



LUND
UNIVERSITY



DEFORMATION OCH BROTTUTVECKLING I TRÄFÖRBAND MED DYMLINGAR

Experimentell studie av tvärbelastade
träförband med jämförelse mot Eurokod 5

MHD NOUREDDIN SHAABAN

Structural
Mechanics

Master's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES
DIVISION OF STRUCTURAL MECHANICS

ISRN LUTVDG/TVSM--26/5282--SE (1-90) | ISSN 0281-6679

MASTER'S DISSERTATION

DEFORMATION OCH BROTTUTVECKLING I TRÄFÖRBAND MED DYMLINGAR

Experimentell studie av tvärbelastade
träförband med jämförelse mot Eurokod 5

MHD NOUREDDIN SHAABAN

Supervisor: Professor **ERIK SERRANO**, Division of Structural Mechanics, LTH
Examiner: **HENRIK DANIELSSON**, Associate Professor, Division of Structural Mechanics, LTH.

Copyright © 2026 Division of Structural Mechanics,
Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.

Printed by V-husets tryckeri LTH, Lund, Sweden, January 2026 (PI).

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

Sammanfattning

Arbetet som presenteras i denna rapport avser undersökningar av deformation och brottutveckling i träförband med dymlingar, med fokus på intryckningen av hålet under de första belastningstimmarna. Examensarbetet är ett fortsättningsarbete på ett pågående forskningsprojekt där både korttids- och långtidsförsök har genomförts.

I långtidsförsöken belastades förbanden med en konstant last motsvarande 80 % av den maximala lasten från korttidsförsöken, medan korttidsförsöken drev provkropparna till brott inom 2–5 minuter. Ett centralt problem i långtidsförsöken var att intryckningen under de första timmarna inte kunde mätas tillförlitligt, vilket detta arbete framför allt undersöker. Ett ytterligare syfte har varit att utvärdera beräkningsmetoder för belastning vinkelrätt mot fiberriktningen enligt Eurokod 5 (EC5), genom jämförelse med praktiska försök.

För att möjliggöra tillförlitliga mätningar under de inledande timmarna användes FEM-beräkningar i Abaqus/CAE. Modellen efterliknade provkropparnas beteende och användes som underlag för utformning av en fungerande provuppställning baserad på trepunktsböjning och för val av mätmetoder. Materialbeteendet justerades för att realistiskt motsvara verkliga träprov, och tidigare experimentella resultat användes för att fastställa flytkriterier. En jämförelse genomfördes sedan mellan EC5:s beräknade brottlaster och de brottlaster som uppmättes i försöken.

De experimentella resultaten visade att både acetylerade och obehandlade furuprover uppvisade liknande last-bärande beteende, men med tydliga skillnader. Acetylerat trä är ett kemiskt modifierat material som framställs genom att träet impregneras med ättiksyraanhydrid. De acetylerade proverna uppvisade mindre intryckning vid dymlingen, men hade lägre spricklaster. De obehandlade proverna uppvisade större intryckning, men klarade högre belastning innan brott genom uppsprickning. Vid konstant last fortsatte intryckningen att öka markant hos de obehandlade proverna, medan utvecklingen var långsammare hos de acetylerade. Intryckning uppstod i båda träslagen men var mer uttalad i de obehandlade, vilket kan ge tydligare förvarning innan brott.

Brottlasterna i de praktiska försöken visade sig vara lägre än de värden som beräknas med Eurokodens ekvationer. EC5:s teori är utvecklad för att fungera under vissa förutsättningar och tar därför främst hänsyn till provkropparnas geometri, med antagandet att alla övriga krav – såsom träslag och materialegenskaper – uppfylls. Detta resulterade i stort sett i samma

beräknade brottlast för alla prover, oberoende av träslag. Jämfört med de experimentella resultaten gav beräkningar enligt EC5 betydligt högre brottlaster, där de obehandlade provkropparna i praktiken visade högre brottlast än de acetylerade.

Abstract

The work presented in this report investigates deformation and fracture development in timber joints with dowels, with a specific focus on the indentation of the hole during the first hours of loading. The thesis continues a larger ongoing research project in which both short-term and long-term tests have been carried out. In the long-term tests, the joints were subjected to a constant load corresponding to 80% of the maximum load obtained from the short-term tests, while the short-term tests drove the specimens to failure within 2–5 minutes. A central issue in the long-term tests was that the indentation during the first hours could not be measured reliably, which is the primary focus of this thesis. Another objective was to evaluate the validity of Eurocode 5 (EC5) for loading perpendicular to the grain by comparing the code predictions with experimental results.

To enable reliable measurements during the initial hours of loading, FEM simulations were performed in Abaqus/CAE. The model replicated the behaviour of the test specimens and served as a basis for developing a functioning test setup using three-point bending and for selecting appropriate measurement methods. The material behaviour was adjusted to realistically represent real timber specimens, and previous experimental data were used to establish yielding criteria. A comparison was then carried out between the failure loads predicted by EC5 and the loads measured in the experiments.

The experimental results showed that both acetylated and untreated pine specimens exhibited similar load-bearing behavior, albeit with clear differences. Acetylated wood is a chemically modified material produced by impregnating the wood with acetic anhydride. The acetylated specimens showed less embedment indentation around the dowel but had lower fracture loads. The untreated specimens exhibited greater embedment but withstood higher loads before splitting failure occurred. Under constant load, the embedment continued to increase substantially in the untreated specimens, while the development was slower in the acetylated ones. Embedment occurred in both materials, but it was more pronounced in the untreated specimens, which may provide a clearer warning before failure.

The failure loads obtained from the experiments were lower than those predicted by the Eurocode equations. EC5 is developed to operate under specific assumptions and therefore primarily considers the geometry of the specimen, assuming that all other requirements — such as material properties and wood species — are met. This resulted in essentially the same predicted failure load for all specimens, regardless of wood type. Compared to the experimental

results, EC5 significantly overestimated the failure loads, and in practice, the untreated specimens demonstrated higher failure capacity than the acetylated ones.

Förord

Detta examensarbete har genomförts vid avdelningen för Byggnadsmekanik som det avslutande momentet i min utbildning inom civilingenjörsprogrammet i väg- och vattenbyggnad vid Lunds tekniska högskola. Arbetet har gett mig möjlighet att fördjupa mig i trä som byggnadsmaterial, EC5:s teorier, träets byggnadsmekaniska egenskaper, särskilt vid belastning vinkelrätt mot fiberriktningen samt modellering och beräkningar i Abaqus. Det har också gjort det möjligt att tillämpa och fördjupa de kunskaper jag fått under utbildningens gång.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Erik Serrano för värdefull vägledning, stöd och insiktsfulla kommentarer samt de givande diskussionerna under projektets gång. Jag vill även tacka min examinator Henrik Danielsson för den tid som lagts på att läsa och granska arbetet.

Slutligen vill jag rikta ett särskilt tack till mina föräldrar, för deras ovärderliga stöd och kontinuerliga uppmuntran. Jag vill även tacka min familj i övrigt samt mina vänner för deras stöd och för alla stunder som bidragit till att göra studietiden både lättare och mer minnesvärd.

I detta examensarbete har AI-verktyg använts för att assistera med språklig förbättring och översättning. Alla analyser, resultat och slutsatser är författarens egna och har inte påverkats av AI.

Noureddin Shaaban

Lund, januari 2026

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Examensarbetets bakgrund.....	1
1.2	Bakgrund.....	1
1.3	Syfte och mål.....	4
1.4	Frågeställningar.....	4
1.5	Avgränsningar.....	4
2	Litteraturstudie.....	5
2.1	Träets uppbyggnad.....	5
2.1.1	Lövträ och barrträ.....	5
2.1.2	Träets materialstruktur.....	5
2.2	Träets fysikaliska egenskaper.....	7
2.2.1	Fukt i trä.....	7
2.2.2	Friktionsegenskaper.....	8
2.3	Träets mekaniska egenskaper.....	8
2.3.1	Träets styvhet och styrka.....	8
2.3.2	Tidsberoende.....	10
2.4	Acetylerat trä.....	11
2.4.1	Kemiska egenskaper.....	11
2.4.2	Fysikaliska egenskaper.....	12
2.4.3	Mekaniska egenskaper.....	13
2.5	Brottmekanik.....	13
2.5.1	Sprickriktningar och lastmoder för trä.....	13
2.5.2	Elastiska egenskaper.....	14
2.6	Träförband.....	14
2.6.1	Dymlingars bärförmåga.....	15

2.6.2	Stål-trä förband.....	16
2.6.3	Uppsprickning vid belastning tvärs fibreerna	18
2.7	Finita elementmetoden	20
3	Metod	21
3.1	Översikt.....	21
3.2	Teoretiska beräkningar	21
3.3	Finita elementanalys (FEA)	22
3.3.1	Geometri.....	22
3.3.2	Materialegenskaper	23
3.3.3	Laster och randvillkor	28
3.3.4	Kontaktvillkor	29
3.3.5	Elementnät.....	29
3.4	Metod: Resultat och analys	30
3.4.1	Teoretiska beräkningar – Modell 1.....	31
3.4.2	FEA-Elastiska tillståndet – Modell 1	31
3.4.3	FEA-Olinjära beräkningar – modell 2.....	33
3.4.4	FEA-Olinjära beräkningar – modell 1.....	35
3.5	Provuppställning och mätmetoder.....	42
3.6	Materialegenskaper för provkropparna	46
4	Resultat och analys.....	49
4.1	EC5: Beräkning av uppsprickningslast	49
4.2	Experimentella resultat.....	50
4.2.1	Brottmod och uppsprickningslast.....	52
4.2.2	Deformationsutveckling	53
4.2.3	Uppsprickningsmönster.....	57
5	Diskussion.....	59
5.1	Tolkning av resultaten i relation till frågeställningar	59

5.2	Jämförelse mellan träslagen	60
5.3	Jämförelse mellan teori och experiment.....	62
5.4	Felkällor (metodkritik och osäkerhet)	64
6	Slutsats och framtida arbete	67
6.1	Slutsats	67
6.2	Framtida arbete.....	68
7	Referenser.....	69
8	Bilagor.....	71
	Bilaga A – kompletterande figurer och diagram.....	71

1 Inledning

1.1 Examensarbetets bakgrund

Det finns alltid risk för uppsprickning i fiberriktningen när träförband utförs med dymlingar. Intryckningen och brottutvecklingen i träförbandet beror framför allt på förbandets geometriska utformning och trämateriallets egenskaper.

Studien i detta examensarbete är en fortsättningsstudie av ett pågående forskningsprojekt, där träförbands beteende under kort- och långtidsförsök studerats. Vid långtidsförsöken belastades förband med konstant last tills brott uppstod genom uppsprickning. Lasten som användes vid långtidsförsöken var 80 % av den maximala lasten som förbanden klarade vid korttidsförsök. Vid korttidsförsöken skedde pålastningen till brott under 2–5 min.

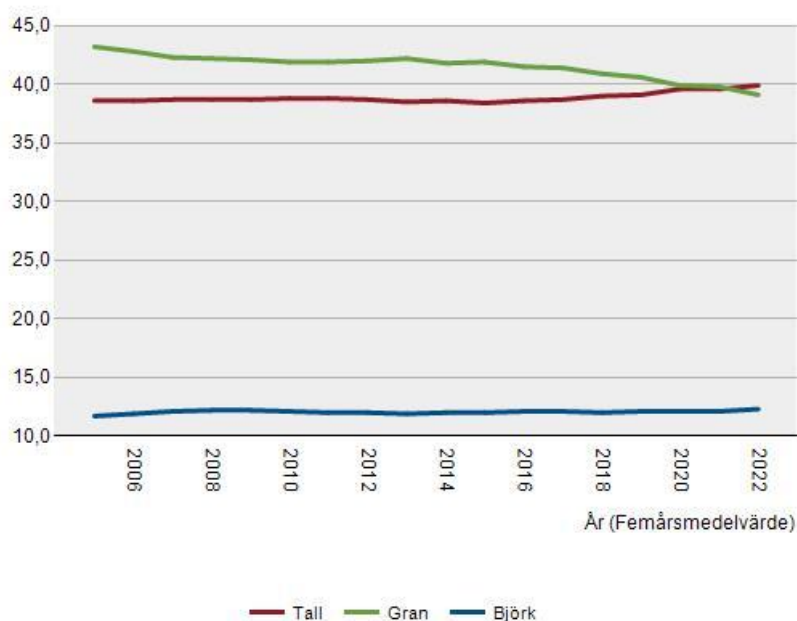
Vid de genomförda långtidsförsöken var det svårt att på ett tillförlitligt sätt mäta deformationsutveckling under de första timmarna av försöken. Därför kommer detta examensarbete att studera denna deformationsutveckling

1.2 Bakgrund

Trä är ett byggmaterial med många fördelar. Det har lägre densitet än andra material som stål och betong, vilket gör det smidigt att transportera, montera och även att bygga på enklare grundkonstruktioner. Materialet är lätt att bearbeta och går bra att anpassa om byggnaden behöver ändras senare. I större industriella projekt sparas både tid och pengar tack vare att träelement kan sättas ihop snabbt. Som förnybar råvara bidrar trä också till minskad klimatpåverkan genom att binda koldioxid. Träets egenskaper och bärförmåga förblir i stort sett oförändrade innanför pyrolyszonen vid brand. (Pyrolysis är den termiska nedbrytning som sker när material upphettas utan syretillgång, varvid flyktiga gaser frigörs och en fast rest bildas, ett förstadium till förbränning där de avgående gaserna senare antänds ([Håkansson, 2000](#))). Eftersom inbränningshastigheten hos trä är väl känd kan denna kunskap utnyttjas effektivt vid branddimensionering ([Svenskt trä, u.å. Varför trä?](#))

Sverige har ungefär 23,5 miljoner hektar produktiv skogsmark. Med produktiv skogsmark menas mark som används för skogsproduktion och som inte i någon större utsträckning har andra syften. Den svenska skogsmarken domineras av barrskog, där tall (furu) står för cirka 40 % av den totala virkesvolymen och gran för cirka 39 %. För lövskog är björk vanligast och

utgör omkring 13 % av virkesvolymen i landet. Se Figur 1 nedan. ([SLU Riksskogstaxeringen, 2025](#))



Figur 1 Sveriges virkesförrådet levande träd andel i % efter Trädslag och År ([SLU Riksskogstaxeringen, 2025](#))

För att nå ett klimatneutralt samhälle måste utsläppen minska och mer kol lagras, och byggsektorn spelar en central roll i detta arbete. Redan under byggskedet uppstår mer än hälften av en byggnads totala klimatpåverkan, vilket gör valet av material extra viktigt. Trä sticker ut eftersom det inte bara är förnybart, utan också lagrar kol, vilket ökar dess betydelse. Sedan 1990-talet har trähusbyggandet vuxit snabbt i Sverige. Industriella lösningar som korslimmat massivträ (KL-trä), limträ och prefabricerade moduler gör det möjligt att bygga flervåningshus effektivare och med lägre klimatpåverkan. Genom att öka användningen av trä kan utsläppen minska med flera miljoner ton koldioxid per år. ([Swedish wood, u.å](#))

Människan har sedan länge byggt med trä. Speciellt i Sverige började man bygga med trä redan under vikingatiden på 800–900-talen. Barrträ har varit den främsta källan att bygga med. Alltså har gran och tall varit, och är fortfarande, de viktigaste trädslagen att använda. Tallen har varit överlägsen då den var mer beständig och ansågs vara lättare att hantera än gran. Detta på grund av att den har färre kvistar och fetare ved. Gran har däremot andra egenskaper, som att den isolerar bättre, är lättare och rakvuxen. Det avgörande vid valet av vilket trädslag man föredrog att använda var trädets mognad. Ett träd betraktades som moget om ytveden var tunnare än kärnveden. Tall ansågs vara det bästa alternativet när den var tillräckligt mogen, men om den inte uppfyllde detta krav valde man i stället att bygga med gran. ([Vesling JK, 1999, s. 150-152](#))

Tall (*Pinus sylvestris*) får benämningen fura när den har mognat, dvs. när ytveden blir mindre än kärnan. Tallens mognad kännetecknas av att barken vid roten ska vara grov och grå, men några meter upp ska den vara tunn och ljusgrå. Furu är benämningen på det sågade virket. Furu används främst i hus och i fuktigt inomhusklimat. Tack vare sin beständighet används furu där risken är störst för röta. Furu är däremot väldigt känslig för värme på grund av det höga innehållet av kåda och används därför inte i konstruktioner som utsätts för hög värme. Tallens egenskaper, såsom kvistfrihet, längd och rakvuxenhet, påverkas starkt av växtplatsen. Högre kvalitet återfinns ofta på torra hedar och höglänta sluttningar, där träden utvecklar en större kärnandel och generellt har lägre inre spänningar. ([Vesling JK, 1999, S. 151-154](#))

Trä behöver skydd för att hålla länge. Det som oftast orsakar problem i Sverige är rötsvamp, men även insekter och andra skadegörare kan påverka. Nyckeln är att undvika att trä blir stående fuktigt och se till att det kan torka ut snabbt. När det finns risk för långvarig fukt använder man antingen träslag med naturlig beständighet eller trä som behandlats för att stå emot angrepp, till exempel genom impregnering eller värmebehandling. Tryckimpregnerat virke görs nästan alltid av furu och klassas enligt NTR-systemet (Nordiska Träskyddsrådet), medan gran inte tar upp impregneringsmedel lika bra och därför får sämre skydd. Det impregnerade virket får en särskild färg och kräver fästdon i rostfritt eller annat korrosionshärdat stål. Om virket kapas eller bearbetas måste de nya ytorna behandlas igen för att skyddet ska hålla. ([Svenskt trä, u.å. Träskydd](#))

Modifiering av trä är ett sätt att förbättra beständighetsegenskaperna genom att behandla träet kemiskt, utan tillägg av biocidbaserade medel. Det modifierade träet framställs genom industriella metoder. Ett exempel på modifierat trä är acetylerat trä som tillverkas genom impregnering med ättiksyraanhydrid. Detta ger träet ett bra skydd mot röta, men samtidigt blir träet svagt mot mögel utomhus i närvaro av faktorer som luftfuktighet och temperatur. Acetyleringen i sig ger ingen färg, men träet grånar under tiden vid användning utomhus. Den ger däremot en lukt av ättika efter att ha använts under en längre period. ([Fröbel & Bergqvist, 2020, s. 50–56](#))

Furfurylalkohol är ett annat exempel på en kemikalie som används för att tillverka modifierat trä, där bästa möjliga beständighet kan uppnås genom att radiatall impregneras genomgående. Bland de viktigaste egenskaperna som furfurylerat trä kan ha är hårdhet och dimensionsstabilitet. Det får en högre densitet än obehandlat trä och får en mörkbrun färg som med tiden övergår till grått. Impregnering av trä kan även kräva ytbehandling för att motverka sprickbildning, på samma sätt som obehandlat virke, under förutsättning att ytfuktkvoten inte

överstiger 16 %. För att impregneringsmedlen ska tränga igenom alla delar av virket används för både acetylering och furfurylering radiatatal (*Pinus radiata*), som är en snabbväxande art med hög permeabilitet. ([Fröbel & Bergqvist, 2020, s. 50–56](#))

1.3 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur intryckningen i träförband med dymlingar utvecklas under de första timmarna av belastning. I arbetet studeras särskilt belastning vinkelrätt mot fiberriktningen, samt skillnaden mellan obehandlad furu och acetylerad furu. Studien bygger på både experimentella försök och finita elementanalyser (FE-analyser). Målet med FE-analyserna är att utforma provuppställningar och mätmetoder som gör det möjligt att få tillförlitliga deformationsmätningar i det tidiga skedet av belastningen. Giltigheten i EC5:s teori för uppsprickningslast vid belastning vinkelrätt mot fiberriktningen undersöks också.

1.4 Frågeställningar

- Hur kan man genomföra provningarna (provuppställning, mätning av intryckning)?
- Hur utvecklas deformationen (Intryckning under dymling) under de första timmarna av belastning (<5 h), när dymlingen utsätts för last vinkelrätt mot fiberriktningen?
- På vilket sätt påverkas förbandets beteende av acetylering, jämfört med obehandlad furu?
- Hur väl överensstämmer EC5:s teori för beräkning av uppsprickningslast vid belastning vinkelrätt mot fiberriktningen med de faktiska uppmätta resultaten?

1.5 Avgränsningar

För att arbetet skulle vara genomförbart och fokuserat på de centrala frågeställningarna har vissa avgränsningar gjorts. Undersökningen omfattar endast furuprovkroppar, både obehandlade och acetylerade, som förvarats i ett klimatkontrollerat rum med relativ fuktighet på 60 % och temperatur 20° C. Totalt användes endast 9 provkroppar av varje typ på grund av begränsade resurser och tid. Andra träslag eller andra fuktnivåer har inte studerats.

Långtidsbelastning och effekter över perioder längre än de initiala timmarna har inte analyserats. Endast lastfall relaterade till trepunktsböjning och intryckning under dymlingen har studerats, och sprickmoderna har begränsats till de mest relevanta (RL och TL) för detta material och provuppställning.

2 Litteraturstudie

2.1 Träets uppbyggnad

2.1.1 Lövträ och barrträ

Detta avsnitt baseras på ([West & Ferguson, 2021, s. 2-2](#)).

Träd delas in i två huvudgrupper: lövträ och barrträ. Dessa skiljer sig åt både i sina egenskaper och i sin uppbyggnad, vilket blir tydligt på såväl makroskopisk som mikroskopisk nivå.

Lövträ kännetecknas ofta av att vara lövfällande, även om det finns undantag. Exempel på lövträ är bok och kastanj. Biologiskt tillhör lövträ angiospermer (gömfröiga växter), där fröna är inneslutna i blommans fruktämne. Anatomiskt är de porösa eftersom de innehåller kärlelement – specialiserade vedceller som bildar rör för transport av vatten och näringsämnen.

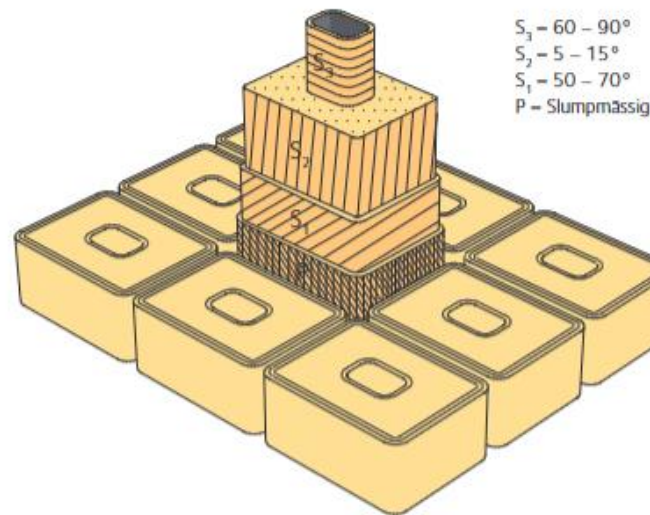
Barrträ tillhör istället gymnospermer (nakenfröiga växter). Exempel på barrträ är gran och tall. Till skillnad från lövträ saknar barrträ kärlelement och är därför icke-porösa. De flesta barrträd har barr- eller fjällliknande blad, bär kottar och behåller sin gröna färg året runt, även om vissa arter, som lärk, faller barren under vintern.

2.1.2 Träets materialstruktur

Följande avsnitt baseras på ([Johansson, 2019, S. 26-28](#)).

Trä kan beskrivas som en naturlig komposit som består av kol, syre och väte. Ungefär hälften av träet är kol, medan syre står för en stor del av resten (ca 44 %) och väte utgör en mindre andel. Dessa ämnen binds ihop i tre viktiga beståndsdelar: cellulosa, hemicellulosa och lignin. I nordiska barrträd ligger fördelningen ungefär på 40–45 % cellulosa, 25–30 % hemicellulosa och 25–35 % lignin. Cellulosa utgörs av mycket långa kedjor av glukosenheter, ibland upp till 15000 stycken, som kan binda till varandra med vätebindningar. Hemicellulosa har kortare kedjor, medan lignin är en mer komplex polymer med en tredimensionell struktur.

Cellulosan bildar mikrofibriller som bygger upp cellväggen. Cellväggen har fyra lager. Ytterst finns primärväggen, och innanför den tre skikt som brukar kallas S1, S2 och S3. Av dessa är S2 det dominerande – det står för ungefär 85 % av väggens tjocklek och här ligger mikrofibrillerna nästan helt parallellt med cellens längdriktning. Mellan cellerna finns också ett slags fogmassa, mittlamellen, som är rik på lignin. Det är den som håller ihop cellerna och fungerar som naturens eget klister, se Figur 2.

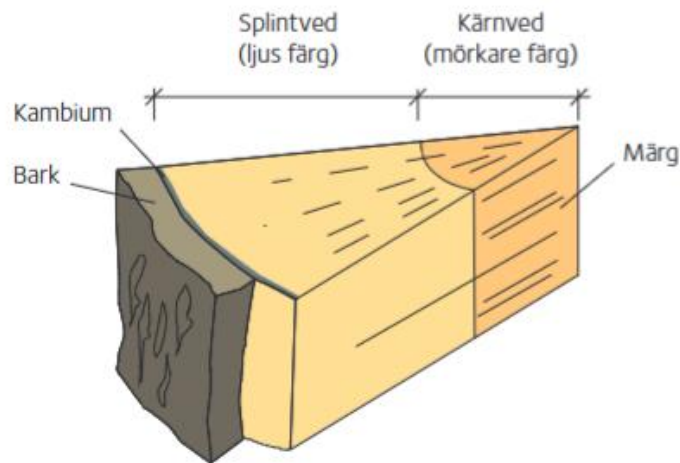


Figur 2 Cellväggen uppbyggd av 4 skikt kring det centrala cellhålrummet. (Johansson, 2019, s. 28)

I barrträ består nästan hela veden av trakeider (fibrer), alltså långsmala rörformiga celler som både ger styrka och transporterar vatten. De utgör ungefär 90 % av volymen och är vanligtvis 2–4 mm långa och omkring 0,1 mm breda. Lövträ är mer varierat. Där finns flera olika celltyper, bland annat kärlelement med öppningar som gör att vatten blir porös. Det är en tydlig skillnad jämfört med barrträets tätare struktur.

Trädets tillväxt förändras med årstiderna. Vårveden, som bildas tidigt på året, har tunna cellväggar på ca 2 μm och stora lumen som underlättar transporten av vatten. Sommarveden, som växer senare, har däremot tjockare väggar på ca 10 μm och bidrar framför allt med styrka. De här skillnaderna gör att årsringarna syns tydligt i veden. De ljusa, breda banden kallas vårved och de smalare, mörkare banden som ger extra styrka kallas sommarved.

Vedcellerna har små porer som förbinder dem med angränsande celler och möjliggör transport av vatten med mineraler och näringsämnen. De enda cellerna som verkligen lever och kan dela sig finns i kambium, nära barken. Cellerna längre in transporterar vatten och näring och kallas för splintved. Innanför splintveden lagras ämnen i kärnveden för att skyddas mot biologiska angrepp. I tall syns kärnveden som mörkare, medan skillnaden är mindre tydlig i gran. Mitt i stammen ligger mörken, trädets centrum, se Figur 3.

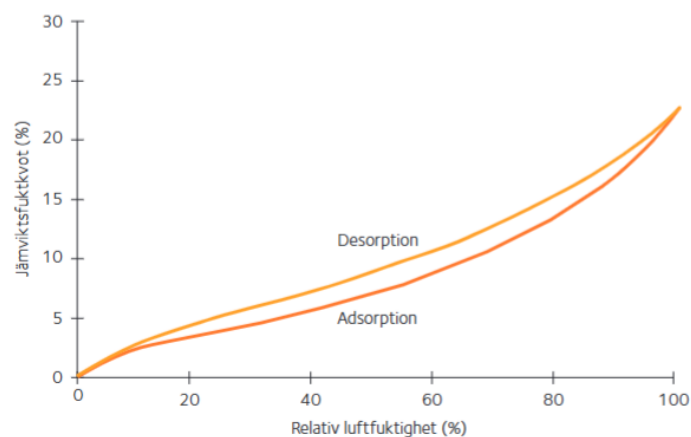


Figur 3 Illustration av ett trädstams tvärsnitt. (Johansson, 2019, s. 28)

2.2 Träets fysikaliska egenskaper

2.2.1 Fukt i trä

Vatten påverkar starkt träets mekaniska egenskaper. Dessutom sväller och krymper trä vid uppfuktning och uttorkning. Träets fuktkvot, definierad som vattenvikten i procent av torrsvikt, styrs av den omgivande luftens relativa fuktighet. När trä absorberar vatten binds det först till cellväggarnas hydroxylgrupper, och först när dessa platser är fyllda börjar cellhålrummen fyllas. Jämviktsfuktkvoten är den nivå där vattenupptag och avgivning är i balans. Ett centralt begrepp är fibermättnadspunkten, då cellväggarna är mättade men cellhålrummen fortfarande torra. För europeiskt barrträ ligger fibermättnadspunkten ofta mellan 27 och 33 % fuktkvot. Över denna nivå fylls cellhålrummen med vatten, men endast vattnet i cellväggarna påverkar träets svällning och krympning. Sambandet mellan relativ luftfuktighet och jämviktsfuktkvot illustreras i Figur 4. (Johansson, 2019, s. 31–32)



Figur 4 Sambandet mellan relativ luftfuktighet och jämviktsfuktkvot. (Johansson, 2019, s. 31)

2.2.2 Friktionsegenskaper

Friktionsegenskaperna hos trä beskrivs vanligtvis genom friktionskoefficienten, som anger motståndet mellan två ytor. Den delas in i statisk friktion, som verkar precis innan glidning sker, och dynamisk friktion, som uppstår under själva rörelsen ([West & Ferguson, 2021, s. 4-19](#))

Följande stycken baseras på ([Gajos & Petersson, 2019](#)).

