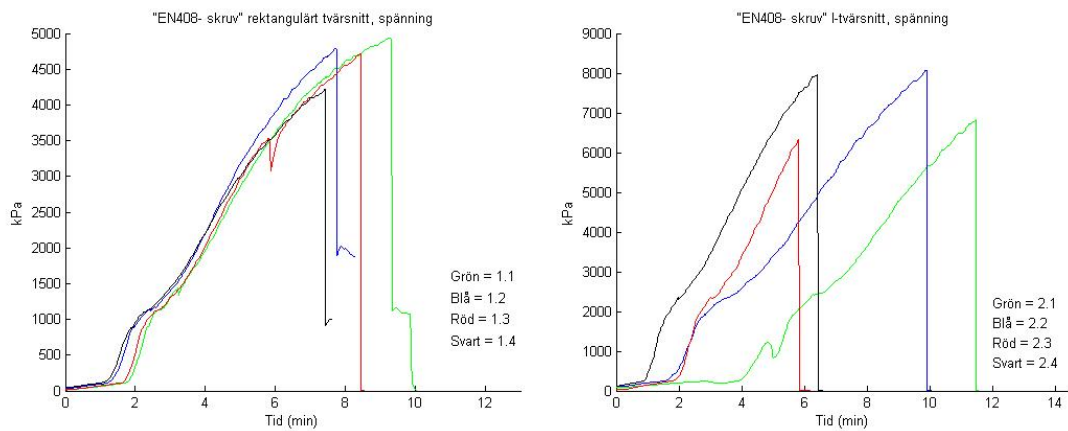
Tabell 4: Brottlast vid prov enligt EN408- skruv.

I Figur 26 kan det observeras att vid ungefär 70 kN sker en viss fördröjning av pålastningen, vilket inte har med egenskaper i träet att göra utan att mothållet i testapparaten justerar sig i sina gängor, se avsnitt 4.2.3. Med andra ord ligger mothållets tyngd på ungefär 70 kN.

På kurvorna i Figur 26 syns även hur skruvförbandet justerar sig i början av belastningen, och det dröjer cirka en minut innan krafterna/spänningarna stiger i provkropparna. Ståldetaljerna antas röra sig något, då skruvarna som är 4,5 mm i diameter glappar i hålen som har en diameter på 5 mm. Lastcellen ger, som Figur 26 visar, utslag under injusteringen av skruvförbandet, men det är först när det är klart som krafterna i provkroppen stiger markant.

Provkropp 1.3 fick en avlastning vid cirka 6 minuter, troligen orsakad av en spricka, vilket inte kunde observeras under tiden provningen var igång. Dock märktes detta genom att det först misstänktes att brottlasten var uppnådd, men vid fortsatt pålastning visade det sig att provkroppen hade högre kapacitet. Även provkropp 2.1 fick troligen en spricka, denna gång efter cirka 5 minuter, vilket orsakade en lastreduktion (se höger i Figur 27). Detta, samt för långsam pålastning, gjorde att brottet uppnåddes först efter cirka 11 minuter.

För att få en bättre jämförelse mellan de båda tvärsnitten, kan lasterna räknas om till skjuvspänning i de två aktuella tvärsnitten, se Figur 27. Observera att skalorna i de två delfigurerna är olika.

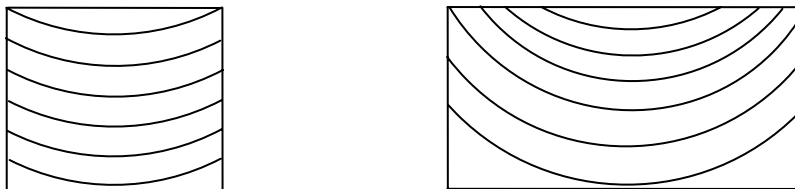


Figur 27: Skjuvspänning som funktion av tiden vid prov enligt EN408- skruv (kPa).



Figur 28: Brottmoder EN408- skruv.

Figur 28 ovan visar brottmoderna för EN408- skruv. Så som limträbitarna är sågade sker det mesta av belastningen LT- planet (se Figur 1), vilket även är det plan där brotten i aktuell uppställning uppstod. Men i och med att bredden på träkropparna är 115 mm kommer mer av årsringarnas omkrets med i brottytan (se längst ner i Figur 29). Detta skiljer sig från standarduppställningen av EN408 där bredden på provkropparna endast är 32 mm och årsringarna är mer eller mindre endast horisontellt orienterade.

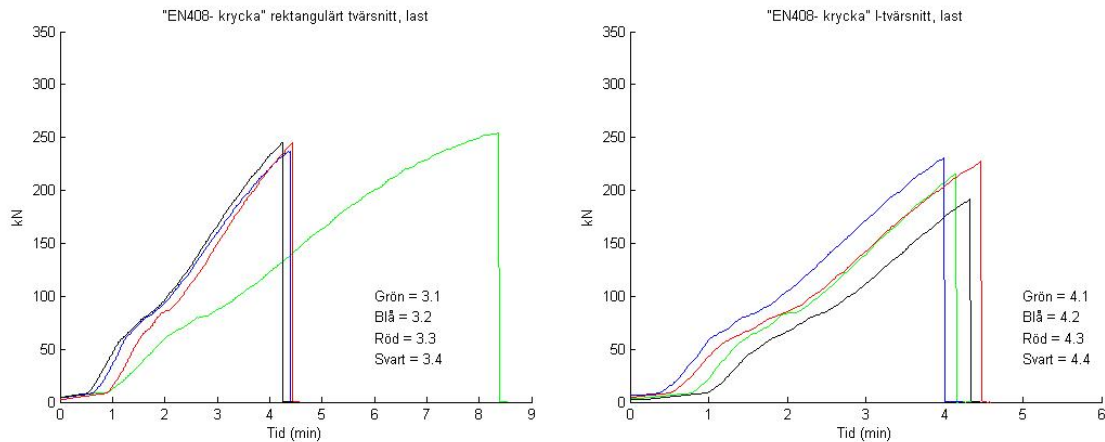


Figur 29: Årsringarnas "riktning" i två olika breda tvärsnitt.

Vad gäller provkropparna med I- tvärsnitt skedde brotten i närheten av övergångarna mellan flänsarna och livet. Dessa övergångar har i förväg försökt göras mindre abrupta, genom att limma dit trekantslister, men i flera fall gick sprickorna närmare ner mot flänsarna, pga. att årsringarna i de 115 mm breda provkropparna "leder" brottytan mot flänsarna.

4.4 Provningsresultat vid prov enligt EN408- krycka



Resultaten ifrån mätningarna med uppställning enligt avsnitt 4.2.3.2, EN408- krycka, redovisas i Figur 30 nedan.



Figur 30: Last som funktion av tiden vid prov enligt EN408- krycka (kN).

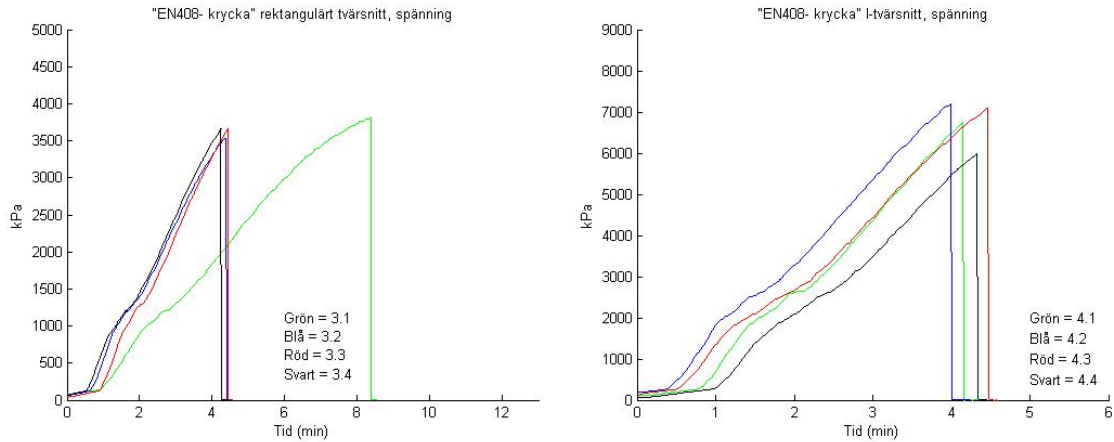
Provkropp 3.1 belastades något för långsamt, brottet skedde först vid närmare 8,5 minuter. Till de resterande provningarna korrigerades belastningshastigheten så att tiden till brott skedde inom marginalerna 300 ± 120 sekunder. Belastningshastigheten i var 3,0 mm/min, förutom provkropp 3.1 som belastades 1,8 mm/min.

Värden på provkropparnas brottlast finns i Tabell 5:

 Prov nr:	Brottlast (kN)	 Prov nr:	Brottlast (kN)
3.1	255	4.1	216
3.2	237	4.2	229
3.3	245	4.3	227
3.4	245	4.4	192
Medelbrottlast:	245,5	Medelbrottlast:	216
Max spridning:	(+9,5)	Max spridning:	(-24)
Standardavvikelse:	7,4	Standardavvikelse:	17,0

Tabell 5: Brottlast vid prov enligt EN408- krycka.

Samtliga provkroppar visade på jämn lastökning upp till brott, inga avvikelser vad gäller tex sprickor innan själva brottet uppkom i dessa två testserier. Grafer som visar skjuvspänning i de två olika tvärsnitten finns i Figur 31.



Figur 31: Skjuvspänning som funktion av tiden vid prov enligt EN408- krycka (kPa).

Brottnoderna skiljer sig till synes inte något från provningarna med EN408 med skruvförband, se Figur 32. Ändrätet på provkropparna kan tyckas vara mer tilltygat från den tidigare uppställningen, men det beror till stor del på att vid brott separerade ofta de två halvorna och föll ner i golvet. Vikten från stålkryckorna orsakade att träet separerade efter brott.

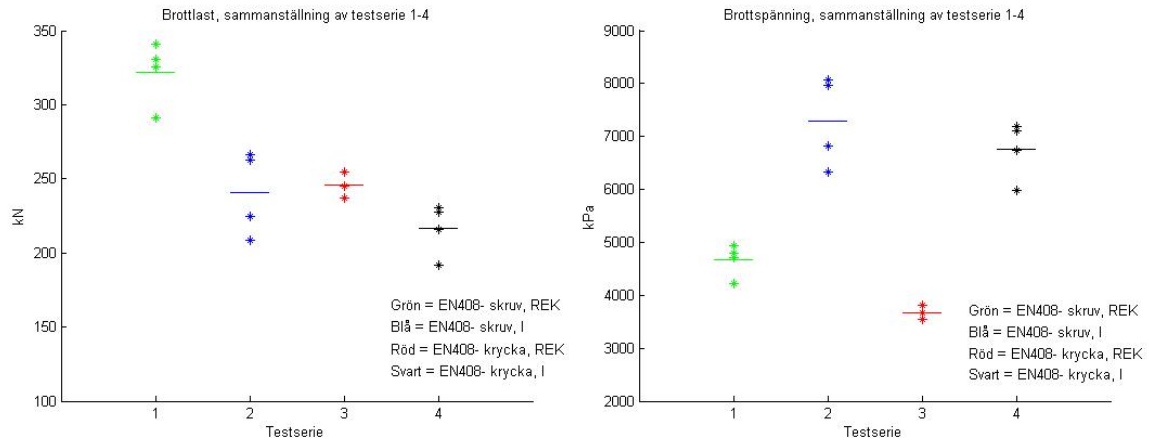


Figur 32: Brottmoder för EN408- krycka.

4.5 Sammanställning av resultatet från provningar och beräkningar

I samtliga materialprovningar skedde brotten tillfredställande. Inget brott skedde tex i någon limfog mellan lamellerna, utan istället i själva träet, och när det gällde I-tvärsnitt någonstans i provkropparnas liv. Vissa områden på flänsarna kan ha inkluderats i brottyorna, men i så fall pga att årsringarna "ledde" ner sprickan dit. Brotten initierades fortfarande i tvärsnittens liv och bedöms som godkända.

Provkropparna med I-tvärsnitt klarade högre spänningar än de med rektangulärt tvärsnitt, se Figur 33. Genomsnittlig brottspänning för de båda uppställningarna var 7,52 respektive 6,76 MPa för I-tvärsnitten, jämfört med 4,81 respektive 3,67 MPa för de rektangulära tvärsnitten. EN408- skruv visade sig klara högre spänningar med de båda olika tvärsnitten än vad uppställningen EN408- krycka gjorde.



Figur 33: Sammanställning över Brottlast och Brottspänning, (kN) resp. (kPa).

Nämns kan att y-axlarna i Figur 33, kN resp. kPa, inte börjar från noll utan har justerats för att bättre visa områden där mätvärdena befinner sig.

Resultaten beräknade med hjälp av Abaqus tydde på att skillnaden mellan de båda uppställningarna var marginell vad gäller de maximalt belastade punkterna i träkroppen. Resultaten från de verkliga provningarna visade däremot skillnad mellan de båda uppställningarna. Denna skillnad är emellertid statistisk osäker eftersom endast fyra provningar av varje typ gjordes.

För att få en bra överblick över resultaten, provad och beräknad skjuvhållfasthet, finns en sammanställning i Tabell 6 på nästa sida.

	Provning	Beräkning	Beräkning	Beräkning
Spänningsberäkning	Medelbrottlast, kN; (MPa)	Konventionell, brottlast, kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, brottlast, kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, Norris-McKinnon, brottlast; kN (MPa)
Brottkriterium	-	$\tau_{medel} = f_v$	$\tau_{max} = f_v$	$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$
Materialvärde	-	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_1 = 23 \text{ alt. } 36 \text{ MPa}$ $f_2 = 0,5 \text{ alt. } 8 \text{ MPa}$ $f_{12} = 4 \text{ MPa}$,
“Skruv” rek	321,9; (4,81)	267,7; (4,0)	232,9; (3,48)	87,7 (1,31)
“Skruv” I	240,6; (7,52)	128,0; (4,0)	114,9; (3,59)	109,3 (3,41)
“Krycka” rek	245,5; (3,67)	267,7; (4,0)	233,6; (3,49)	86,7 (1,30)
“Kryck” I	216,3; (6,76)	128,0; (4,0)	115,6; (3,61)	103,2(3,22)

Tabell 6: I tabellen anges brottlast (kN), medelvärde från provningar samt värden enligt tre olika beräkningsmetoder. Inom parentes anges brottskjuvspänning (MPa), medelvärde från provningar samt värden enligt tre olika beräkningsmetoder.

Provresultaten avser medelvärden, vilket bör hållas i minnet vid jämförelse med karaktäristiska värden (5 % -fraktilen).

Beräknad brottlast från Abaqus är beräknad enligt tillvägagångssättet i avsnitt 3.4. Brottlast enligt Norris-McKinnons formel, Ekvation 2.3-3, beräknades enligt avsnitt 3.5. De element som tagits med i beräkningarna är endast de som inte påverkas av skruvarna från ståldetaljerna. Skruvarna sträcker sig 35 mm in i träkropparna, så de element som befinner sig inom dessa områden finns inte representerade i resultaten. De som däremot är med, är elementen som finns i det skruvfria området med en höjd på $(125-2\cdot 35)=55$ mm. Detta område motsvarar I-tvårsnittets liv. Se Figur 15 och Figur 19 för närmare beskrivning.

Användandet av skruvförband i EN408 fungerade tillfredställande. Inget brott skedde i området där skruvar befann sig, vilket ledde till att samtliga provningar hade brott inne i det skjuvbara området, vilket förväntades. Antalet skruvar som användes i respektive provning var tillräckligt för att klara träets brottlast och inga större deformationer av skruvförbandet ägde rum. Valet att endast använda hälften av antalet skruvar i de yttersta raderna på träkropparnas långsidor var även det tillräckligt för att dels klara brottlasten, dels för att hindra att delar klossades bort alternativt att sprickor uppkom längs en hel rad med skruvar. Förborring av dessa hål bedömdes vara en nödvändighet, vilket får anses stämma då inga uppsprickningar pga det stora antalet skruvar kunde iakttas.

5 Provning och analys av limträbalkars tvärkraftskapacitet

5.1 Introduktion

I detta kapitel redovisas provningar av limträbalkars tvärkraftskapacitet och motsvarande skjuvhållfasthet med 6 olika provningsuppställningar. Dessa är redovisade i avsnitt 5.5 till 5.10. Provningarna genomfördes med två olika tvärsnitt, dels med rektangulärt tvärsnitt, dels med I-tvärsnitt. Balkarnas uppställning varierades genom olika belastningstyper och överkragning vid stöd samt genom olika antal stöd, 2 resp. 3 stöd. Förutom provningsresultaten redovisas också spänningsanalyser av de olika provade balkarna.

5.2 Diskussion inför val av provuppställning

Valet av balkuppställningen baseras på Schinkhofer-Obermayr [9] som i sin tur baserade sitt arbete på kända internationella projekt om skjuvhållfasthet på timmer för att ta fram en optimal uppställning för tester av limträ. Det som hade gjorts tidigare var tester på timmer med små tvärsnitt och i och med bristen av utförliga tester på större tvärsnitt bedömde Schinkhofer-Obermayr att säkra värden på skjuvhållfastheten på limträ inte existerade. Testuppställningen dvs. på vilket sätt man väljer att prova skjuvhållfastheten, påverkar resultatet. Den uppmätta tvärkraftskapaciteten kan, som exempel, påverkas av samtidigt verkande böjmoment och/ eller normalspänning vinkelrätt fiber.

Schinkhofer-Obermayr diskuterar problemet med att det i princip inte finns några undersökningar gjorda på skjuvhållfasthet hos limträ med större tvärsnitt, utan att de värden som används vid dimensionering refererar till EN408 och prEN1193 som avser skjuvhållfastheten hos små prover av massivt trä.

En annan aspekt på testuppställning visade sig vid provningar som genomfördes på CSIRO i Australien där tre olika träslag, med vardera 100 provkroppar testades. Vid detta tillfälle provades konstruktionsträ med tvärsnitt på 38x185 mm, som var upplagt på tre stöd och belastades i båda spannen. Geometrin på balkarna var L:H=5:1, resp. 6:1. Resultatet visade att endast 40 % av balkarna gick till skjuvbrott. Det noterades även att de balkar som hade förhållandet 6:1 visade sig ha mellan 10 och 30 % lägre medelskjuvhållfasthet än vid förhållandet 5:1.

I Schinkhofer-Obermayrs arbete med att hitta en optimerad uppställning för att få skjuvbrott jämförs 2- resp. 3- stödsbalkar med L:H = 5:1. Deras resonemang är att de skjuvområden som uppstår runt mittstödet påverkar varandra så att 3-stödsbalkar klarar högre skjuvpåkänningar. Resultat som Schinkhofer-Obermayr uppmärksammade i R.H Leichester och F.G Youngs rapport visar att skillnaden är upp till 40 %.