Friktionen mellan trä och stål påverkas starkt av träets fukthalt och ytans beskaffenhet. En ökad fukthalt kan initialt höja friktionen genom svällning och större kontaktyta, och friktionen fortsätter att öka tills ytan når en viss fuktnivå, men vid vattenmättnad minskar den eftersom vatten då fungerar som ett smörjmedel och reducerar motståndet. Även stålets yta har stor betydelse. En grövre yta ger högre friktion. Tester med dymlingsförband visar tydligt att högre friktion förbättrar både bärförmåga och repeterbarhet. Faktorer som last och area och fiberriktning har mindre påverkan, medan fukthalt och stålyta är avgörande för den maximala friktionen.

I ett examensarbete av Gajos & Petersson, 2019 framkom att friktionskoefficienten vid slät glidyta varierade mellan cirka 0,40 och 0,50 för fiberriktningarna 0° respektive 90° i blött klimat, och mellan 0,15 och 0,25 i normalt och torrt klimat. Som jämförelse, för de olika fiberriktningar 0° respektive 90° och vid normalt samt torrt klimat, varierade medelvärdet för friktionskoefficienten mellan cirka 0,70 – 0,80 för blåstrad yta.

Det torra klimatet tenderade att ge något högre medelvärden än det normala, där friktionen tvärs fibrerna uppmättes till 0,194 för torrt virke, jämfört med 0,141 för normalfuktigt klimat.

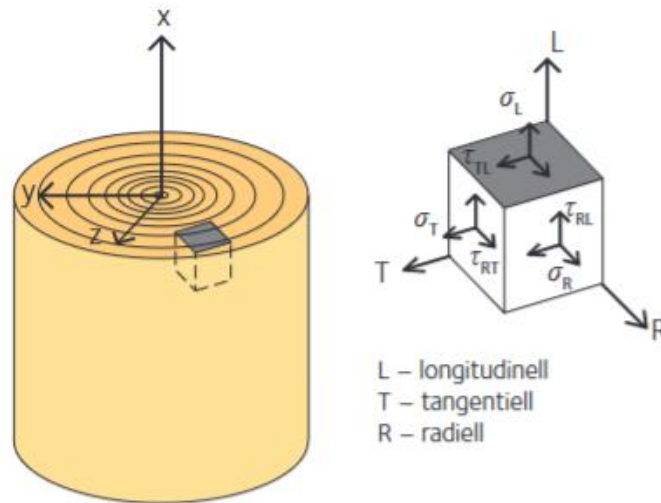
2.3 Träets mekaniska egenskaper

Detta avsnitt baseras på ([Johansson, 2019](#)).

2.3.1 Träets styvhet och styrka

Trä är ett anisotropt material, vilket innebär att dess mekaniska egenskaper varierar beroende på riktning. Träets struktur ger olika egenskaper längs fibrerna och tvärs fibrerna. För att beskriva detta definieras tre huvudriktningar som tillsammans utgör ett koordinatsystem: längsriktning (parallellt med fibrerna, L), radiell riktning (från centrum mot barken, R) och tangentiell riktning (längs årsringarna, T), se Figur 5. Träets styvhet och styrka kan påverkas av olika faktorer, bland annat, fukt, belastningshastighet och belastningstid, temperatur samt den

belastade volymens storlek. Till detta kommer alltså att beteendet i allmänhet är olika i de olika riktningarna.



Figur 5 Definition av riktningarna i trämaterialiet samt av normal- och skjuvspänningar i de olika riktningar (Johansson, 2019, s. 34)

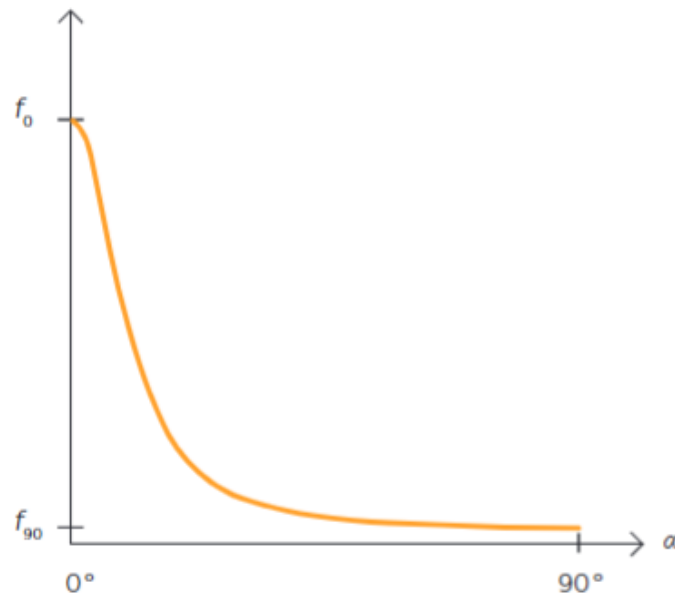
2.3.1.1 Belastning parallellt med fiberriktningen

När barrträ belastas parallellt med fibrerna följer sprickorna i stort sett fibrernas riktning. Dragprov på små, kvistfria provkroppar visar nästan linjära spännings-töjningskurvor fram till brott. Barrträ kan då nå ett karakteristiskt värde för dragspänningar, runt 30 MPa, enligt EC5-definition, ofta med ett mycket sprött brott.

Vid tryck parallellt med fibrerna är träs rörformiga struktur stabil och kan bära höga laster. Om belastningen blir mycket hög kan fibrerna knäckas, vilket leder till viss plasticering. Karakteristiskt värde för tryckhållfastheten ligger runt 24 MPa. Den typiska stukningstöjningen är mellan 0,8 och 1,2 %, medan brottöjningen är ungefär tre gånger större.

2.3.1.2 Belastning vinkelrätt mot fiberriktningen

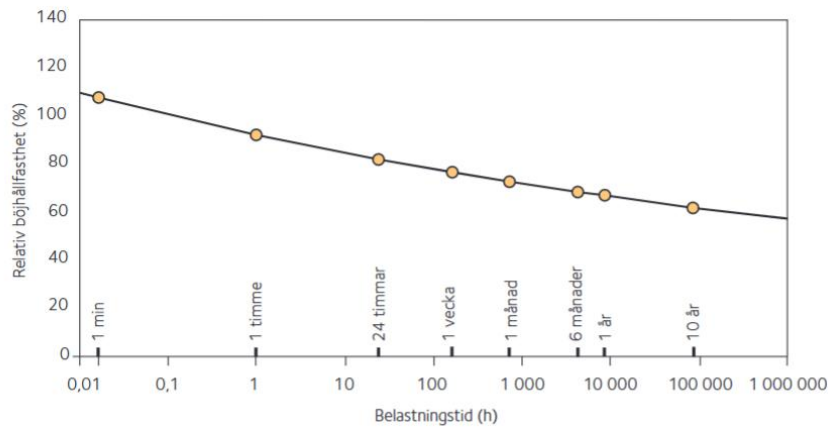
När trä belastas vinkelrätt mot fibrerna är hållfastheten betydligt lägre än vid belastning längs fibrerna. Draghållfasthetens karakteristiska värde är mycket lågt, ofta högst omkring 0,5 MPa, och materialet är också mindre styvt. Vid tryck i samma riktning krossas de rörformiga cellerna, vilket kräver relativt lite kraft och ger både låg styvhet och låg hållfasthet. Det maximala karakteristiska värdet för tryckhållfastheten ligger mellan 3 och 5 MPa, där brott definieras som den spänning som orsakar ungefär 1 % bestående deformation. Figur 6 visar hur brotthållfastheten förändras med vinkeln α mellan fiberriktningen och kraftriktningen.



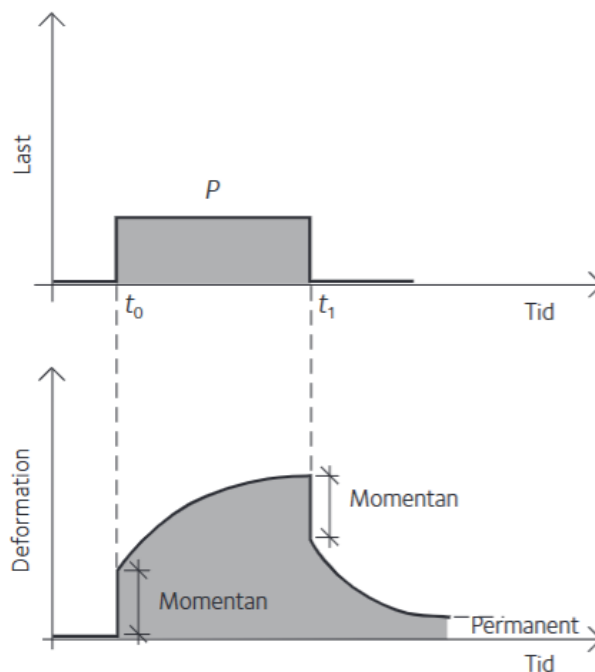
Figur 6 Förhållandet mellan brotthållfasthet och vinkeln α mellan fiber- och kraftriktning
([Johansson, 2019, s. 36](#))

2.3.2 Tidsberoende

Tid är en viktig faktor för träets mekaniska egenskaper. Hållfastheten, särskilt böjhållfastheten, minskar med ökande belastningstid, ett samband som först beskrevs för små kvistfria provkroppar genom den så kallade Madisonkurvan på 1950-talet. Kurvan i Figur 7 visar att hållfastheten efter ett år har minskat till ungefär 60 % av korttidshållfastheten. Effekten varierar mellan olika träslag, volymer och fuktnivåer, och blir mer uttalad vid högre fukthalt eller temperatur. Belastningstid påverkar inte bara hållfastheten utan även deformationer; Krypcurvan i Figur 8 visar hur ett trästycke utsatt för konstant last gradvis utvecklar ökande deformation. Deformationen består av tre komponenter: direkt elastisk, tidsberoende elastisk och plastisk (viskös). Den elastiska deformationen uppstår omedelbart, den tidsberoende elastiska är reversibel och återgår med tiden, medan den plastiska är permanent. I praktisk dimensionering tas effekten av lastens varaktighet med genom lastvarighetsklasser, hållfasthetsmodifieringsfaktor k_{mod} och krypfaktor k_{def} i Eurokod 5.



Figur 7 Relativ böjhållfasthet som funktion av belastningstid, där hållfastheten vid 5 minuter är 100 % (Johansson, 2019, s. 39)



Figur 8 Visar hur deformationen utvecklas i tre faser över tid i relation till belastningstiden (Johansson, 2019, s. 40)

2.4 Acetylerat trä

Detta avsnitt baseras på (Forsman, 2020).

2.4.1 Kemiska egenskaper

Acetylering förändrar träs kemiska uppbyggnad genom att hydroxylgrupper i cellväggen reagerar med acetylgrupper från ättiksyraanhydrid och bildar esterbindningar. Varje hydroxylgrupp får en acetylgrupp, och ättiksyra blir en biprodukt. Denna kemiska förändring

mäts ofta som viktprocentförändring (WPG), vilket anger hur mycket träets torra massa ökat (i procent) efter behandlingen.

Ekvation 1

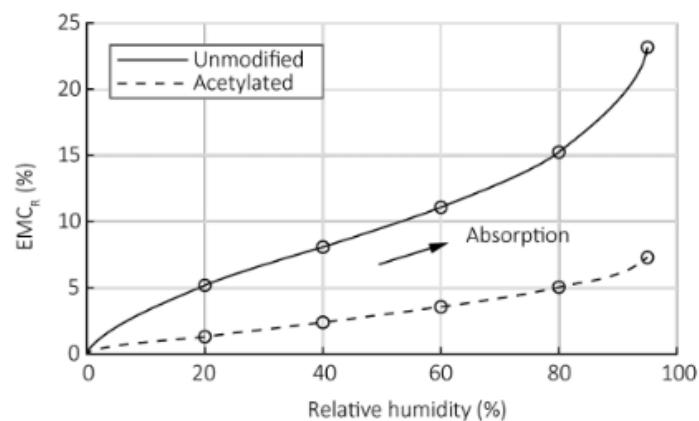
$$WPG = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$$

Där m_1 och m_0 representerar träets vikt i ugnstorr tillstånd efter respektive före modifiering.

Denna process påverkar inte bara träets molekylära struktur, utan ger också förändringar i både fysikaliska och mekaniska egenskaper. Rätt val av tid, temperatur och tryck är avgörande för att behandlingen ska bli jämn och effektiv, och olika träslag reagerar olika på processen.

2.4.2 Fysikaliska egenskaper

Acetylerat trä får högre densitet och blir mer hydrofobt eftersom acetylgrupperna binder till de tidigare vattenbindande hydroxylgrupperna. Vid en WPG på 15–20 %, dvs då den torra massan ökat med 15–20 %, kan träet betraktas som permanent svällt. Detta gör att tillkommande vatten inte längre påverkar svällning och krympning på samma sätt som i obehandlat trä. Acetylerat trä skiljer sig därför tydligt från obehandlat trä genom att fibrerna tar upp mindre vatten. Det gör att jämviktsfukthalten (EMC) blir lägre och att träet inte ändrar volym lika mycket när luftfuktigheten växlar över tid, se Figur 9 nedan. Detta innebär i sin tur att acetylerat trä är mer dimensionsstabil och mindre benäget att spricka eller skeva. Samtidigt får träet ett bättre skydd mot biologisk nedbrytning, eftersom de hydrofoba fibrerna gör det svårare för mikroorganismer att få fäste.



Figur 9 Absorptionsisotermer för obehandlad och acetylerad furu, som visar minskad vattenupptagning hos acetylerat trä (Forsman, 2020)

2.4.3 Mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna påverkas direkt av de kemiska och fysikaliska förändringarna. Eftersom acetylerat trä innehåller något färre fibrer per tvärsnitt, och fukthalten är lägre, förändras styrkan på olika sätt. Generellt ökar tryckhållfastheten och hårdheten, särskilt när träet utsätts för perioder med högre eller lägre fukthalt i luften, och träets krypning under dessa variationer minskar. Samtidigt kan skjuvstyrkan och brottenergin minska, och effekten varierar beroende på träslag och behandlingsgrad. För konstruktionsändamål är det mest intressanta att träet blir mer stabilt över tid och att dess motståndskraft mot biologiska angrepp förbättras.

2.5 Brottmekanik

Detta avsnitt baseras på ([West & Ferguson, 2021](#)).

2.5.1 Sprickriktningar och lastmoder för trä

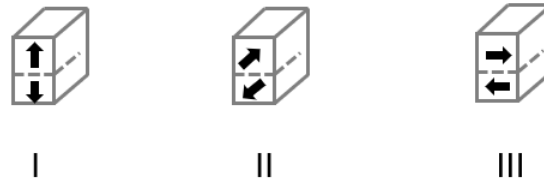
Brottmekanik handlar om hur trä beter sig när det redan finns sprickor eller små defekter som kan växa och i värsta fall leda till brott.

Sprickor kan utsättas för olika belastningsmoder, vilka styr hur de öppnas och växer. Mod I innebär öppning vinkelrätt mot sprickplanet, mod II innebär skjuvning längs sprickplanet och att sprickans två ytor glider relativt varandra i sprickans propageringsriktning och mod III innebär skjuvning i sprickplanet och att sprickans två ytor glider relativt varandra vinkelrätt mot sprickans propageringsriktning.

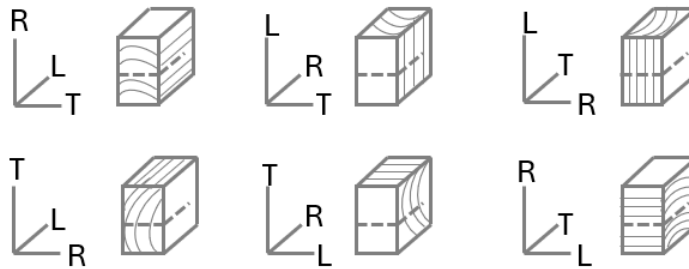
Utöver mod måste även sprickans orientering i förhållande till fiberriktningen beaktas. I trä analyseras därför främst sprickor i riktningarna RL, TL, TR och RT, eftersom sprickor tenderar att följa de svagaste riktningarna längs eller tvärs fibrerna. Se Figur 10. Av dessa är RL och TL särskilt intressanta för praktiska tillämpningar, exempelvis balkar med dymlingsförband och belastning vinkelrätt mot fiberriktningen.

När man mäter brottseghet K_c får man typiska värden på ungefär 220–550 kPa \sqrt{m} vid drag vinkelrätt fibrerna och 1 650–2 400 kPa \sqrt{m} vid skjuvning längs fibrerna. Tester görs ofta vid en fuktnivå mellan 10 % och 12 %. Fuktens påverkan är intressant: träets motstånd mot sprickor påverkas lite eller kan till och med förbättras när det torkar till omkring 6–15 % fuktkvot. Om det blir ännu torrare minskar däremot motståndet igen.

a) Brottmoder



b) Riktningar



Figur 10 a) Definition av moder, b) Definition av sprickorientering

2.5.2 Elastiska egenskaper

Träets elastiska beteende beskrivs med tolv materialkonstanter, varav nio är oberoende: tre elasticitetsmoduler (E_L, E_R, E_T), tre skjuvmoduler (G_{LR}, G_{LT}, G_{RT}) och sex Poisson-tal (μ).

Elasticitet handlar om hur materialet reagerar när det belastas måttligt så att det återgår till sin ursprungliga form. Vid högre belastning kan träet deformeras permanent (plastiskt), vilket typiskt sker vid tryck, eller gå till brott, vilket typiskt sker vid dragning eller skjuvning.

Hur styvt träet är beror på riktningen: längs fibrerna (longitudinellt), från trädets mäg och i riktning mot barken (radiellt) eller parallellt med årsringarna (tangentiellt). Styvheten bestäms av elasticitets- och skjuvmoduler, medan Poisson-talen anger förhållandet mellan deformation parallellt och vinkelrätt mot belastningsriktningen vid elastisk dragning/tryck. Alla dessa värden påverkas av träslag, fukthalt och densitet, och tillsammans ger de en bild av hur träet deformeras vid måttliga belastningar.

2.6 Träförband

Följande avsnitt baseras på ([Lidelöw, 2019](#)), ([CEN, 2004, avsnitt 8.2.3](#)) och ([Forsman & m.fl. 2024](#)).

För att en träkonstruktion ska hålla ihop och fungera som en stabil konstruktion behöver trärelementen kopplas samman. Hur de kopplas ihop påverkar hela byggnadens beteende. Vissa

förband kan ta upp moment och fungera styvt, medan andra fungerar mer som ledade punkter som tillåter viss rörelse.

Ett vanligt sätt att sammanfoga trä är med dymlingsförband. Här placeras förbindarna vinkelrätt mot den kraft som ska överföras, och lasten tas upp genom skjuvning i dymlingen och via kontaktkrafter mellan dymlingen och träet. Dessa förband kan göras duktila, vilket innebär att de tål viss deformation utan att gå av och detta ökar säkerheten i konstruktionen. Förband av dymlingstyp omfattar till exempel spikar, skruvar, dymlingar och plåtar med spikar.

Dymlingarna är cylinderformade (utan huvud), och enligt Eurokod 5 har de en diameter mellan 6 och 30 mm. De flesta är av stål, ofta rostfritt eller härdat, och klassas efter brottgräns f_u och sträckgräns f_y . Ett exempel är klass 8.8, vilket motsvarar en brottgräns på 800 MPa och en sträckgräns på 640 MPa.

2.6.1 Dymlingars bärförmåga

När en dymling monteras vinkelrätt mot lastens riktning pressas den mot träets hållkanter, vilket skapar ett lokalt tryck. Dymlingen fungerar då som en liten balk som bär upp trycket. Om dymlingen är kraftig håller den emot böjning, men är den smalare kan den böja sig och bilda flytleder. I det läget kan den också börja ta upp dragkrafter, och det går att förstärka detta genom exempelvis skruvar med huvud eller mutter, snedställda skruvar som tar upp lasten via gängorna, eller dymlingar med sträv yta som ökar motståndet mot utdragning med hjälp av friktion.

Hur mycket ett sådant förband kan bära beror på tre saker: träets hållkanthållfasthet f_h , dymlingens flytmoment M_y samt förmågan att överföra last i dymlingens längsriktning, alltså förankringskapaciteten. Hållkanthållfastheten visar hur stort tryck träet runt dymlingen klarar och motsvarande hållkantryck beräknas enligt EC5 som kraften delat med den projicerade ytan av dymlingen:

Ekvation 2

$$A_{yta} = d \cdot t_{trä}$$

Där d är dymlingens diameter och $t_{trä}$ är träets tjocklek.

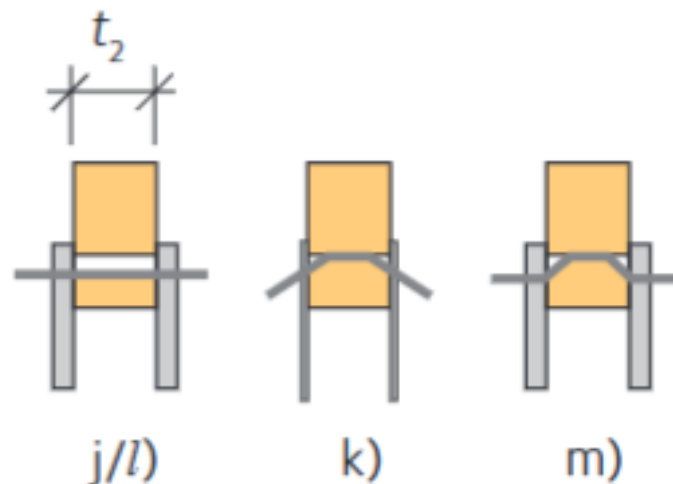
Det bör noteras att hållkanthållfastheten, på grund av sin definition, inte är ren materialparameter. Istället påverkas hållkanthållfastheten av flera faktorer, dels faktorer som påverkar trämaterialiet och dels faktorer som har med geometri och interaktion mellan trä och

dymling att göra: träets densitet, dymlingens diameter, vinkeln mellan fibrerna och lasten, friktionen, fukthalten och om hålet borrats i förväg eller inte. Genom att förstärka träet mot drag tvärs fibrerna kan man dessutom minska risken för sprickor och höja bärförmågan.

2.6.2 Stål-trä förband

Bärförmågan i ett stål-trä förband beror i stor utsträckning på plåtens tjocklek. Är plåten tunnare än hälften av dymlingens diameter räknas den som tunn, medan en plåt som är lika tjock som diametern eller mer klassas som tjock. Mellantjocklekar ligger mitt emellan och beräknas då genom interpolation.

En tjock plåt gör att dymlingens infästning till plåten blir styv nog för att skapa en flytled i dymlingen, vilket ökar förbandets kapacitet. Om plåten däremot är tunn, ungefär $d/2$ eller mindre, beter sig förbandet mer som en led där dymlingen kan rotera i hålet utan att någon flytled bildas. Därmed blir kapaciteten lägre. I praktiken används ibland två skjuvplan i stället för ett, och då ersätter man ofta trädelarna på utsidan med stålplåtar. Det kan lösas på olika sätt, till exempel med spik som slutar i träet eller med dymlingar som går hela vägen genom både trä och stål. Se Figur 11.



Figur 11 Brottmoder som uppstår för förband stål mot trä i ett fall som liknar de försök som genomförts i detta arbete (Fröbel, 2019)

För att ta reda på hur brott kommer att ske måste förbandets hållfasthet alltid kontrolleras efter uttryck för olika brottmoder och dimensioneras efter den minsta karakteristiska bärförmågan. Se Ekvation 3 & Ekvation 4.

I detta sammanhang är det värt att nämna linverkan som innebär bärförmågan i drag hos dymlingar. När olika typer av dymlingar utsätts för drag sker en viss lastupptagning. Denna effekt har en stor betydelse beroende på hur dymlingens yta förankras med träelementets kontaktyta. Förankringshållfastheten betecknas F_{ax} . Enligt Eurokod 5 måste hänsyn tas till detta genom att inkludera termen $F_{ax,Rk}/4$ i beräkningen av bärförmågan i skjuvning i form av en viss procentuell sats för olika förbindare. För dymlingar är den termen 0 %.

För tunna stålplåtar ($t \leq 0.5 d$) som yttre element i förband med dubbla skjuvningsplan fås *per skjuvplan*:

Ekvation 3

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0.5 f_{h,2,k} t_2 d & j) \\ 1.15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & k) \end{cases}$$

För tjocka stålplåtar ($t > d$) som yttre element i förband med dubbla skjuvningsplan fås *per skjuvplan*:

Ekvation 4

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0.5 f_{h,2,k} t_2 d & l) \\ 2.3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & m) \end{cases}$$

Där

$F_{v,Rk}$ är karakteristisk tvärkraftsbärförmåga *per skjuvningsplan* för en förbindare.

t_2 är det mellersta träelementets tjocklek.

d är förbindarens diameter

$F_{ax,Rk}/4$ är bidraget från linverkan enligt Eurokod 5.

$f_{h,2,k}$ är den karakteristiska hållkanthållfastheten och den erhålls vid en vinkel α mot vinkelriktningen när diametern är lika med eller mindre än 30 mm ur följande uttryck:

Ekvation 5

$$f_{h,a,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

Där

Ekvation 6

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$$

Och

Ekvation 7

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \text{ för barrträ}$$

Där d är dymlingsdiameter i mm och ρ_k är karakteristisk virkesdensitet i kg/m^3 .

$M_{y,Rk}$ är det karakteristiska flytmomentet. Det finns två huvudfaktorer som påverkar hur det ska beräknas. Förbindarens typ och förbindarens diameters storlek. Flytmomentet kan beskrivas som det plastiska momentet som krävs för att en flytled ska uppstå. I praktiken innebär det den punkt där dymlingen övergår från elastiskt till plastiskt beteende. För diameter som är större än 8 mm beräknas $M_{y,Rk}$ enligt Ekvation 8 nedan:

Ekvation 8

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_u d^{2,6}$$

Där

d är förbindarens diameter i mm och f_u är brotthållfasthet i N/mm^2 .

2.6.3 Uppsprickning vid belastning tvärs fibrerna

I träkonstruktioner kan belastning vinkelrätt mot fiberriktningen leda till sprickbildning, oftast genom separation längs fibrerna, och särskilt i dymlingsförband. Eurokod 5 (EC5) ger ett sätt att dimensionera konstruktionerna i sådana fall. Metoden bygger på linjärelastisk brottmekanik och används som verktyg för att bedöma när sprickbildning kan bli kritisk.

Tvärkraftskapaciteten, $F_{90,Rd}$, ska uppfylla:

Ekvation 9

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd}$$

Där:

Ekvation 10

$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed,1} \\ F_{v,Ed,2} \end{cases}$$

det vill säga, den största av de två tvärkrafterna på vardera sidan om förbandet. Se Figur 12.

Karakteristiska tvärkraftskapacitetet $F_{90,Rk}$ beräknas enligt EC5 enligt följande formel:

Ekvation 11

$$F_{90,Rk} = 14 \cdot b \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{h}}}$$

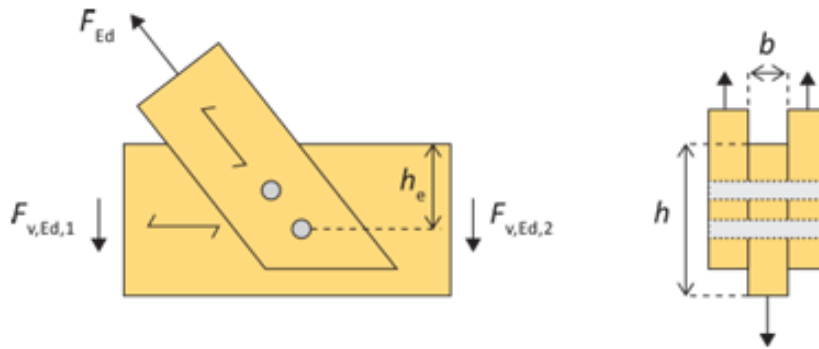
Där b , h och h_e definieras enligt Figur 12.

Dimensioneringen av förbandet verkar vid första anblick enbart bero på geometriska mått, utan att ta hänsyn till materialets egenskaper såsom styrka och styvhet. Detta beror enligt ([Jensen & m.fl. 2012](#)) på att Ekvation 11 är en förenkling av Ekvation 12 som utgör den teoretiska grund som härletts för en fritt upplagd balk belastad i mittspannet. För att möjliggöra dimensionering även för andra lastplaceringar har Eurokod 5 generaliserat metoden genom att formulera brottvillkoret i termer av tvärkraft. Den maximala tvärkraften på någon sida om förbandet, enligt Ekvation 10, jämförs därför med den karakteristiska tvärkraftskapaciteten enligt Ekvation 11, vilken motsvarar hälften av den totala uppsprickningslasten som ges av Ekvation 12. På så sätt kan samma brottmekaniska modell tillämpas oberoende av lastens placering längs balken.

Ekvation 12

$$P_{cr} = 2bC_1 \sqrt{\frac{h_e}{1 - \frac{h_e}{h}}}, \quad C_1 = \sqrt{\frac{G_c G}{0.6}}$$

där G_c är den kritiska energifrigörelsehastigheten och G är längskjuvmodulen. En jämförelse mellan Ekvation 11 och Ekvation 12 visar att antaganden om linjärelastiska brottegenskaper har fastställts empiriskt. Därför går det inte att ta för givet att metoden alltid fungerar. Den måste testas och verifieras för olika träslag och även för trä som har modifierats, innan man kan använda den med tillförlitlighet.



Figur 12 Förband belastat i vinkel mot fibrerna. (Forsman & m.fl. 2024)

2.7 Finita elementmetoden

Detta avsnitt baseras på (Lyu, 2022).

I ingenjörsvetenskap används ofta matematiska modeller för att beskriva mekaniska problem, men exakta analytiska lösningar går bara att få för enkla geometrier. I de flesta fall med komplexa former eller icke-linjära samband krävs numeriska metoder. Den numeriska analysen är mer krävande än analytiska metoder, men moderna datorer gör det hanterbart, vilket gör numeriska metoder till en central del i ingenjörberäkningar.

Finita elementmetoden (FEM) är en numerisk metod för att lösa komplexa ingenjörproblem, till exempel inom hållfasthetslära, värmeöverföring och strömningsmekanik. Metoden bygger på att man delar upp en kropp i mindre delar, element, som binds samman i noder. Belastningar överförs via dessa noder och därmed går det att beräkna hur hela konstruktionen beter sig.

FEM utgår från en ekvivalent integralform av de differentialekvationer som beskriver problemet, ofta genom den viktade residualmetoden. Till skillnad från traditionella metoder definieras approximationsfunktionen här för varje enskilt element, vilket gör det lättare att hantera komplexa problem. Denna strategi har lett till viktiga framsteg inom ingenjörberäkningar.

I detta arbete har programvaran Abaqus/CAE använts – ett program för finita elementanalys. Abaqus/CAE används för att bygga modeller, analysera dem och visualisera resultaten.

3 Metod

3.1 Översikt

Metoden som användes i detta examenarbete består av tre delar; analytiska beräkningar, finita elementanalyser (FEM) och experimentella försök. De analytiska beräkningarna handlar om att uppskatta brottlasten och även om att ge en första förståelse för förbandets beteende. FEM-modelleringen används för att analysera spänningsfördelningar och deformationer i förbandet, samt för att utforma provuppställningar och välja mätmetoder. De experimentella försöken syftar till att mäta dymlingsförbands bärförmåga, studera deformationsutvecklingen under belastningen med fokus på intryckningen under dymlingen och jämföra beteendet hos olika typer av trä, här acetylerad furu och vanlig furu. Kombinationen av dessa delar ger en grund för att på ett mer tillförlitligt sätt undersöka intryckningen i träförband under de första timmarna av belastning.

3.2 Teoretiska beräkningar

Som ett första steg genomfördes preliminära beräkningar för att uppskatta brottmoden och uppsprickningslasten i träförbandet. För att analysera hur brott skulle kunna uppstå, beräknades förbandets hållfasthet enligt Eurokod 5 och dimensionerades utifrån den minsta karakteristiska bärförmågan, baserat på Ekvation 3 & Ekvation 4 i avsnitt 2.6.2. Uppsprickningslasten uppskattades enligt teorin i avsnitt 2.6.3. Syftet med dessa beräkningar var att skapa ett underlag för FEM-analyserna och säkerställa rimliga resultat som efterliknar resultaten från experimentella provkropparna.

Den beräknade brottlasten antogs ge upphov till sprickbildning vinkelrätt mot fiberriktningen. Geometriska värden som användes baseras på teoretiska måtten som presenteras i avsnitt 3.3.1 nedan. Materialegenskaper för både trä och dymling togs i beaktande, där hållfasthetsklass C24 användes som referens. Dymlingen antogs bestå av stål med hållfasthetsklass S235.

För att analysera skillnaden mellan EC5:s uppsprickningslast och de värden som erhålls i det experimentella försöket beräknas den karakteristiska uppsprickningslasten för varje provserie. Dessa jämförs sedan med den uppmätta brottlasten.

En ytterligare del av analysen är att utvärdera EC5:s beräkning av uppsprickningslast enligt Ekvation 11 i avsnitt 2.6.3. I denna ekvation ingår konstanten 14, som i EC5 antas vara representativ för alla barrträslag. Med hjälp av de uppmätta uppsprickningslasterna och

provkropparnas faktiska dimensioner genomförs därför en omvänd beräkning för att bestämma parametern x , som i EC5 motsvarar värdet 14. Den omvända beräkningen utförs enligt två olika tillvägagångssätt. I det första tillvägagångssättet beräknas medelvärde och spridning för parametern x separat för varje träslag (acetylerad respektive obehandlad furu). Detta görs efter att den parametern x har beräknats utifrån uppmätt brottlast och uppmätta dimensioner för varje provkropp. Därefter bestäms det karakteristiska värdet för parametern x .

I det andra tillvägagångssättet beräknas i stället medelvärde, spridning och karakteristiskt värde för de uppmätta brottlasterna. Utifrån det karakteristiska värdet på brottlasterna för respektive träslag samt medelvärdet av dimensionerna bestäms därefter ett karakteristiskt värde för parametern x . Dimensionerna är mycket lika mellan provkropparna, och skillnaden i resultat bedöms därför vara liten oavsett om medelvärde eller karakteristiskt värde används för dimensionerna. Detta görs för att kunna jämföra det med EC5:s föreslagna värde.

3.3 Finita elementanalys (FEA)

Nästa steg i arbetet var att genomföra finita elementanalyser med programvaran Abaqus. Syftet med analyserna var att undersöka deformationsmönster, studera spänningsfördelningen runt dymlingen, identifiera var sprickor kan förväntas uppstå samt att utforma en lämplig provuppställning inklusive mätmetod.

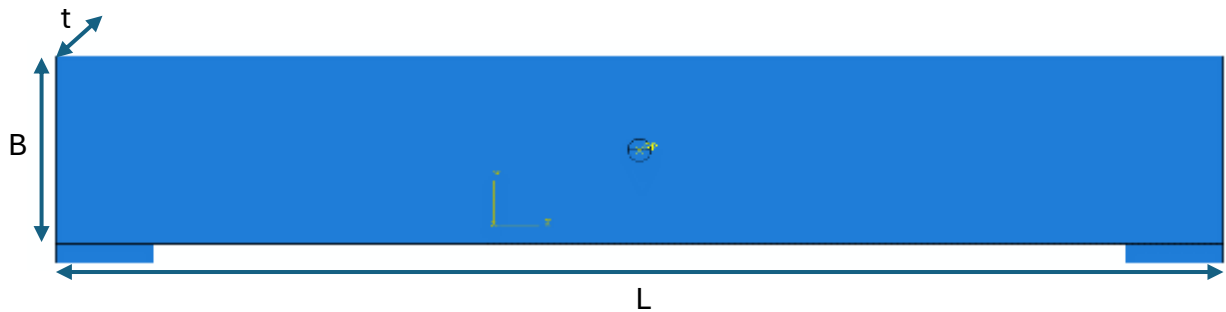
3.3.1 Geometri

Först modellerades en förenklad 2D-modell (modell 1) som representerar träförbandet så som det var tänkt. Den bestod av tre delar: själva träelementet, dymlingen och två stöd. Hålet placerades centralt i träelementet, medan stöden lades vid de nedre hörnen för att simulera verkliga provförhållanden. Stödets mått i planet var 50×10 mm. Träelementet hade dimensionerna $B \times L \times t = 100 \times 600 \times 30$ mm, och hålet hade en diameter på 12 mm, se Figur 13.

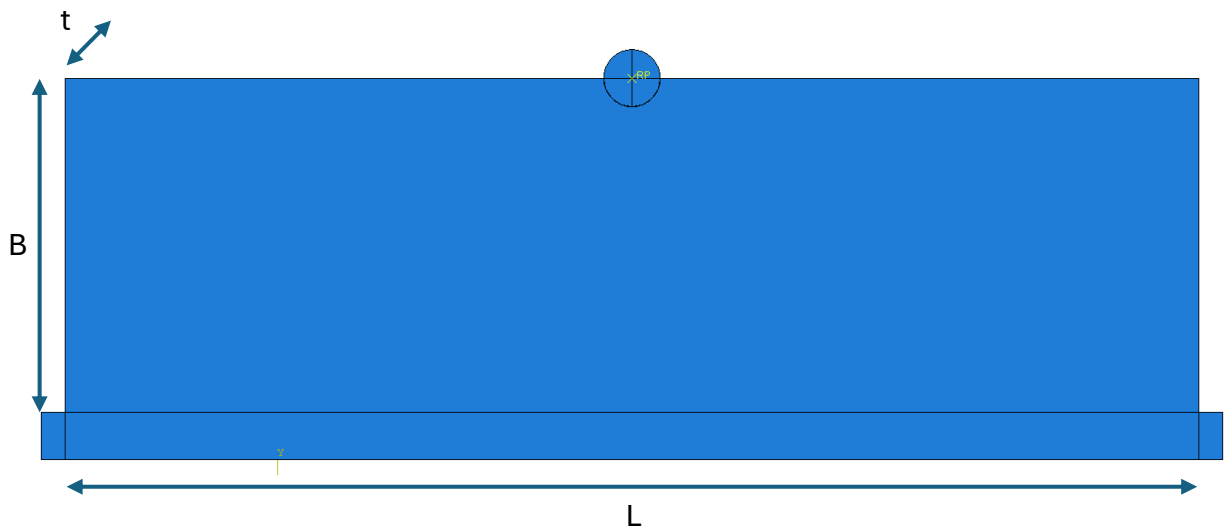
Efter att modellen först analyserats i det elastiska tillståndet gick analyserna vidare för att undersöka spänningsfördelningen och risken för uppsprickning i det plastiska (olinjära) tillståndet. Eftersom dessa analyser visade sig vara mer komplicerade togs en alternativ modell (modell 2) fram som referens. Syftet var att kunna jämföra resultat från beräkningar med modell 2 med provningsresultat från litteraturen.

Modell 2 byggdes med utgångspunkt i en tidigare studie av [Forsman & m.fl. \(2024\)](#), där kända resultat användes för att säkerställa att modellen låg nära realistiska provdata. Geometrin bestod

av ett rektangulärt träelement där ett halvt hål var placerat centralt längs den övre kanten, se Figur 14. Träelementets hela underkant vilade mot ett stålstöd. Dimensionerna för träelementet var $B \times L \times t = 70 \times 240 \times 30$ mm och håldiametern 12 mm.



Figur 13 Modell av provningsuppställning, modell 1



Figur 14 Modell av provningsuppställning, modell 2

3.3.2 Materialegenskaper

Trä är ett anisotropt material, vilket innebär att dess mekaniska egenskaper varierar beroende på riktning. Därför behöver hållfasthetsegenskaper definieras i tre riktningar: longitudinell, radiell och tangentiell. I denna studie har hållfasthets- och styvhetsegenskaperna valts utifrån konstruktionsvirke i hållfasthetsklass C24. Dymlingen och stöden modellerades i stål med hållfasthetsklass S235.

3.3.2.1 Elastiska egenskaper

För stålet i dymlingen har elastiska egenskaper enligt Eurokod 3 ([SIS, 2022, avsnitt 5.2.5](#)) använts, se Tabell 1 nedan.

Tabell 1 Värden för Elasticitetsmodul och Poissons tal för stål

Parameter	Värde
E [GPa]	210
μ	0,3

För elasticitetsegenskaper i träet har konstruktionsvirke av hållfasthetsklass C24 antagits. Värden för Poissons tal har valts för gran (Norway spruce), vars egenskaper är jämförbara med furu. Styvhetsvärdena redovisas i Tabell 2 & Tabell 3 nedan enligt [Niemz, & m.fl. \(2023\)](#).

Tabell 2 Elastiska egenskaper för träelementet i hållfasthetsklass C24

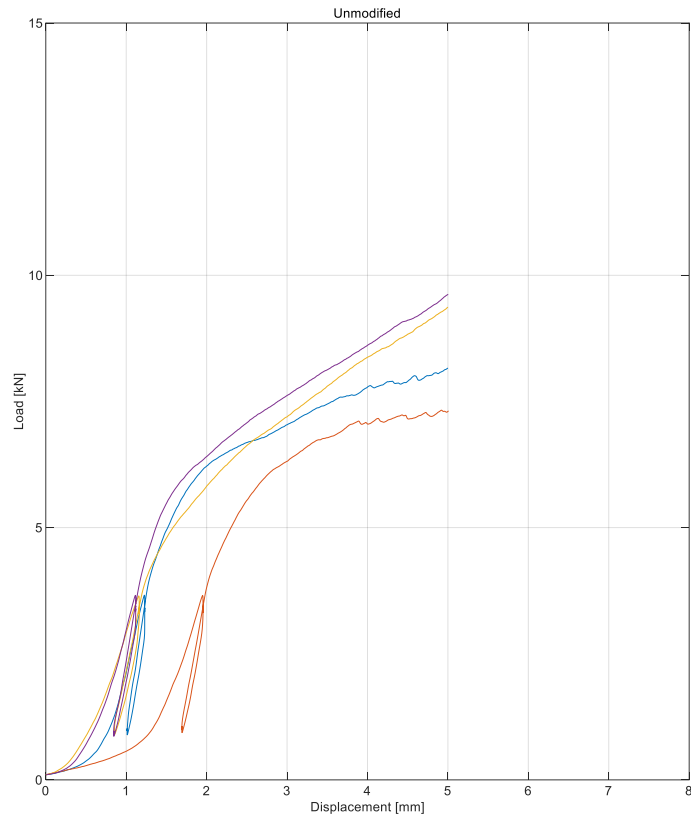
Parameter	Värde [MPa]
E_L	11000
E_R	1000
E_T	500
G_{LR}	680
G_{LT}	680
G_{RT}	70

Tabell 3 Poissons tal för gran

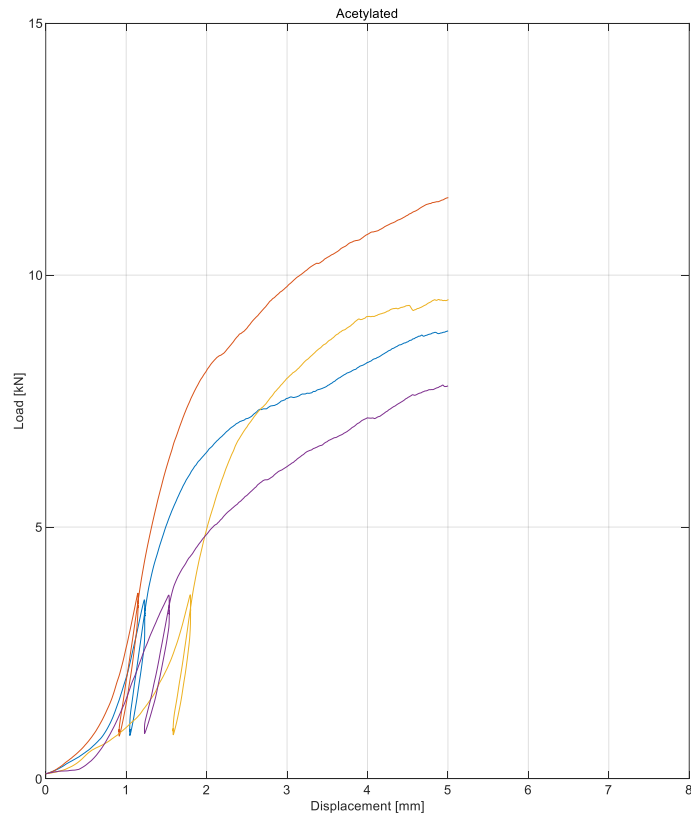
Poissons tal	Värde
μ_{LR}	0,46
μ_{LT}	0,45
μ_{RT}	0,50

För att kunna analysera träelementet och förstå materialets beteende behövdes en referensmodell med realistisk respons jämfört med provningsdata från litteraturen vad gäller det olinjära tillståndet. För detta användes en plasticitetsmodell i Abaqus.

Modell 2 användes för kalibrering av indata till plasticitetsmodellen i försök att efterlikna resultaten som presenteras i [Forsman & m.fl. \(2024\)](#), se Figur 15 och Figur 16. Syftet var att, efter en kalibrering av materialmodellen, beräkna responsen för modell 1, med samma materialparametrar. Deformation i figurerna avser förskjutning för dymlingens mittpunkt (intryckning)



Figur 15 Last-intrycknings kurvor för vanlig furu, provningar motsvarande modell 2 (Forsman & m.fl. 2024)



Figur 16 Last-intrycknings kurvor för acetylerad furu, provningar motsvarande modell 2 (Forsman & m.fl. 2024)

Funktionen *plastic* i Abaqus är i sin enklaste form avsedd för von Mises-plasticitet, vilket gäller isotropa material. Genom att använda underfunktionen *potential* kan man däremot definiera plasticitet för anisotropa material, det vill säga man kan ange olika värden för flytspänningar i träets olika riktningar. De olika värdena i de olika riktningarna anges som relativa värden i förhållande till, exempelvis värdet i den longitudinella riktningen. Se Tabell 4.

Tabell 4 Exempel på värden för flytspänning i olika riktningar, uttryckta som procent av flytspänningen längs fiberriktningen

Parameter	Värde [%]
σ_L	100
σ_R	10
σ_T	10
σ_{LR}	20
σ_{LT}	20
σ_{RT}	20

I Abaqus definieras materialets olinjära beteende genom att ange flytkriterium som baseras på spänning och plastisk töjning. De värden som användes baseras på ungefärliga referensvärden från examensarbetena av [Rosengren, \(2010\)](#) och [Persson, \(2011\)](#). Se Tabell 5. Dessa värden utgjorde en utgångspunkt för att vidare undersöka och fastställa lämpliga parametrar för modell 2, vilket i sin tur möjliggjorde olinjära analyser och studier av träets beteende när den elastiska gränsen överskreds.

Tabell 5 Indata (spännings-töjningskurvor) från examensarbetena Rosengren, (2010) och Persson, (2011)

Rosengren, (2010)		Persson, (2011)	
Plastisk töjning [%]	Spänning [MPa]	Plastisk töjning [%]	Spänning [MPa]
0	2,5	0	4,0
0,8	8,0	1,0	8,0
1,1	16,5	1,8	8,2
1,5	102	2,0	9,5
		2,1	16,5

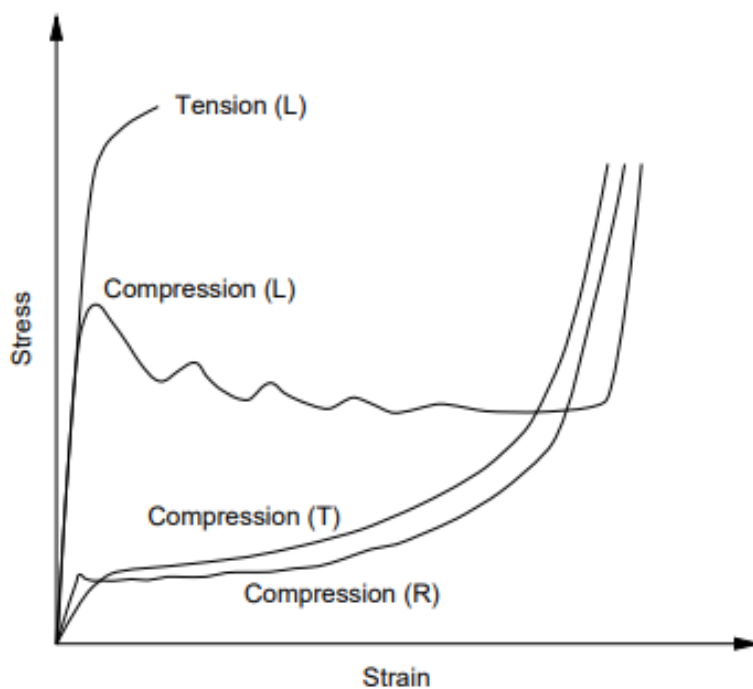
En last-intryckningskurva liknande den i modell 2 (enligt Figur 15 och Figur 16) visade sig dock svår att återskapa med dessa indata. Därför inkluderades även jämförelsekurvor från

forskningsarbetet av [Persson, \(2000\)](#), där en typisk spännings-töjningskurva för trä presenteras. Typiska spännings-töjningskurvor för trä i olika riktningar visas i Figur 17.

Efter flera analyser och simuleringar kunde en spännings-töjningskurva för trä, som gav rimliga resultat, tas fram. Spännings-töjningsdata redovisas i Tabell 6 och motsvarande kurva i Figur 18.

Last-intryckningskurvor för modell 2 baserade på indata från [Rosengren, \(2010\)](#), och [Persson, \(2011\)](#) presenteras i Figur 28. Som ses i Figur 28 avviker de från de kurvorna i figurerna Figur 15 och Figur 16.

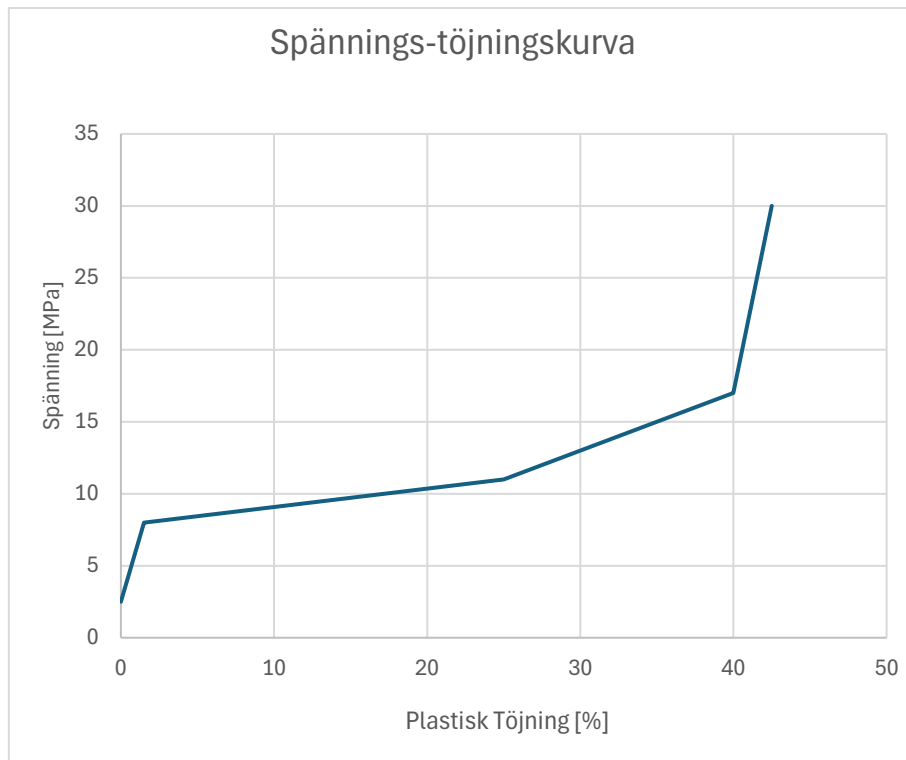
Resultaten baserade på FE-analys av modell 2 (se Tabell 6 och Figur 18) gav betydligt bättre överensstämmelse med resultaten från [Forsman & m.fl. \(2024\)](#), se Figur 15 och Figur 16. Den resulterande kurvan visas i Figur 29.



Figur 17 Typiska spännings-töjnings kurvor för trä i olika riktningar ([Persson, 2000](#))

Tabell 6 Flytkriterium för spänning och töjning, tvärs fiberriktningen för träelementet

Plastisk töjningen [%]	Spänning [MPa]
0	2,5
1,5	8
25	11
40	17
42,5	30

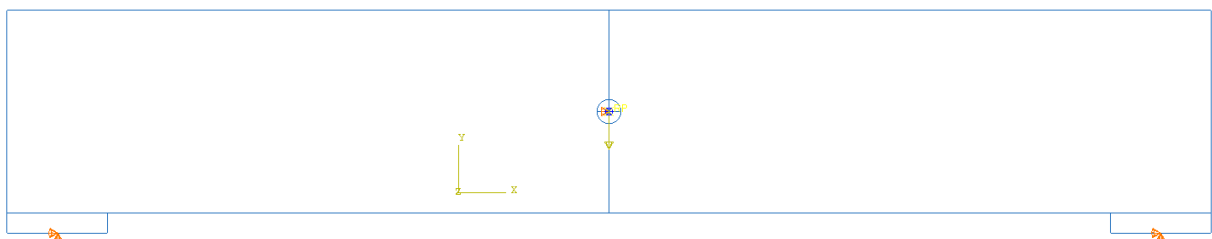


Figur 18 Spännings-töjningskurvan för indata enligt Tabell 6

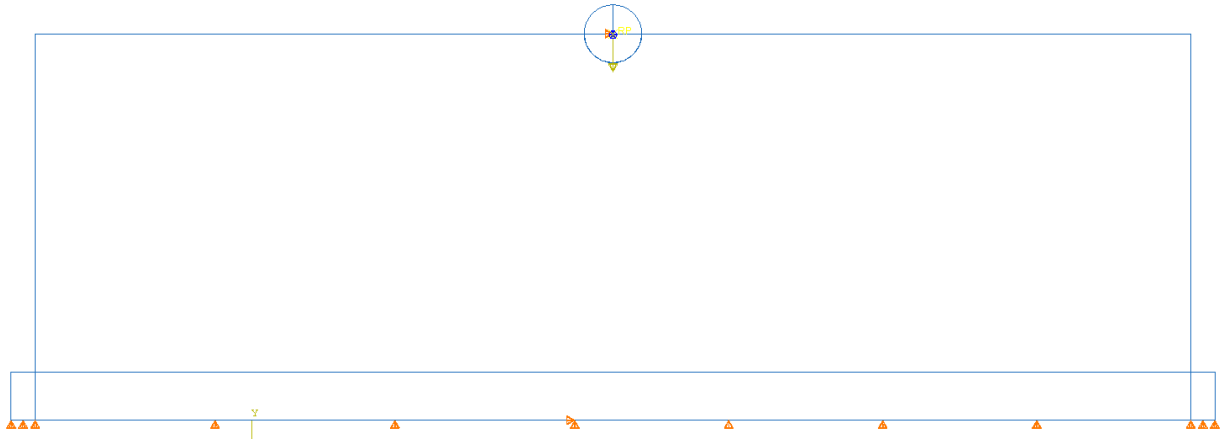
3.3.3 Laster och randvillkor

En punktlast på 4,0 kN applicerades i dymlingens centrum via en referenspunkt, vinkelrätt mot fiberriktningen. Randvillkoren skiljde sig något mellan modell 1 och modell 2.

Dymlingen var fixerad i x-riktningen och rotationsförhindrad, medan stöden i modell 1 var fixerade i både x- och y-riktning vid ändarna för att uppnå symmetri. Träförbandet tilläts däremot glida på upplagen, vilket innebar att det enda tvång som infördes i x-riktningen var det som friktionen mellan träet och upplagen gav upphov till. Se Figur 19. För modell 2 tillämpades samma principer för randvillkor, men här fanns endast ett kontinuerligt stöd – till skillnad från modell 1. Se Figur 20.



Figur 19 Visar randvillkoren och lasten som verkar på modellen (modell 1)



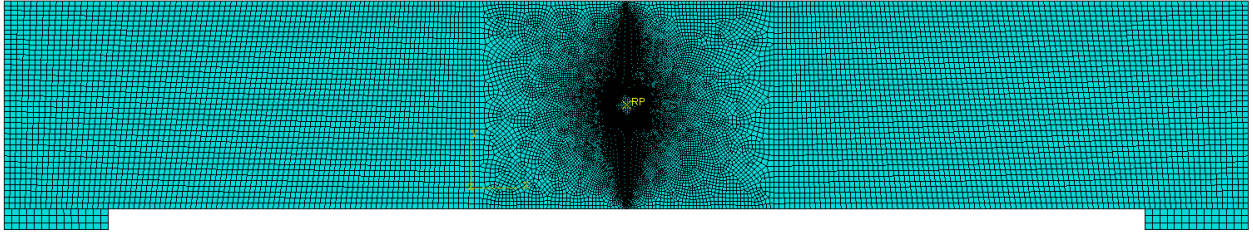
Figur 20 Visar randvillkoren och lasten som verkar på modellen (modell 2)

3.3.4 Kontaktvillkor

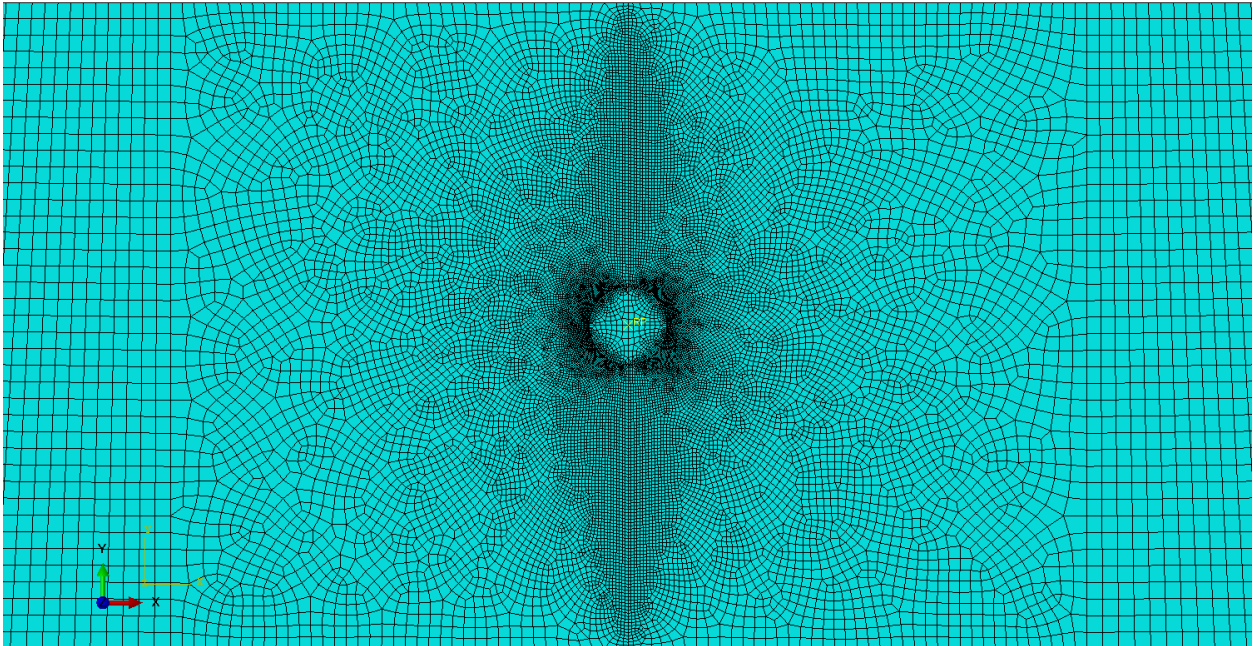
Kontakten mellan upplagen och träet, samt mellan dymlingen och träet, definierades som en standardkontakt, där stålelementen fungerade som master-yta. Referenspunkten i dymlingens centrum kopplades till dess nedre del med en så kallad "kinematisk koppling". Referenspunkten definierades som "referensnod" och dymlingens yta som "kopplingsnoder". På detta sätt fördelades den applicerade lasten på referensnoden över hela dymlingens nedre halva. Kontakttegenskaper mellan stålelementen och träelementet inkluderade både normal- och tangentiellt beteende. Friktionskoefficienten mellan dymlingen och träet sattes till 0,2, baserat på avsnitt 2.2.2 eftersom dymlingen hade en slät yta. För kontakten mellan stöden och träelementet användes däremot en högre friktionskoefficient på 0,7 då, enligt samma avsnitt, stöden antogs ha en blåstrad yta.