Som ett alternativ till, det i prEN1194:1998 definierade uttrycket $f_{v,k} = 0,32 \cdot f_{m,k}^{0,8}$, ville Schinkhofer-Obermayr ta fram en provuppställning som kunde ge verkliga värden på limträns skjuvhållfasthet – inte endast härledda värden utifrån provningar av små solida träkroppar. Syftet var att hitta tillförlitliga testvärden som skulle kunna ligga till grund för nya karakteristiska skjuvhållfasthetsvärden för limträ. Resultatet blev tester på fritt upplagda limträbalkar på två stöd, I-tvärsnitt och med L:H=5:1. I-tvärsnitt pga. att balken skulle ha hög böjkapacitet i förhållande till skjuvkapacitet. Sammanfattningsvis är resultatet av Schinkhofer-Obermayrs undersökningar följande geometri:

- L:H=5:1
- H:H_{fläns}=5:1
- B_{fläns}:B_{liv}=2:1

För att undvika spänningskoncentrationer orsakade av skarpa hörn mellan livet och flänsarna rekommenderar Schinkhofer-Obermayr att hörnen rundas av så att det blir en mjukare övergång mellan delarna. Vid höga spänningskoncentrationer kan brott ske för tidigt och testresultatet blir därför inte direkt jämförbart med en balk med rektangulärt tvärsnitt.


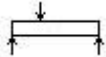

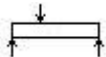

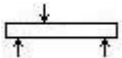

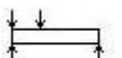

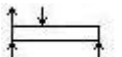

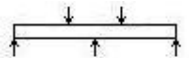
5.3 Provmaterial, provplan, utrustning och provningsgenomförande

5.3.1 Provmaterial

Provningsmaterialet för balkprovningarna är av samma typ som för materialprovningarna. För materialvärden och klimatdata, se kapitel 4.2.1.

5.3.2 Provplan

Tabell 7 visar provplanen för balkprovning med skiss på uppställningen samt dimensioner på balkarna.

Balkserie	Tvårsnitt	Längd (mm)	Höjd (mm)	Bredd (mm)	Antal	Last och upplag	Beteckning
1 (rektangulärt)		2575	315	115	4		1.1-1.4
2 (I-tvårsnitt)		2575	315	115	4		2.1-2.4
3 (överkragning)		3475	315	115	4		3.1-3.4
4 (tryck)		3000	315	115	4		4.1-4.4
5 (drag)		1975	315	115	4		5.1-5.4
6 (kontinuerlig)		4500	315	115	4		6.1-6.4

Tabell 7: Provplan för balkprovning.

5.3.3 Beskrivning av provningsutrustning

Provningsutrustning för balkprovningen kan ses under kapitel 4.2.3.



Figur 34: Bild på provutrustningen.

5.4 Antaganden och metod vid spänningsanalyser med FEM

Spänningsanalysen vid balkprovningarna har gjorts för att undersöka spänningsfördelningen för de provade balkarna. Trä har i beräkningsmodellen modellerats som ett ortotrop linjärelastiskt material, dvs. materialet har olika egenskaper i de olika riktningarna. Materialdata i beräkningsmodellen finns i kapitel 3.3.1, Tabell 1.

Upplagen för balkarna är stålplattor med måtten 300*115 mm och modelleras som styva. Randvillkoren vid dessa upplag har satts till ett fixlager och de övriga upplagen är av typen rulllager, detta har gjorts för att förhindra strukturen att rotera och för att det inte ska bli en stelkroppsrörelse.

Lasten P är i beräkningsmodellen en punktlast som verkar vertikalt på träbalken. Vid bestämning av storleken på lasten P har tvärkraftkapaciteten samt momentkapaciteten beräknats. Lasten P har sedan beräknas så att max skjuvspänning enligt konventionell balkteoriberäkning, Ekvation 1.2-4, blir 1 Pa för att enkelt få en jämförelse med vad beräkningar enligt normer ger. Ekvationerna för att göra denna jämförelse är Ekvation 1.2-4 och Ekvation 5.4-1 nedan.

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Ekvation 5.4-1

Lasten P appliceras inte mitt mellan upplagen, utan är förskjuten mot ena upplaget för att brott endast ska kunna ske vid en sida av balken, se figurer i avsnitt 5.3.2. Verkar lasten i

mitten kan balken gå till brott på båda sidorna av balken och det är då den svagaste sidan av balken som går till brott. En jämförelse mellan balkprovningar där brott endast kan ske på en sida, med balkprovningar där brott kan ske på två sidor, ger inte en bra jämförelse pga. den svagaste länken-teorin.

Ett problem vid modelleringen av upplagsplattorna är att upplagsplattorna och balken har samma nodpunkter vilket gör att de inte kan "glida" i förhållande till varandra. Om upplagsplattorna och balken inte kan glida i förhållande till varandra kommer spänningar att skapas i modellen vilka inte finns i verkligheten. Stålp Plattorna har även en gynnsam effekt mot böjbrott då de styvar upp balken om inte ett glidlager appliceras. Detta har undvikits genom att skapa ett tunt lager mellan upplagsplattorna och balken vilket har låg skjuvstyvhet och därigenom tillåts balken och upplagsplattorna att glida mot varandra. Denna lösning har samtliga upplagsplattor för att kunna efterlikna den verkliga provuppställningen.

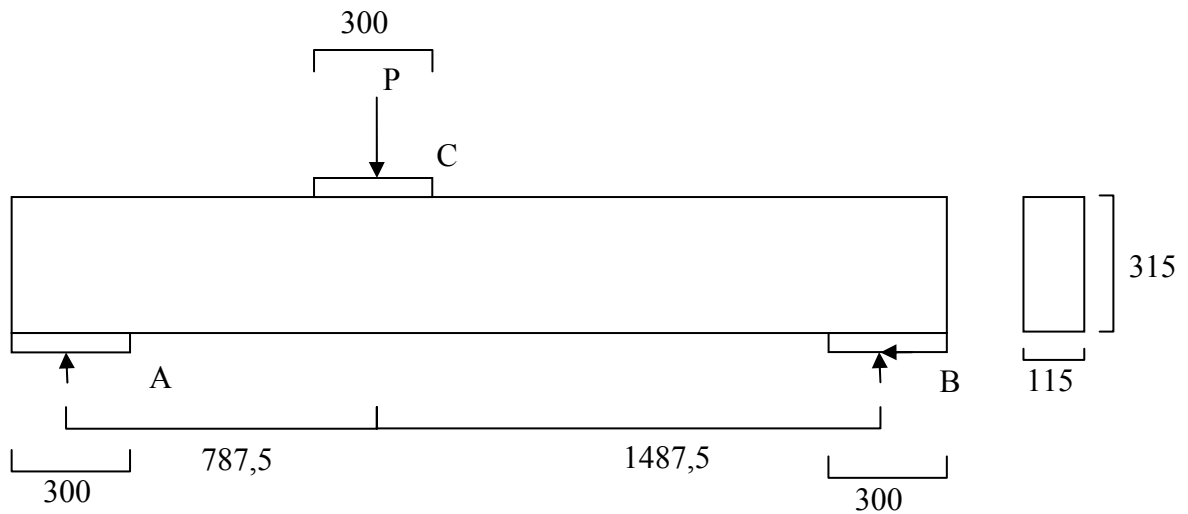
5.5 Balkserie 1, tvåstödsbalk med rektangulärt tvärsnitt

5.5.1 Introduktion

Balkarna i detta prov har samma yttermått på tvärsnittet som de övriga balkarna med I-tvärsnitt har, 115x315 mm. Balkens längd är 2575 mm och den är upplagd på två stöd med en last som angriper 787,5 mm från ena stödet, se Figur 35. Vid spänningsanalysen konstaterades det att vid en trepunktsböjning av en balk med rektangulärt tvärsnitt kan det bli svårt att få tillräckligt många balkar att gå till skjuvbrott, se Schinkhofer-Obermayr . Den här provningens resultat ska jämföras med motsvarande provning av balkar med I-tvärsnitt. Syftet är också att konstatera huruvida balken går till skjuvbrott innan böjbrott. För att få det eventuella skjuvbrottet att ske i en anvisad ände har lasten appliceras närmare enda upplaget.

5.5.2 Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt BKR

Balken är upplagd på två stöd av stål, A och B, dessa upplag har en längd på 300 mm. Belastningsplattan vilken lasten P verkar på har samma längd som upplagsplattorna. Upplaget vid A är ett rullager och upplaget vid B är ett fixlager, vilket förhindrar rörelse i horisontalled. Lasten kan mätas med hjälp av en lastcell, lastcellen registrerar den kraft som verkar på balken.



Figur 35: Uppställning och måttangivelser balkserie 1.



Figur 36: Provning av balkserie 1.

Vid bestämning av balkens bärförmåga används BKR, enligt Ekvation 5.5-1 nedan.

$$V = \frac{A \cdot f_{vk}}{1,5}$$

Ekvation 5.5-1

Denna ekvation är anpassad för balkar med rektangulära tvärsnitt. V är tvärkraften, A är arean av tvärsnittet och f_{vk} är karakteristiska skjuvhållfastheten

Arean och skjuvhållfastheten är givna. Arean är 115*315 mm och skjuvhållfastheten är 4 MPa. När dessa parametrar är kända kan tvärkraften beräknas då balken med viss sannolikhet ska gå till brott enligt normen.

$$V = \frac{A \cdot f_{vk}}{1,5}$$

$$V = 96,6 \text{ kN}$$

$$P = \frac{V_A \cdot L}{b} = 147,7 \text{ kN}$$

Ekvation 5.5-2

Böjkapaciteten beräknades och visade att balkserie 1 skulle gå till böjbrott, se beräkning nedan. Dock testas balkserie 1 för att få en jämförelse mellan rektangulärttvärsnitt och I-tvärsnitt.

$$M = f_{mk} \cdot W$$

$$P = \frac{f_{mk} \cdot W \cdot L}{a \cdot b} = \frac{33 \cdot 10^6 \cdot 0,0019 \cdot 2,275}{0,788 \cdot 1,488} = 121,8 \text{ kN}$$

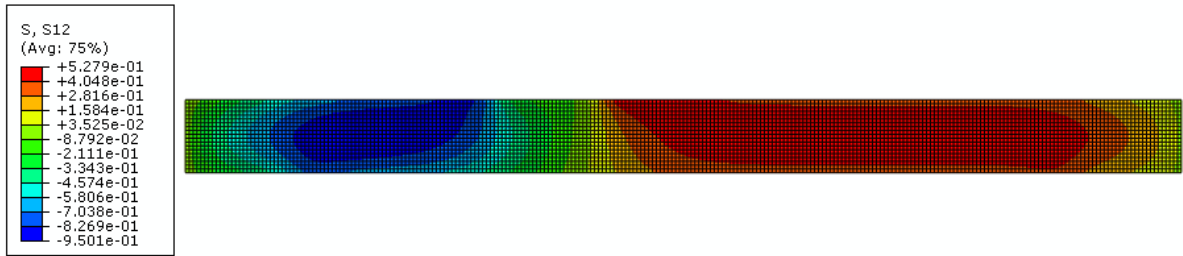
5.5.3 Spänningsanalys med FEM

Analysen gjordes för att undersöka spänningsfördelningen för den provade balken. Lasten P är i beräkningsmodellen en punktlast som verkar vertikalt på stålplattan, vilken i sin tur ligger på träbalken. Lasten P har beräknat så att max skjuvspänning blir 1 Pa för att enkelt få en jämförelse med vad beräkningar enligt normer ger. Lasten P är då 0,0369 N enligt nedan.

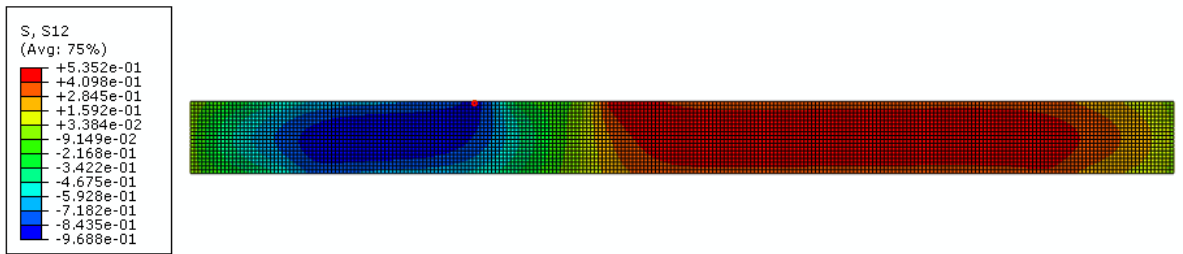
$$V = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} = \frac{0,315 \cdot 0,115 \cdot 1}{1,5} = 0,02415 \text{ N}$$

$$P = \frac{VL}{b} = 0,0369 \text{ N}$$

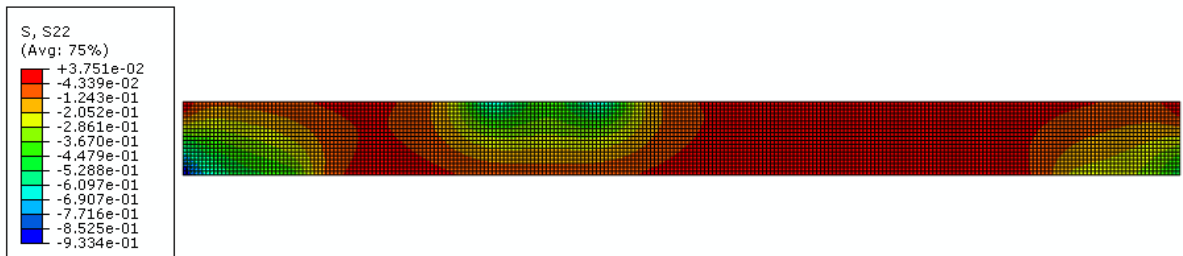
Figureerna som följer visar endast de mellersta 2/3 av balkhöjden. Detta för att bättre kunna jämföra med provningarna med I-tvärsnitt, där 2/3 av balkhöjden motsvaras av dess liv. Inledningsvis gjordes beräkningar för att undersöka vad ett mellanlager med låg skjuvstyvhet mellan stålplatta och trä har för inverkan. Figur 37 och Figur 38 nedan visar att ett mellanlager ger högre maximal skjuvspänning. Den maximala skjuvspänningen ökar från 0,9501 Pa till 0,9688 Pa. I alla följande beräkningar har ett mellanlager använts.



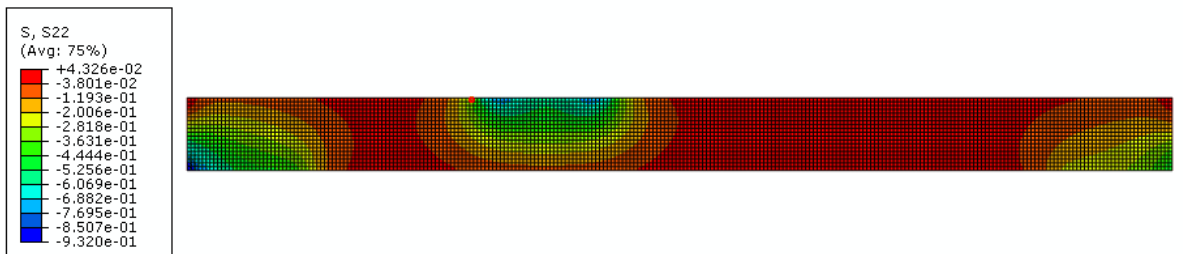
Figur 37: Skjuvspänning utan mellanlager mellan stålplattor och träbalk.



Figur 38: Skjuvspänning med mellanlager mellan stålplattor och träbalk.



Figur 39: Spänningar i y-led utan mellanlager mellan stålplattor och träbalk.



Figur 40: Spänningar i y-led med mellanlager mellan stålplattor och träbalk.

Även vid beräkning av spänningar i y-led kan en ökning av maximal spänning observeras då ett mellanlager appliceras i beräkningsmodellen. Vid ytan C där kraften P verkar mot träbalken skapas två spänningskoncentrationer i beräkningsmodellen. Dessa uppstår pga att belastningsplattan i stål är väldigt styv jämfört med träbalken, vilket skapar spänningskoncentrationer i träbalken invid belastningsplattans hörnpunkter.

Spänningarna i x- och y-led, samt skjuvspänningarna har sedan använts i Norris-McKinnons brottvillkor för att undersöka var i balken påfrestningarna på träet blir som störst. De röda prickarna i Figur 38 och i Figur 40 visar var i balk 1 jämförelsespänningar enligt Norris-McKinnons kriterium är störst. Vid denna punkt finns maximal skjuvspänning samt att punkten ligger i närheten av spänningskoncentrationen från belastningsupplaget.

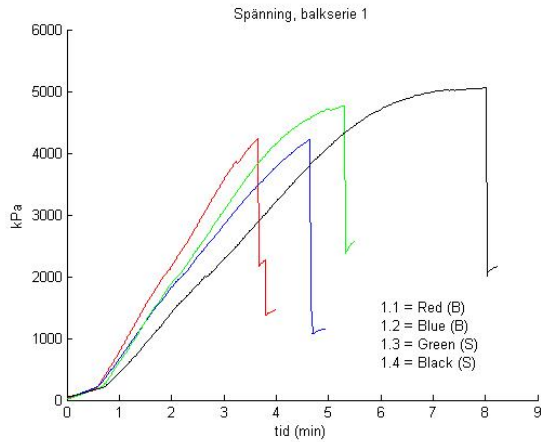
5.5.4 Provningsresultat

Vid provningen uppstod böjbrott i balk 1.1 och 1.2 medan balk 1.3 och 1.4 gick till skjuvbrott. Eventuellt har även tiden inverkan på vilket brotttyp som uppstår, eftersom 1.3 och 1.4 har de längsta provningstiderna och då speciellt 1.4. På grund av att balk 1.4 testades först fanns det svårigheter i hur fort provningsmaskinen skulle belasta balken, detta gjorde att balk 1.4 hade längre provningstid. Brottspänningarna och tvärkraften är enligt förväntningar från beräkningarna och vad det karakteristiska värdet är för limträ.

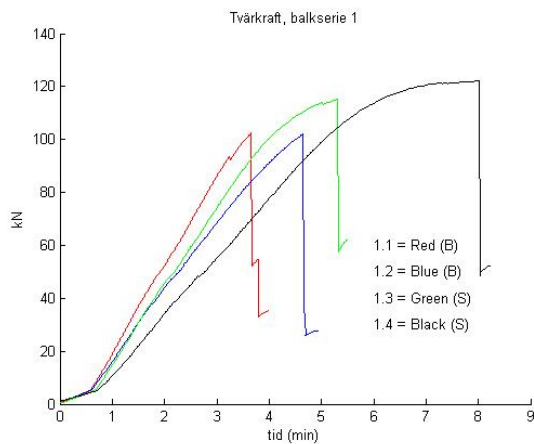
Balkserie	Brottvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brotttyp
Balk 1.1	102,38	4,24	Böjbrott
Balk 1.2	102,06	4,22	Böjbrott
Balk 1.3	115,17	4,77	Skjuvbrott
Balk 1.4	122,16	5,06	Skjuvbrott
Medelvärden:	110,44	4,57	
Standardavvikelse:		0,41	

Tabell 8: Resultat balkserie 1.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 8, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 41 och Figur 42.

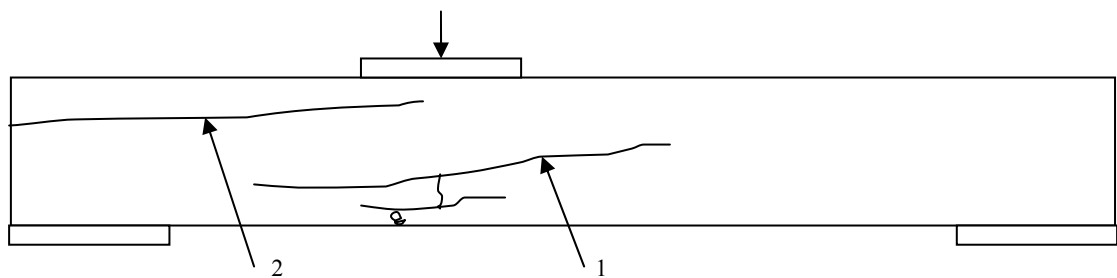


Figur 41: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 1. Balk 1.4 belastades 4,2 mm/min, övriga balkar 6 mm/min.



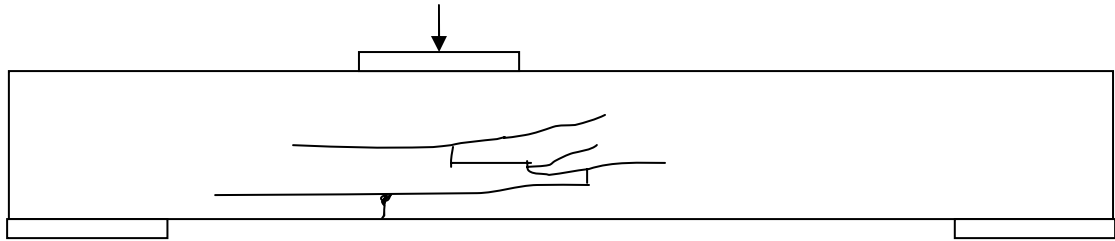
Figur 42: Tvärkraft som funktion av tiden för balkserie 1.

Brottnoderna för balkserie 1 visas i nedan följande figurer



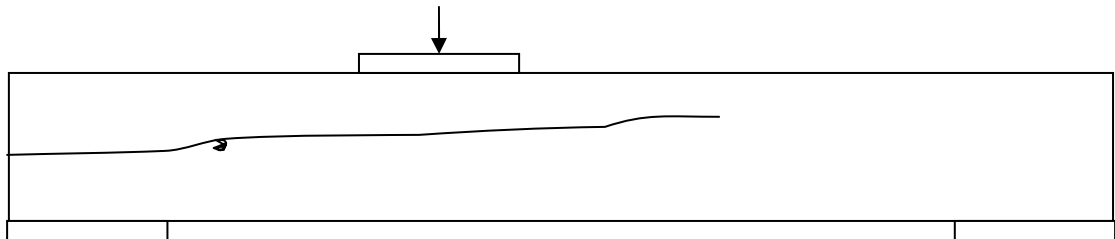
Figur 43: Illustration av brottet i balk 1.1.

Brottet som först uppkom i balk 1.1 är ett böjbrott vilket kan ses i Figur 43 ovan. Därefter har ett skjuvbrott uppkommit vid ökad nedböjning.



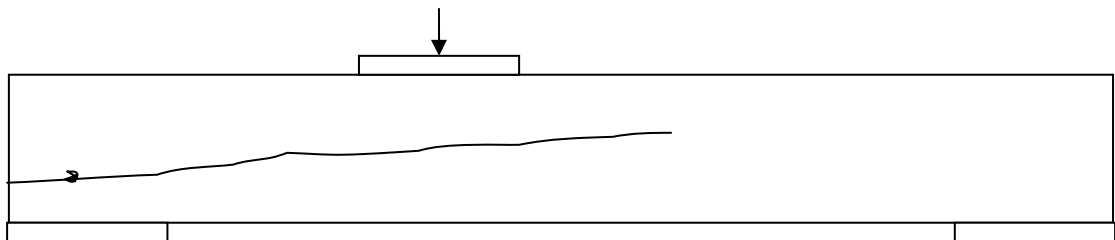
Figur 44: Illustration av brottet i balk 1.2.

Brottet i balk 1.2 är ett böjbrott. En försvagning i balken, en kvist, finns placerad rakt under belastningsplattan i underkanten av balken, denna försvagning har förmodligen givit en brottanvisning i balken. Detta på grund av hur krafterna fördelar sig runt en knast.



Figur 45: Illustration av brottet i balk 1.3.

Brottet i balk 1.3 är ett skjuvbrott, efter brottet har balken förlorat stor del av bärförmågan.



Figur 46: Illustration av brottet i balk 1.4.

Brottet i balk 1.4 är ett skjuvbrott, efter brottet har balken förlorat stor del av bärförmågan.

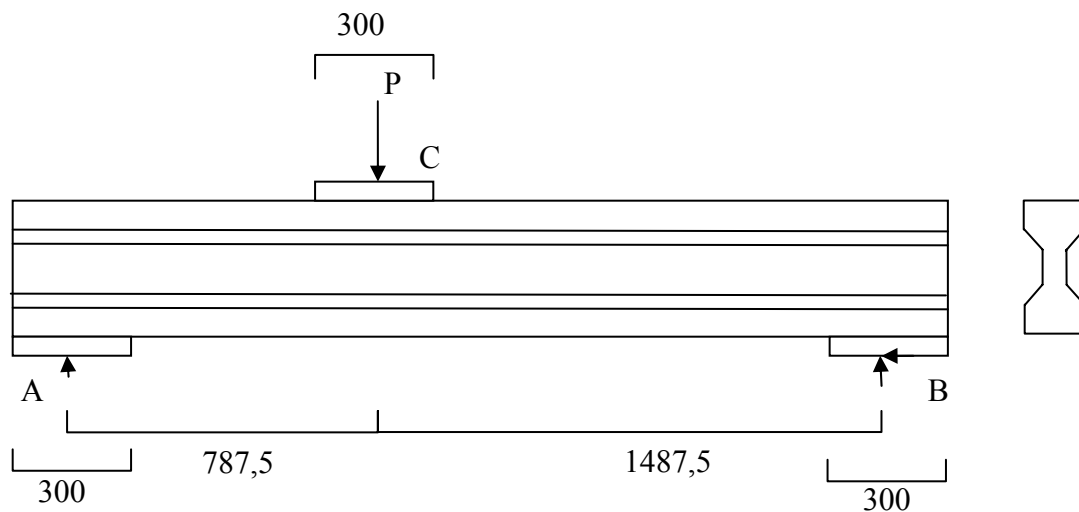
5.6 Balktyp 2: Tvåstödsbalk med I-tvärsnitt

5.6.1 Introduktion

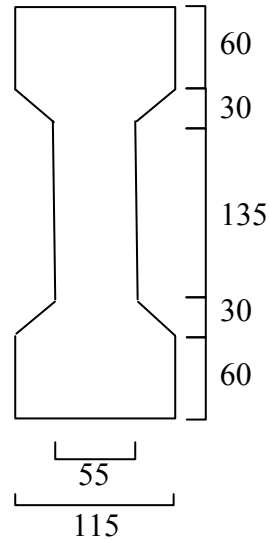
Balkuppställningen är densamma som för balkserie 1, den förändring från balkserie 1 som har gjorts är att tvärsnittet i balkserie 2 är ett I-tvärsnitt, se Figur 47. Förändringen är gjord för att se eventuella skillnader mellan ett rektangulärt tvärsnitt och ett I-tvärsnitt. Snedskärningarna i I-tvärsnittet används för att få en bättre övergång mellan liv och fläns i tvärsnittet. Vid tidigare tester gjorda i Finland, redovisade i rapporten *Experimental study of compression and shear strength of spruce timber* [4], användes inte dessa snedskärningar vilket har lett till att ett stort antal balkar har gått till skjuvbrott i anslutningen mellan liv och fläns. Snedskärningen används för att minska spänningskoncentrationer vid liv/fläns-övergången för att brottet istället ska ske i mitten av livet. Balkserie 3-6 där andra parametrar förändras använder samma tvärsnitt som i balkserie 2.

5.6.2 Provningsuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt norm

Balkuppställningen är likadan som i balkserie 1, förutom att I-tvärsnitt används. Provbalkens geometri visas i Figur 47 och balkens tvärsnitt är visat i Figur 48. Den totala längden på balken är 2575 mm och spännvidden mellan upplagen är 2275 mm.



Figur 47: Uppställning balkserie 2.



Figur 48: I-tvårsnittets geometri.

Vid beräkning av tvärkraftskapaciteten användes för balkserie 1 BKR med ekvationen nedan

$$V = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5}$$

Ekvation 5.6-1

Denna formel är anpassad för balkar med rektangulära tvärsnitt. Därför används istället den allmänna formeln för att beräkna skjuvspänningar.

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Ekvation 5.6-2

Där V är tvärkraften, S det statiska momentet, I tröghetsmomentet och b är bredden där skjuvspänningen beräknas. Den största skjuvspänningen uppstår i mitten av tvärsnittet, därför beräknas endast denna skjuvspänning för tvärsnittet.

Det statiska momentet beräknas från följande

$$S = \sum y_0 \cdot A = 1,220 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Ekvation 5.6-3

Tröghetsmomentet kan beräknas från Ekvation 5.6-4 nedan:

$$I = \sum \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + y_0^2 \cdot A \right) = 2,763 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Ekvation 5.6-4

Bredden och skjuvhållfastheten är givna. Livets bredd är 55 mm och skjuvhållfastheten är 4 MPa. När dessa parametrar är kända kan tvärkraften beräknas då balken ska gå till brott enligt normen.

$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = 49,82 \text{ kN}$$

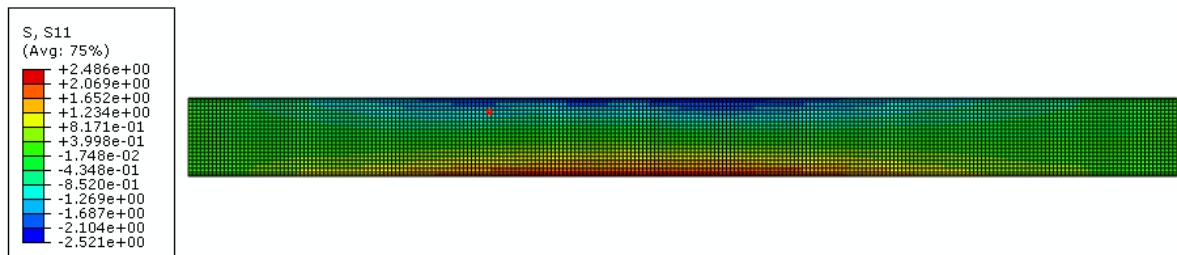
$$P = \frac{V_A \cdot L}{b} = 75,19 \text{ kN}$$

5.6.3 Spänningsanalys med FEM

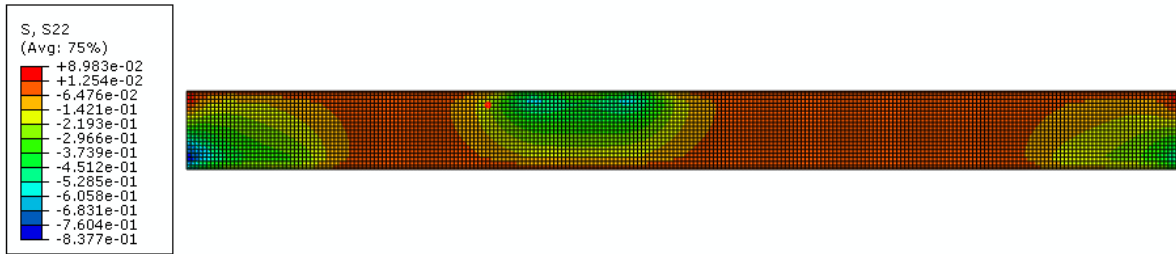
Förutsättningarna för Abaqus-analysen vilka nämns i balkserie 1 är samma i balkserie 2, dvs. mellanlager mellan platta och balk har applicerats samt hänsyn till fiberriktningen i träet har tagits med i beräkningarna. Beräkning av lasten vilken appliceras i modellen har gjorts med hjälp av normen, Ekvation 5.6-2, där skjuvspänningen är satt till 1 Pa för att underlätta jämförelser mellan balkserierna. Lasten blir då enligt nedan.

$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = 0,0124 \text{ N}$$

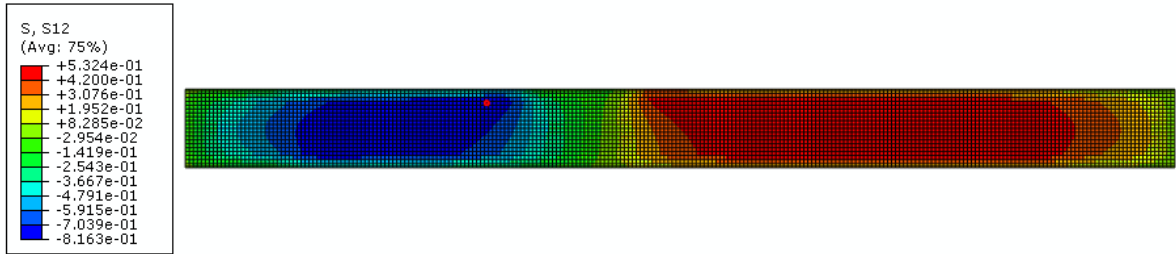
$$P = \frac{VL}{b} = 0,01896 \text{ N}$$



Figur 49: Spänning i x-led för balkserie 2.



Figur 50: Spänning i y-led för balkserie 2.



Figur 51: Skjuvspänning för balkserie 2.

Abaqus-beräkningen ger att den maximala skjuvspänningen i livet är 0,816 Pa vilket är betydligt lägre än vad normen anger, vilket är 1 Pa med samma last. Det innebär att lasten i modellen ska ökas med 22,5% för att skjuvspänningen i modellen ska vara 1 Pa. En förklaring till varför det skiljer sig mellan beräkningen med normerna och med Abaqus kan vara att normen använder balkteori vilket inte fungerar optimalt då balken är förhållandevis kort och hög. De röda prickarna visar var det med störst sannolikhet sker ett brott enligt Norris-McKinnons brottsvillkor. Denna punkt är utsatt för stor skjuvspänning, tryck vinkelrätt träfibrer från belastningsplattan samt tryck i fibrernas riktning från böjmomentet.

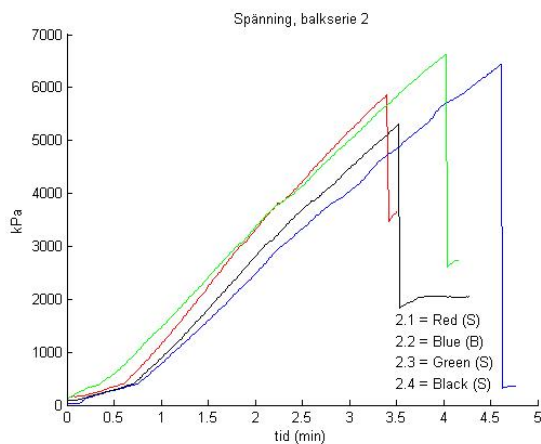
5.6.4 Provningsresultat

Resultatet från provningarna överstiger de förväntade värdena vid beräkningar. Brottspänningarna för balkserie 2 är mellan 5,31 och 6,63 MPa vilket är 32,8 % till 65,6 % över den karakteristiska skjuvhållfastheten för limträ. Balktest 2.2 har inte haft ett skjuvbrott utan balken fick ett böjbrott vilket inte varit förväntat. Beräknad brottlast P enligt BKR är för skjuvbrott 75,97 kN medans brottlasten för böjbrott är 113,41 kN, lasten P ($P_{medel} = 115,05$ kN) har överstigit båda brottlasterna vid provningen. Eftersom balken inte har gått till skjuvbrott är skjuvspänningen i balken ett lägsta värde av vad balk 2.2 klarar. Övriga balkar har gått till skjuvbrott.

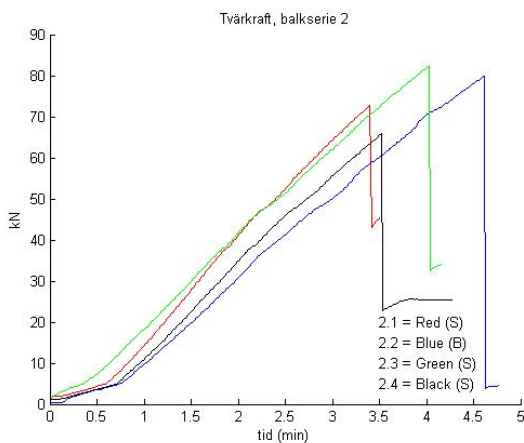
Balkserie	Brottvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brottyp
Balk 2.1	72,78	5,86	Skjuvbrott
Balk 2.2	79,83	6,43	Böjbrott
Balk 2.3	82,32	6,63	Skjuvbrott
Balk 2.4	65,96	5,31	Skjuvbrott
Medelvärden:	75,22	6,06	
Standardavvikelse:		0,60	

Tabell 9: Resultat balkserie 2.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 9, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 52 och Figur 53.

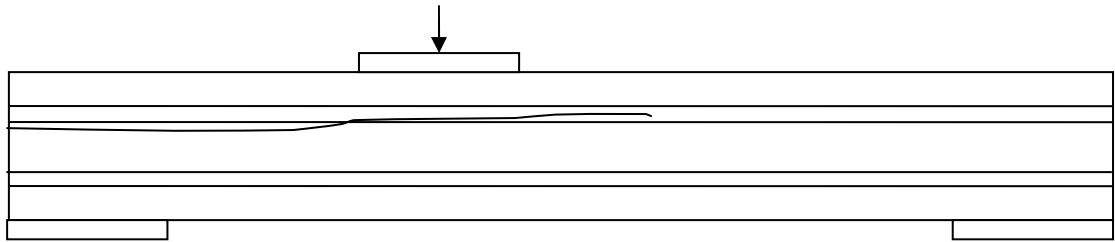


Figur 52: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 2. Balk 2.1 hade en belastningshastighet på 5,4 mm/min, övriga balkar 4,8 mm/min.



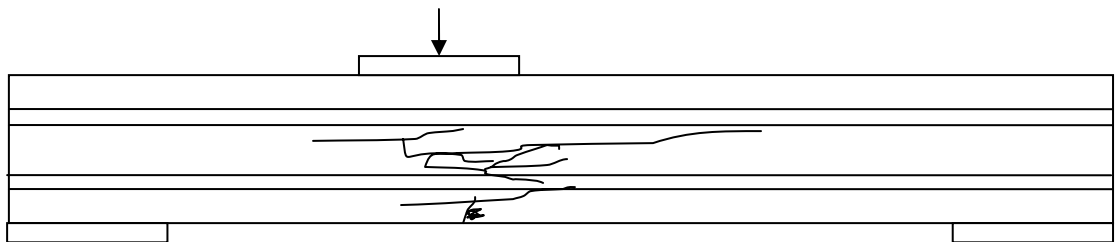
Figur 53: Tvärkraft som funktion av tiden för balk 2.