3.3.5 Elementnät

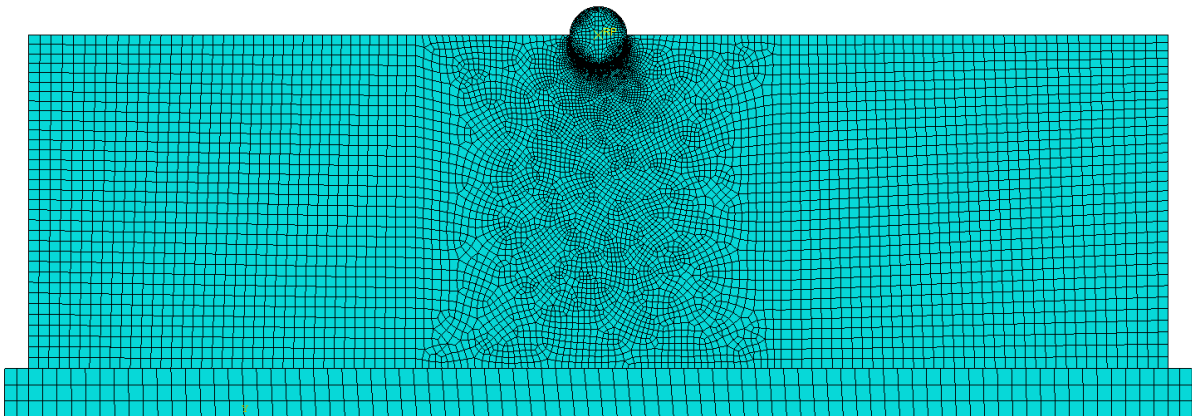
För att uppnå tillräcklig noggrannhet användes ett elementnät bestående av fyrsidiga element (CPS4 i Abaqus). Den globala elementstorleken sattes till cirka 2,5 mm, medan elementen i en rektangulär partition runt hålet har elementen varierat i storlek från cirka 2,5 till cirka 0,18 mm där de finaste elementen användes nära hålet för att bättre följa det cirkulära hålets kontur. Se Figur 21 och Figur 22. För modell 2 användes ett liknande elementnät, som följde samma princip. Se Figur 23.



Figur 21 Elementnätet för modell 1



Figur 22 Elementnätet lokalt runt dymlingen för modell 1



Figur 23 Globala elementnätet för modell 2

3.4 Metod: Resultat och analys

Resultaten från FEA var avgörande för att bestämma provuppställningen och välja vilka mätmetoder som skulle användas.

3.4.1 Teoretiska beräkningar – Modell 1

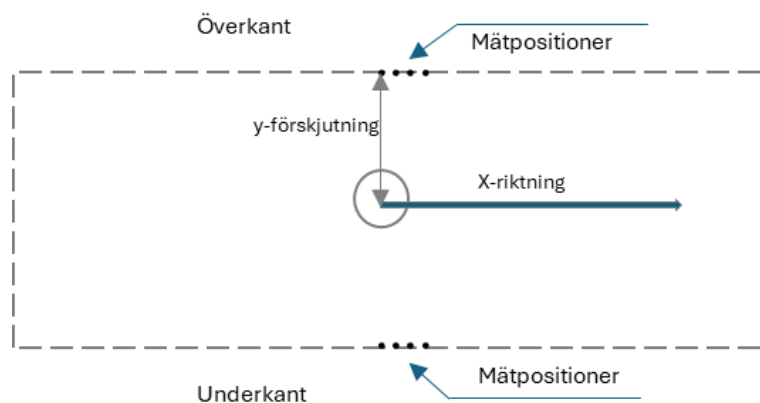
Brottmoderna j , k , l och m beräknades enligt Ekvation 3 och Ekvation 4, med antagande om följande egenskaper: $\rho_k=350 \text{ kg/m}^3$, $d=12 \text{ mm}$, $t_2=30 \text{ mm}$, $f_{h,90,k}=16,5 \text{ MPa}$ och $f_{ud}=360 \text{ MPa}$. Jämförelsen visade att brottmod j var dimensionerande, med en karakteristisk bärförmåga för hållkanthållfasthet på 5,9 kN. Uppsprickningslasten, beräknad med Ekvation 11 i avsnitt 2.6.3 med antagande om följande parametrar: $h=100 \text{ mm}$, $h_e=50 \text{ mm}$, $b=30 \text{ mm}$ gav en tvärkraft på 4,2 kN, dvs en bärförmåga på 8,4 kN. Eurokod 5 förutsäger alltså att dymlingen ska tryckas in i träet innan uppsprickning sker.

Den verkliga bärförmågan hos förbandet (medelvärde vid provning) förväntas dock vara högre än det karakteristiska värde som beräknas enligt EC5. Detta beror på att trä är ett naturligt material med stor variation, även inom samma träslag. Skillnader i densitet, cellväggarnas struktur, årsringarnas uppbyggnad samt kvistarnas fördelning bidrar till denna variation. Dessa faktorer motiverar en stor säkerhetsmarginal.

3.4.2 FEA-Elastiska tillståndet – Modell 1

Inledningsvis genomfördes elastiska beräkningar för att studera intryckningen i träet under dymlingen. För att utvärdera möjliga mätmetoder analyserades dymlingens intryckning, det vill säga hur avståndet mellan dymlingens centrum och träbitens ytterkanter förändrades vid belastning. Förskjutningsförändring i y -riktning beräknades genom att bestämma vertikalförskjutningen för ett antal noder längs ytterkanterna, inom intervallet $[-14 - 14] \text{ mm}$ i x -riktningen relativt dymlingens centrum, Figur 24 visar den schematiska principen. Tabell 7 visar mätresultaten. Syftet var att undersöka hur känslig mätningen var för avvikelse i position under dymlingen, och att avgöra om en sådan metod skulle kunna användas praktiskt i de kommande försöken.

Analysen visade låg känslighet för små förändringar i mätpositionen, vilket innebär att resultaten inte påverkades nämnvärt om mätningen utfördes cirka 14 mm till höger eller vänster om centrum. Eftersom uppställningen är symmetrisk avser tabellen nedan endast resultaten för mätpositioner till höger om dymlingens centrum. Samtidigt visade resultaten att förskjutningen ökade något längre ut från centrum, vilket förklaras av att mätningen då sker relativt två punkter med olika böjdeformation, se Figur 26. Inverkan är dock liten på små avstånd från dymlingen.



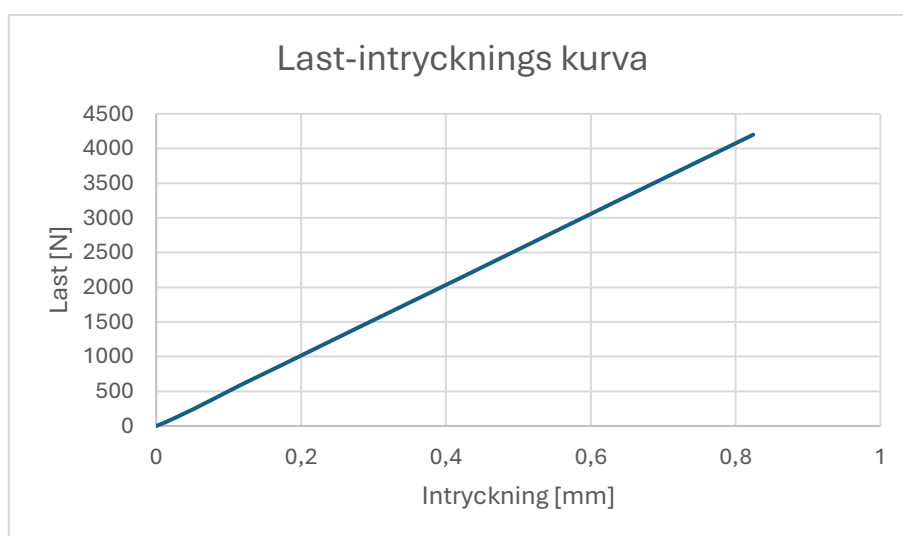
Figur 24 Schematisk figur på mätpositionsanalys

Tabell 7 Vertikala ändring av kantavstånd (\approx intryckning) längs provkroppens över- och underkant

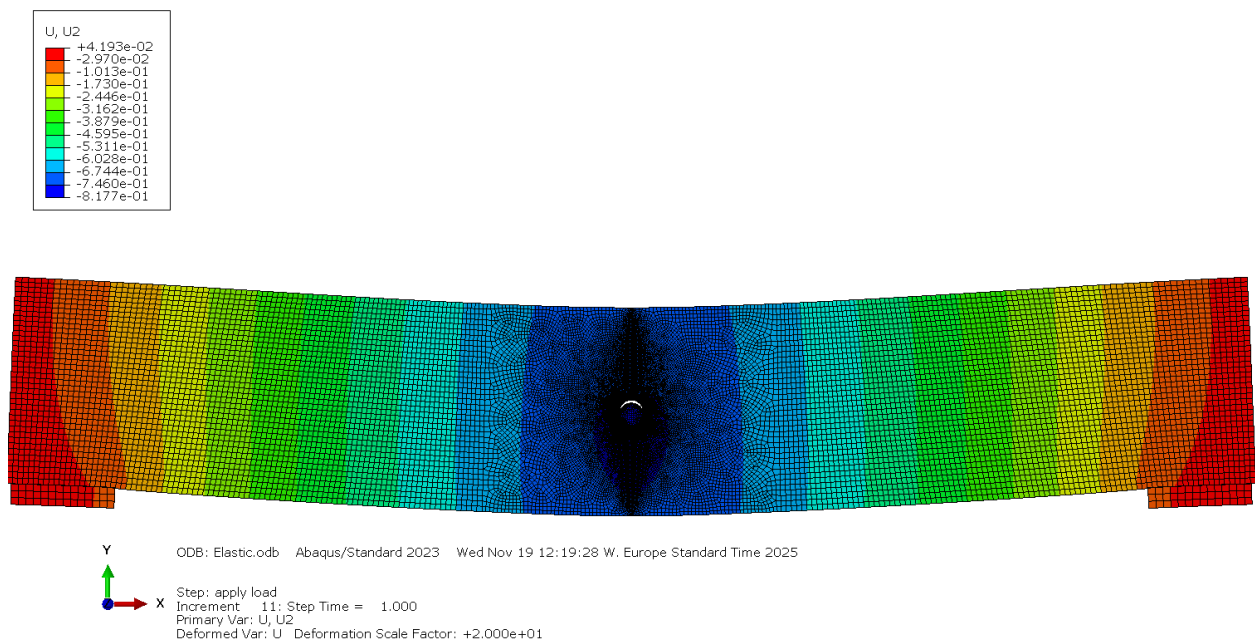
Överkant		Underkant	
Position (x) [mm]	y-förskjutning [mm]	Position (x) [mm]	y-förskjutning [mm]
0	9,54e-2	0	7,64e-2
3,6	9,57e-2	3,6	7,68e-2
7,1	9,66e-2	7,1	7,81e-2
10,7	9,81e-2	10,7	8,03e-2
14,2	1,00e-1	14,2	8,33e-2

Vid denna beräkning uppgick dymlingens totala intryckning till 0,82 mm. Se last – intryckningskurva i Figur 25.

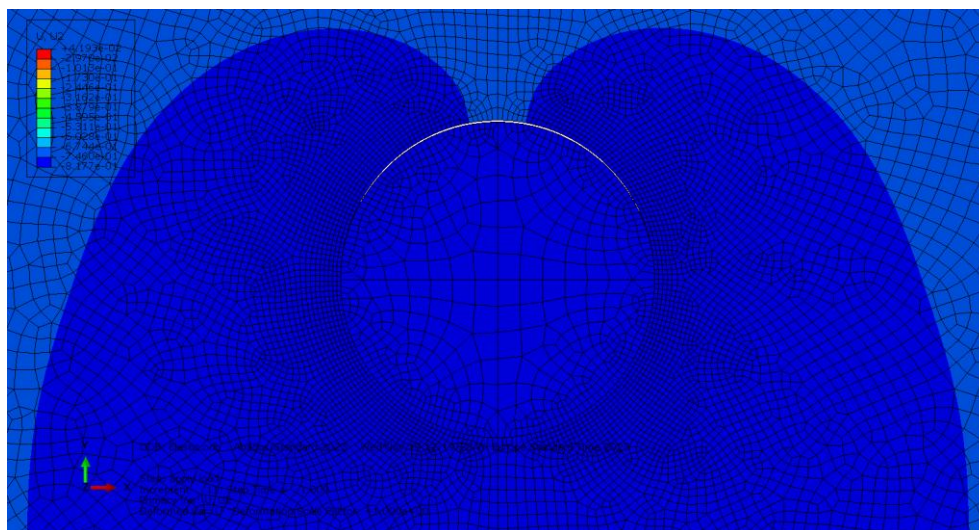
Figureerna Figur 26 och Figur 27 visar deformationsfördelning i den uppbyggda FEM-modellen i Abaqus i det elastiska fallet.



Figur 25 Last-intryckningskurva i elastiska tillståndet för modell 1 (förskjutning av dymlingens mittpunkt)



Figur 26 Deformerad modell. Lasten är 4,2 kN (skalnfaktor för deformation 20:1)



Figur 27 Dymlingens intryckning i y-riktning för modell 1 lokalt

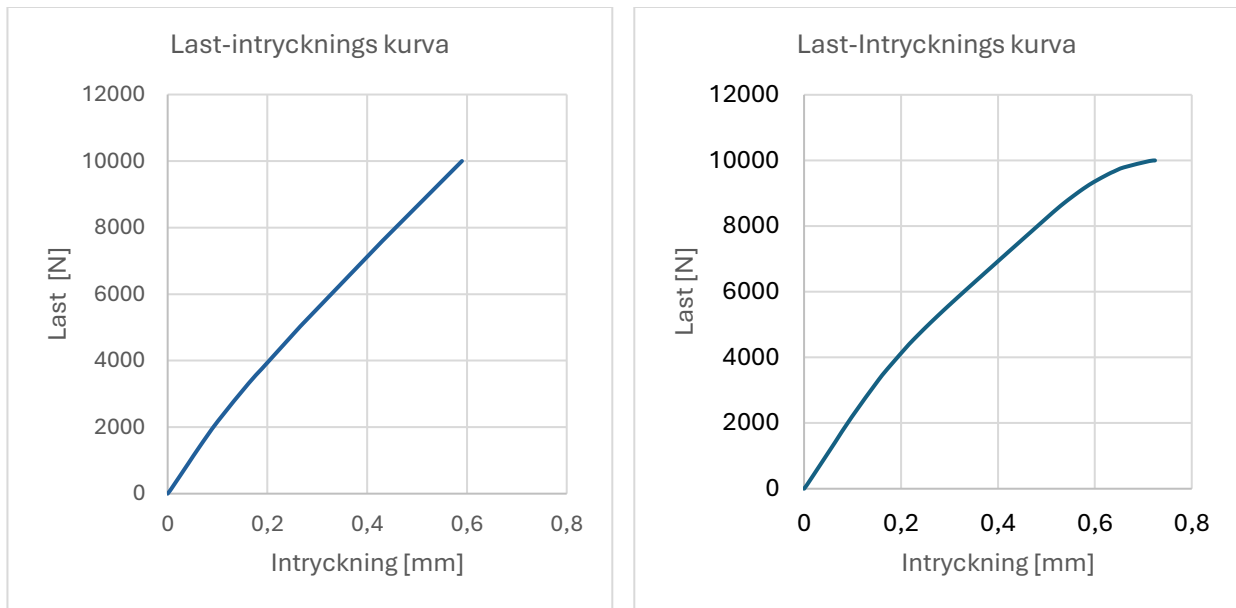
3.4.3 FEA-Olinjära beräkningar – modell 2

I jämförelse med kurvorna i figurerna Figur 15 och Figur 16 framkom det att de kurvor som tagits fram baserat på data i Tabell 5, dvs med indata från examensarbetena av Rosengren (2010) och Persson (2011) uppvisar helt olika förlopp, vilket framgår av Figur 28 nedan. Kurvan som togs fram baserat på indata från Tabell 6 däremot uppvisar viss likhet med kurvorna i figurerna Figur 15 och Figur 16. Se Figur 29 nedan.

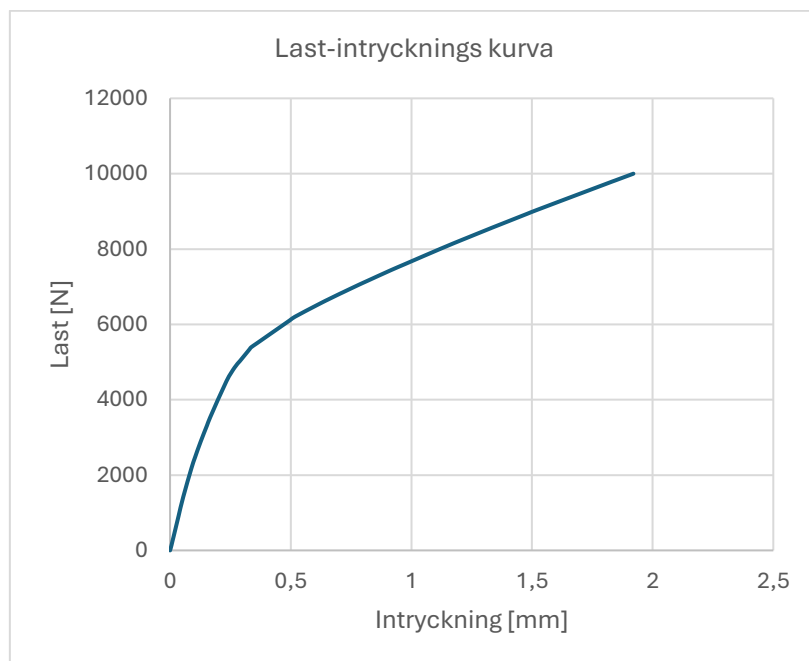
Att skillnader förekommer är helt förväntat, eftersom trävirke uppvisar individuella egenskaper även inom samma träslag. Detta framgår tydligt av variationerna mellan kurvorna i figurerna

Figur 15 och Figur 16. Här har heller inget försök gjorts att noggrant passa modellen till resultaten i figurerna Figur 15 och Figur 16, utan kurvornas övergripande trend, snarare än deras exakta lutningar eller totala intryckningen.

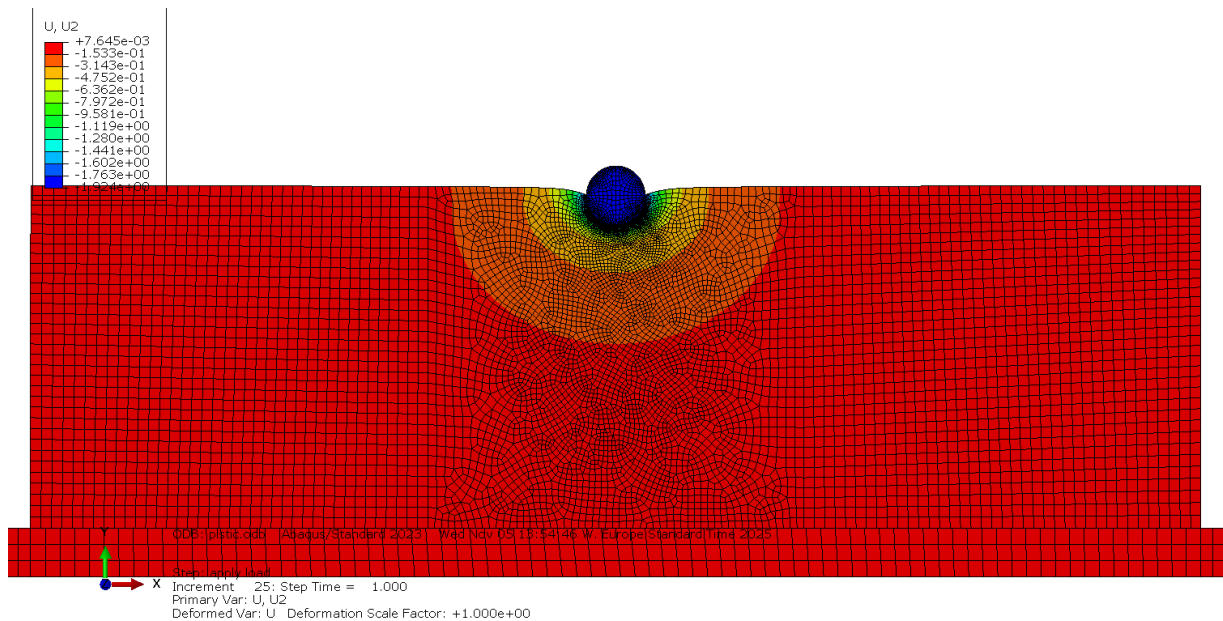
Den kalibrering som visade bäst överensstämmelse användes som grund för att fastställa flytkriteriets indata, vilket möjliggjorde en så realistisk materialåtergivning som möjligt i FE-analysen för modell 1. Figur 30 nedan visar deformationerna i modell 2.



Figur 28 Last-intrycknings kurva baserat på ([Rosengren, 2010](#)) (gul) och ([Persson, 2011](#)) (blå), indata för modell 2



Figur 29 Last-intrycknings kurva (förskjutning av dymlingens mittpunkt) baserat på praktiska stimuleringar och analyser för modell 2



Figur 30 Vertikal deformation i modell 2 baserat på indata från Tabell 6

3.4.4 FEA-Olinjära beräkningar – modell 1

Samma analys som genomfördes för det elastiska tillståndet för modell 1 utfördes även i det olinjära tillståndet, för att kunna dra slutsatser inför de kommande experimentella försöken. Här är det mer realistiskt och därför läggs det större vikt på de plastiska beräkningarna. I det plastiska tillståndet uppgick den totala vertikala förskjutningen av dymlingen till cirka 3,05 mm, vid en total last om 10 kN, vilket är ett rimligt värde med tanke på att plasticering har inkluderats i analysen. Detta ger en ungefärlig uppfattning om hur stor intryckning kan bli i de praktiska försöken.

I Tabell 8 nedan redovisas den vertikala ändringen av kantavstånd längs provkroppens över- och underkant. Alltså hur kantavståndet mellan dymlingens centrum och träbitens ytterkanter förändrades vid belastning. Intryckning beräknades genom att bestämma den vertikala förskjutningen för ett antal noder längs ytterkanterna, inom intervallet [-14 – 14] mm i x-riktningen relativt dymlingens centrum.

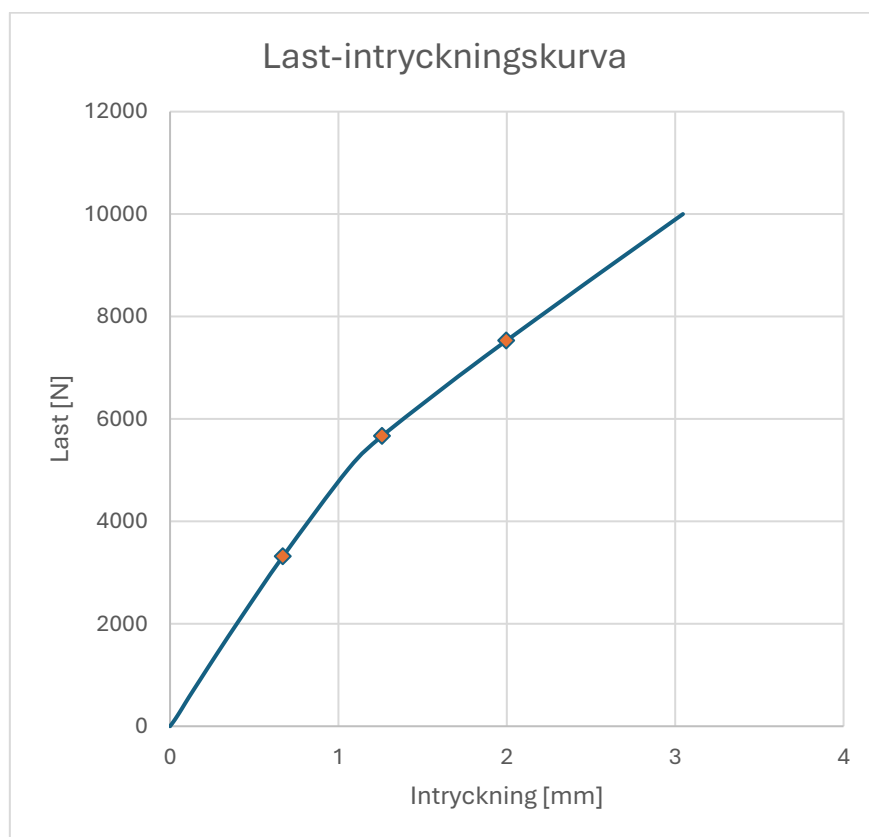
Tabell 8 Vertikala ändringen av kantavstånd (\approx intryckning) längs provkroppens över- och underkant

Överkant		Underkant	
Position (x) [mm]	y-förskjutning [mm]	Position (x) [mm]	y-förskjutning [mm]
0	1,291	0	1,245
3,6	1,291	3,6	1,246
7,1	1,293	7,1	1,249
10,7	1,297	10,7	1,253
14,2	1,301	14,2	1,260

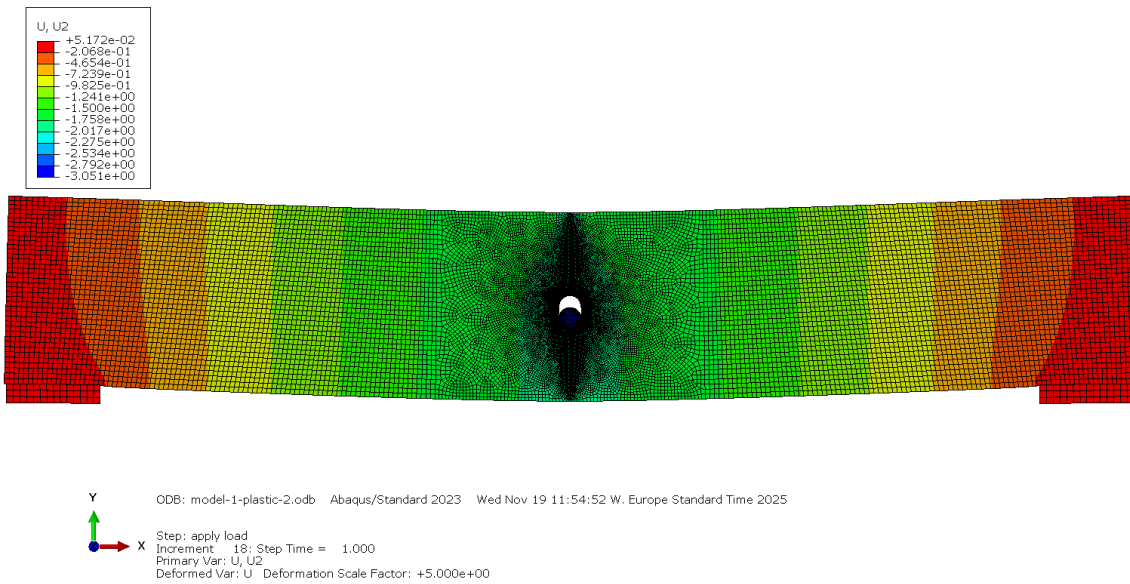
Värdena i tabellen ovan visar liknande trender som i det elastiska fallet, även om den totala deformationen i denna modell är betydligt större än i det elastiska tillståndet. Detta innebär att mätpositionens noggrannhet inte är direkt avgörande och att metoden därmed är fullt tillräcklig och ger en tillfredsställande noggrannhet.