Brottmödrerna för balktyp 2 redovisas i nedan följande figurer



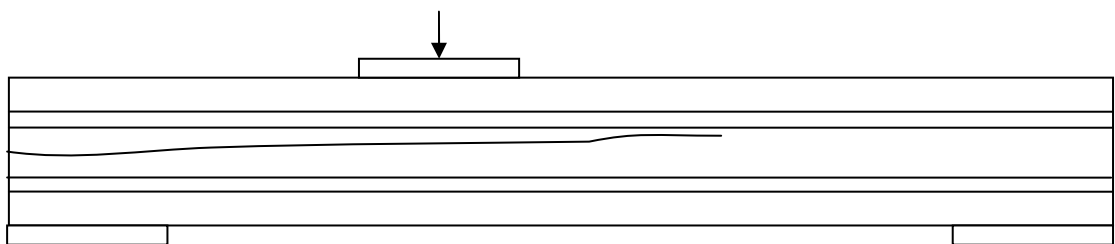
Figur 54: Illustration av brottet i balk 2.1.

Brottet på balk 2.1 är ett skjuvbrott, efter brottet har balken förlorat större delen av sin bärförmåga



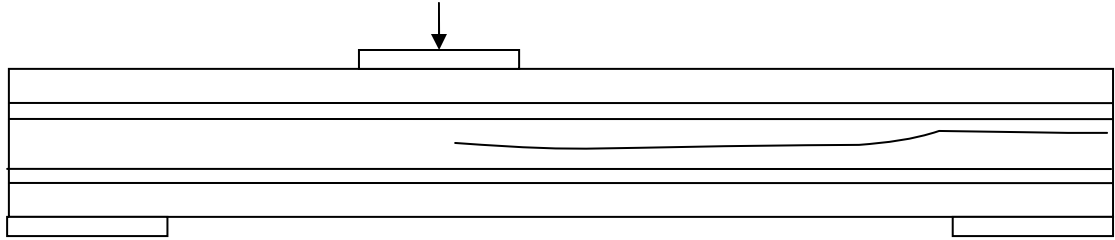
Figur 55: Illustration av brottet i balk 2.2.

Brottet på balk 2.2 är ett böjbrott. Böjbrottet har förmodligen startat i anslutning till kvisten i balkens nedre del.



Figur 56: Illustration av brottet i balk 2.3.

Brottet på balk 2.3 är ett skjuvbrott, efter brottet har balken förlorat större delen av sin bärförmåga.



Figur 57: Illustration av brottet i balk 2.4.

Brottet på balk 2.4 är ett skjuvbrott. Dock har brottet gått på ”fel” del av balken. I brottytan observerades 3 stora kvistar, varav en var delvis förruttnad. Vidare observerades i brottytan att en del av fogen mellan två lameller inte är limmad vid tillverkningen. Limrester finns kvar på lamellernas fogtor, men lamellerna hade längs ca 10 cm inte varit i kontakt när limmet hårdnade. Ytan med den felaktiga limningen var i balken belägen på ett ställe med stor skjuvspänning. Detta kan förklara varför balken gick till skjuvbrott i ”fel” ände.

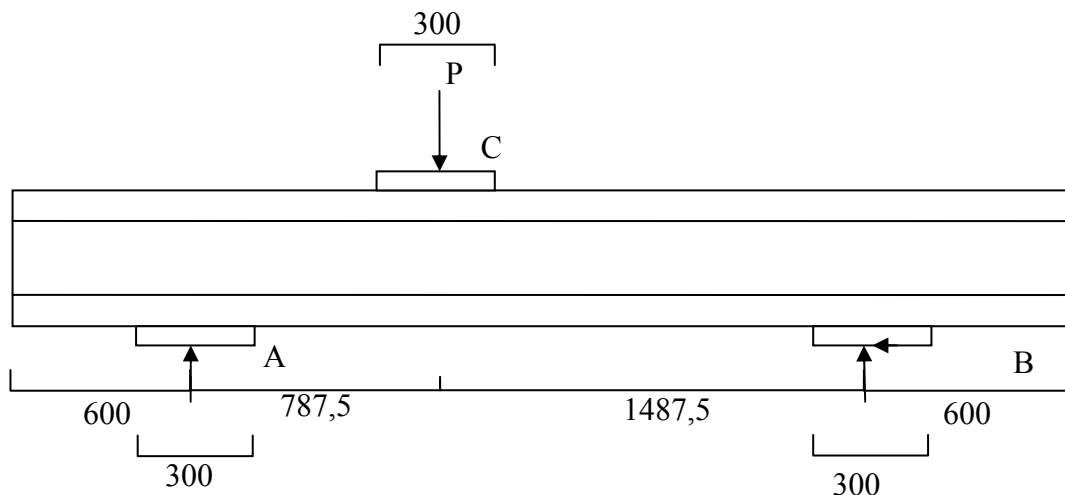
5.7 Balktyp 3: Tvåstödsbalk med I-tvårsnitt och överkragning

5.7.1 Introduktion

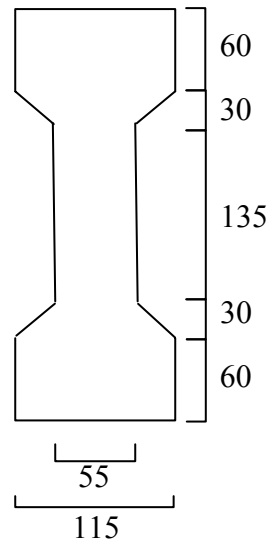
Denna provning undersöker hur överkragning vid upplag påverkar en balks tvärkraftskapacitet. Det förväntades att överkragningen skulle verka positivt på balkens tvärkraftskapacitet, eftersom det är större area som tar upp skjuvkraften när balken har överkragning. Provningsen genomförs med ett I-tvårsnitt. Enligt de beräkningsmetoder och normer som används vid dimensionering av balkar tas ingen hänsyn till hur en eventuell överkragning påverkar balken.

5.7.2 Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet

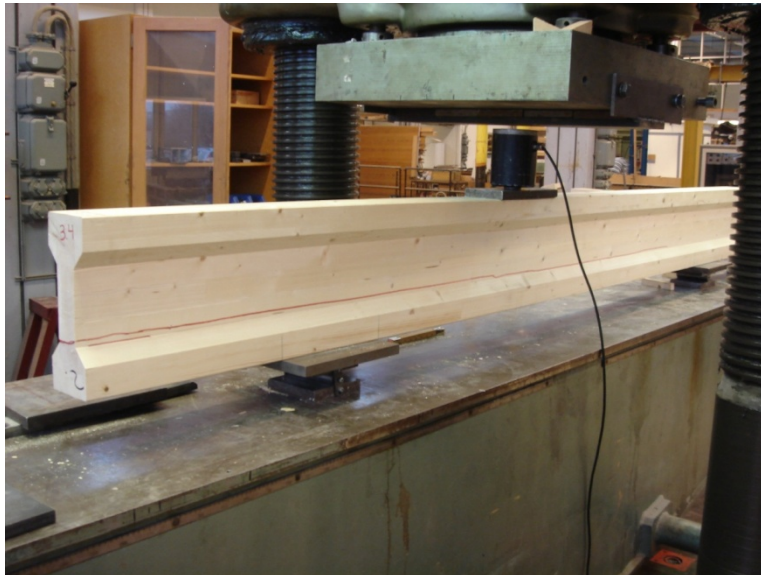
På var sida om stöden kragar balken ut 600 mm, se Figur 58 och Figur 60. Lasten angriper ej som i tidigare serier, dvs. mitt emellan upplagen. Avståndet från upplag A till kraften P är 0,7875 m och från upplag B till kraften P är avståndet 1,4875 m. Tvärsnittets geometri för provbalken kan ses i Figur 47, där syns även snedskärningar vilka har till syfte att minska eventuella spänningskoncentrationer i balken. Måtten på dessa är 30x30 mm.



Figur 58: Balkuppställning för balktyp 3.



Figur 59: Geometri balkserie 3.



Figur 60: Provning av balkserie 3.

Beräkning av tvärkraftkapaciteten har den svenska normen används, se ekvation nedan.

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Där V är tvärkraften, S det statiska momentet, I tröghetsmomentet och b är bredden där skjuvspänningen beräknas. Den största skjuvspänningen skapas i mitten av tvärsnittet, därför beräknas endast denna skjuvspänningen för tvärsnittet. Eftersom samma tvärsnitt och spännvidd används i detta test som i balkserie 2 fås samma brottvärkraft och samma brottlast.

$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = 49,82 \text{ kN}$$

$$P = \frac{V_A \cdot L}{b} = 75,19 \text{ kN}$$

5.7.3 Spänningsanalys med FEM

Beräkningsanalys har gjorts av provbalken med en spännvidd på 2275 mm mellan upplag A och B, och med en överkragning på 600 mm. Detta för att se hur överkragningen påverkar spänningsfördelningen. Spännvidden mellan upplagen är den samma som i balkserie 1 och samma I-tvärsnitt som balkserie 2 används i denna uppställning. Kraften P, vilket verkar på balken, har beräknats så att skjuvspänningen enligt BKR blir 1 Pa, enligt följande:

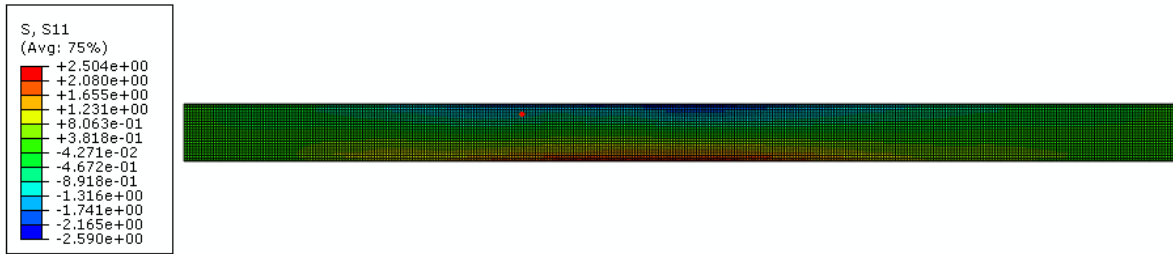
$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = \frac{1 \cdot 0,0002787 \cdot 0,055}{0,001235} = 0,01242 \text{ N}$$

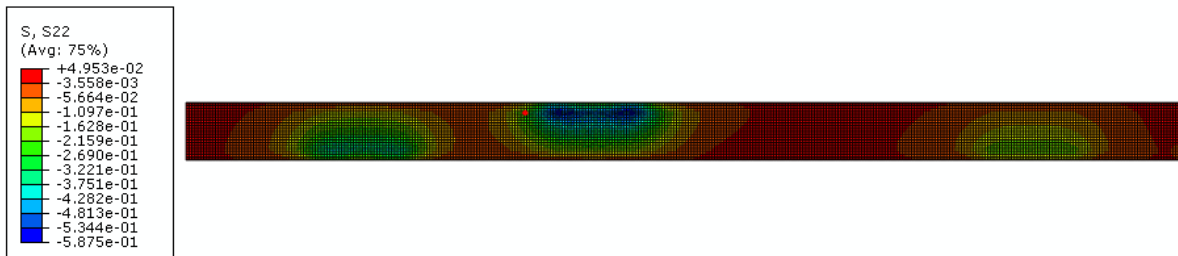
Då tvärkraften V vid punkten A är beräknad kan lasten P beräknas.

$$P = \frac{V \cdot L}{b} = \frac{0,01242 \cdot 2,275}{1,4875} = 0,01896 \text{ N}$$

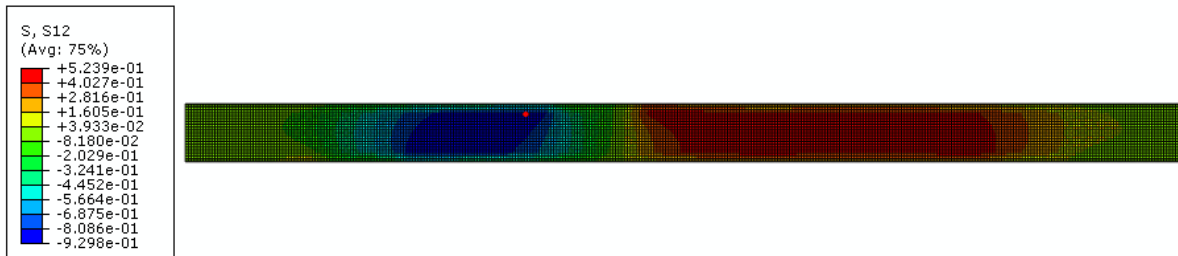
Förutsättningar och antagande för beräkningar i Abaqus är de samma som i balkserie 1 och 2, dvs att ett mellanlager har applicerats samt att hänsyn tagits till fiberorienteringen i träet.



Figur 61: Spänningar i x-led för balkserie 3.



Figur 62: Spänningar i y-led för balkserie 3.



Figur 63: Skjuvspänningar för balkserie 3.

Abaqus-beräkningarna ger att den maximala skjuvspänningen är 0,9298 Pa med en last som är beräknad från normen då skjuvspänningen är 1 Pa. Det ger att Abaqusmodellen måste applicera en last vilket är 7,5 % större än vad normen anger för att uppnå en skjuvspänning på 1 Pa. De röda prickarna i Figur 61-Figur 63 ovan markerar var det med störst sannolikhet sker ett brott enligt Norris-McKinnons brottvillkor. Denna punkt är belastad med stor skjuvspänning, tryck vinkelrätt fibrerna samt tryck längs med fibrerna.

5.7.4 Provningsresultat

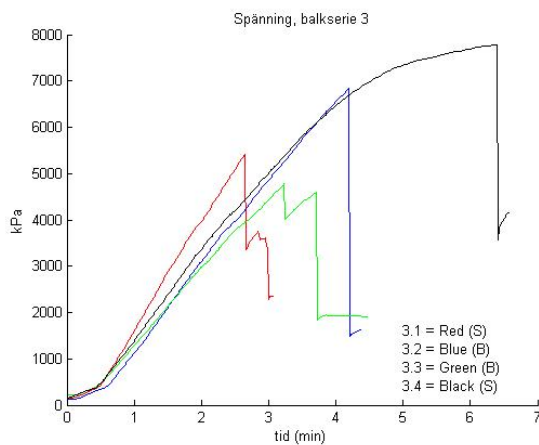
Från balkserie 3 är resultatet mycket varierande då balkarna har gått till skjuvbrott från 4,78 MPa till 7,78 MPa. Belastningshastigheten av 3.1 var för hög, 6 mm/min. Lämplig belastningshastighet har varit svår att uppskatta i förväg då förväntningarna vid provningen var att balken skulle klara en större last med överkragningen. Det är även svårt att dra någon slutsats från testerna då av de två balkar vilka klarade störst spänning

har en gått till skjuvbrott och en till böjbrott, vilket gör att det är svårt att se något samband av brottyperna.

Balkserie 3	Tvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brotttyp
Balk 3.1	67,29	5,42	Skjuvbrott
Balk 3.2	84,93	6,84	Böjbrott
Balk 3.3	59,33	4,78	Böjbrott
Balk 3.4	96,64	7,78	Skjuvbrott
Medelvärden :	77,05	6,21	
Standardavvikelse:		1,36	

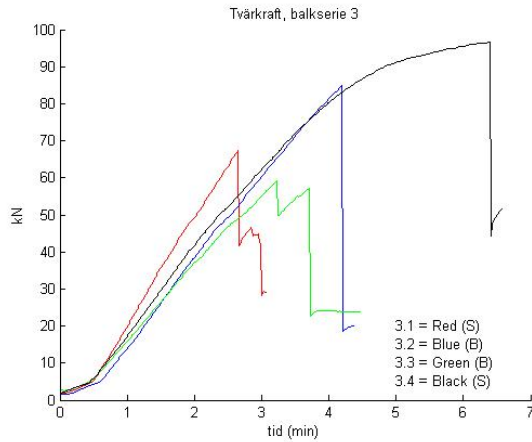
Tabell 10: Resultat balkserie 3.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 10, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 64 och Figur 65.



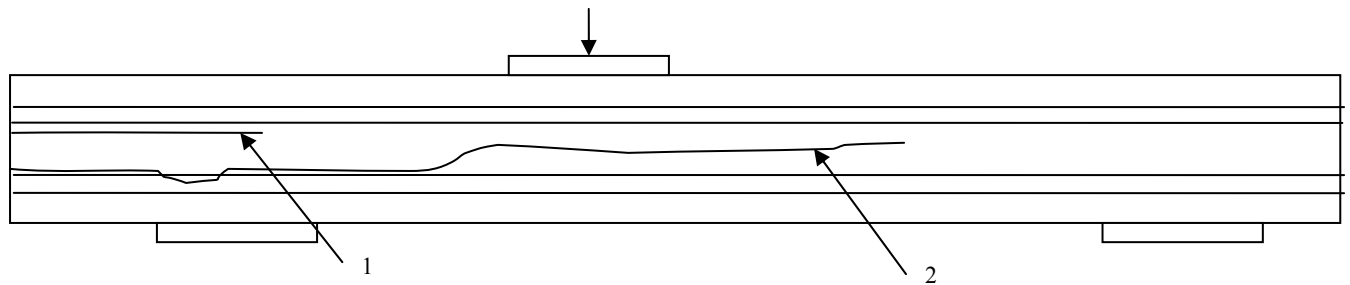
Figur 64: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 3. Balk 3.1 hade en belastningshastighet på 6 mm/min, balk 3.2 hade 5,4 mm/min och övriga balkar 4,8 mm/min.

Provnigen av balk 3.3, grön linje i Figur 64 ovan, har först gått till böjbrott och därefter gått till skjuvbrott vilket man kan se i Figur 64 ovan som en nedgång i grafen då böjbrottet sker och därefter har spänningen ökat tills den har gått till skjuvbrott.



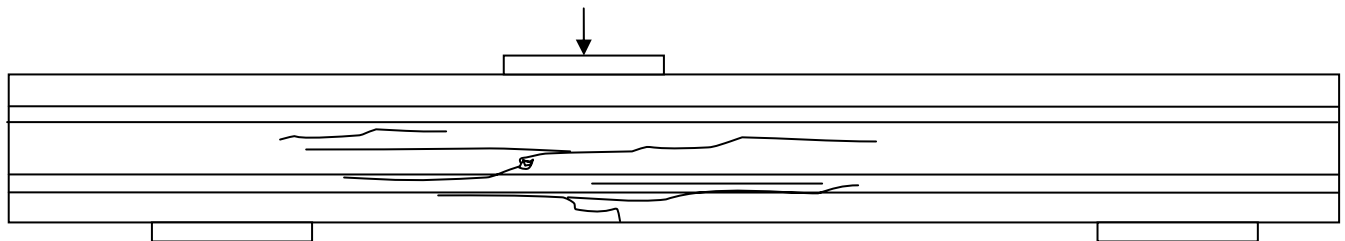
Figur 65: Tvärkraft som funktion av tiden för balk 3.

Brottmödr för balktyp 3 redovisas i följande figurer nedan.



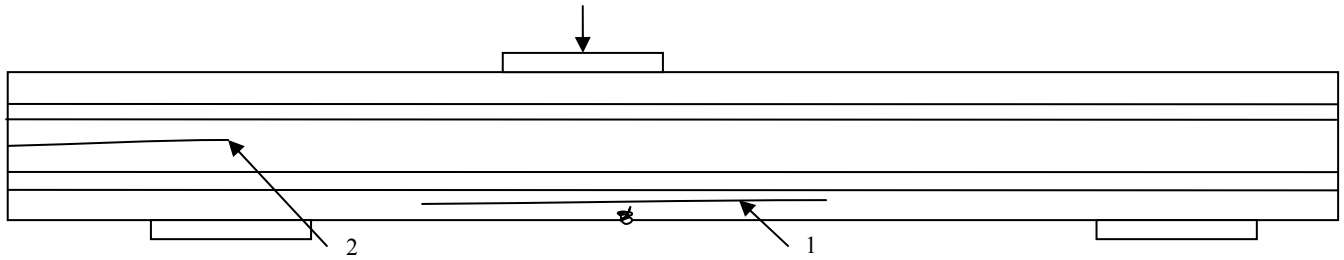
Figur 66: Illustration av brottet i balk 3.1.

Brottet i balk 3.1 är i båda fallen skjuvbrott.



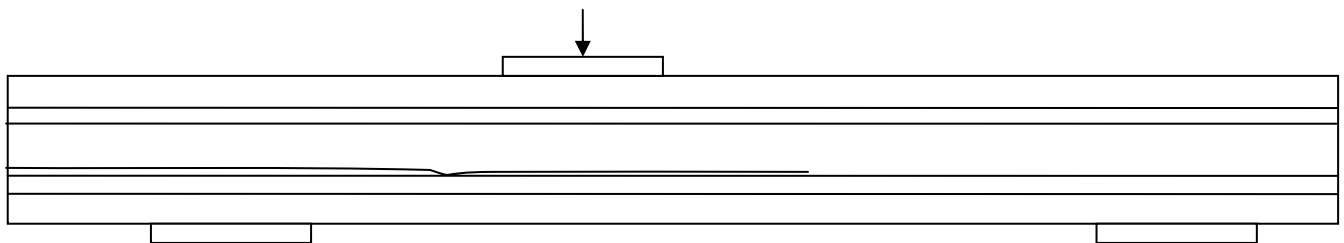
Figur 67: Illustration av brottet i balk 3.2.

Brottet i balk 3.2 är ett böjbrott. Även i denna balk finns det en kvist i undersidan av balken i linje med belastningsplattan. En möjlig förklaring till böjbrottet är spänningsfördelningen runt kvisten.



Figur 68: Illustration av brottet i balk 3.3.

Brottet i balk 3.3 är först ett böjbrott och därefter ett skjuvbrott. Även i detta fall har kvisten med stor sannolikhet haft inverkan på brottet. Efter att böjbrottet har skett finns det mindre area för att ta upp krafter i balken vilket har lett till ett skjuvbrott.



Figur 69: Illustration av brottet i balk 3.4.

Brottet i balk 3.4 är ett skjuvbrott. Efter brottet har större delen av bärförmågan förlorats.

Balktyp 4: Tvåstödsbalk med I-tvärsnitt och tryckkraft vinkelrätt fiber

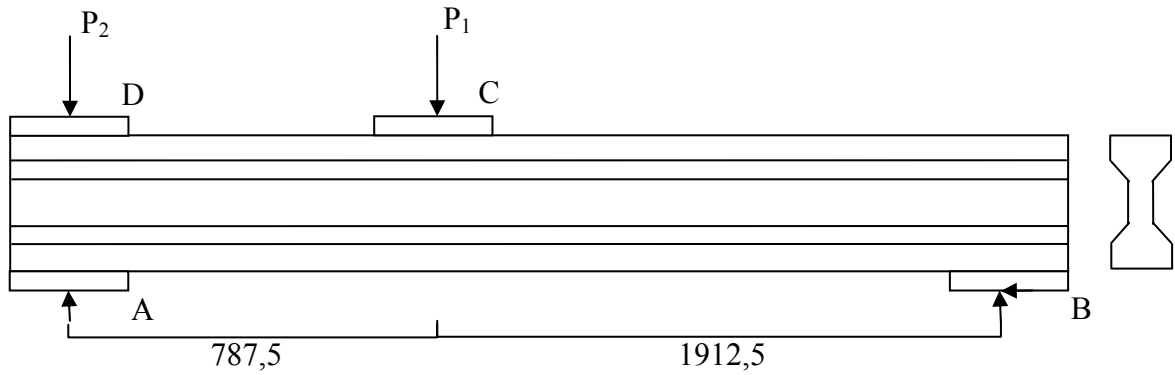
5.7.5 Introduktion

Tryckande kraft vinkelrätt fibrerna tros ha gynnsam effekt på skjuvhållfastheten hos en balk eftersom den tryckande kraften ger friktion mellan fibrerna och så sätt ökar skjuvkapaciteten. I de nämnda brottkriterierna tas ingen hänsyn till ifall kraften är tryckande eller dragande och detta ska undersökas i de två följande provningarna. Förutom den böjande lasten, som i detta fall angriper närmare ena upplaget, appliceras en tryckande kraft på balken rakt ovanför samma upplag. Den böjande lasten placeras närmare ena upplaget för att undvika oönskade brott i den "fria" änden. I-balkarna har i denna provning längder på 3000 mm.

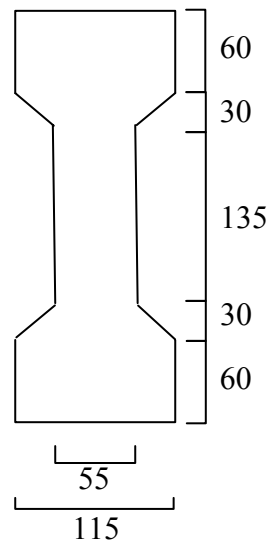
5.7.6 Provuppställning och beräkning av tvärkraftskapacitet enligt norm

Balkserie 4 används I-tvärsnitt med en längd på balken på 3000 mm. För att skapa ett tryck i balkänden vid punkt D används en stålbalk för att dela upp kraften från

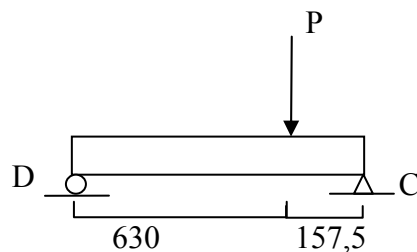
provningssmaskinen mellan belastningsplattorna vid punkt C och D. Lasten från provningssmaskinen belastar stålbalcken så att P_2 är 20 % av totala lasten P .



Figur 70: Uppställning och måttangivelser balkserie 4.



Figur 71: Tvärsnittsgeometri för balkserie 4.



Figur 72: Belastningsbalcken för balkserie 4. Balcken fördelar lasten till två punkter.



Figur 73: Provning av balkserie 4.

För beräkning av tvärkraftskapaciteten används den svenska normen, se ekvation nedan.

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Där V är tvärkraften, S det statiska momentet, I tröghetsmomentet och b är bredden där skjuvspänningen beräknas. Den största skjuvspänningen skapas i mitten av tvärsnittet, därför beräknas endast denna skjuvspänningen för tvärsnittet. Eftersom samma tvärsnitt och spännvidd används i detta test som i balkserie 2 fås samma brotttvärkraft och samma brottlast.

$$V = 49,82 \text{ kN}$$

För att beräkna lasten P krävs att lasten P_1 först beräknas.

$$P_1 = \frac{VL_1}{b_1} = \frac{49,82 \cdot 2,70}{1,913} = 70,33 \text{ kN}$$

$$P = \frac{P_1 L_2}{b_2} = \frac{70,33 \cdot 0,7875}{0,63} = 87,91 \text{ kN}$$

$$P_2 = \frac{P b_3}{L_2} = \frac{87,91 \cdot 0,1575}{0,7875} = 17,58 \text{ kN}$$

Den tryckande kraften P_2 är 20 % av belastningen från provningsmaskinen och 80 % belastar balken i punkt C.

5.7.7 Spänningsanalys med FEM

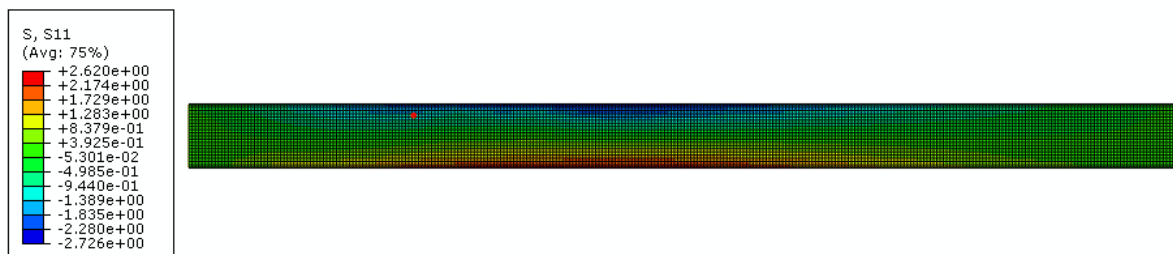
Vid beräkning för balkserie 4 används de förutsättningar vilka nämns i Abaqus beräkningar för balkserie 1, dvs. ett mellanlager är applicerat och träets fiberriktning är beaktad. Lasten är beräknad då skjuvspänningen enligt den allmänna formeln är 1 Pa, vilket ger att lasten P , P_1 och P_2 är enligt nedan.

$$V = \frac{\tau \cdot l \cdot b}{S} = 0,0124 \text{ N}$$

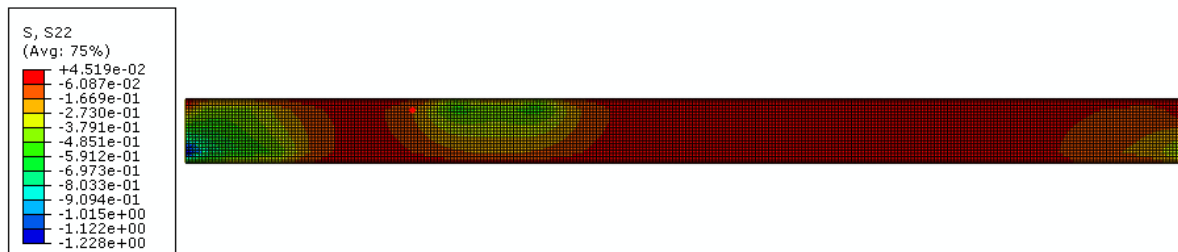
$$P_1 = 0,0175 \text{ N}$$

$$P = 0,0219 \text{ N}$$

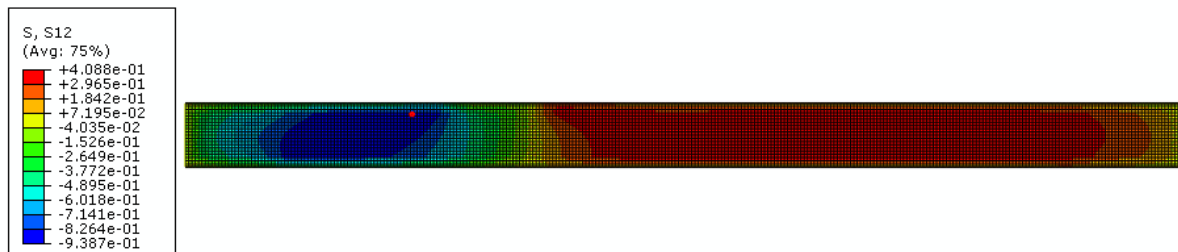
$$P_2 = 0,00438 \text{ N}$$



Figur 74: Spänningar i x-led för livet i balkserie 4.



Figur 75: Spänningar i y-led för livet i balkserie 4.



Figur 76: Skjuvspänningar för livet i balkserie 4.

Abaqusberäkningen gav att den maximala skjuvspänningen är 0,9387 Pa. Detta är lägre än vad konventionell beräkning enligt normen ger. Den röda pricken i Figur 74-Figur 76 visar vart det med störst sannolikhet sker ett brott enligt Norris-McKinnons brottvillkor.

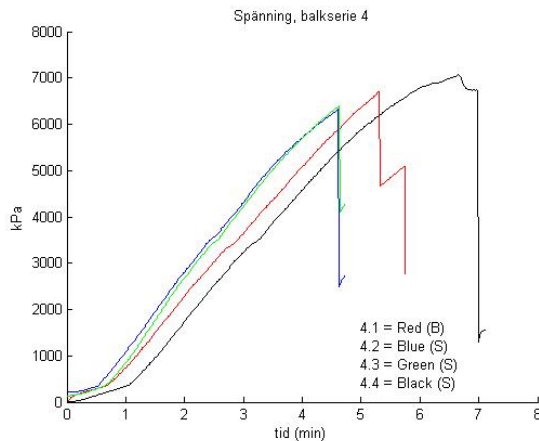
5.7.8 Provningsresultat

Samtliga balkar i balkserie 4 har gett skjuvbrott vilket är i enlighet med beräkningarna. Resultat är över förväntan då medelskjuvspänningen för balkserie 4 är 6,63 MPa medan balkserie 2 hade en medelskjuvspänning på 6,06 MPa. Det visar att en tryckande kraft vid upplaget har en gynnsam effekt på skjuvhållfastheten. Ökningen av spänningen från balkserie 2 är 9%.

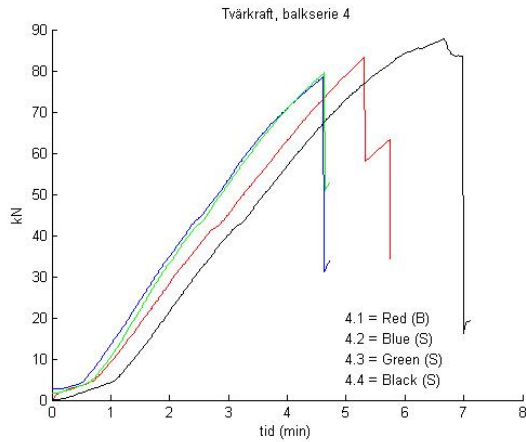
Balkserie 4	Brottvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brotttyp
Balk 4.1	83,35	6,71	Böjbrott
Balk 4.2	78,54	6,32	Skjuvbrott
Balk 4.3	79,55	6,41	Skjuvbrott
Balk 4.4	87,73	7,06	Skjuvbrott
Medelvärden:	82,29	6,63	
Standardavvikelse:		0,33	

Tabell 11: Resultat balkserie 4.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 11, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 77 och Figur 78.

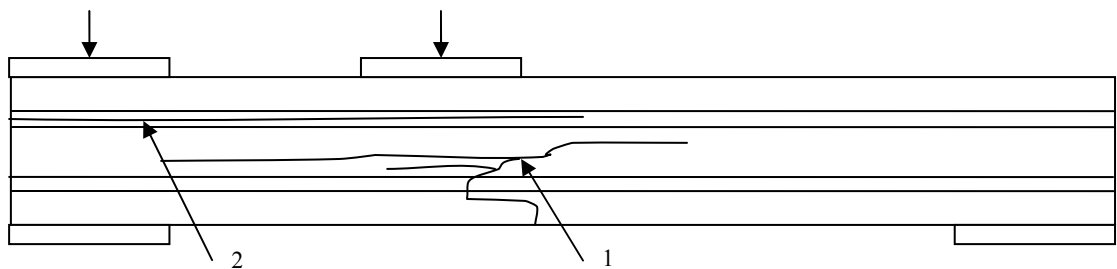


Figur 77: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 4. Belastningshastigheten är 4,2 mm/min.



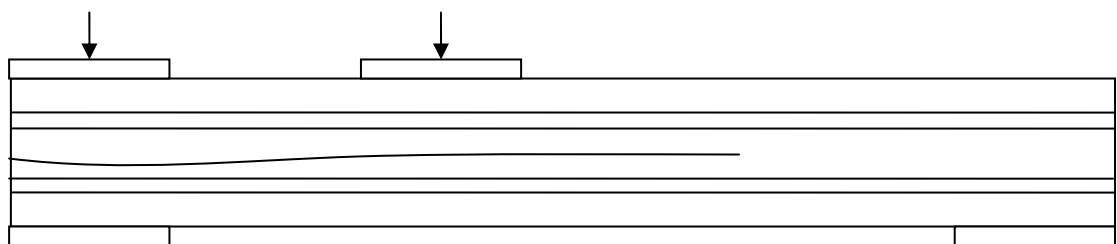
Figur 78: Tvärkraft som funktion av tiden för balk 4.

Brottnoder i balkserie 4 visas i figurerna som följer.



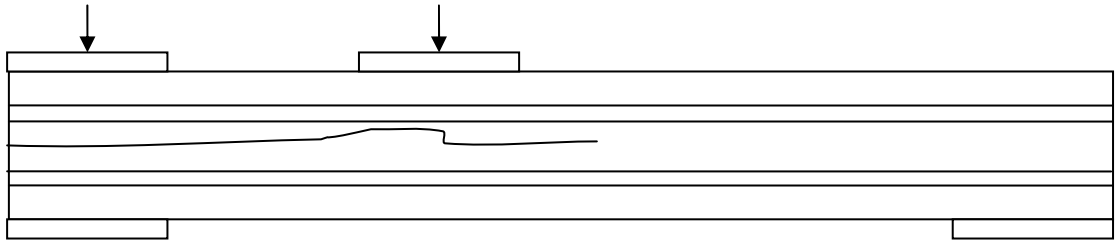
Figur 79: Illustration av brottet i balk 4.1.

Det första brottet i balk 4.1 är ett böjbrott, se Figur 79 ovan. Därefter har balken gått till skjuvbrott, se brott 2 ovan. Det andra brottet har förmodligen skett då den arean som har gått till böjbrott har blivit inaktiv för att ta upp krafterna, vilket har lett till en ökad skjuvspänning och ett andra brott.



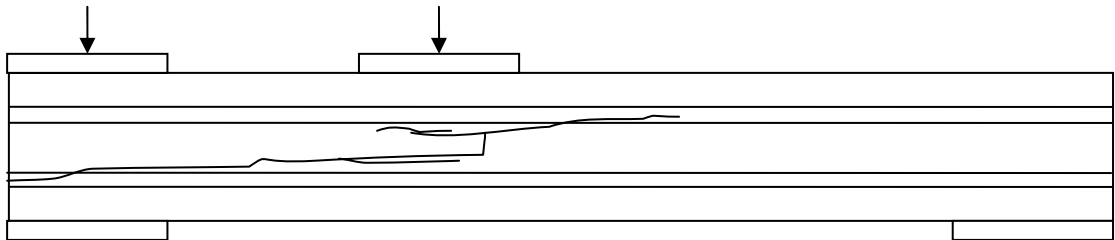
Figur 80: Illustration av brottet i balk 4.2.

Brottet i balk 4.2 är ett skjuvbrott. Efter brottet har balken förlorat större delen av bärförmågan.



Figur 81: Illustration av brottet i balk 4.3.

Brottet i balk 4.3 är ett skjuvbrott.



Figur 82: Illustration av brottet i balk 4.4.

Brottet i balk 4.4 är först ett skjuvbrott, vilket har startat i änden av balken. Vid belastningspunkten i mitten av balken har det skett ett böjbrott på grund av att delar av balken har blivit inaktiv efter skjuvbrottet.