Skillnaden i kantavstånd ökar med avståndet från dymlingens centrum längs x-riktningen, vilket huvudsakligen beror på att böj deformationerna ökar ju längre ut längs x-riktningen. Inverkan är dock liten. Det finns ytterligare en aspekt i mätningen som är värd att uppmärksamma: skillnaden mellan de vertikala förskjutningarna vid den övre respektive nedre kanten. Skillnaden beror på Poisson-effekten (tvärkontraktionen) och är ca $4,07 \cdot 10^{-2}$ mm. Denna effekt bedöms vara försumbar vid utformningen av provuppställningen, eftersom den motsvarar en mycket liten materialexpansion som i praktiken är svår att mäta med tillräcklig noggrannhet.

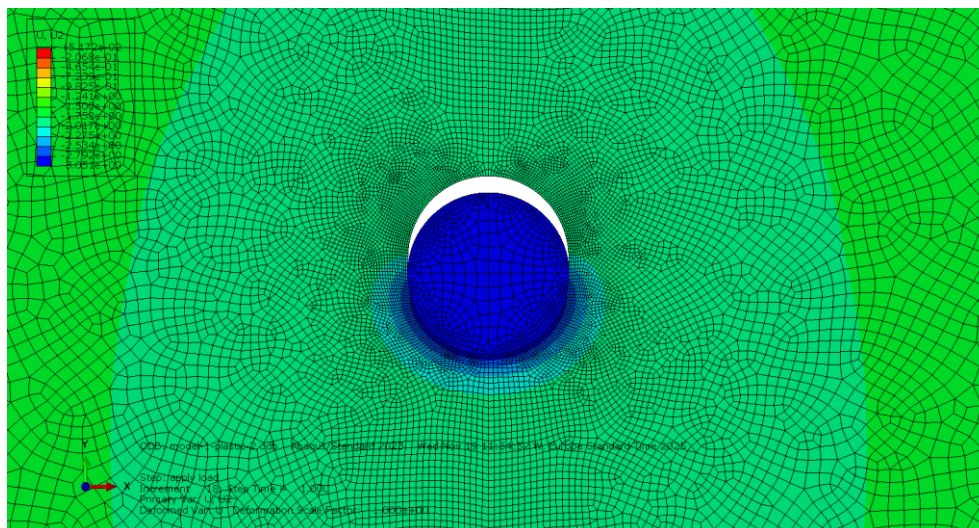
Figur 32 och Figur 33 nedan visar totala deformationsfördelningen i y-riktning för modell 1 i det plastiska tillståndet. Figur 31 nedan visar last-intryckningskurva för modell 1 i det olinjära tillståndet.



Figur 31 Last-intryckningskurva (förskjutning av dymlingens mittpunkt) för modell 1 i det olinjära fallet



Figur 32 Vertikal deformation. Notera intryckning vid hålet där dymlingen verkar i det olinjära fallet (skalfaktor 5:1)

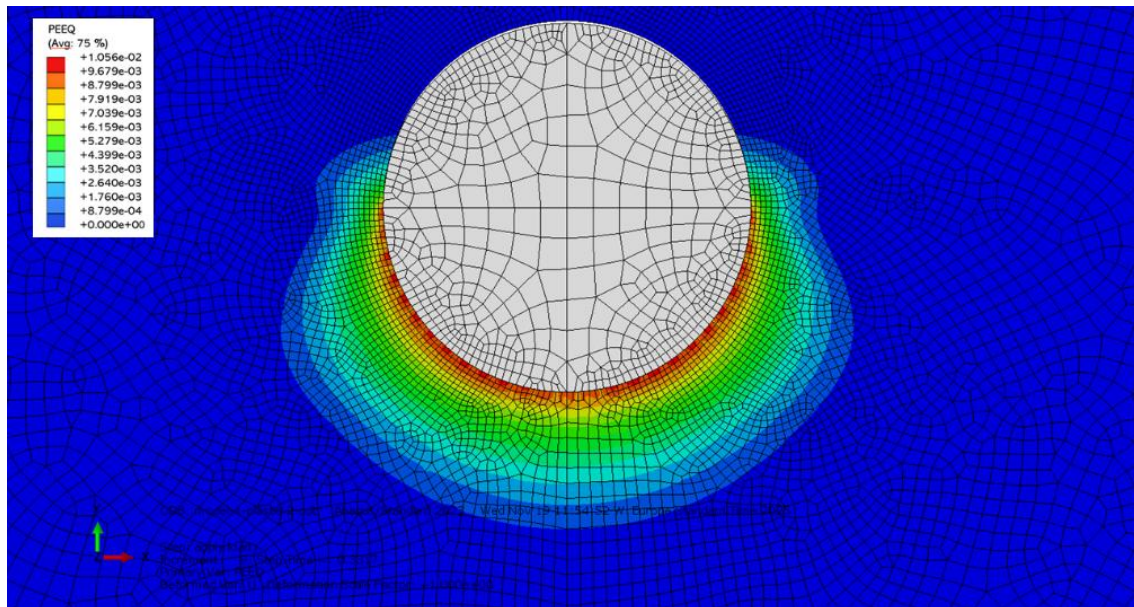


Figur 33 dymlingens intryckning i y-riktning för modell 1 i det olinjära fallet, lokalt.

Var plasticeringen uppstår och hur den sprider sig i materialet har också analyserats för att få en tydligare bild av hur träprovkropparna plasticeras under belastningen.

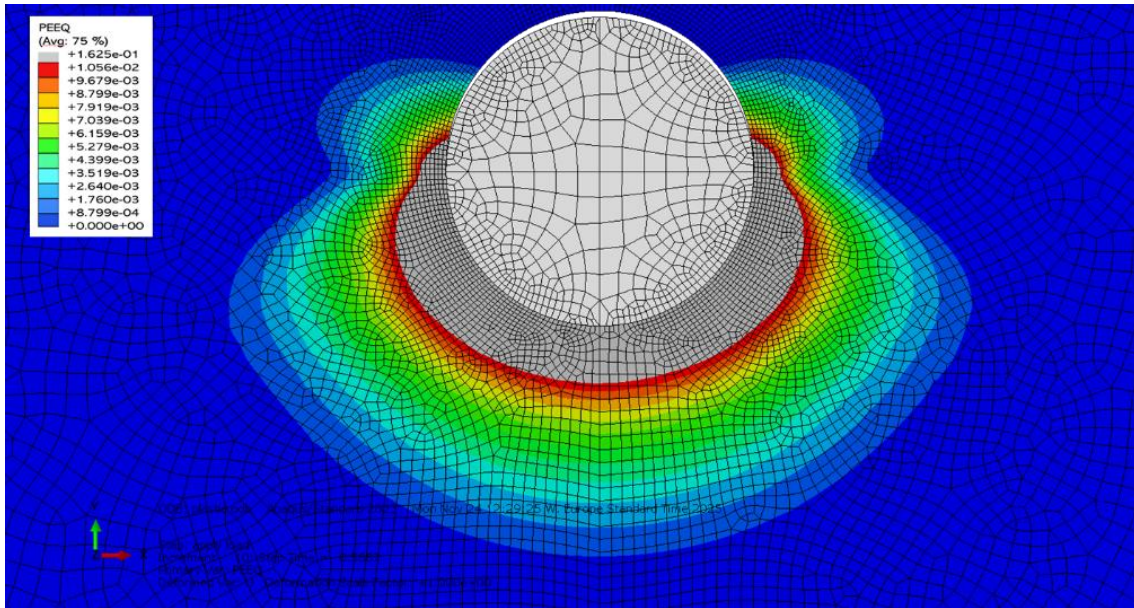
Baserat på kurvan i Figur 31 valdes tre laster som representerar ett relevant intervall. Den första lasten, 3317 N (steg 8), ligger i den initiala delen av kurvan och motsvarar det sista steget innan lutningen tydligt förändras. Den andra lasten, 5667 N (steg 10), valdes eftersom den ligger ungefär vid den punkt där kurvan börjar byta lutning. Den tredje lasten, 7529 N (steg 13), representerar den senare delen av kurvan och ingår i det andra kurvstycket efter lutningsändringen.

Plasticeringen initieras vid kontaktytan mellan dymlingen och trä. Den börjar lokalt och sprider sig därefter gradvis i det omgivande området i takt med att lasten ökar. Utbredning av plastiska töjningar vid 3317 N visas i Figur 34. Det framgår tydligt att plasticeringen breder ut sig i den riktning som dymlingen belastar materialet, samtidigt som de största plastiska töjningarna återfinns i det tunna röda området närmast dymlingens kontaktzon.



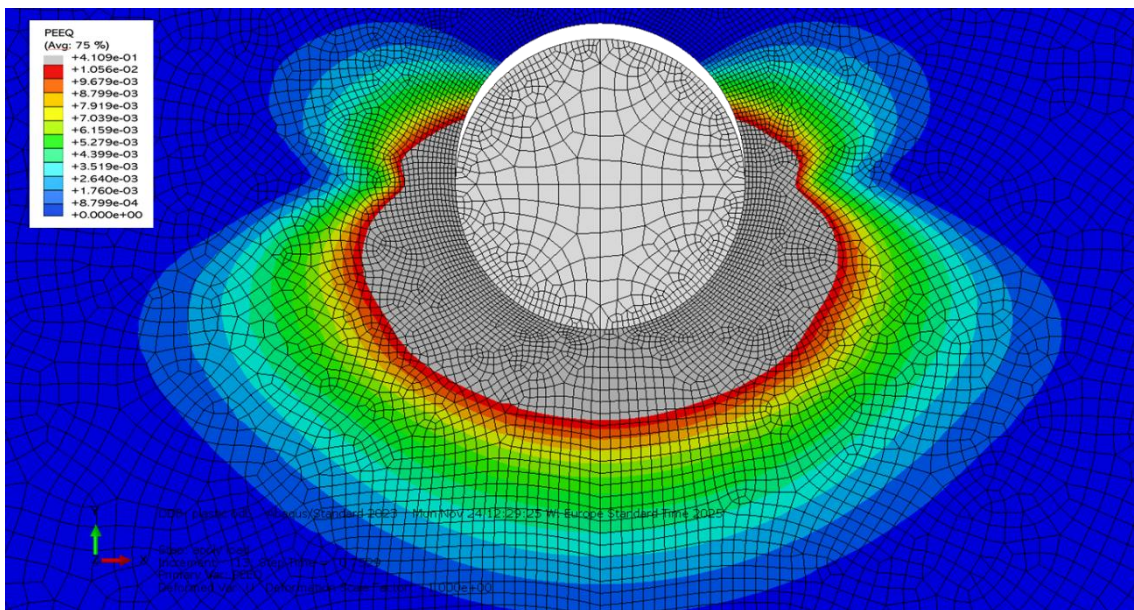
Figur 34 Plastiska töjningar då lasten är 3317 N

Det gråa området i Figur 35 nedan representerar det område som, vid en last på 5667 N, har större plastisk töjning än maximala plastiska töjningen vid lasten 3317 N i Figur 34 ovan. Som framgår av Figur 35 har plastiska området fördubblats jämfört med plastiska töjningar i Figur 34. I den övre halvan syns däremot ingen tydlig variation i omfattningen av de plastiska töjningarna, även om en viss del av området påverkas. En mindre plasticering uppstår även på sidorna av dymlingen, vilket dels beror på att dessa områden påverkas när dymlingen pressas in i träet och därmed deltar i det lokala tryckförloppet, men också på grund av drag vinkelrätt fiberriktningen och på grund av skjuvning.



Figur 35 Plastiska töjningar då lasten är 5667 N

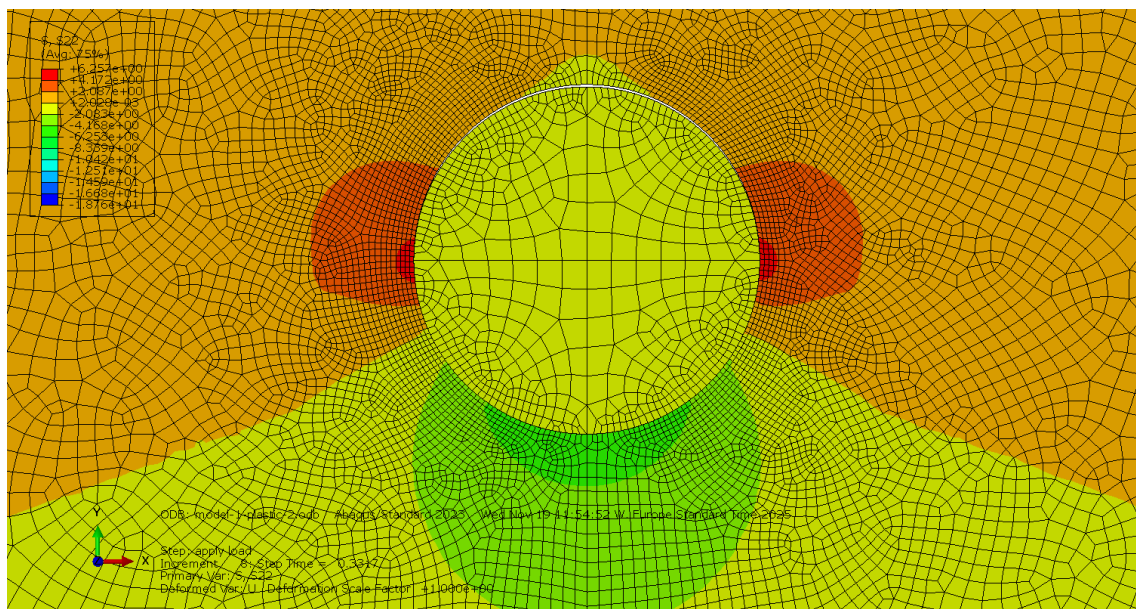
Figur 36 nedan visar plasticeringen vid en last på 7529 N, där det gråmarkerade området är det område som, vid en last på 7529 N, har större plastisk töjning än maximala plastiska töjningen vid lasten 3317 N i Figur 34 ovan. Plasticeringen följer samma mönster som i Figur 35, men i en betydligt större omfattning. Det plasticerade området har vuxit och deformationerna sprider sig i samtliga riktningar. Utbredningen är så pass stor att den plastiska zonen i belastningsriktningen uppgår till en sträcka motsvarande dymlingens diameter. Detta indikerar två möjliga scenarier för provningar: antingen skulle träet spricka längs fiberriktningen innan intryckningen når denna nivå eller så skulle dymlingen tränga in i materialet under dymlingen.



Figur 36 Plastiska töjningar då lasten är 7529 N

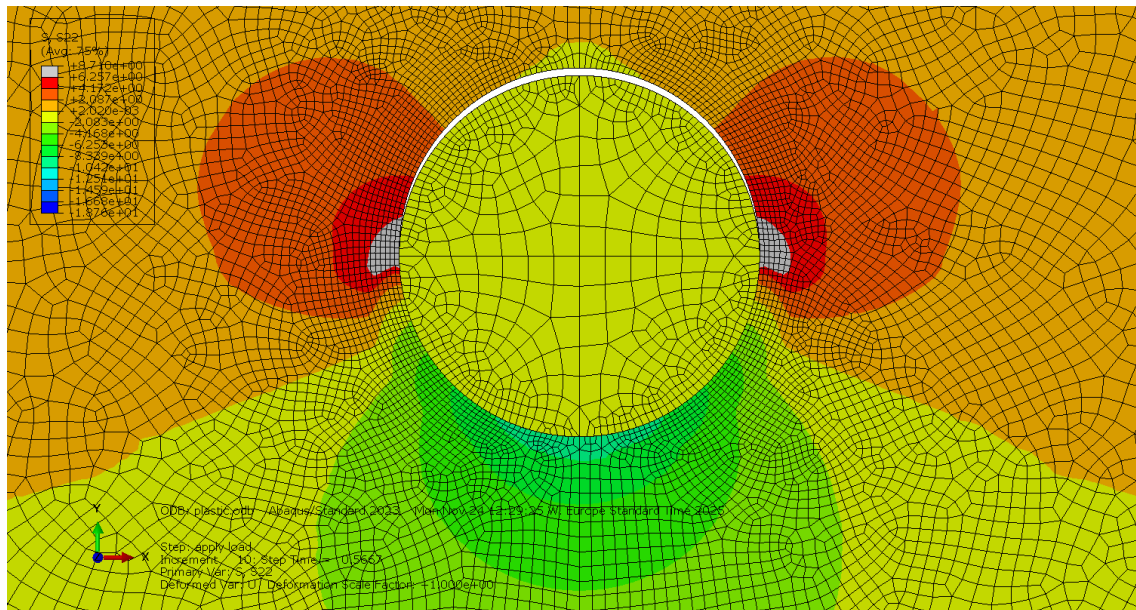
Spänningsfördelningen i y-riktningen har även analyserats för samma laster som valdes för plasticeringsanalys och kartlagts för att få en bättre förståelse av var uppsprickning kan förväntas uppstå under belastning. Det är viktigt att påpeka att spänningsanalyserna vad gäller drag vinkelrätt fiberriktningen inte kan förväntas ge realistiska absoluta värden, eftersom den använda materialmodellen förutsätter att träet plasticeras i dragning. Detta inträffar inte i praktiken, utan träet spricker upp istället.

Vid lasten 3317 N fördelar sig spänningarna enligt Figur 37 nedan. De högsta spänningarna koncentreras till höger och vänster om dymlingen inom ett relativt litet område. Det framgår även att inom det röda området finns ännu mindre zoner, placerade på båda sidor om dymlingen och nära dess mittpunkt, där spänningen är som störst.



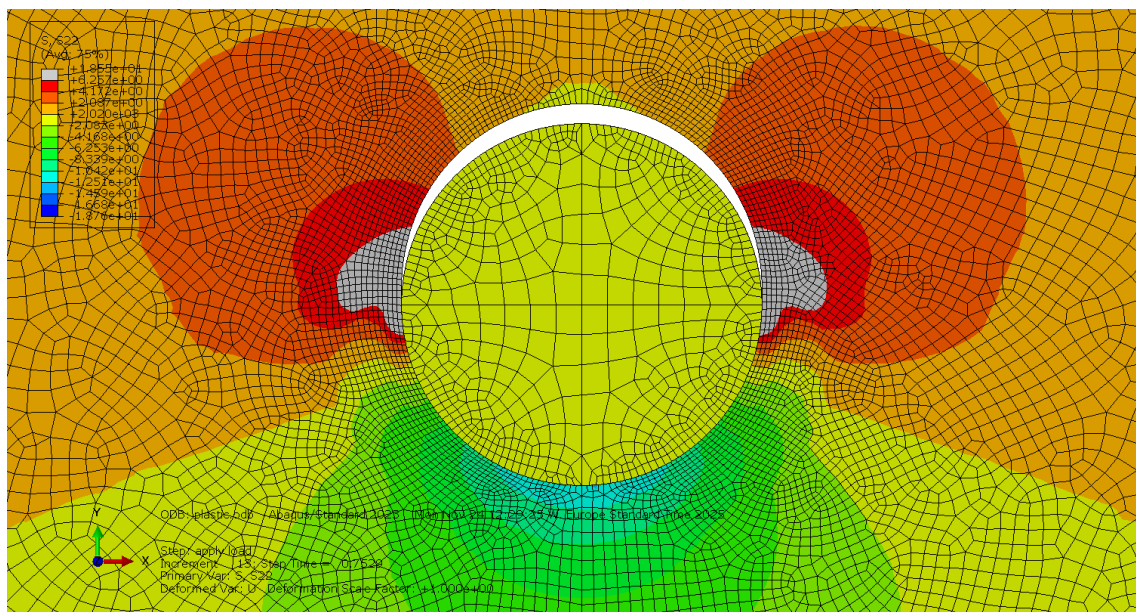
Figur 37 Spänningsfördelning, normalspänning vinkelrätt fiberriktningen, då lasten är 3317 N

När lasten ökar till 5667 N – det intervall där lutningsändringen ungefär inträffar – blir spänningszonerna på höger och vänster sida om dymlingen betydligt större. Fördelningen följer samma mönster som i Figur 37, där de högsta spänningarna fortfarande är samlade i dessa områden. Spänningarna ökar även i det tunna materiallagret som ligger i direkt kontakt med dymlingen, men inte i samma omfattning som i zonerna på sidorna. Detta är förväntat eftersom dymlingen belastar träet mest i dessa punkter, vilket leder till lokala intryckningsspänningar. Se Figur 38.



Figur 38 Spänningsfördelning, normalspänning vinkelrätt fiberriktningen, då lasten är 5667 N

Vid en last på 7529 N ser spänningsfördelningen ut som i Figur 39. Mönstret överensstämmer med det som framgår i Figur 38, där de högsta spänningarna uppstår på höger och vänster sida om dymlingen. Spänningar utvecklas även i området direkt under dymlingen, där materialet ligger i kontakt med dymlingen och belastas i intryckningsriktningen. De mest betydande spänningarna återfinns dock på sidorna, där både intensitet och utbredning ökar i störst omfattning. Utifrån denna fördelning är det mest sannolikt att sprickor initieras på höger och vänster sida om dymlingen.



Figur 39 Spänningsfördelning, normalspänning vinkelrätt fiberriktningen, då lasten är 7529 N

Dessa analyser behöver inte överensstämma exakt med de laster som uppmättes i de experimentella försöken, men de ger en tydlig bild av hur spänningarna och plasticeringen förändras under belastning. Det innebär att materialets beteende och påverkan i princip följer samma mönster som det som framkommer i analysen. Analysen ger även indikationer på var sprickbildning sannolikt initieras, men den kan fortfarande inte fastställa vid vilken last ett brott kan inträffa. Det finns dessutom en osäkerhet kring om spänningarna verkligen blir identiska på båda sidor av dymlingen, eftersom eventuell excentricitet kan påverka symmetrin.

3.5 Provuppställning och mätmetoder

Totalt testades 18 träprovkroppar, varav 9 bestod av obehandlad furu (R) medan de resterande var acetylerade (A). För varje provkropp registrerades mått samt hålets placering för att uppskatta excentriciteten i y-riktningen.

Excentriciteten beräknades som skillnaden mellan avståndet från hålets centrum till den övre kanten och halva provkroppens höjd. Ett negativt värde innebar att hålet var förskjutet uppåt, medan ett positivt värde indikerade en förskjutning nedåt (i förhållande till provuppställningen i Figur 40). Ett negativt värde betyder alltså att avståndet mellan hålets belastade kant och provkroppens dragna sida är mindre än halva höjden.



Figur 40 Provuppställningen

Provkropparnas tjocklek mättes både vid den övre och den nedre delen, varefter medelvärdet beräknades och användes som representativ tjocklek för hela provkroppen. Data redovisas i Tabell 9 och Tabell 10 nedan.

Tabell 9 Provkropparnas mått samt excentricitet i y-riktning för acetylerad furu

Provkropp	A1a	A1b	A2a	A2b	A3a	A3b	A4a	A4b	A5a
Längd [mm]	599	602	598	599	598	599	598	598	597
Tjocklek medelvärde [mm]	28,1	27,9	28,2	28,6	28,2	28,4	28,6	27,3	28,2
Höjd [mm]	109,8	109,7	109,6	110,0	109,6	109,7	109,4	109,6	109,6
excentricitet [mm]	0,2	-0,8	-1,2	-0,6	-0,8	-0,85	0,2	0,3	-0,2

Tabell 10 Provkropparnas mått samt excentricitet i y-riktning för obehandlad furu

Provkropp	R1a	R1b	R2a	R2b	R3a	R3b	R4a	R4b	R5a
Längd [mm]	600	600	597	600	599	599	599	597	597
Tjocklek medelvärde [mm]	27,7	28,4	28,1	28,4	27,7	27,6	28,5	28,2	28,3
Höjd [mm]	109,8	110,3	110,5	110,0	109,8	110,0	110,1	110,1	110,0
excentricitet [mm]	-1,1	-0,6	0,9	0,1	-1,6	-0,9	-0,3	-0,5	0,6

Försöket gick ut på att utsätta provkroppen för en konstant last motsvarande cirka 80–90 % av bärformågan i korttidsförsök från forskningsprojektet som detta examensarbete är en del av. Tabell 11 nedan visar ungefärliga lasterna som provkropparna skulle utsättas för.

Tabell 11 visar lasterna som provkropparna utsattes för

	Acetylerat	Referens
Korttidslast [N]	5790	6000
90 % av korttidslasten [N]	5200	5400
80 % av korttidslasten [N]	4600	4800

För att fastställa en lämplig lastnivå genomfördes inledningsvis flera provningar, där en provkropp av obehandlad furu och en provkropp av acetylerad furu valdes slumpmässigt och testades vid 80 %, 90 % och 100 % av korttidslasten, med konstant belastning under två timmar. Syftet var att identifiera den högsta last som kunde appliceras utan att provkroppen sprack direkt, men som samtidigt gav en tydlig intryckning av hålet.

I Tabell 12 nedan redovisas resultaten för en acetylerad provkropp (A1b) och en obehandlad provkropp (R1a). Provkropparna valdes slumpmässigt och testades successivt vid 80 % och 90 % av korttidslasten. När ingen sprickbildning uppstod ökades lasten ytterligare. Provkropp A1b testades slutligen vid ca 100 % av korttidslasten, medan R1a belastades kontinuerligt med ökande last tills sprickbildning inträffade. Syftet med dessa tester var att fastställa en lämplig lastnivå för de återstående provkropparna.

Tabell 12 visar lastnivåerna tills uppsprickning inträffar för provkropparna A1b och R1a

	A1b	Tid	R1a	Tid
Försökets last, omgång 1 (80%) [N]	4600	2 [h]	4800	2 [h]
Försökets last, omgång 2 (90%) [N]	5200	2 [h]	5400	1 [h]
Omgång 3 Uppsprickningslasten [N]	5700	232 [s]	6650	47 [s]

För de fortsatta försöken bestämdes till en början att använda en belastning på 80 % av korttidslasten för att undvika sprickbildning under pålastning. Målet var att provkropparna skulle tåla denna belastning under två timmar så att deformationens utveckling (intryckning av hålkanten) kunde följas över tid och så att eventuell sprickbildning inte skedde under pålastning.

Efter att fem provomgångar genomförts konstaterades att 80 % av korttidslasten var för lågt, då nästan alla provkroppar klarade den utan brott. Därför höjdes belastningen till 90 % för resterande provkroppar, i syfte att uppnå större intryckning och bättre utforska materialets beteende vid högre belastning. I Tabell 13 nedan visas vilka provkroppar som testades för 80 % av korttidslasten och vilka som testades för 90 % av korttidslasten.

Tabell 13 Visar fördelning av provkroppar för acetylerad och obehandlad furu vid 80 % och 90 % av korttidslasten

Lastnivå (% av korttidslast)	Acetylerad furu (A)	Obehandlad furu (R)
	Provkroppar	Provkroppar
80 %	A1a, A2a, A3a, A3b, A4b	R1b, R2a, R2b, R3a, R3b
90 %	A2b, A4a, A5a	R4a, R4b, R5a

I de fall där provkroppen inte spruckit efter två timmar påfördes en ökande totaldeformation tills brott inträffade. På detta sätt kunde provkropparnas maximala bärförmåga fastställas.

Intryckning mättes på flera sätt under försöken. Kolvrörelsen i MTS-maskinen ger den totala deformationen, vilket inkluderar både böjdeformationer och intryckning vid hålet. Eftersom böjdeformationen är inkluderad i den mätning behövde intryckningen mätas separat.

Två typer av mätningar genomfördes: dels vid konstant last under en viss tid, dels vid avslutande pålastning för de provkroppar som inte gått till brott under konstant last.

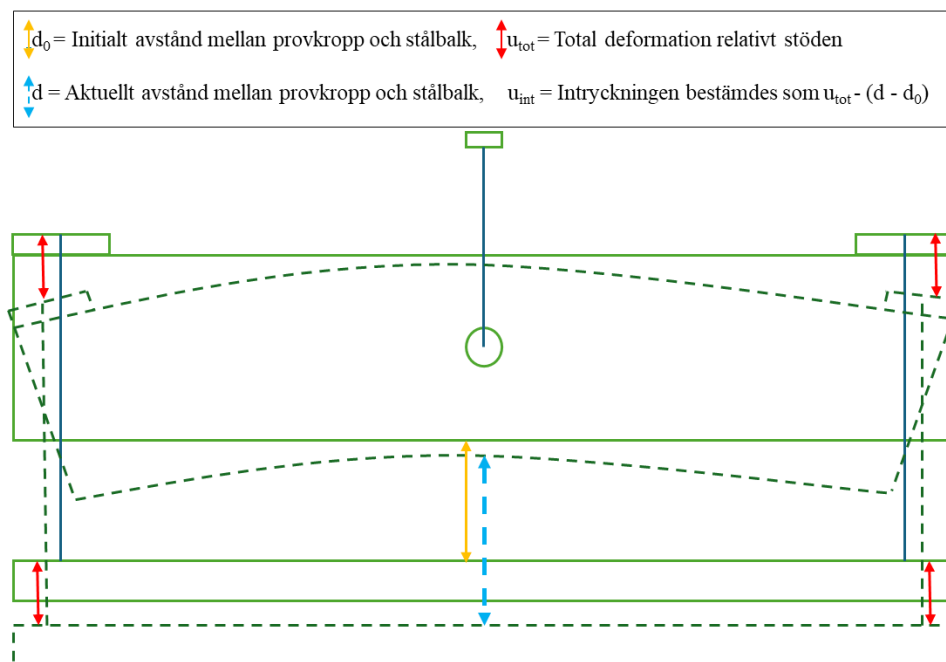
För att bestämma intryckningen behövde den vertikala förskjutning under hålet mätas. Utgångspunkten var resultaten från FEM-analyserna, som visade att intryckningen kan bestämmas även i en trepunktsböjning, under förutsättning att provkroppens böjning beaktas. I provuppställningen är provkroppen kopplad till en stålbalk som rör sig uppåt och nedåt, medan förbandet vid dymlingen är fast. Provkroppens stöd är kopplade till stålbalken och följer dess

rörelser samtidigt som dymlingen betraktas som orörlig. På så sätt skapades en situation som motsvarade de antaganden som användes i analyserna.