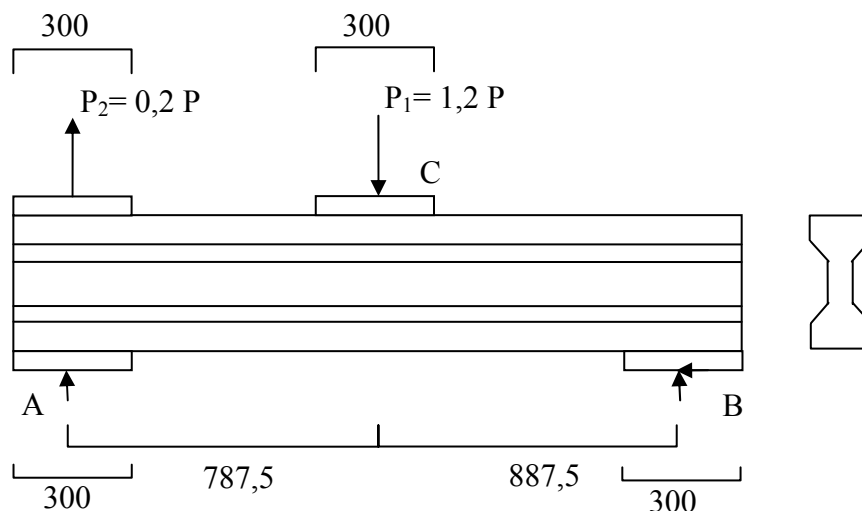
5.8 Balktyp 5: Tvåstödsbalk med I-tvårsnitt och dragkraft vinkelrätt fiber

5.8.1 Introduktion

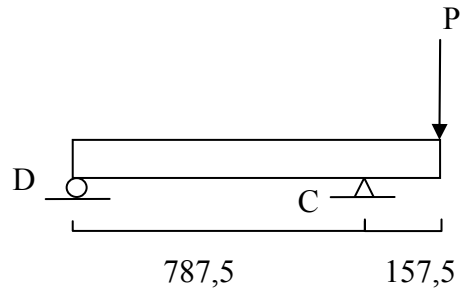
Dragande kraft vinkelrätt fibrerna tros ha missgynnsam effekt på skjuvhållfastheten hos en balk eftersom träets dragkapacitet vinkelrätt fibrerna är lågt och eventuell friktion mellan träfibrerna minskas med dragkraften. Enligt normer tas ingen hänsyn till ifall balken får en dragande kraft vinkelrätt fibrerna. Förutom den böjande lasten, som i detta fall angriper närmare ena upplaget, appliceras en dragande kraft på balken rakt ovanför det yttre upplaget. Den böjande lasten placeras närmare ena upplaget för att undvika oönskade brott i den ”fria” änden. I-balkarna har i denna provning längden 1975 mm. Längden på balken i balkserie 5 har minskats eftersom tvärkraftskapaciteten antas sjunka och risken för ett brott i fel ände är lägre.

5.8.2 Uppställning

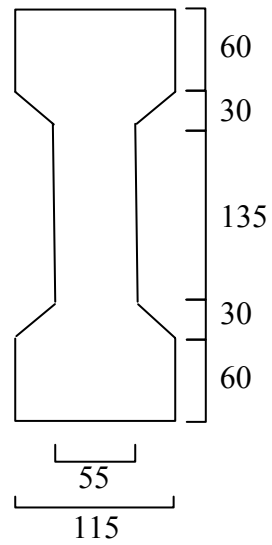
Balkserie 5 utförs med en dragande kraft vid balkänden A för att undersöka effekten på skjuvspänning då det finns en dragande kraft tvärs fibrerna. I balkserie 5 används ett I-tvårsnitt och den totala längden på balken är 1975 mm. För att åstadkomma en dragande kraft vid upplag A används en stålbalk som belastar provningsbalken med en dragande kraft i änden och en tryckande kraft vid punkten C, se Figur 83 och Figur 84 nedan. Plattan vilken åstadkommer den dragande kraften skruvas fast med skruvar, detta för att ge en jämn fördelning av kraften på en större yta. Skruvarna mäter 4,5 mm i diameter, är 50 mm långa och går ner 35 mm i träet. Dragplattans längd är 300 mm, samma längd används för upplagsplattorna.



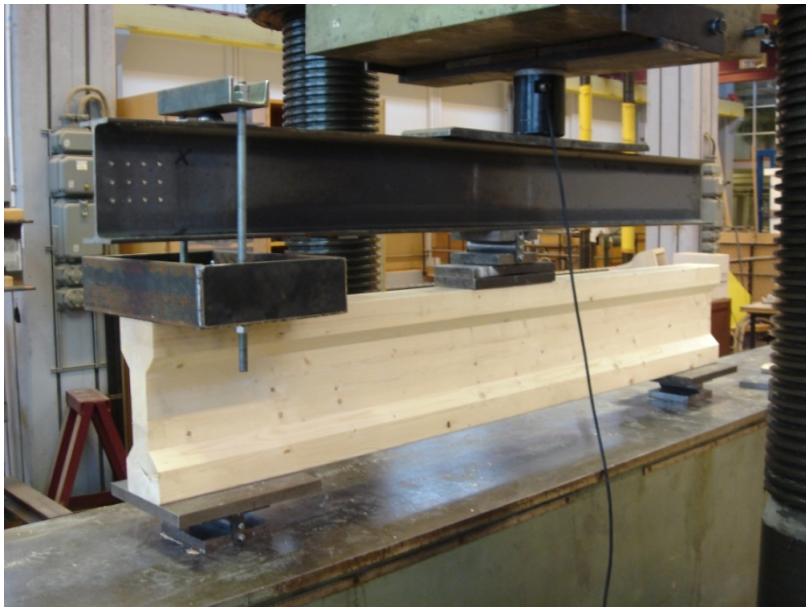
Figur 83: Balkuppställning för balktyp 5.



Figur 84: Uppställning och måttangivelser balkserie 5.



Figur 85: Tvärsnittsgeometri för balkserie 5.



Figur 86: Provning av balkserie 5.

Tidigare nämnt är Ekvation 5.5-1 anpassad för rektangulära tvärsnitt och därför används ekvationen nedan

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Där V är tvärkraften, S det statiska momentet, I tröghetsmomentet och b är bredden där skjuvspänningen beräknas. Den största skjuvspänningen skapas i mitten av tvärsnittet, därför beräknas endast denna skjuvspänningen för tvärsnittet. Eftersom samma tvärsnitt och spännvidd används i detta test som i balkserie 2 fås samma brottvärkraft och samma brottlaster.

$$V = 49,82 \text{ kN}$$

För att beräkna lasten P krävs att lasten P_1 först beräknas.

$$P_1 = \frac{VL}{b} = \frac{49,82 \cdot 1,675}{0,8875} = 94,03 \text{ kN}$$

$$P = \frac{P_1 a}{(a + c)} = \frac{94,03 \cdot 0,7875}{(0,7875 + 0,1575)} = 78,36 \text{ kN}$$

$$P_2 = \frac{Pc}{a} = \frac{78,36 \cdot 0,1575}{0,7875} = 15,67 \text{ kN}$$

Den dragande kraften är 20% av belastningen från provningsmaskinen och 120% belastar balken i punkt C.

5.8.3 Spänningsanalys med FEM

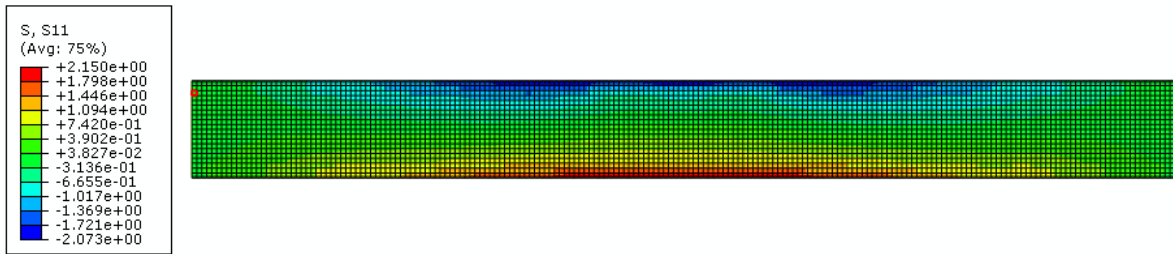
Vid beräkning för balkserie 5 används de förutsättningar vilka nämns i kapitel 5.4 Antaganden och metod vid spänningsanalyser med FEM, dvs. ett mellanlager är applicerat, fiberriktningen har inkluderats i modellen och lasten är beräknad då skjuvspänningen enligt den allmänna formeln är 1 Pa, vilket ger att lasterna P, P_1 och P_2 är enligt nedan.

$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = 0,0124 \text{ N}$$

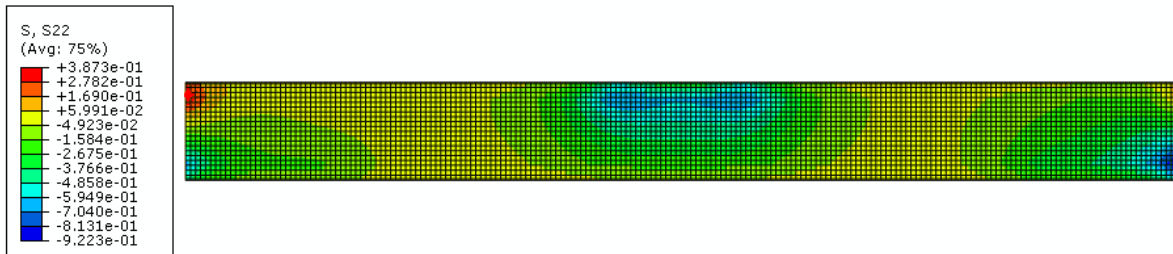
$$P = 0,0195 \text{ N}$$

$$P_1 = 0,0234 \text{ N}$$

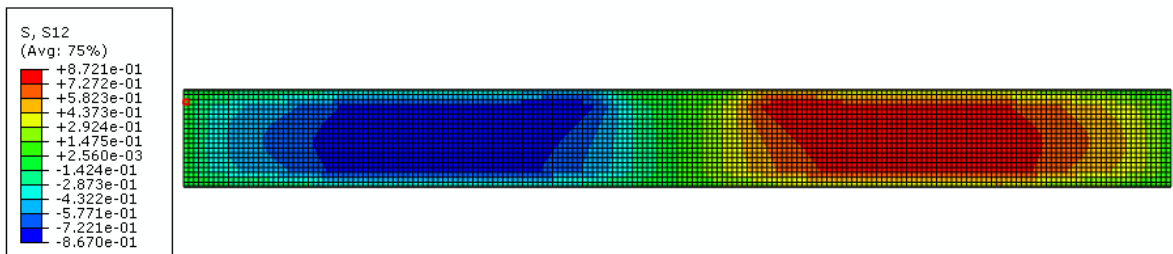
$$P_2 = 0,0039 \text{ N}$$



Figur 87: Spänning i x-led för balkserie 5.



Figur 88: Spänning i y-led för balkserie 5.



Figur 89: Skjuvspänning för balkserie 5.

Från Abaqusberäkningen fås den maximala skjuvspänningen till 0,872 Pa. Vid en jämförelse mellan konventionell beräkning och finita elementberäkningen kan konstateras lägre skjuvspänningar i finita elementberäkningen. Den röda pricken i Figur 87-Figur 89 visar vart det med störst sannolikhet sker ett brott enligt Norris-McKinnons brottvillkor.

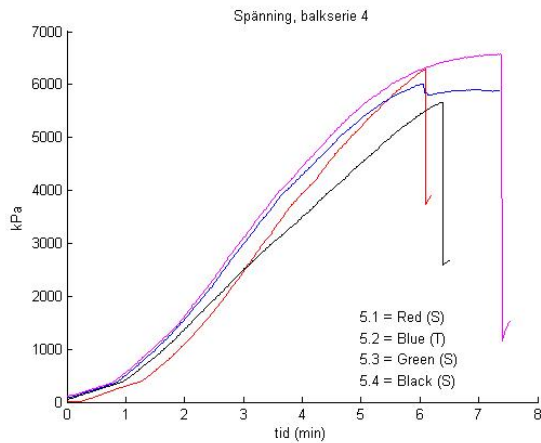
5.8.4 Provningsresultat

Resultatet från balkserie 5 är inte i enlighet med de förväntningarna. Brottspänningen för balkserie 5 är marginellt högre än brottspänningen för balkserie 2, vilket är referensbalken. Differensen mellan balkserie 2 och 5 är 1 %, vilket är något oväntat. Skillnaden mellan brottspänningen mellan balkserie 4 och 5 är också oväntad. Skillnaden i tvärkraftskapacitet förväntades vara större mellan balkserie 4 och 5. Dock finns en skillnad om ca 8 % mellan balkserie 4 och 5, vilket normer inte beaktar.

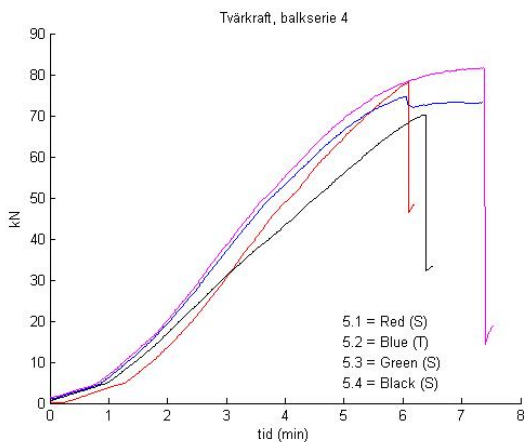
Balkserie 5	Brottvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brotttyp
Balk 5.1	78,22	6,30	Skjuvbrott
Balk 5.2	74,70	6,02	Tryckbrott
Balk 5.3	81,61	6,57	Skjuvbrott
Balk 5.4	70,26	5,66	Skjuvbrott
Medelvärden:	76,20	6,14	
Standardavvikelse:		0,39	

Tabell 12: Resultat balkserie 5.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 12, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 90 och Figur 91.

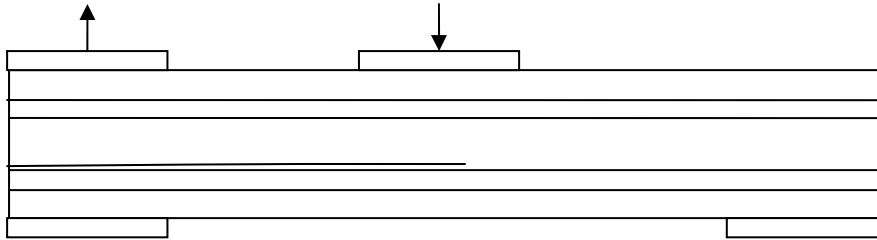


Figur 90: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 5. Balkserie 5 hade en belastningshastighet på 4,2 mm/min.



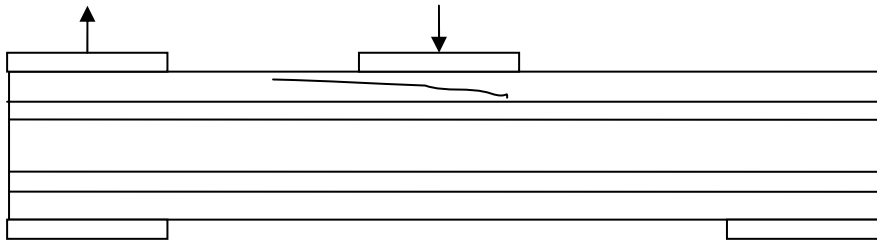
Figur 91: Tvärkraft som funktion av tiden för balk 5.

Brottnoder vid balktyp 5 provningen redovisas i nedan följande figurer.



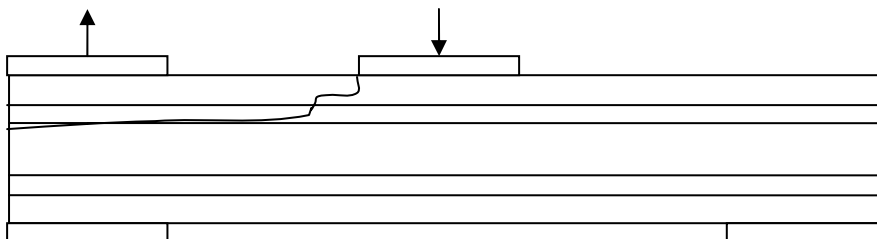
Figur 92: Illustration av brottet i balk 5.1.

Brottet i balk 5.1 är ett skjuvbrott. Efter brottet har balken tappat större delen av bärförmågan.



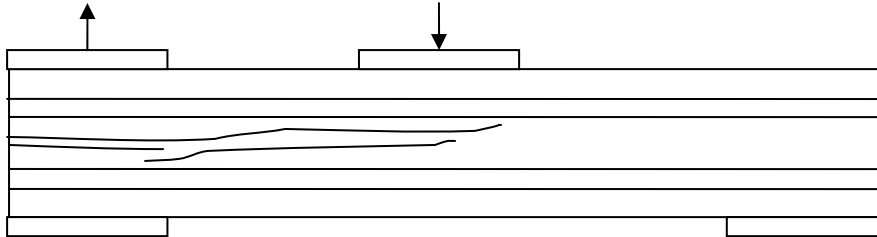
Figur 93: Illustration av brottet i balk 5.2.

Brottet i balk 5.2 är ett förmodat tryckbrott som kan ha uppkommit på grund av att belastningen på belastningsplattan inte har skett centriskt. Detta har sedan gjort att belastningen har ökat lokalt på balken där den vänstra delen av plattan anligger och där gett ett tryckbrott. Balken gick aldrig till böjbrott eller skjuvbrott och hade kvar en betydande bärförmåga. Vid ökad nedtryckning så ökade inte belastningen, utan tryckbrottets deformation ökade. Detta kan ses i grafen från provningen, se Figur 91



Figur 94: Illustration av brottet i balk 5.3.

Brottet i balk 5.3 är ett förmodat skjuvbrott. Efter att skjuvsprickan har uppkommit har dragkraften i änden av balken gjort att den övre delen av balken har dragit loss från balken. Den sista biten av sprickan vilket går från livets överkant till belastningsplattan har förmodligen uppkommit vid separationen av balkdelen.



Figur 95: Illustration av brottet i balk 5.

Brottet i balk 5.4 är ett skjuvbrott. Efter brottet har balken tappat större delen av bärförmågan.

5.9 Balktyp 6: Trestödsbalk med I-tvärsnitt

5.9.1 Introduktion

Denna provning inkluderar längre balkar som är upplagda på tre stöd och belastade med två punktlaster. Balklängden var 4500 mm.

I början av 1990- talet undersökte Leichester-Young hur skjuvhållfastheten i kontinuerliga balkar är i jämförelse med balkar med endast två upplag. Hur stor inverkan skjuvhållfastheten har i de två olika fallen beskrevs enkelt genom att visa förhållandet mellan skjuv- och böjhållfasthet nedan.

Enkelt spann: $\frac{f_s}{f_b} = 0,083$

Dubbelt spann: $\frac{f_s}{f_b} = 0,152$

Förhållandet mellan balkspannets längd och balkhöjden var 6:1. Det visar sig då att skjuvhållfastheten hade större betydelse vid dimensionering av en kontinuerlig balk, än vad den har vid dimensionering av en balk med endast två upplag. Pga. detta kom det ett förslag att kontinuerliga balkar kanske kunde användas vid tester av provkroppars skjuvhållfasthet. Leichester-Young valde att utföra provningar på tre olika uppställningar:

- Två stöd, två punktlaster på tredjedelar av balkens längd (810 mm)
- Två stöd, en punktlast mitt mellan upplagen (270 mm spann)

- Tre stöd, en punktlast mitt i vardera span (270 mm)

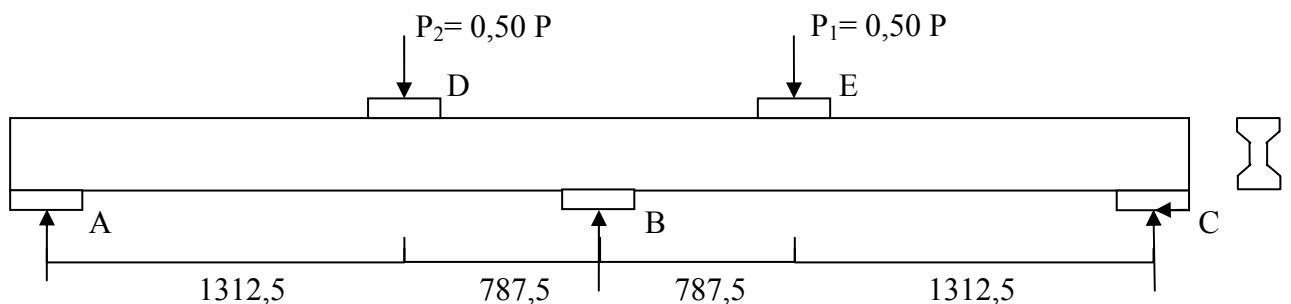
Den första uppställningen skulle ge ett värde på böjhållfastheten, medan de följande två skulle undersöka skjuvhållfasthet.

Materialet som testades var s.k. LVL, som innebär att 3,2 mm tjocka lameller (av träslaget Pinus Elliotii) limmats ihop till sammanlagd bredd på 120 mm och höjd 45 mm. Från testerna med endast ett spann fann Leichester- Young tydliga värden på böj- resp. skjuvhållfasthet. I serien med två punktlaster gick samtliga provkroppar till böjbrott och gav ett medelvärde på $f_b = 77,8 \text{ MPa}$. I serien med endast en punktlast gick alla provkroppar till skjuvbrott med ett medelvärde på $f_v = 5,4 \text{ MPa}$. Utifrån dessa två värden kunde jämförelser göras på den kontinuerliga balken. Skjuvspänningen vid kontinuerlig balk var 7,6 MPa vilket överskred 5,4 MPa, som enkelspannet hade, men balken gick ändå inte till skjuvbrott. Däremot observerades det att balkarna endast klarade böjspänning på 50 MPa.

Leichester- Young konstaterade att pga. symmetrin över mittstödet motverkas bildandet av en longitudinell spricka vilket gör att den kontinuerliga balken klarar mer än en balk med två upplag.

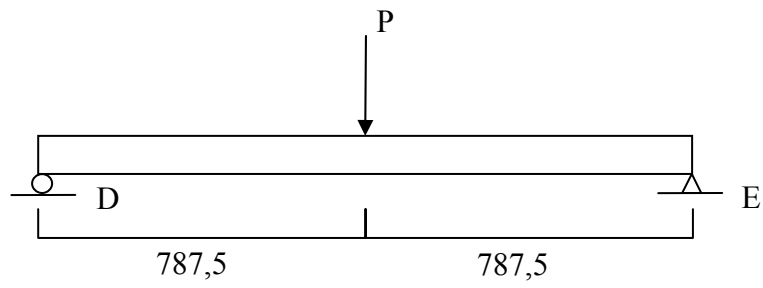
5.9.2 Uppställning

Balken är upplagd på tre stöd, två av stöden har rullager och det tredje har ett fixlager. Samtliga belastnings- och upplagsplattor är av stål och har en längd av 300 mm. Lasterna P_1 och P_2 är förskjutna mot mittupplaget, avståndet från mittupplaget är 787,5 mm. Avståndet från stödet till belastning i balkserie 6 är lika stort som i de övriga balkserierna. Tvärsnittet i balkserie 6 ett I-tvärsnitt vilket använts tidigare i balkserie 2-5.

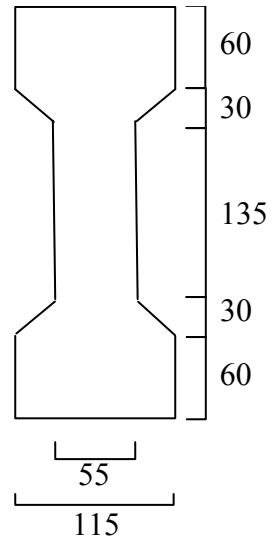


Figur 96: Uppställning och måttangivelser balkserie 6.

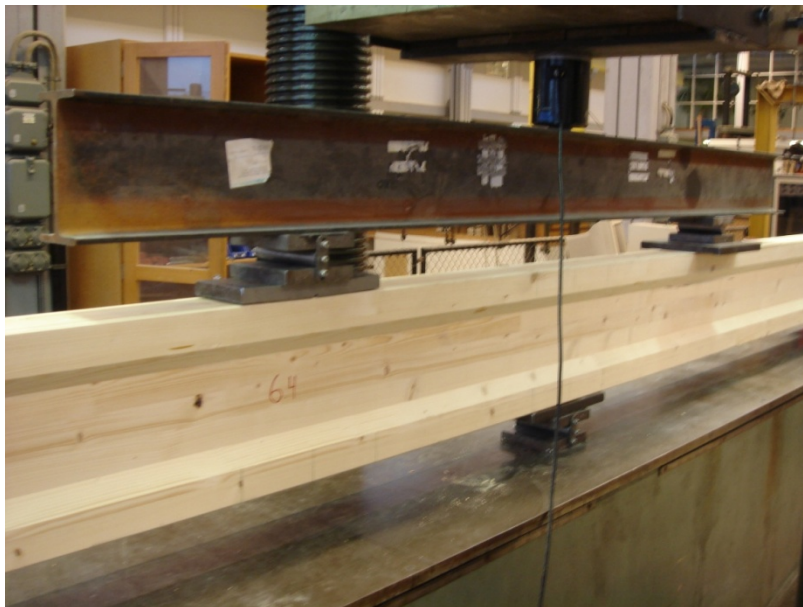
Lasten från provningsmaskinen kan endast ges i en punkt. Därför används en stålbalk för att föra över lasten till balken, så att balken kan belastas med två laster, se Figur 97 nedan.



Figur 97: Belastning på stål balk för balkserie 6.



Figur 98: Tvärsnittsgeometri för balkserie 6.



Figur 99: Provning av balkserie 6.

Tvärkraftskapaciteten beräknas med den svenska normen vilket kan ses nedan

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b}$$

Där V är tvärkraften, S det statiska momentet, I tröghetsmomentet och b är bredden där skjuvspänningen beräknas. Den största skjuvspänningen uppstår i mitten av tvärsnittet, därför beräknas endast denna skjuvspänningen för tvärsnittet. Eftersom samma tvärsnitt och spännvidd används i detta test som i balkserie 2 fås samma brottvärkraft.

$$V = 49,67 \text{ kN}$$

Då balkserie 6 är en kontinuerlig balk med tre upplag, är den även statiskt obestämd. För att kunna beräkna lasten i balkserie 6 delas balken i två delar. Vid mittupplaget antas balken vara fast inspänd, detta kan göras då vinkeländringen vid balkmitt är noll. Med dessa antaganden kan tvärkraften för balkserie 6 beräknas.

$$V = \frac{P_1 \cdot a}{2L} \left(3 - \frac{a^2}{L^2} \right)$$

$$P_1 = \frac{V \cdot 2L}{a \cdot \left(3 - \frac{a^2}{L^2} \right)} = \frac{49,67 \cdot 2 \cdot 2,1}{1,3125 \cdot \left(3 - \frac{1,3125^2}{2,1^2} \right)} = 60,91 \text{ kN}$$

$$P_1 = 60,91 \text{ kN}$$

Då lasten P_1 och lasten P_2 verkar på vars en sida om mittupplaget och är lika stora, ger det att lasten P från provningsmaskinen ska vara 121,82 kN för att uppnå en skjuvspänning på 4 MPa.

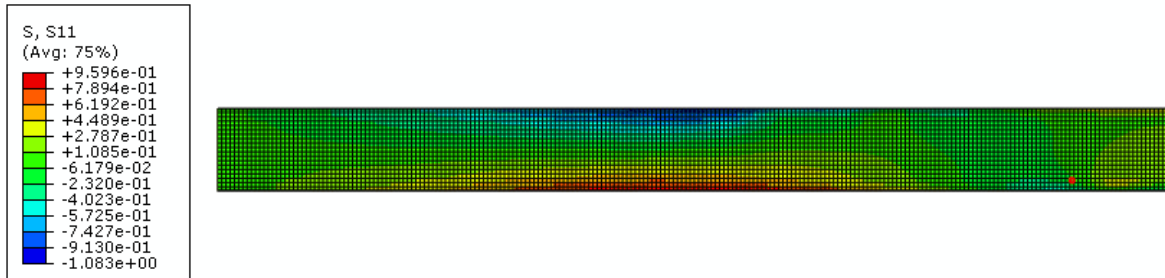
5.9.3 Spänningsanalys med FEM

Vid Abaqusanalys av balkserie 6 används de förutsättningar vilka nämns i Abaqus beräkningar för balkserie 1. Dvs. hänsyn har tagits till fiberriktningen i träet samt att ett mellanlager har applicerats mellan balk och plattorna. Lasten P har beräknas från normen då skjuvspänningen är satt till 1 Pa för att kunna göra jämförelse mellan testerna. Lasten P beräknas ur följande formler nedan.

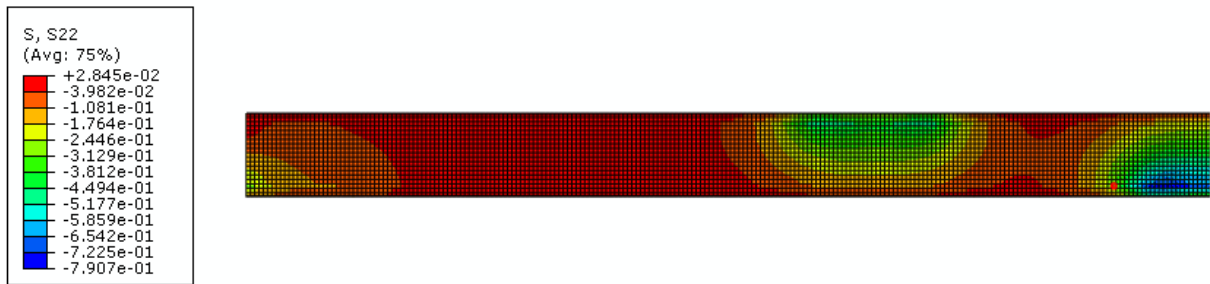
$$V = \frac{\tau \cdot I \cdot b}{S} = 0,0124 \text{ N}$$

$$V = \frac{P_1 \cdot a}{2L} \left(3 - \frac{a^2}{L^2} \right)$$

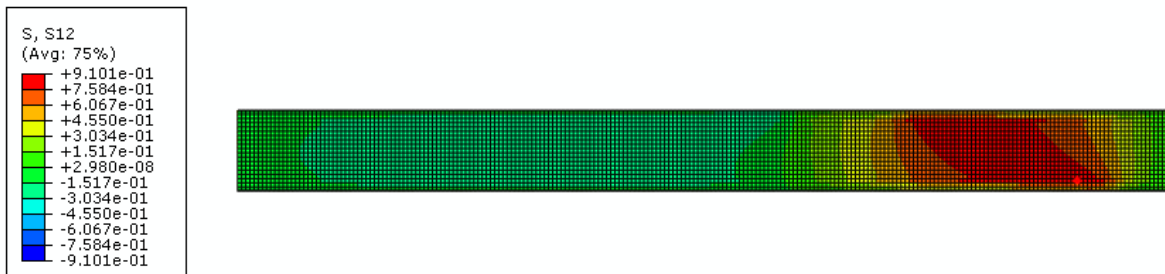
$$P_1 = \frac{V \cdot 2 \cdot L}{a \cdot \left(3 - \frac{a^2}{L^2} \right)} = 0,01522 \text{ N}$$



Figur 100: Spänning i x-led för balkserie 6, figuren visar vänstra delen av balken där mittstödet är till höger i figuren.



Figur 101: Spänning i y-led för balkserie 6, figuren visar vänstra delen av balken där mittstödet är till höger i figuren.



Figur 102: Skjuvspänning för balkserie 6, figuren visar vänstra delen av balken där mittstödet är till höger i figuren.

Resultatet från Abaqusberäkningen är att skjuvspänningen maximalt är 0,91 Pa mot att normen med samma last P ger skjuvspänningen 1 Pa. Enligt Abaqusberäkningen kan balken belastas med 10 % större last för att ge samma spänning som beräkningar enligt normen. Den röda pricken i Figur 100- Figur 102 visar var det med störst sannolikhet

sker ett brott enligt Norris-McKinnons brottvillkor. Denna punkt är utsatt för stor skjuvning och ett stort tryck vinkelrätt fibrerna. Detta område anses enligt Norris-McKinnons brottvillkor vara det mest känsliga för ett brott.

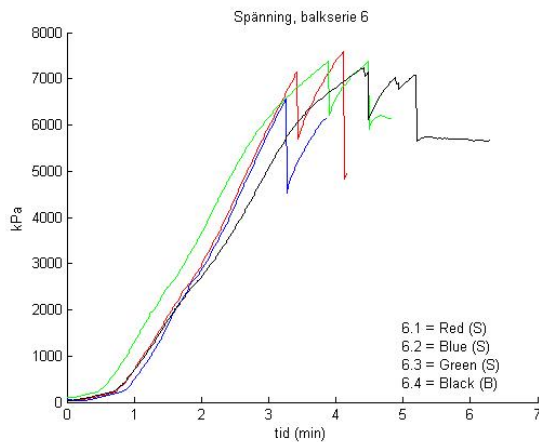
5.9.4 Provningsresultat

Vid provning av balkserie 6 fick endast balk 6.4 ett böjbrott medan övriga balkar har gått till skjuvbrott. Det kan även noteras höga skjuvspänningar i balkserien, medelvärdet vid testet är 80 % högre än det karakteristiska värdet för limträ.

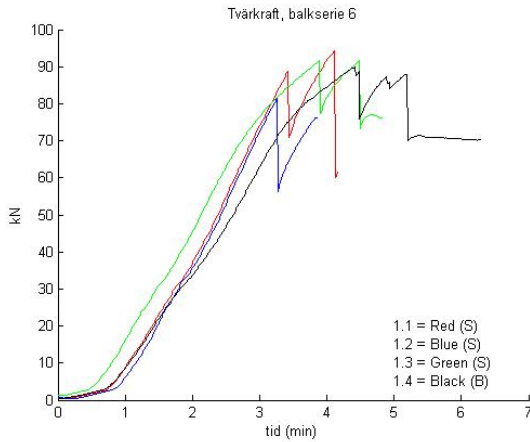
Balkserie 6	Brottvärkraft (kN)	Skjuvspänning (MPa)	Brotttyp
Balk 6.1	94,26	7,59	Skjuvbrott
Balk 6.2	81,70	6,58	Skjuvbrott
Balk 6.3	91,55	7,37	Skjuvbrott
Balk 6.4	89,88	7,34	Böjbrott
Medelvärden:	89,35	7,20	
Standardavvikelse:		0,39	

Tabell 13: Resultat balkserie 6.

Brottvärkraft och motsvarande skjuvspänning visas i Tabell 13, och skjuvspänning respektive tvärkraft som funktion av tiden visas i Figur 103 och Figur 104.

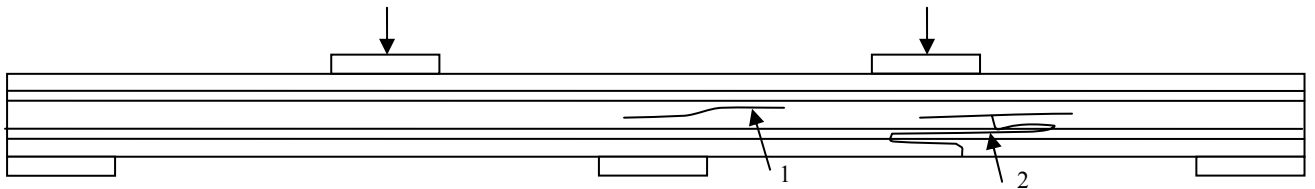


Figur 103: Skjuvspänning som funktion av tiden för balkserie 6. Balkserie 6 hade en belastningshastighet på 5,4 mm/min.



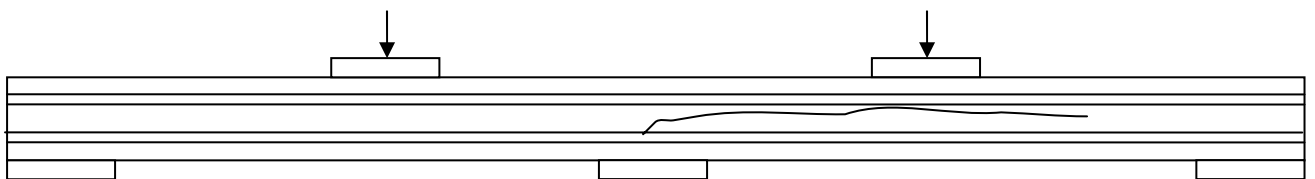
Figur 104: Tvärkraft som funktion av tiden för balkserie 6.

Brottmoderna för provningen av Balktyp 6 visas i nedan följande figurer



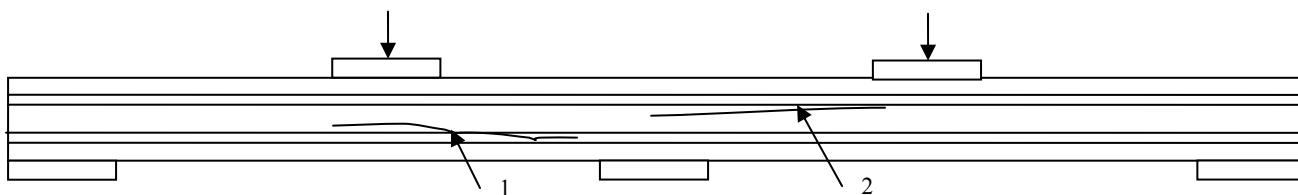
Figur 105: Illustration av brottet i balk 6.1.

Det första brottet, brott 1, i balk 6.1 är ett skjuvbrott och därefter har ett böjbrott, brott 2, skett. Böjbrottet har skett vid en högre spänning än i skjuvbrottet. Se Figur 103.



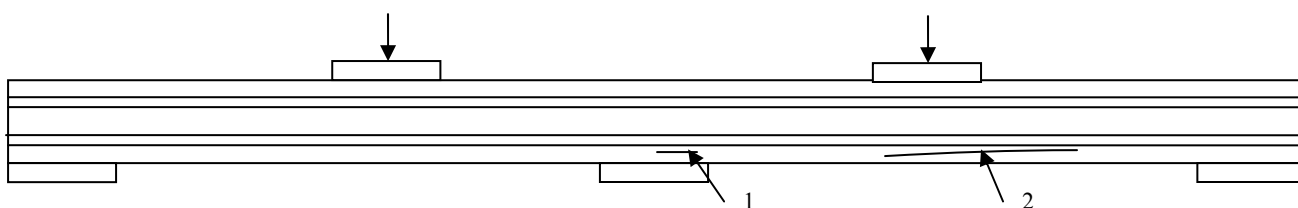
Figur 106: Illustration av brottet i balk 6.2.