MTS-maskinen registrerade den totala deformationen, medan två externa deformationsgivare användes för att mäta förskjutning direkt under hålet. Den ursprungliga avsikten var att placera givarna precis på undersidan av provkroppen, men detta var inte möjligt eftersom balken låg direkt under och det saknades utrymme. För att lösa detta fästes därför en aluminiumdel på undersidan av provkroppen, förlängd utåt så att givarna fick plats. Givarna placerades på varsin ände av denna aluminiumdel – cirka fem centimeter framför respektive bakom provkroppen – och medelvärdet beräknades för att minimera fel på grund av eventuell rotation. Genom att subtrahera dessa mätvärden från den totala deformationen kunde dymlingens intryckning i träet bestämmas.

Den andra typen av mätning utfördes under slutlig belastning till brott, med syftet att fastställa provkropparnas maximala lastkapacitet. Under dessa mätningar registrerades enbart den totala deformationen, inklusive böjning.

FEM-analyserna visade att intryckningen kan bestämmas genom att mäta intryckningen vid provkroppens över- eller underkant, med endast en försumbar skillnad orsakad av Poisson-effekten. FEM-analyserna visade också att små avvikelser i mätpositionen vid hålkanten har försumbar påverkan. Figur 41 illustrerar hur mätningen genomfördes och vad som faktiskt registrerades. Figuren är inte skalenlig utan fungerar enbart som en schematisk skiss.



Figur 41 Principskiss av provuppställningen

3.6 Materialegenskaper för provkropparna

Provkropparna förvarades i ett klimat med 20 °C och 60 % relativ luftfuktighet. Materialet utgjordes av konstruktionsvirke av tall (Furu), där 9 provkroppar var obehandlade (R) och 9 var acetylerade (A). Dimensionerna för de testade provkropparna redovisas i Tabell 9 och Tabell 10.

Efter genomförda tester togs mindre provkuber ut från mitten av respektive provkropp, i anslutning till hålets position. Syftet var att erhålla så representativa värden som möjligt för densitet, torrdensitet och fuktkvot. Resultaten för dessa provkuber redovisas i Tabell 14 och nedan. Figur 42 visar de provkuber som beräkningarna baserades på.

Tabell 14 Materialegenskaper för de olika provkuberna

Prov	Volym [mm ³]	Massa [g]	Torr massa [g]	Fuktkvot [%]	Densitet [kg/m ³]	Torrdensitet [kg/m ³]
A1a	36687,71	17,615	17,032	3,4	480,1	464,2
A1b	40333,48	18,223	17,480	4,3	451,8	433,4
A2a	47463,02	22,112	21,427	3,2	465,9	451,4
A2b	46119,04	20,703	20,081	3,1	448,9	435,4
A3a	43934,10	19,760	19,110	3,4	449,8	435,0
A3b	38530,58	17,617	17,008	3,6	457,2	441,4
A4a	46724,45	20,462	19,723	3,8	437,9	422,1
A4b	39940,59	16,863	16,245	3,8	422,2	406,7
A5a	35996,08	16,305	15,778	3,4	453,0	438,3
Medelvärde	—	—	—	3,5	451,9	436,4
Standardavvikelse	—	—	—	0,33	15,3	15,4
R1a	39768,64	16,993	15,235	11,5	427,3	383,1
R1b	50560,44	21,227	18,975	11,9	419,8	375,3
R2a	42661,17	18,003	16,126	11,6	422,0	378,0
R2b	45750,26	20,520	18,389	11,6	448,5	401,9
R3a	43596,91	18,001	16,154	11,5	412,9	370,5
R3b	40857,20	20,191	17,950	12,5	494,2	439,3
R4a	44952,20	18,016	16,173	11,4	400,8	359,8
R4b	38583,96	16,770	15,035	11,6	434,6	389,7
R5a	48237,26	19,330	17,314	11,7	400,7	358,9
Medelvärde	—	—	—	11,7	429,0	384,1
Standardavvikelse	—	—	—	0,30	27,2	23,4



Figur 42 provkuberna som data i Tabell 14 avser

4 Resultat och analys

4.1 EC5: Beräkning av uppsprickningslast

Uppsprickningslasten vinkelrätt mot fibrerna beräknades för de olika provkropparna baserat på deras verkliga mått. Uppsprickningslasten beräknades enligt Ekvation 11 i avsnitt 2.6.3, som bygger på teorin i EC5. I Tabell 15 nedan jämförs brottlasten beräknad enligt EC5 med den uppmätta brottlasten från de experimentella försöken. Resultaten visar att EC5:s beräkningar ger högre brottlaster än uppmätta brottlaster, vilket också redovisas i tabellen.

I samma ekvation utgår EC5 från att konstanten 14 är giltig för beräkning av uppsprickningslast vinkelrätt mot fibrerna för barrträ. I tabellen redovisas därför en omvänd beräkning där den experimentellt uppmätta uppsprickningslasten och provkropparnas verkliga mått används för att bestämma den motsvarande parametern. Detta görs på två olika sätt för att undersöka eventuella skillnader. Det första sättet är att utföra en omvänd beräkning av konstanten för varje provkropp individuellt, baserat på dess egna mått och uppmätta brottlast. Det andra sättet är att använda medelvärdet av uppsprickningslasterna för samtliga provkroppar direkt i Ekvation 11, tillsammans med medelvärdet av deras dimensioner, för att ta fram en enda konstant. Dessa två resultat jämförs sedan med varandra och med den teoretiska konstanten 14.

I Tabell 15 redovisas de använda parametrarna, de beräknade uppsprickningslasterna samt de konstanta parametrarna, tillsammans med de uppmätta uppsprickningslasterna. För samtliga storheter presenteras även respektive medelvärde och standardavvikelse. Vidare redovisas de karakteristiska värdena för de uppmätta brottlasterna samt för de beräknade parametrar som ersätter konstanten 14 i Ekvation 11. De karakteristiska värdena har beräknats, baserat i teorin från [Fahleson, C. & Utsi, S. \(2009\)](#) enligt formeln nedan:

Ekvation 13

$$X_k = \mu_X (1 - k_n \cdot V_X)$$

Där:

X_k = karakteristiskt värde

μ_X = medelvärde

k_n = statistisk faktor beroende på provantal och fraktil (9 st provkroppar = 1,92)

$V_x = s/\mu_x =$ variationskoefficient (standardavvikelse delat med medelvärdet)

Tabell 15 Jämförelse av beräknade och uppmätta uppsprickningslaster samt EC5:s konstant

Provkropp	A1a	A1b	A2a	A2b	A3a	A3b	A4a	A4b	A5a	medelvärde	Standard- avvikelse
Tjocklek, b [mm]	28,1	27,9	28,2	28,6	28,2	28,4	28,6	27,3	28,2	28,2	—
Höjd, h [mm]	109,8	109,7	109,6	110,0	109,6	109,7	109,4	109,6	109,6	109,7	—
Effektiv höjd, h_e [mm]	54,7	55,6	56,0	55,6	55,6	55,7	54,5	54,5	55,0	55,2	—
Brottlast, P_{cr} EC5 [N]	8222	8295	8449	8476	8373	8444	8331	7959	8297	8316	149
Brottlast, P_{cr} Uppmätt , [N]	4422	5802	5333	4801	5637	5455	6359	5615	5307	5414	528
EC5 / uppmätt brottlast	186%	143%	158%	177%	149%	155%	131%	142%	156%	155%	16%
Omvänd ber. konst. [-]	7,5	9,8	8,8	7,9	9,4	9,0	10,7	9,9	9,0	9,12	0,92
										Kar. Värde 7,35 *	
Omvänd ber. konst. Baserat på kar. brottlaster (4400 N) * [-]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Kar.Värde 7,41 *	
Provkropp	R1a	R1b	R2a	R2b	R3a	R3b	R4a	R4b	R5a	medelvärde	Standard- avvikelse
Tjocklek, b [mm]	27,7	28,4	28,1	28,4	27,6	27,6	28,5	28,2	28,3	28,1	—
Höjd, h [mm]	109,8	110,3	110,5	110,0	109,8	110,0	110,1	110,1	110,0	110,1	—
Effektivhöjd, h_e [mm]	56,0	55,7	54,4	54,9	56,5	55,9	55,3	55,5	54,4	55,4	—
Brottlast, P_{cr} EC5 [N]	8304	8422	8144	8325	8352	8239	8397	8338	8221	8305	84
Brottlast, P_{cr} Uppmätt , [N]	6693	5797	6482	7016	6881	6604	5263	6503	5429	6296	602
EC5 / uppmätt brottlast	124%	145%	126%	119%	121%	125%	160%	128%	151%	133%	14%
Omvänd ber. konst. [-]	11,3	9,6	11,1	11,8	11,5	11,2	8,8	10,9	9,2	10,61	1,04
										Kar. Värde 8,63 *	
Omvänd ber. konst. Baserat på kar. brottlaster (5141 N) * [-]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Kar.Värde 8,67 *	

4.2 Experimentella resultat

Provkropparna testades på olika sätt, A1b och R1a användes för att bestämma vilken lastnivå som skulle vara lämplig att använda för övriga provkroppar, enligt Tabell 12.

De provkroppar som är markerade med ljusgrå färg nedan testades med 80 % av korttidslasten, medan de som är markerade med mörkgrå färg testades med 90 % av korttidslasten. Den första omgången var alltid bestämd till två timmar med en konstant last på 80 % eller 90 % av korttidslasten.

I vissa tester sprack provkropparna redan under den första omgången, medan andra klarade den och därför genomgick en ytterligare omgång, där lasten ökades gradvis tills sprickbildning uppstod. Medelvärdet för uppsprickningslasten låg på cirka 5400 N för de acetylerade provkropparna, medan det för de obehandlade provkropparna låg på cirka 6300 N.

Medelvärdet och standardavvikelsen inkluderar uppsprickningslasten för A1b och R1a. Provkropparna som presenteras i Tabell 12 visar lastnivåerna tills uppsprickning inträffar för provkropparna A1b och R1a.

Tabell 16 Belastningstid för provkropparna vid olika lastnivåer, inklusive uppsprickningslast

Provkropp	Omgång 1 (konstant last)		Omgång 2
	Belastningstid (*=tid till brott och maxlast)	Nominell lastnivå [N] (% av korttidslast)	Max last [N]
A1a	28 s, 4422 N *	4600 (80%)	
A2a	2 h	4600 (80%)	5332,5
A2b	28 s, 4801,3 N *	5200 (90%)	
A3a	2 h	4600 (80%)	5637,2
A3b	2 h	4600 (80%)	5455,2
A4a	2 h	5200 (90%)	6359,1
A4b	2 h	4600 (80%)	5615,3
A5a	1 h: 45 m: 40 s 5306,9 N *	5200 (90%)	
Medelvärde	—	—	5414,6
Standardavvikelse	—	—	528,5
R1b	2 h	4800 (80%)	5797,3
R2a	2 h	4800 (80%)	6482,3
R2b	2 h	4800 (80%)	7016,3
R3a	2 h	4800 (80%)	6881
R3b	2 h	4800 (80%)	6603,6
R4a	77 s, 5262,9 N *	5400 (90%)	
R4b	2 h	5400 (90%)	6503
R5a	12 m: 33 s, 5429,2 N *	5400 (90%)	
Medelvärde	—	—	6296,5
Standardavvikelse	—	—	601,7

Det som avviker från den generella trenden är egentligen A1a, som sprack redan under den första omgången vid lastökningen. Detta var dock relativt förväntat, eftersom provkroppen hade en tydlig svaghet från början längs fiberriktningen. Den sträckte sig nästan längs hela provkroppens längd, precis vid hålet, se Figur 43 nedan.

Alla övriga provkroppar som testades vid 80 % av korttidslasten klarade belastningen. Därför ökades lastnivån till 90 % av korttidslasten. För dessa provkroppar noterades en stor variation i tiden till brott för både obehandlad furu och acetylerad furu.

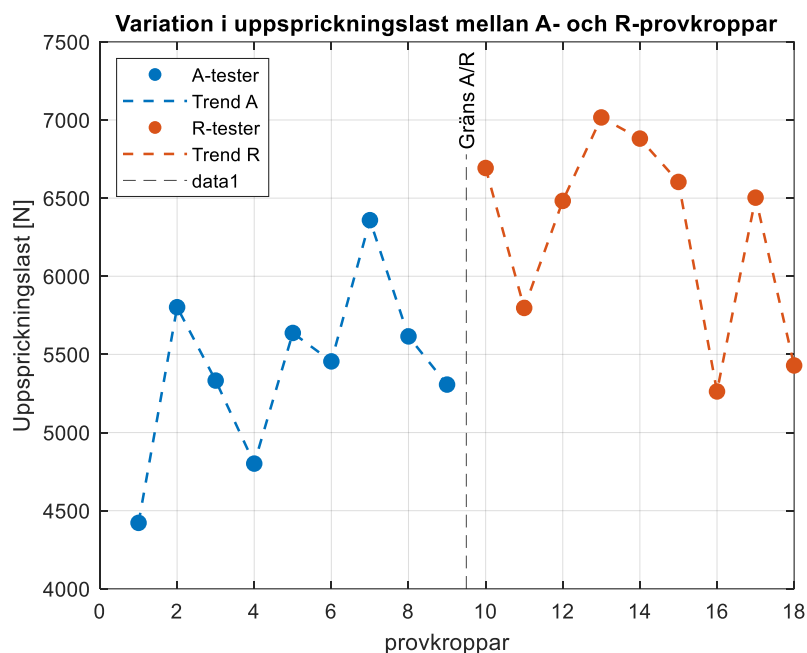


Figur 43 visar träprovkroppen A1a som hade avvikande resultat än de andra provkropparna

4.2.1 Brottmod och uppsprickningslast

Vid belastningen var intryckningen vid dymlingen enligt brottmod j , vilket stämmer väl överens med förväntningarna enligt avsnitt 3.4.1. Det finns dock en tydlig skillnad mellan de obehandlade och de acetylerade provkropparna. För de obehandlade provkropparna kunde brottmoden j observeras mycket tydligt innan uppsprickningen inträffade. I de acetylerade provkropparna var detta däremot mindre framträdande, eftersom intryckningen runt hålet var betydligt mindre jämfört med de obehandlade.

Uppsprickningslasten varierade mellan de olika provkropparna, men det finns en tydlig trend som visar att de obehandlade provkropparna uppnådde högre lastnivåer än de acetylerade, se Figur 44 nedan.



Figur 44 visar trenden för uppsprickningslaster för de 18 provkropparna

4.2.2 Deformationsutveckling

I Figur 46 visas resultaten från provkropparna som belastades med en konstant last under en bestämd tid för att tydligt kunna studera deras beteende. Bland dessa provkroppar fanns några som sprack redan under den första omgången, vilket gjorde det svårare att mäta intryckningen. Eftersom dessa provkroppar (A1a, A5a, R4a och R5a) i praktiken uppförde sig mer som rampförsök, skiljer sig deras last – och intryckningsutveckling något från övriga provkroppar. Därför presenteras de separata figurer.

I Figur 47 visas tids – intryckningskurvor för samma provkroppar som i Figur 46, där utvecklingen av intryckningen över tid framgår. Det syns tydligt i Figur 47 att både de acetylerade (A) och de obehandlade (R) provkropparna uppvisar den största intryckningen under de första sekunderna (<1 min), det vill säga under den fas då lasten ökar till den bestämda nivån. Detta framgår i jämförelse mellan Figur 45 och Figur 47.

Figur 48 visar att den totala deformationen fortsätter att öka även efter pålastningen. Denna ökning domineras tydligt av intryckningen. Samma kurvor för resterande provkropparna presenteras i Figur A2 i Bilaga A – kompletterande figurer och diagram.

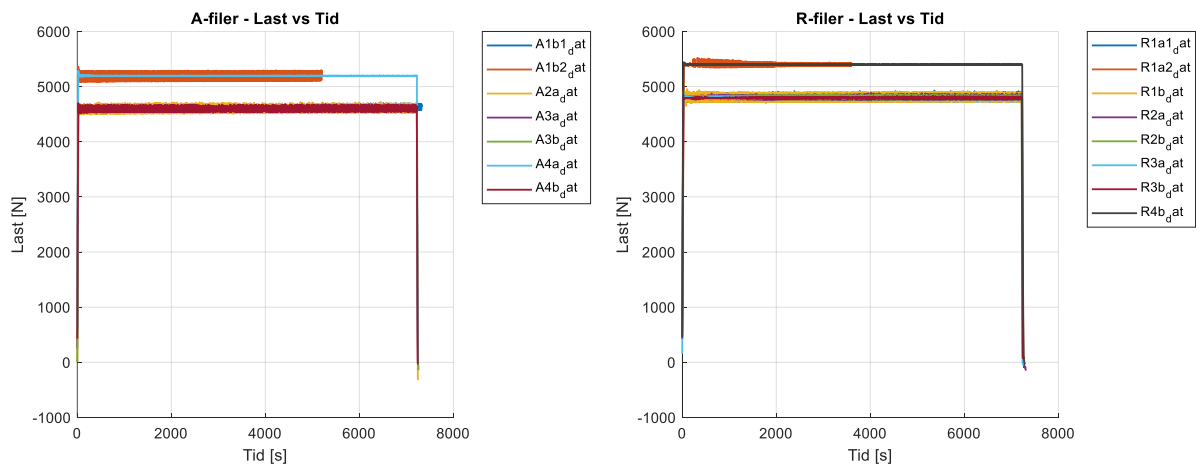
Intryckningen uppvisade stor variation både inom samma träslag och mellan de acetylerade och obehandlade provkropparna. Den maximala intryckningen varierade mellan 0,63–1,85 mm för de acetylerade provkropparna och mellan 1,17–8,92 mm för de obehandlade. Notera att

provkropperna A1b1 och A1b2 avser samma provkropp men olika lastnivåer (80 % respektive 90% av korttidslasten). Samma sak gäller för R1a1 och R1a2. Se Tabell 17 nedan.

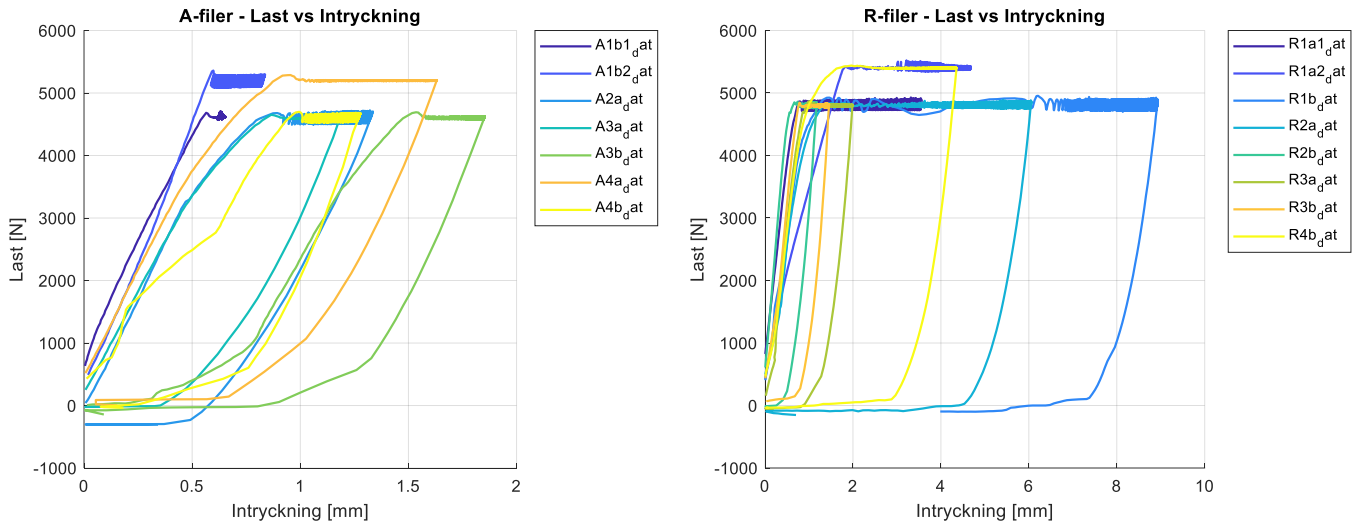
Tabell 17 Total intryckning för de olika provkroppar

Prov-kropp	A1a	A1b1	A1b2	A2a	A2b	A3a	A3b	A4a	A4b	A5a	Medel-värde	Std.av.
Intryckn.	0,8	0,63	0,83	1,32	1,26	1,19	1,85	1,63	1,27	1,39	1,22	0,359
Prov-kropp	R1a1	R1a2	R1b	R2a	R2b	R3a	R3b	R4a	R4b	R5a		
Intryckn.	4,35	4,67	8,89	6,05	1,17	1,98	1,45	8,1	3,53	10,6	5,08	3,102

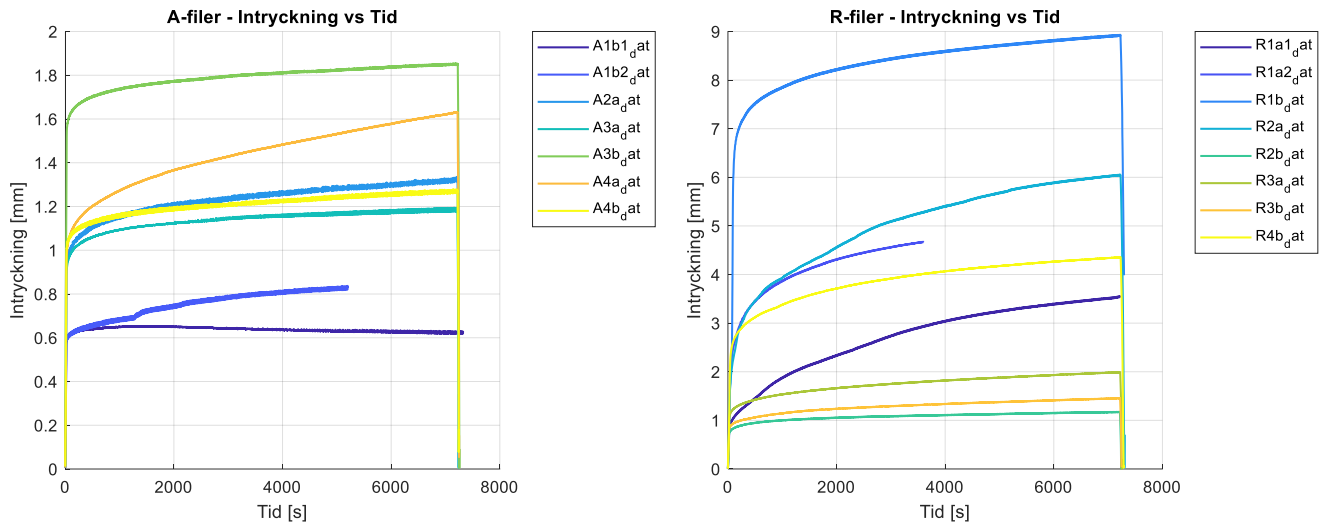
I Figur 47 och Figur 46 visas även provkropparna som testades vid 90 % av korttidslasten, nämligen A4a, R4b, A1b2 och R1a2. En högre lastnivå ledde generellt inte till någon tydlig ökning av intryckningen (jämfört med övriga provkroppar inom respektive träslag), men provkropparna A1b2 och R1a2 uppvisade en tendens till något större intryckning vid högre belastning, jämfört med sina motsvarande försök vid lägre lastnivå (80 %), det vill säga A1b1 respektive R1a1.



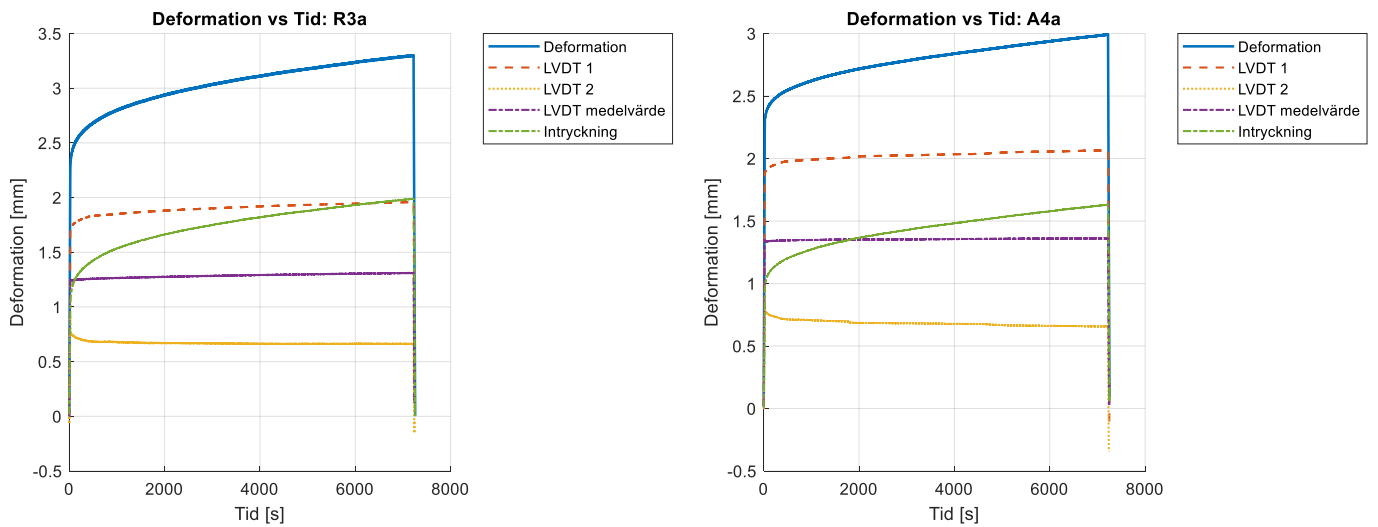
Figur 45 Last-tidskurvor för de olika provkroppar



Figur 46 Last-intryckningskurvor för de olika provkropparna



Figur 47 Tids-intryckningskurvor för de olika provkropparna

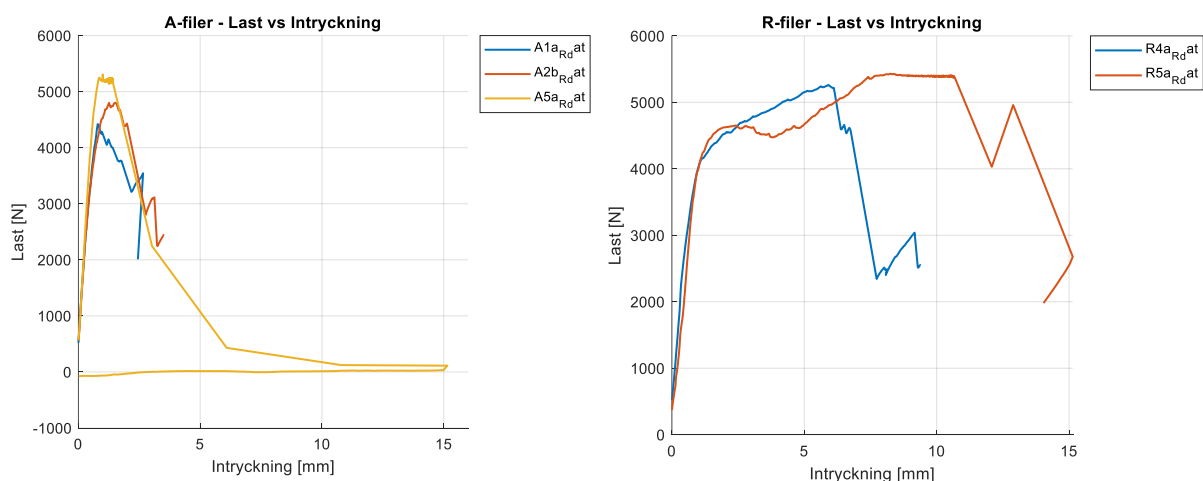


Figur 48 Tids-deformationskurvor för provkropparna R3a och A4a (total deformation och intryckning)

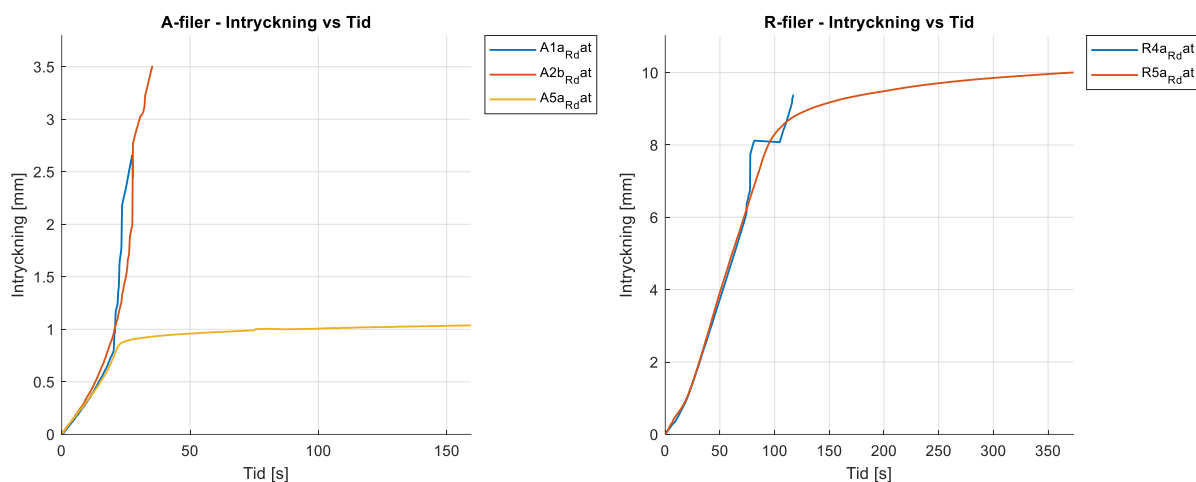
De provkroppar som sprack redan under första omgången, alltså under själva mätningen av intryckningen (A1a, A2b, A5a, R4a, R5a), visas i Figur 49 och Figur 50,

De acetylerade provkropparna uppvisade ett liknande beteende, trots att de hade två olika bestämda lastnivåer. Provkroppen (A1a) sprack redan vid cirka 80 % av korttidslasten, vilket är lägre än för övriga A-provkroppar. Detta var dock förväntat (se förklaringen i avsnitt 4.2, Figur 43 ovan). Figur 50 visar en total intryckning på 2,7 mm hos denna provkropp, men i jämförelse med Figur 49 framgår att intryckningen nådde endas cirka 0,8 mm innan sprickbildningen uppstod, varefter intryckningen ökade kraftigt. Den andra provkroppen (A2b) hade ganska likt beteende som provkroppen (A1a). Den sprack också redan under pålastningen, strax över 80 % av korttidslasten, och därefter ökade intryckningen kraftigt i samband med att träet sprack isär. Det fanns inga synliga avvikelser som kunde indikera att den skulle spricka i förtid. Intryckningen låg inom det förväntade intervallet och uppmättes till 1,26 mm. Den tredje acetylerade provkroppen (A5a) nådde den bestämda lastnivån och varade nästan två timmar innan brottet, men även där låg intryckningen inom det intervall som tidigare nämnts.