Brottet i balk 6.2 är ett skjuvbrott, vilket går från upplaget och vidare förbi belastningspunkten.



Figur 107: Illustration av brottet i balk 6.3.

Brotten i balk 6.3 är i båda fallen skjuvbrott. Efter det första brottet sjunker spänningen, vilket stiger till när nästa brott sker. Båda brotten sker vid samma last.



Figur 108: Illustration av brottet i balk 6.4.

Brott 1 i balk 6.4 vilket uppkom vid mittupplaget är ett tryckbrott vilket har vuxit successivt under belastningen. Därefter har den gått till böjbrott vid brott 2.

5.10 Sammanställning av resultat och diskussion från balkprovningar och beräkningar

Balkseriernas brott uppstod tillfredställande i samtliga tester förutom balkserie 3.1 där ett skjuvbrott uppstod på ”fel” sida av belastningspunkten. Detta förklarades tidigare i kapitel 5.7.4.

Beräkningar innan testningen visade att balkserie 1 skulle gå till böjbrott, vilket skedde i två av testerna. Lite oväntat skedde två skjuvbrott vid balkserie 1 vilket tyder på en variation i böjhållfastheten mellan balkarna. Balkserie 1 provades för att kunna få en jämförelse mellan rektangulärt tvärsnitt och I-tvärsnitt som användes i övriga balkprovningar.

För balkserie 2 gick tre av balkarna gick till skjuvbrott medan en gick till böjbrott. Brottspänningen var 32 % högre än i balkserie 1. Resultatet är intressant och ingen teori vi tar upp i rapporten förklarar hur detta resultat kommer sig.

Resultatet från balkserie 3 är som tidigare nämnts svårt att dra några slutsatser ifrån då resultatet varierar stort mellan de olika balkprovkropparna. De två brott vilka har skett vid en hög spänning har betydligt högre bärförmåga än balkserie 2. För att kunna öka bärförmågan och då tillgodoräkna sig överkragning bör det undersökas varför det är så stor spridning mellan de olika provningarna.

Balkserie 4 och 5 ökar skjuvbrottspänningen jämfört med balkserie 2, vilket var förväntat för balkserie 4. Teorin bakom varför balkserie 4 skulle ha högre skjuvbrottspänning var att friktionen mellan träfibrerna pga. tryckkraft tvärs fibrerna skulle kunna öka brottspänningen. Brottspänningen har ökat vid balkserie 4, dock är det mer oväntat att brottspänningen för balkserie 5 är ungefär samma som för balkserie 2. Norris-McKinnons brottvillkor anger en lägre brottspänning för balkserie 5 än balkserie 2 vilket också var förväntat vid balkprovningen. Provningen visade dock att brottspänningen var ungefär samma som för balkserie 2 vilket inte följer Norris-McKinnons brottvillkor. Någon direkt förklaring kan inte presenteras i rapporten.

I balkserie 6 skiljer sig den konventionella beräkningen av spänningen från uppmätt brottspänning med 80 %, vilket är i enlighet med Leichester- Youngs [10] provningar som anger att skjuvbrottspänningen ska öka med 85 %. Våra tester verifierar deras provningsresultat.

Samtliga resultat är medelvärden av skjuvspänningar och kan inte direkt jämföras med den karakteristiska skjuvhållfastheten. Utifrån våra provningar är det svårt att beräkna en 5 % fraktil eftersom varje uppställning provas 4 gånger.

	Provning	Beräkning	Beräkning	Beräkning
Spänningsberäkning	Medelbrottvärkraft, kN; (MPa)	Konventionell brottvärkraft kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, brottvärkraft kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, Norris-McKinnon brottvärkraft kN; (MPa)
Brottkriterium	-	$\tau_{medel} = f_v$	$\tau_{max} = f_v$	$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$
Materialvärde	-	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_1 = 23 \text{ alt. } 36 \text{ MPa}$ $f_2 = 0,5 \text{ alt. } 8 \text{ MPa}$ $f_{12} = 4 \text{ MPa}$
Balkserie 1	110,4; (4,57)	96,6; (4,0)	99,7; (4,13)	95,1; (3,94)
Balkserie 2	75,2; (6,06)	49,7; (4,0)	60,8; (4,89)	59,9; (4,83)
Balkserie 3	77,1; (6,21)	49,7; (4,0)	53,3; (4,29)	52,7; (4,24)
Balkserie 4	82,3; (6,63)	49,7; (4,0)	52,8; (4,26)	52,0; (4,19)
Balkserie 5	76,2; (6,14)	49,7; (4,0)	56,9; (4,58)	16,0; (1,29)
Balkserie 6	89,4; (7,20)	49,7; (4,0)	54,0; (4,35)	55,9; (4,32)

Tabell 14: Resultat från balkprovningar.

6 Avslutande jämförelse, slutsatser och kommentarer

6.1 Sammanställning av skjuvhållfasthet enligt material- och balkprovningarna

Nedan följer sammanställning av materialprovningar och balkprovningar samt beräkningar enligt konventionell beräkning, beräkning med Abaqus och Norris-McKinnons brottvillkor.

	Provning	Beräkning	Beräkning	Beräkning
Spänningsberäkning	Medelbrottlast, kN; (MPa)	Konventionell, brottlast, kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, brottlast, kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, Norris-McKinnon, brottlast; kN (MPa)
Brottkriterium	-	$\tau_{medel} = f_v$	$\tau_{max} = f_v$	$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$
Materialvärde	-	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_1 = 23 \text{ alt. } 36 \text{ MPa}$ $f_2 = 0,5 \text{ alt. } 8 \text{ MPa}$ $f_{12} = 4 \text{ MPa,}$
“Skruv” rek	321,9; (4,81)	267,7; (4,0)	232,9; (3,48)	87,7 (1,31)
“Skruv” I	240,6; (7,52)	128,0; (4,0)	114,9; (3,59)	109,3 (3,41)
“Krycka” rek	245,5; (3,67)	267,7; (4,0)	233,6; (3,49)	86,7 (1,30)
“Kryck” I	216,3; (6,76)	128,0; (4,0)	115,6; (3,61)	103,2 (3,22)

Tabell 15: Resultat från materialprovningar.

	Provning	Beräkning	Beräkning	Beräkning
Spänningsberäkning	Medelbrottvärkraft, kN; (MPa)	Konventionell brottvärkraft kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, brottvärkraft kN; (MPa)	FEM, 2D plan spänning, Norris-McKinnon brottvärkraft kN; (MPa)
Brottkriterium	-	$\tau_{medel} = f_v$	$\tau_{max} = f_v$	$\frac{\sigma_1^2}{f_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{f_{12}^2} = 1$
Materialvärde	-	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_v = 4 \text{ MPa}$	$f_1 = 23 \text{ alt. } 36 \text{ MPa}$ $f_2 = 0,5 \text{ alt. } 8 \text{ MPa}$ $f_{12} = 4 \text{ MPa}$
Balkserie 1	110,4; (4,57)	96,6; (4,0)	99,7; (4,13)	95,1; (3,94)
Balkserie 2	75,2; (6,06)	49,7; (4,0)	60,8; (4,89)	59,9; (4,83)
Balkserie 3	77,1; (6,21)	49,7; (4,0)	53,3; (4,29)	52,7; (4,24)
Balkserie 4	82,3; (6,63)	49,7; (4,0)	52,8; (4,26)	52,0; (4,19)
Balkserie 5	76,2; (6,14)	49,7; (4,0)	56,9; (4,58)	16,0; (1,29)
Balkserie 6	89,4; (7,20)	49,7; (4,0)	54,0; (4,35)	55,9; (4,32)

Tabell 16: Resultat från balkprovningar.

6.2 Slutsats om metod för provning av träets skjuvhållfasthet

Standarduppställningen av EN408 visade efter analys i Abaqus på lokalt stora spänningar i längdled, vilket skulle kunna leda till uppsprickning i provkroppen innan skjuvbrott. Förutom detta, skulle det kunna tänkas att praktiskt sett kan denna uppställning vara komplicerad att genomföra tillräckligt bra. Många faktorer spelar in för att få en limmet att fästa tillräckligt bra. Tidigare försök har visat att brott i limfogen har förekommit och orsakat att provkroppar ogiltigförklarats.

När det gäller de två alternativa uppställningarna, EN408- skruv och EN408- krycka, så är den största skillnaden mot standarduppställningen att det används skruvförband istället för lim. Försöken visade att brott sker mer kontrollerat i dessa två uppställningar dvs. att det enda området där brott kan ske är inne i själva träet. Analyserna i Abaqus antydde att det inte skulle vara stor skillnad mellan de båda uppställningarna vad gäller spänningsfördelning eller brottlast. Provningarna visade dock relativt stora skillnader mellan brottlasterna.

Vid val mellan de två testade uppställningarna är EN408- krycka att föredra. Den främsta fördelen med denna uppställning är att den är enkel att få på rätt plats i testapparaten, i och med att den inte behöver justeras in i rätt vinkel, så som EN408- skruv måste. Användandet av skruvar är även det smidigt. Det tar tid att skruva i alla de skruvar som krävs för att klara belastningen som provkroppen utsätts för, men det bedöms ändå vara enklare än att få ett limförband att uppfylla samma krav. Skjuvspänningsfördelningen skiljer sig inte mycket från EN408- skruv, så fördelar som har med det praktiska runt själva testningen blir avgörande. Om resultaten stämmer, utifrån endast nominellt fyra prover av varje uppställning och tvärsnitt, påvisar dock denna uppställning på lägre skjuvhållfasthetsvärden. Orsaken till detta är ej känd.

Den främsta nackdelen med EN408- krycka är att i och med att dimensionerna på de testade provkropparna är så pass stora, leder detta till att även dimensionerna på ståldetaljerna är grova. Detta resulterar i att varje provkropp, inklusive ståldetaljer, blir tung. Uppställningen enligt EN408- skruv kräver inte lika mycket av ståldetaljerna och blir då lättare. Båda alternativen på uppställningar kan lyftas av en person, men när det kommer till finjustering i testapparaten så behövs det hjälp av ytterligare en person.

6.3 Slutsatser om inverkan av en balks utformning och upplagsförhållanden

Balkserierna med I-tvärsnitt där övergången mellan liv och fläns fylldes med trianglar gav ett positivt men även ett oväntat resultat. Av de balkar med I-tvärsnitt där balken gick till skjuvbrott uppkom brottet oftast i närheten av mitten i livet, vilket var önskat inför provningarna. Öväntat gick ändå många balkar till böjbrott även med I-tvärsnitt vilket inte följde beräkningar och rapporten från *Poussa-Tukiainen* [4]. Eventuellt kan variansen i böjhållfastheten och skjuvhållfastheten mellan de olika balkarna förklara de

böjbrott vilka skedde i provningarna med I-tvårsnitt. Liknande resultat erhöles vid provning av det rektangulära tvärsnittet. Hälften av balkproverna gick till skjuvbrott och den andra hälften gick till böjbrott. Detta resultat är något förvånande då beräkningar visade att denna balktyp skulle gå till böjbrott. Från våra provningar skulle ett rektangulärt tvärsnitt fungera lika bra som ett I-tvårsnitt, dock är det svårt att fastställa detta då vi endast har provat 4 balkar vid varje balkserie. Det skulle behöva göras många fler provningar för att säkerhetsställa resultatet och kunna dra slutsatser för olika sorters storlekar och typer av balkar.

Upplagsplattorna fungerade tillfredställande, endast vid två provningar (balk 5.2 och 5.3) fanns det problem med upplagsplattorna. Vid den ena provning kan plattan blivit snedbelastad och då givit en brottanvisning. Även längden mellan belastningspunkten och upplaget har fungerat tillfredställande. En flytt av belastningspunkten närmare upplaget kommer tillföra tryckkrafter vinkelrätt fibrerna vid upplaget vilket inte är optimalt vid provning.

En jämförelse mellan balkserie 1 och 2 visar att I-tvårsnittet klarar större skjuvspänningar än det rektangulära tvärsnittet innan balkarna går till brott. Jämförelse för balkserie 2 mellan beräknade brottskjuvspänningen och den provade visar en skillnad på 33,9 % medan samma jämförelse för balkserie 1 visar en skillnad på 12,5 %. Konventionell brottvärkraft och beräknad brottvärkraft med FEM visar snarlika resultat medan Norris-McKinnon förutspår brottvärkraften en aning bättre.

För balkserie 4 fås en högre brottvärkraft jämfört med balkserie 2. Detta var i enlighet med de förväntningar vi hade på provningen. Ingen av beräkningsmetoderna förutspådde detta resultat vilket är något anmärkningsvärt. Ännu mer anmärkningsvärt är resultatet från balkserie 5. Då balken blir dragbelastad vid upplaget är brottvärkraften till och med något högre än vid balkserie 2. Vad detta kan bero på är väldigt svårt att svara på. Norris-McKinnons brottvillkor gav en brottvärkraft på 16,03 kN vilket avviker stort från provningsresultatet, hela 79 %. Då dragkrafter skapas vinkelrätt fibrerna sjunker hållfastheten med 16 gånger jämfört med tryckkrafter vinkelrätt fibrerna. Av någon anledning blir inte skillnaden så stor i brottvärkraften. Vid provning med tryck vinkelrätt fibrerna noterades en ökad brottvärkraft jämfört med balkserie 2 med 9,4 %. Tryckkraften har givit en positiv skillnad från balkserie 2 vilket är i enlighet med förväntningarna på provningen där tryckkraften skapar friktion mellan fibrerna och på så vis ökar brottvärkraften.

Balkserie 6, kontinuerlig balk, följer teorin om att brottvärkraften ska öka med cirka 85 % från konventionell beräkningsmetod. Vårt resultat visar att brottvärkraften ökar med cirka 80 % vilket får anses följa teorin.

6.4 Slutsats om undersökta brottkriterier

Av de tre studerade beräkningsmetoderna i avsnitten om materialprovningarna (konventionell, beräknad med Abaqus och Norris-McKinnon) så stämmer det konventionella bäst sett över båda uppställningarna och båda tvärsnitten. Brottkriteriet utgår ifrån att medelskjuvspänningen ska vara mindre än det karaktäristiska styrkevärdet på skjuvhållfastheten för L40 som är 4 MPa. Dock blir avvikelserna något för stora när det gäller I- tvärsnitten. Jämfört med provningsresultaten är avvikelserna för respektive brottkriterium enligt Tabell 17 nedan.

Metod	Provning, medelbrottlast, kN; (MPa)	Konventionell brottlaster	Beräknad brottlaster (Abaqus)	Norris-McKinnon brottlaster
“Skruv” rek	321,9; (4,81)	-16,5%	-27,6%	-72,8%
“Skruv” I	240,6; (7,52)	-46,9%	-52,2%	-54,6%
“Krycka” rek	245,5; (3,67)	+9,0%	-4,8%	-64,7%
“Kryck” I	216,3; (6,76)	-40,8%	-45,6%	-52,3%

Tabell 17: Brottmetodernas avvikelser från provningsresultaten.

	Provning, medelbrottvärkraft, kN; (MPa)	Konventionell brottvärkraft	Beräknad brottvärkraft (Abaqus)	Norris-McKinnon brottvärkraft
Balkserie 1	110,4; (4,57)	-12,5%	-9,7%	-13,9%
Balkserie 2	75,2; (6,06)	-33,9%	-19,1%	-20,3
Balkserie 3	77,1; (6,21)	-35,5%	-30,9%	-31,6%
Balkserie 4	82,3; (6,63)	-39,6%	-35,8%	-36,8%
Balkserie 5	76,2; (6,14)	-34,8%	-25,3%	-79,0%
Balkserie 6	89,4; (7,20)	-44,4%	-39,6%	-37,5%

Tabell 18: Brottmetodernas avvikelser från provningsresultaten.

6.5 Slutsats om limträns skjuvhållfasthet

Utifrån skjuvhållfasthetsprovningarna i denna rapport, med nominellt fyra provkroppar i respektive uppställning och tvärsnitt, är den föreslagna sänkningen till 3,0 alt. 2,5 MPa inte befogad. Resultaten från materialprovningarna med rektangulärt tvärsnitt stämmer mer eller mindre överens med dagens styrkevärde på 4 MPa. Däremot visar skjuvhållfasthetsprovningarna med I-tvärsnitt på högre värden. Även balkprovningarna uppvisar samma resultat som materialprovningarna.

Varje provserie omfattade endast 4 nominellt lika provningar. Emellertid, med ett schablonmässigt antagande om att det karakteristiska 5 % fraktilvärdet är 0,67 gånger medelvärdet, fås att sänkning av det karakteristiska värdet från 4,0 MPa till ca 3,0 MPa kan vara befogad för rektangulära tvärsnitt, men knappast för I-tvärsnitt. Om prover skulle tas ut från olika fabriker vid olika tidpunkter under en period av några år, skulle spridningen i resultaten förmodligen bli större än i denna undersökning som utfördes på ett enda parti limträ. Variationskoefficienten för mätresultaten i detta arbete låg kring

0,09, men med hänsyn till ovanstående kan det vara mer realistiskt att anta ett värde på 0,2. Detta ger att det karakteristiska 5 % fraktilvärdet är 0,67 gånger medelvärdet.

7 Förslag på fortsatt arbete

Arbetet i rapporten är en grund till vidare arbeten. Under arbetets gång har fler frågeställningar uppkommit. Förslag till vidare arbeten är följande:

- Verifiera provningsresultat genom ökat antal provningar och förändringar av geometrier för materialprovningarna och balkserierna.
- Undersökning om varför balkserie 3, överkragning, får så stor spridning i testresultatet.
- Vidare undersökning om tryckandes och dragandes krafts inverkan på skjuvhållfastheten.
- Vidare undersökning av effekten av att använda I-tvårsnitt och varför detta tvårsnitt klarar högre spänningar.

8 Referenser

- [1] Johannesson, B. *Brottkriterier för Trä*
Publ. S 84:1, Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1984
- [2] Carling, O. *Dimensionering av Träkonstruktioner*
Svensk byggtjänst med stöd av Träteknik och Statens råd för byggnadsforskning, Solna, 1992
- [3] Carling, O. *Limträhandbok*
Svenskt Limträ AB, Print & Media i Sundsvall AB, 2001
- [4] Poussa M., Tukiainen P. *Experimental Study of Compression and Shear Strength of Spruce Timber*
CIB- W18/40-6-2, Bled, Slovenia, 2007
- [5] Denzler, J. K., Glos, P. *Determination of Shear Strength Values According to EN408*
Holzforschung, Technische Universität, München, Germany, 2005
- [6] *Eurocode 5: Design of Timber Structures*
prEN 1995-1-1:2004
- [7] *Timber Structures – Structural Timber and Glued Laminated Timber – Determination of Some Physical and Mechanical Properties*
prEN 408:2003
- [8] Larsen, H. J., Riberholt, H. *Trækonstruktioner, Forbindelser*
SBI-Anvisning 194, 3 Udgave, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1999
- [9] Schinkhofer, G, Obermayr, B, *Development of an optimized test configuration to determine shear strength of glued laminated timber*
CIB-W18/31-21-1
- [10] Leicester, R H, Young, F G. *Shear strength of continuous beams*
CIB-W18/24-10-1