För de obehandlade provkropparna (R) inträffade sprickbildningen efter att lasten nått cirka 90 % av korttidslasten. Den ena provkroppen (R4a) sprack nästan omedelbart efter att den uppnått den bestämda lastnivån, medan den andra (R5a) deformerades relativt mycket redan under pålastningen. Brottet uppstod sedan efter ca 12 minuter. I Figur 49 framgår det tydligt att R-provkropparna uppvisar en tendens till att högre lastnivåer ger upphov till större intryckning, så länge provkroppen är tillräckligt stark för att motstå sprickbildning.



Figur 49 Last-intryckningskurvor för provkropparna som sprack vid första omgång.

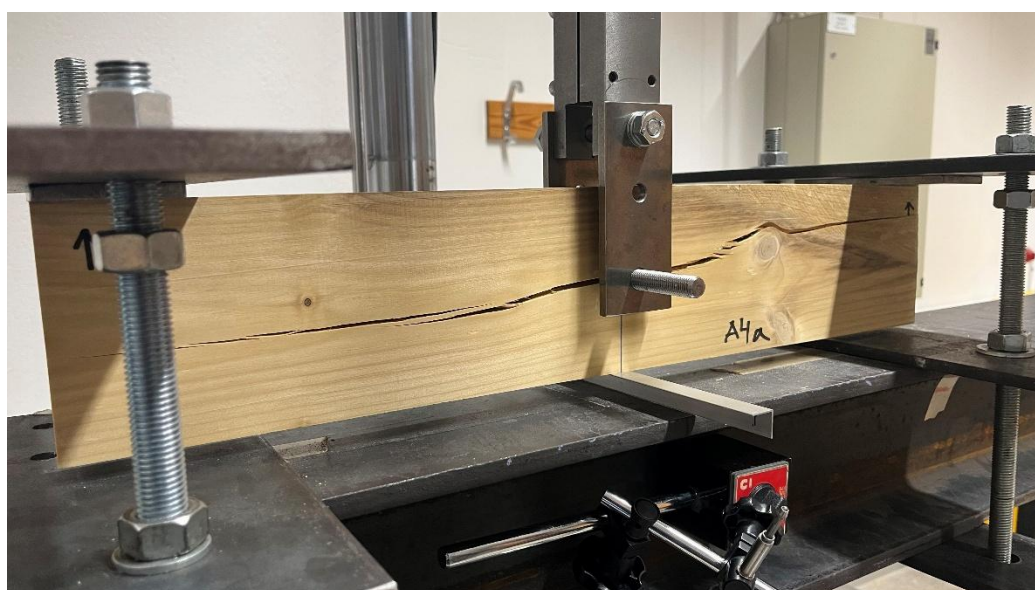


Figur 50 Tids-intryckningskurvor för provkropparna som sprack vid första omgång.

4.2.3 Uppsprickningsmönster

Uppsprickningsmönstret var i stort sett detsamma för samtliga provkroppar och överensstämde väl med resultaten avseende läge för maximal dragspänning vinkelrätt mot fiberriktning från FEM-analyserna. Analysen visade att uppsprickningen initialt uppstår på höger och vänster sida om hålet. I försöken har det visat sig att sprickorna spred sig därefter längs fiberriktningen. I vissa provkroppar påverkades spricktillväxten av förekomsten av kvistar, där sprickan följde fiberriktningen runt kvisten, se Figur 51.

Ett undantag observerades i provkroppen A1a, som hade en svaghet längs mitten av virket i fiberriktningen. I detta fall följde spricktillväxten denna svaga zon snarare än kvistens omkrets, se Figur 52.



Figur 51 visar hur spricktillväxten följer kvistens omkrets,



Figur 52 Visar sprickbildning genom kvisten för provkroppen A1a

Sprickans exakta läge varierade dock något mellan provkropparna; den började ibland något högre på höger sida än på vänster, ibland tvärtom, och i vissa fall initierades sprickan i den övre delen av hålet. Ett exempel är Figur 53 nedan.



Figur 53 visar sprickbildningens initiering från hålets olika sidor

5 Diskussion

5.1 Tolkning av resultaten i relation till frågeställningar

Uppsprickningslasterna visade en betydande skillnad mellan EC5:s beräkningar och de experimentellt uppmätta värdena. För de acetylerade provkropparna var medelvärdet av uppmätta uppsprickningslasten i genomsnitt cirka 35 % lägre än den beräknade karakteristiska värde enligt EC5, medan skillnaden för de obehandlade provkropparna uppgick till cirka 24 %. Detta tyder på att EC5:s teori är ej utformad för att passa för alla träslag. Resultaten visar att de acetylerade provkropparna uppvisade lägre prestanda jämfört med de obehandlade och det ger intryck av att EC5:s teori är mer anpassad för vanliga träslag än för modifierade träslag.

Provkropparna R2b och R3a uppvisade de högsta brottlasterna, men resultaten låg ändå cirka 16 % respektive 18 % under de karakteristiska värdena enligt EC5 för respektive provkropp. Den stora variationen i de uppmätta brottlasterna framstod som slumpmässig, vilket gjorde det mycket svårt att förutsäga vilken provkropp som skulle uppvisa högst brottlast. Jämförelsen mellan excentriciteterna i Tabell 10 visar att R2b hade den lägsta excentriciteten medan R3a hade den högsta, vilket indikerar en betydande osäkerhet. I praktiken är det därför mycket svårt att förutse brottlasten enbart utifrån yttre egenskaper eller synliga defekter.

Beräkningen av uppsprickningslast vinkelrätt mot fibrerna enligt EC5 baseras på ekvation 11, där både provkroppens geometri och en konstant med värdet 14 ingår. I tabell 15 redovisas två omvända beräkningar där denna konstant har bestämts experimentellt. Resultaten visar tydliga avvikelser från EC5:s antagande: för de acetylerade provkropparna erhöles ett medelvärde om cirka 9,1 och ett karakteristiskt värde om cirka 7,4, medan motsvarande värden för de obehandlade provkropparna uppgick till cirka 10,6 respektive cirka 8,6.

Målet att undersöka hur Intryckningen under dymlingen utvecklas under de första timmarna har i hög grad uppnåtts med hjälp av den framtagna provuppställningen. FEM-analyserna användes som underlag för att studera träets beteende och för att säkerställa att den valda mätmetoden var tillförlitlig. Analyserna tog hänsyn till flera kritiska aspekter, bland annat att modellen utsätts för en böjning som är cirka två gånger större än själva Intryckningen (se Figur A2 i Bilaga A – kompletterande figurer och diagram). FEA visade även att positionskänsligheten längs kanten under dymlingen är försumbar, samt att mätning från båda kanter ger i princip samma resultat, med undantag för en liten Poisson-effekt. Dessa parametrar gav en tydlig bild av hur provuppställningen behövde utformas för att ge användbara resultat.

Intryckningsutvecklingen kunde dokumenteras och följas under de första timmarna, där böjningen kunde särskiljas från intryckningen med hög precision. Vid vissa mätningar (de där den maximala lasten för förbandet bestämdes) registrerades inte intryckningen separat. I dessa fall gjordes en last-total deformation mätning istället, eftersom de externa deformationsgivarna under dymlingen är mycket känsliga och riskerar att skadas vid uppsprickningsbrott. Detta påverkar inte studiens slutsatser, eftersom intryckningen redan hade mätts vid tidigare lastnivåer.

Lastnivån 80 % av korttidslasten visade sig vara väl lämpad för att följa den totala deformationsutvecklingen – inklusive intryckning och böjning – under de första timmarna. Både acetylerade och obehandlade provkroppar klarade denna belastning under hela tvåtimmarsperioden, med undantag för A1a som hade en synlig defekt, se avsnitt 4.2, Figur 43.

För att studera beteendet vid en mer kritisk lastnivå ökades belastningen till 90 % av korttidslasten. Av de tre provkroppar som testades vid denna nivå sprack två: en under själva pålastningen och en efter en viss tid under konstant belastning. Detta beteende förekom för både acetylerade och obehandlade provkroppar, men med olika hållfasthetstider

Slutsatserna påverkades dock inte, eftersom den största intryckningsökningen inträffade under de första sekunderna (<1 minut) av pålastningen.

Resultaten visar att träet trycks in något innan uppsprickning, oavsett hur styvt träet är. Variationen är dock stor, och den sammanlagda intryckningen är betydligt lägre för hårdare material, såsom de acetylerade provkropparna. Där varierade intryckningen mellan 0,65 och 1,85 mm, medan de obehandlade provkropparna uppvisade betydligt större variationer, mellan 1,17 och 8,92 mm, se Tabell 17.

5.2 Jämförelse mellan träslagen

Resultaten visar att det obehandlade virket generellt klarade högre laster innan uppsprickningar. Lastnivåerna i försöket skilde sig något redan från början, eftersom de baserades på tidigare studier som visat att obehandlat virke tål högre belastning. En jämförelse av de experimentella resultaten i Tabell 15 bekräftar detta: medelvärdet för maximal last hos de obehandlade provkropparna är cirka 900 N högre än för de acetylerade. Samma trend framgår i Figur 44, där uppsprickningslasten för de obehandlade provkropparna (R) tydligt ligger över de acetylerade (A).

Resultaten visar dessutom att brottlasten varierar i stort sett lika mycket inom respektive träslag, både för acetylerade och obehandlade virken. Däremot framträder praktiskt taget inga skillnader mellan de två grupperna i EC5:s beräkningar. Detta beror på att EC5:s metod enbart baseras på provkropparnas geometri och inte tar hänsyn till materialegenskaper eller träets variation. Därför uppstår nästan ingen spridning i brottlasten enligt EC5, eftersom provkropparna har mycket liknande dimensioner.

När det gäller beräkningen av konstanten i Ekvation 11 visade resultaten att det i praktiken inte spelar någon roll om konstanten bestäms genom att först ta medelvärdet av brottlasten och därefter utföra beräkningen, eller om konstanten beräknas separat för varje provkropp och medelvärdet sedan tas av dessa. Båda metoderna gav i princip samma resultat för såväl de acetylerade som de obehandlade provkropparna.

Däremot var skillnaden tydlig mellan de acetylerade och obehandlade provkropparna, vilket naturligtvis beror på skillnaderna i de experimentellt uppmätta brottlasterna. Dessa värden kan jämföras med den konstant som anges i EC5, där konstanten i Ekvation 11 är satt till 14, se Tabell 15. Resultaten indikerar att denna konstant kan variera, i både liten och stor utsträckning, beroende på vilket träslag som används samt på provkropparnas egenskaper.

Intryckningsbeteendet var överlag likartat för A- och R-provkropparna. I Figur 46, där lastintryckningskurvor presenteras, är kurvformen snarlik, men de obehandlade provkropparna deformeras betydligt mer. Figur 48 visar dessutom att det obehandlade virket fortsätter att deformeras efter att lastnivån stabiliserats, i större utsträckning än de acetylerade, vilket domineras av intryckning.

Tabell 17 visar Intryckningen under dymlingen. Här är skillnaden mellan A och R tydlig: det obehandlade virket har en avsevärt större intryckning. Samtidigt finns undantag där vissa obehandlade provkroppar, exempelvis R2b, R3a och R3b, ligger nära de acetylerade provkropparnas medelvärde (1,53 mm jämfört med A-gruppens 1,22 mm).

Det är också viktigt att notera att provkropparna A1b och R1a testades i två omgångar eftersom de användes för att bestämma en rimlig lastnivå. Intryckningen ökade dock mycket lite mellan första och andra omgången, trots att lastnivån höjdes från 4600 till 5200 N för A1b och från 4800 till 5400 N för R1a. För A1b ökade intryckningen från 0,63 till 0,83 mm och för R1a från 4,35 till 4,67 mm. Detta bekräftar slutsatsen från föregående avsnitt: Ännu mer ökning av lastnivån påverkar inte resultaten i någon större utsträckning.

Uppsprickningsmönstret var i stort sett detsamma för alla provkroppar. Sprickorna följde fiberriktningen och i de fall där kvistar förekom följde sprickan fiberriktningen runt kvisten. Ett undantag var A1a, där sprickan följde en mörk linje i fiberriktningen precis under hålet, vilket avvek från de övriga fallen, se Figur 51 och Figur 52.

Var sprickan initierade varierade något mellan provkropparna. Hos det obehandlade virket var skillnaderna mellan den högra och vänstra sidan mer tydliga på grund av att hålet hade blivit mer utdraget vid hög Intryckning. Se Figur A4 i Bilaga A – kompletterande figurer och diagram. Ett avvikande fall var återigen A1a, där sprickan initierades längs en mörk linje strax under hålet, se Figur 52.

5.3 Jämförelse mellan teori och experiment

Jämförelsen mellan teorin om tidsberoende deformation och de experimentella resultaten visar en tydlig överensstämmelse. Detta framgår särskilt i graferna som illustrerar intryckningens utveckling över tid. Figur 48 visar hur intryckningen fortsätter att öka trots konstant last, och dessa kurvor kan direkt relateras till teorin som presenteras i avsnitt 2.3.2.

När det gäller fuktkvoten i både de acetylerade och obehandlade provkropparna stämmer resultaten väl med teorin. Vid en relativ fuktighet på 60 % hamnar fuktkvoten för de acetylerade provkropparna kring 3–4 %, medan de obehandlade når omkring 12 %. Små variationer förekommer och kan kopplas till materialets naturliga variation, men överlag är resultaten i god överensstämmelse med teorin (jämför Figur 9 med Tabell 14).

Resultaten visar att de obehandlade provkropparna uppvisade större intryckning och högre brottlast, medan de acetylerade provkropparna hade både lägre intryckning och lägre brottlast. Detta framgår i Tabell 17 (intryckning) och Tabell 16 (brottlast). Utfallet ligger i linje med teorin om att acetylering generellt ökar tryckhållfasthet och styvhet, men minskar skjuvhållfasthet och brottenergi. En ytterligare överensstämmelse mellan teori och experiment är den lägre fukthalten och den högre densiteten hos de acetylerade provkropparna, vilket framgår av Tabell 14.

Provkropparna belastades i en kombination av lastmod I (öppning vinkelrätt mot sprickplanet) och lastmod II (skjuvning längs sprickplanet), vilka utgör två av de grundläggande lastmoderna för trä. De aktuella sprickriktningarna i undersökningen var RL och TL. Variationer mellan dessa riktningar kan påverka provkropparnas hållfasthet, liksom avståndet till mörgen i respektive provbit. De stora variationerna i brottlast mellan provkroppar inom samma träslag

kan därför sannolikt bero på skillnader i sprickriktning och märengens position. Uppsprickningsmönstret följde i stort sett teorin och gick längs fiberriktningen samt runt kvistar när sådana förekom, se Figur 51. Ett undantag var provkroppen A1a, där sprickan följde en synlig mörk linje precis under hålet i stället för fiberriktningen, se Figur 52.

Enligt teorin förväntas träförbandet uppvisa någon av brottmoderna j , k eller l . Beräkningarna visar att brottmod 'j' är dimensionerande med ett värde på ca 5,9 kN, vilket även bekräftades av de experimentella resultaten. Eurokodens beräkningar gav en uppskattad uppsprickningslast på cirka 8,3 kN för samtliga provkroppar, eftersom metoden endast tar hänsyn till provkropparnas geometri och låter övriga verkande faktorer ingå i konstanten 14 i Ekvation 11. I praktiken visade sig denna uppskattning vara avsevärt högre än de uppmätta medelvärdena för både de acetylerade och de obehandlade provkropparna, och till och med cirka 15 % högre än det högsta uppmätta värdet.

I Tabell 15 redovisas de beräknade värdena på konstanten för de acetylerade respektive obehandlade provkropparna, tillsammans med medelvärde, standardavvikelse och karakteristiskt värde. Resultaten visar att provkroppar med liknande egenskaper kan ge en parameter som är representativ och användbar för samtliga provkroppar inom samma kategori.

FEM-beräkningarna var avgörande för att utveckla provuppställningen. Resultaten gav framför allt vägledning kring mätmöjligheter och hur intryckningen praktiskt kunde registreras. Analysen visade att mätpositionen hade låg känslighet, vilket innebär att hög mätnoggrannhet kunde uppnås även om givarnas position inte var helt exakt. Den visade även att intryckningen under dymlingen kunde bestämmas genom trepunktsböjning, under förutsättning att provkroppens böjning beaktas. Dessutom framkom att mätning från båda kanterna gav nästan identiska resultat, bortsett från en försumbar Poisson-effekt. Dessa faktorer möjliggjorde framtagandet av en fungerande provuppställning och genomförandet av mätningarna, se skiss i Figur 41.

Spänningsanalysen och plasticeringsanalysen stämde väl överens med de experimentella resultaten. Båda analyserna visade att plasticering skulle uppstå lokalt runt dymlingen på den intryckta sidan, och att den maximala plasticeringen uppstår strax till höger och vänster om dymlingen, se Figur 53. Detta överensstämde med samtliga provkroppar, med undantag för A1a som hade tydliga materialdefekter.

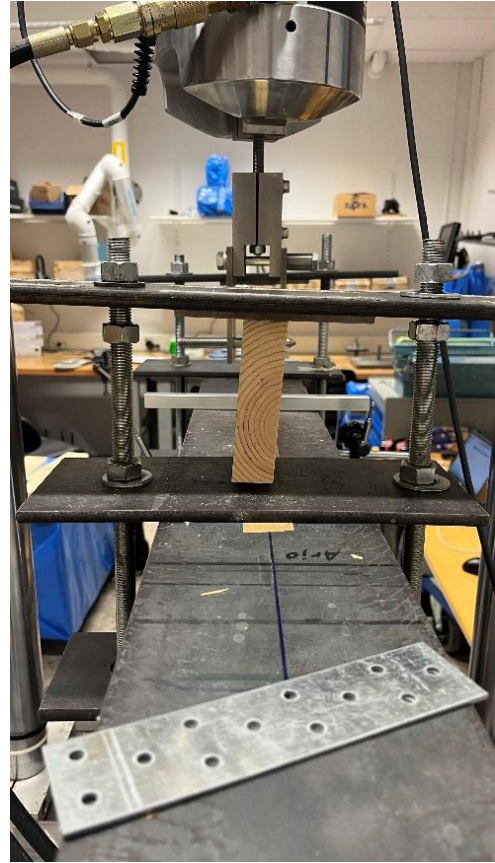
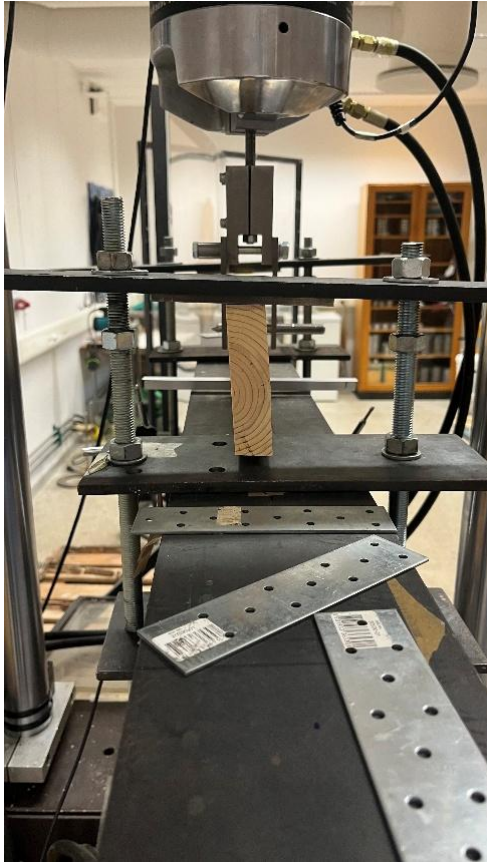
5.4 Felkällor (metodkritik och osäkerhet)

Metoden är i stort sett tillräckligt bra och ger de önskade resultaten. Samtidigt fanns flera potentiella felkällor som kan ha påverkat utfallet. Att placera provkroppen enligt uppställningen i Figur 40 var utmanande, eftersom excentricitet lätt kunde uppstå från olika håll och i olika steg. Det krävdes att provkroppen låg centrerad mot balken som stöden var monterade på, att stöden hade samma höjd och att varje enskilt stöd var identiskt i båda riktningar.

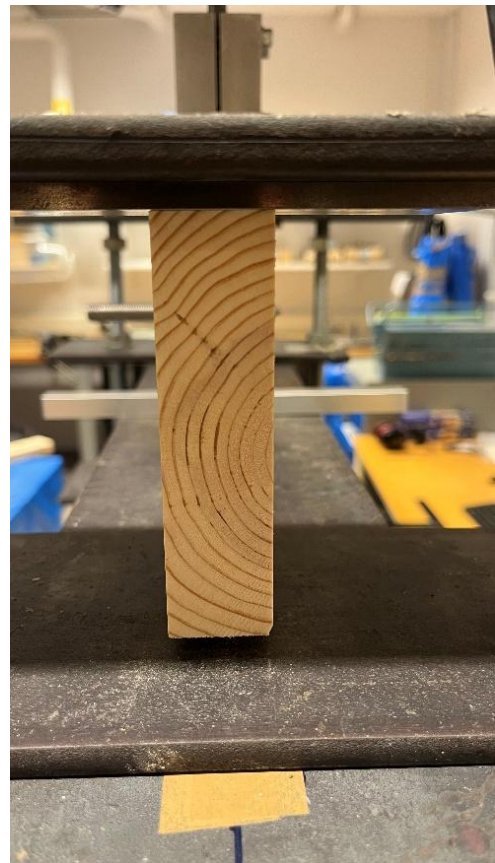
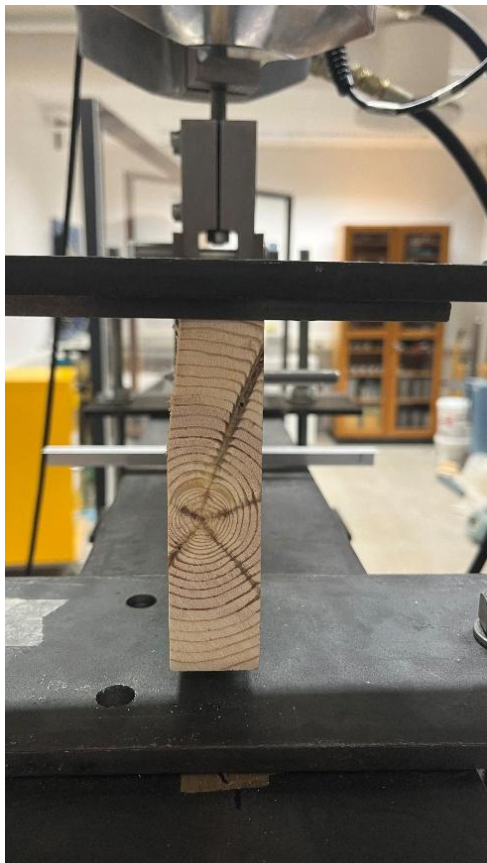
Även stålbitarna som dymlingen passerade igenom behövde vara exakt vinkelräta mot balken och parallella med varandra. Aluminiumdelen som monterades på undersidan var särskilt svår att placera helt centriskt under dymlingen, samtidigt som den behövde vara rätvinklig mot provkroppen i samtliga plan.

De externa deformationsmätarna krävde också en symmetrisk placering för att kunna kompensera för rotation med hög precision. De behövde vara så raka som möjligt, annars kunde en liten vinkel ge upphov till felaktiga registrerade värden.

När det gäller provkropparnas mått fanns ytterligare osäkerheter. Det var svårt att borra hålet exakt centrerat i förhållande till varje provkroppens bredd, och även om excentriciteten mättes kan mätosäkerhet inte uteslutas. Vissa provkroppar var dessutom något ojämnt sågade, vilket gjorde att medelvärden alltid användes för att få så representativa mätvärden som möjligt. Genomförandet och mätningarna utfördes noggrant och kontrollerades på flera punkter per provkropp, men trots detta kvarstod en viss osäkerhet. Detta gäller samtliga manuella mått: volym, vikt, längd, bredd, höjd, diameter och excentricitet. I Figur 54 och Figur 55 nedan visas exempel på provkroppar som var ovanligt sågade.



Figur 54 Utseende defekt, provkroppen A3a har fått en lutning i konsekvens till sågning



Figur 55 Utseende defekt, provkroppen R2b har en förändrad geometri längs höjden

6 Slutsats och framtida arbete

6.1 Slutsats

Med hjälp av FEM-beräkningarna kunde en fungerande provuppställning och tillförlitliga mätmetoder tas fram, vilket gjorde det möjligt att registrera intryckningen redan i det tidiga skedet av belastningen. Även om den framtagna provuppställningen fungerade väl i praktiken, var genomförandet utmanande. Risken för felkällor kopplade till symmetri, excentricitet och mätprecision var påtaglig, vilket krävde noggrann kontroll under hela försöksprocessen.

EC5:s teorier uppvisade tydliga begränsningar och överensstämde inte med resultaten från försöken. Skillnaderna var genomgående stora, både mellan de acetylerade och obehandlade provkropparna och i jämförelse med de beräkningar som utförts enligt EC5. Den fördjupade analysen av konstanten 14 i Ekvation 11 visade att denna parameter varierar mellan de acetylerade och obehandlade provkropparna. Samtidigt finns en fördel i att en experimentellt framtagen konstant, efter införande av en lämplig säkerhetsfaktor, skulle kunna vara tillämpbar för samtliga provkroppar med liknande egenskaper.

Det är dessutom sannolikt att EC5:s teori är utvecklad med utgångspunkt i konventionellt virke, där flera materialparametrar implicit ingår i konstanten 14. Detta innebär att vid användning av andra träslag eller modifierade träprodukter kan ett annat värde än 14 behöva användas för att uppnå en korrekt säkerhetsnivå.

Resultaten visade att acetylerade och obehandlade furuprover i stort sett uppvisade ett liknande beteende under pålastning. Den tydligaste skillnaden var att de acetylerade proverna var styvare, vilket gjorde att de sammantrycktes mindre men sprack vid lägre belastning. De obehandlade proverna deformerades mer men klarade högre spricklaster.

En annan viktig iakttagelse var skillnaderna efter att lastnivån nått sin konstanta fas. Då fortsatte intryckningen att utvecklas tydligt i de obehandlade proverna, medan utvecklingen i de acetylerade proverna gick betydligt långsammare.

Oavsett om de acetylerade eller de obehandlade provkropparna som användes uppstod en form av intryckning. Den var dock betydligt mer uttalad hos de obehandlade proverna, vilket kan ses som positivt eftersom det ger tydligare förvarning innan brott inträffar. Hos de acetylerade proverna var intryckningen däremot betydligt mindre synlig.

Spricklasten visade sig i praktiken vara avsevärt lägre än vad Eurokodens ekvationer anger, både för de acetylerade och de obehandlade provkropparna. Detta indikerar att EC5:s teori inte är anpassad för att bestämma uppsprickningslasten när lasten är placerad mitt i balken. Teorin i EC5 är i stället utformad för att fungera under vissa specifika förutsättningar och är inte generell nog för att vara tillämplig i alla situationer.

6.2 Framtida arbete

Baserat på detta arbete föreslås följande framtida arbeten:

- Fördjupad analys av Eurokodens beräkningsmodeller för uppsprickningslast vid belastning vinkelrätt mot fiberriktningen, med fokus på att utveckla tydligare riktlinjer eller standarder som bättre tar hänsyn till olika träslags materialegenskaper. Syftet är att möjliggöra mer realistiska och tillförlitliga uppskattningar av uppsprickningslasten.
- Undersökning av andra träslag, exempelvis björk, för att se om samma beteenden och trender återfinns även utanför furu.
- Genomförande av försök med varierande fuktkvoter och temperaturer för att studera hur klimatpåverkan förändrar Intryckning och spricklast för olika träslag
- Vidareutvecklande av provuppställningen och mätinstrumenteringen för att minska felkällor och förbättra mätnoggrannheten, exempelvis genom mer robust montering av givare och metoder för att minimera excentricitet.
- Genomförande av parametriska FEM-studier och känslighetsanalyser för att utvärdera effekter av excentricitet, provgeometri, materialvariationer och mätposition.

7 Referenser

CEN (2004). EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization. (Hämtad 2025-09-20).

Fahleson, C. & Utsi, S. (2009).Handledning för sannolikhetsteoretisk dimensionering enligt Eurokod. ProDevelopment i Sverige AB. S. 16(23)-17(23). [TekniskRapport_2009_02](#) (Hämtad 2025-12-27)

Forsman, K. (2020). Fracture behaviour of acetylated wood: Material characterisation and dowel-type connections. [Licentiatavhandling, Byggnadsmekanik]. Division of Structural Mechanics. LTH.

Forsman, K. Serrano, E. & Danielsson, H. (2024). Impact of Acetylation on the Behaviour of Single-Dowel Timber Connections. Buildings. 14(2). 405. <https://doi.org/10.3390/buildings14020405> (Hämtad 2025-09-22).

Fröbel, J. (red.) (2019). Dimensionering av träkonstruktioner – Regler och formler enligt Eurokod 5 – Del 2. Skogsindustrierna. Svenskt Trä.

Fröbel, J. & Bergqvist, P. (red.) (2020). Att välja trä. Skogsindustrierna. Svenskt Trä.

Gajos, K. & Petersson, R. (2019). Bestämning av statiska friktionskoefficienter mellan trä och stål. [Examensarbete, Byggteknik]. Fakulteten för teknik. Linnéuniversitet. (Hämtad 2025-09-26).

Håkansson, M. (Red.) (2000). Skogsencyklopedin. Sveriges Skogsvårdsförbund (numera Föreningen Skogen). Stockholm. [pyrolysis, torrdestillation - Skogen](#) (Hämtad 2025-09-18).

Jensen, Joergen L. Girhammar, Ulf Arne. Quenneville, Pierre. & Källsner, Bo. (2012). Splitting of beams loaded perpendicular to grain by connections – simple fracture mechanics models. World Conference on Timber Engineering. S. 388 – 391. [FULLTEXT01.pdf](#) (Hämtad 2025-12-30).

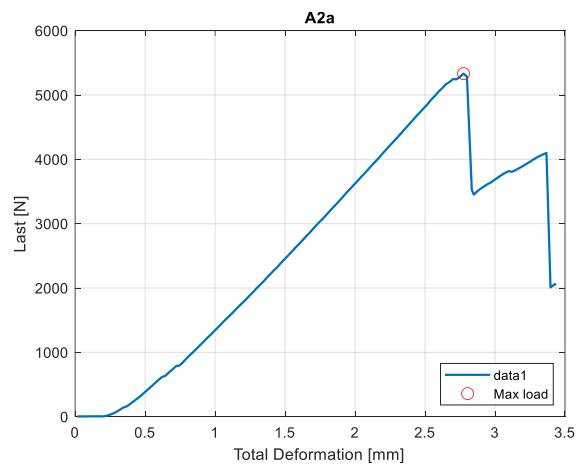
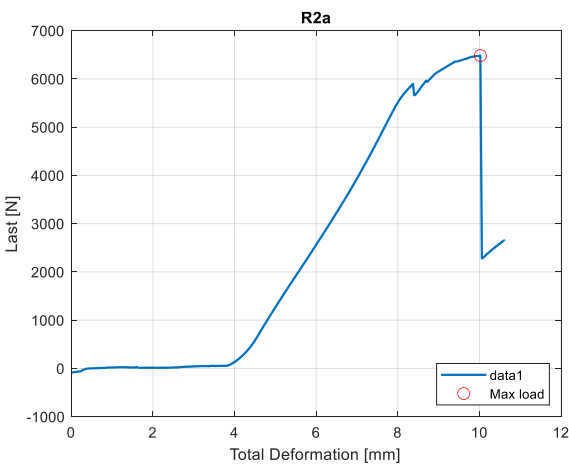
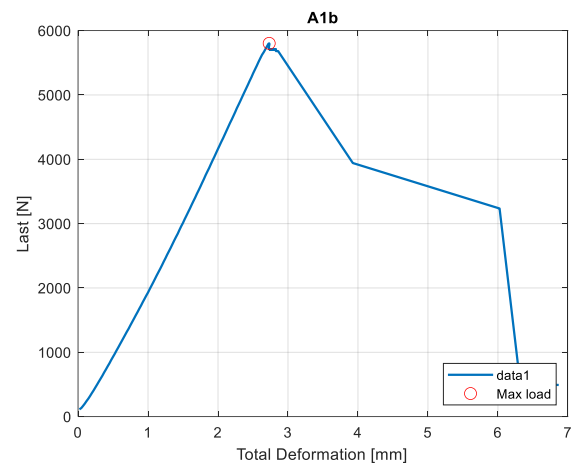
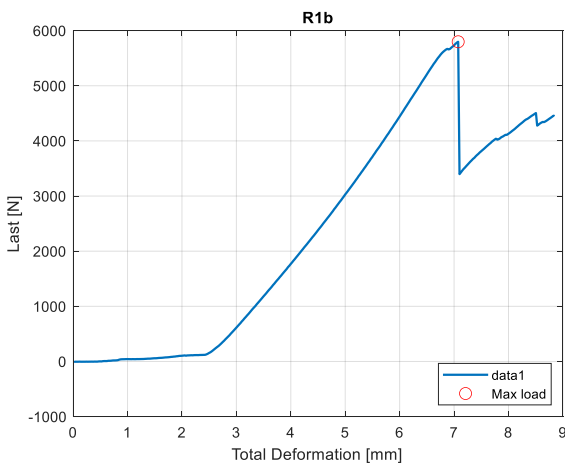
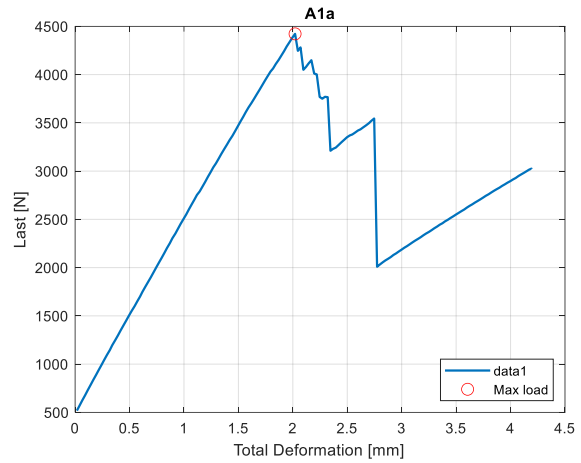
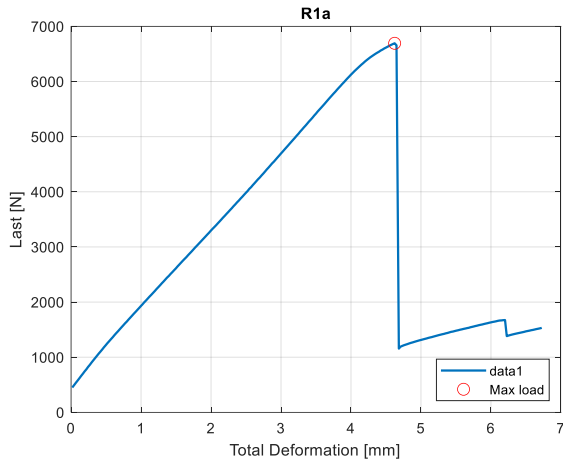
Johansson, M. (2019), Konstruktiva egenskaper för sågat virke och träbaserade kompositprodukter. I: Fröbel, J. (red.) Dimensionering av träkonstruktioner – Projektering av träkonstruktioner – Del 1. Skogsindustrierna. Svenskt Trä. s. 23–53.

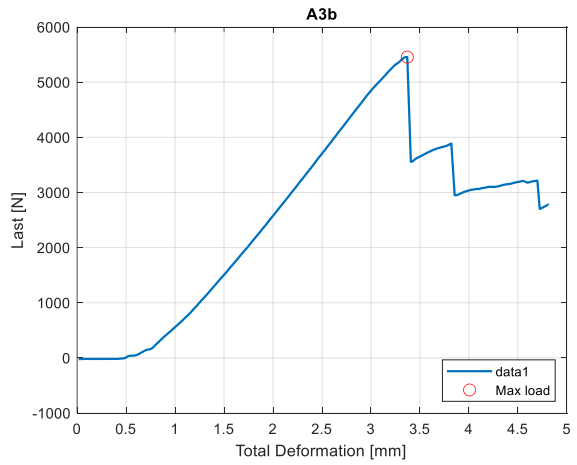
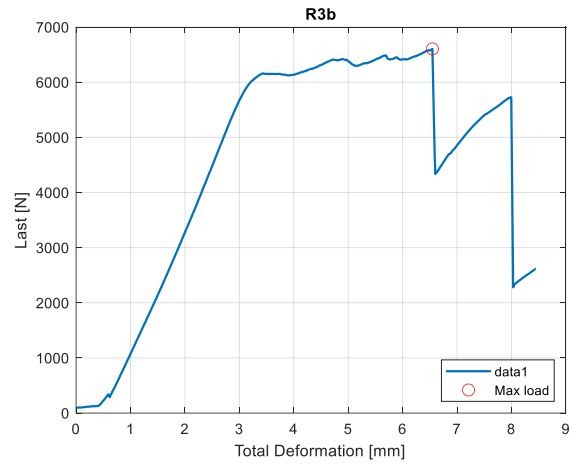
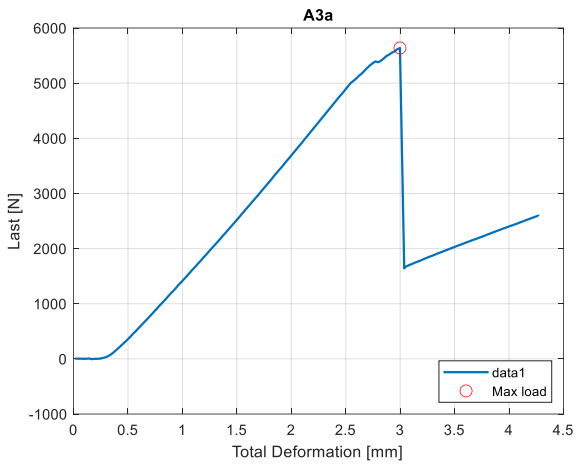
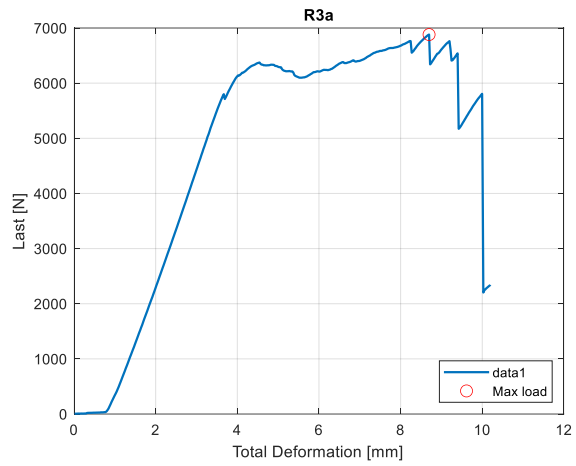
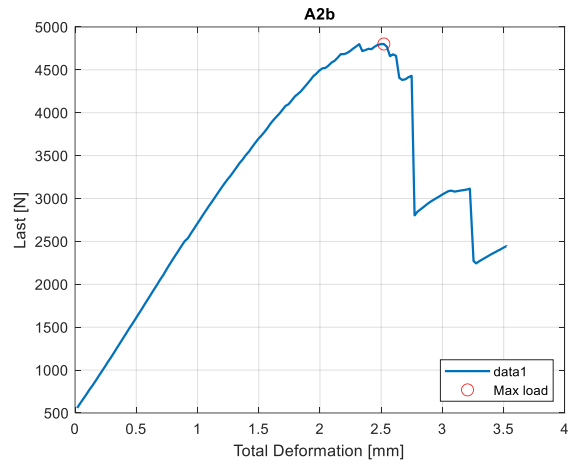
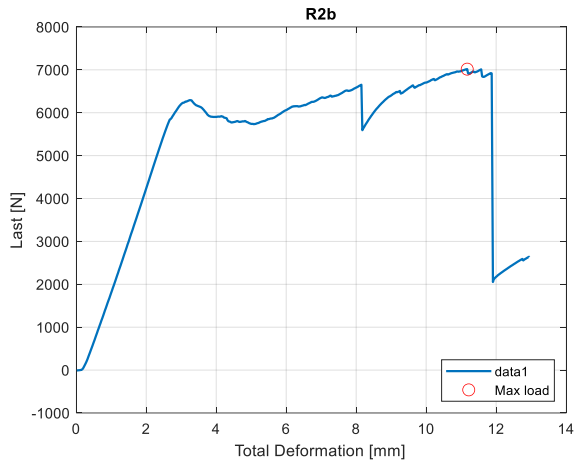
- Lidelöw, H. (2019). Dimensionering av träförband. I: Fröbel, J. (red.) Dimensionering av träkonstruktioner – Projektering av träkonstruktioner – Del 1. Skogsindustrierna. Svenskt Trä. s. 88–114.
- Lyu, Y. (2022). Finite Element Method – Element Solutions. Department of Engineering Mechanics. Dalian University of Technology. Dalian. Liaoning. China.
- Niemz, P. Teischinger, A. & Sandberg, D. (2023). Springer Handbook of Wood Science and Technology. Springer Handbooks. Springer. Cham.
- Persson, J. (2011). Numerical analysis of compression perpendicular to the grain in glulam beams with and without reinforcement. [Examensarbete, Byggt teknik]. Division of Structural Mechanics. LTH. (Hämtad 2025-09-30).
- Persson, K. (2000). Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties. [Doctoral Thesis (monograph). Structural Mechanics]. Division of Structural Mechanics. Lund Institute of Technology.
- Rosengren, M. (2010). Analys av träs tryckhållfasthet vinkelrätt fiberriktningen. [Examensarbete. Byggt teknik]. Division of Structural Mechanics. LTH. (Hämtad 2025-09-26).
- SIS (2022). SS-EN 1993-1-1:2022 Eurokod 3 – Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SLU Riksskogstaxeringen (2025). Produktiv skogsmark. [Produktiv skogsmark | sluse](https://www.slu.se/produktiv-skogsmark) (Hämtad 2025-09-21).
- Svenskt Trä (u.å.). Varför trä? [Varför trä? - Svenskt Trä](#) (Hämtad 2025-09-20).
- Svenskt Trä (u.å.). Träskydd. [Träskydd - Svenskt Trä](#) (Hämtad 2025-09-20).
- Swedish Wood (u.å.). Wood construction cuts climate footprint. [Wood construction cuts climate footprint - Swedish Wood](#) (Hämtad 2025-09-18).
- Vestling, J.K.P. (1999). Högfura eller kärrgran i timrade hus? SLU. s. 150–154. [Vestling_P_1999.pdf](#) (Hämtad 2025-09-23).
- West, C. & Ferguson, T. (red.) (2021). Wood handbook – Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison. WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory.

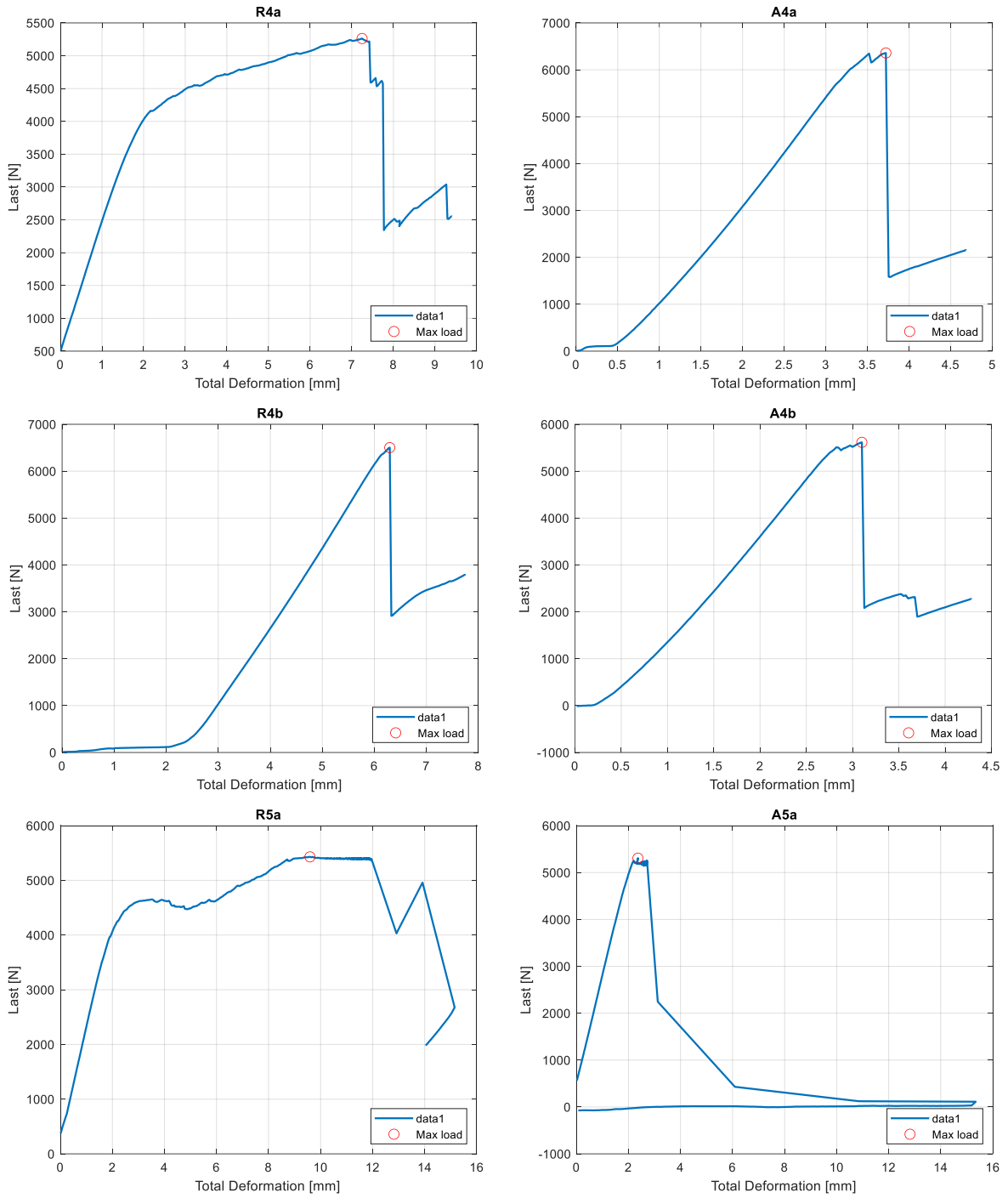
8 Bilagor

MATLAB-koden som användes för dataanalys och diagramgenerering finns bifogad som en separat fil. Excel-filen, som innehåller olika beräkningar och viss hantering av data, finns också bifogad som en separat fil.

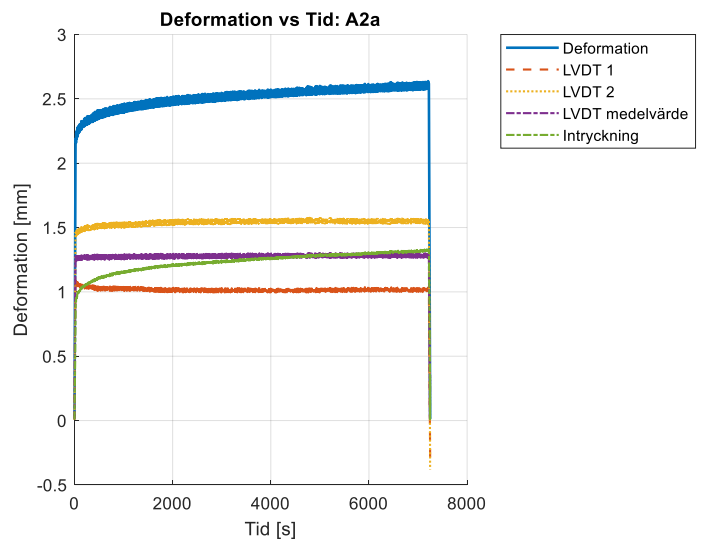
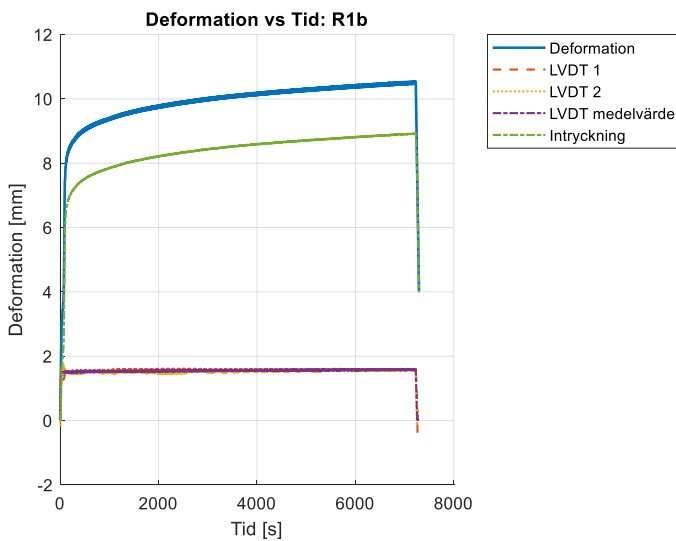
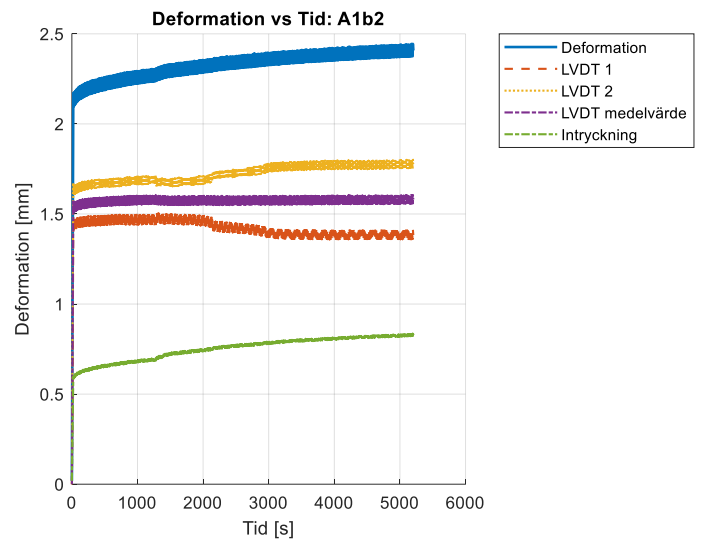
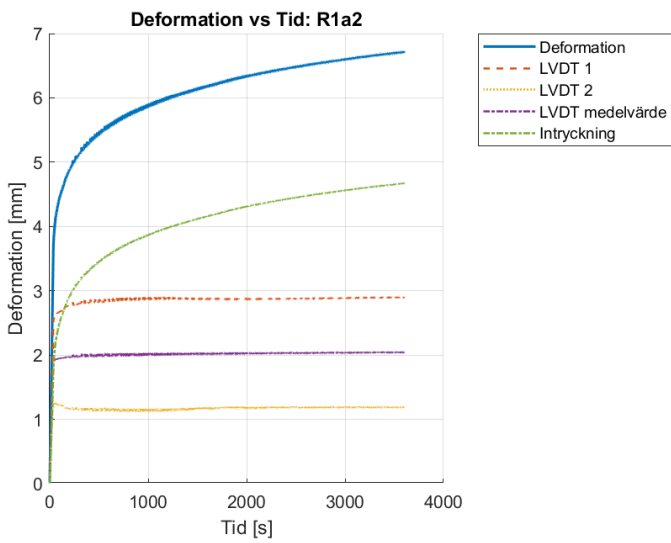
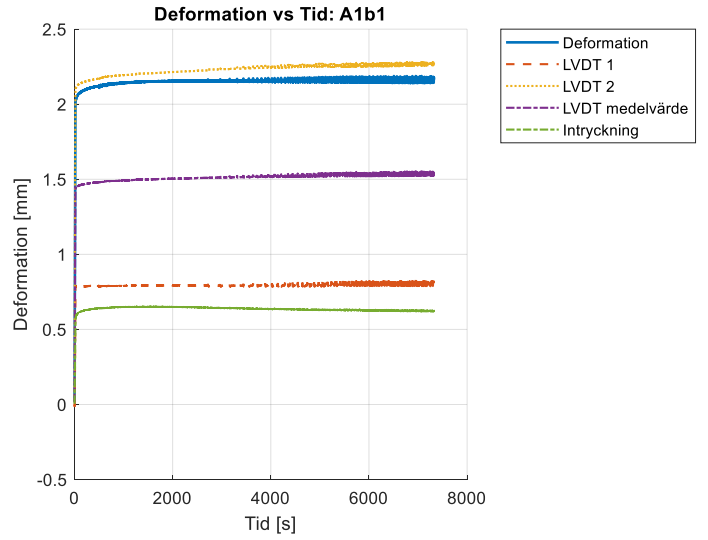
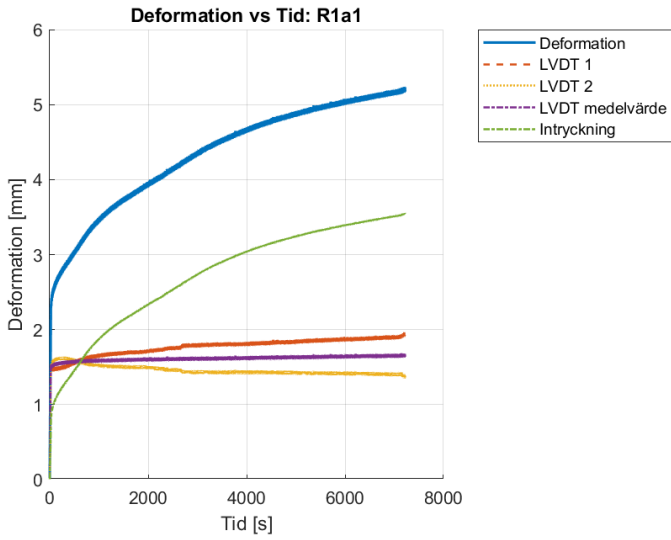
Bilaga A – kompletterande figurer och diagram

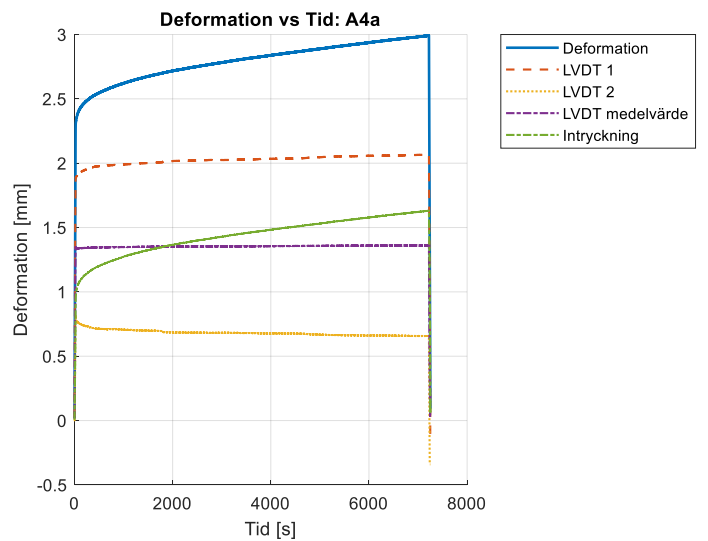
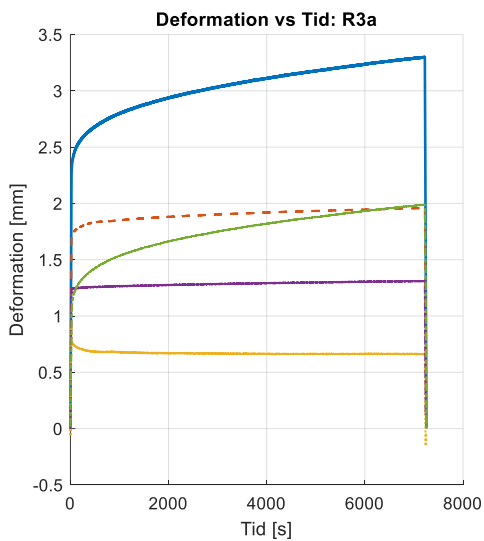
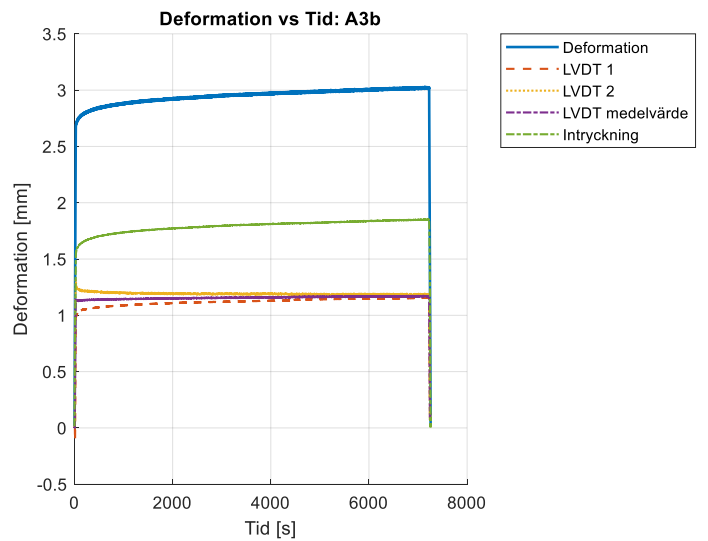
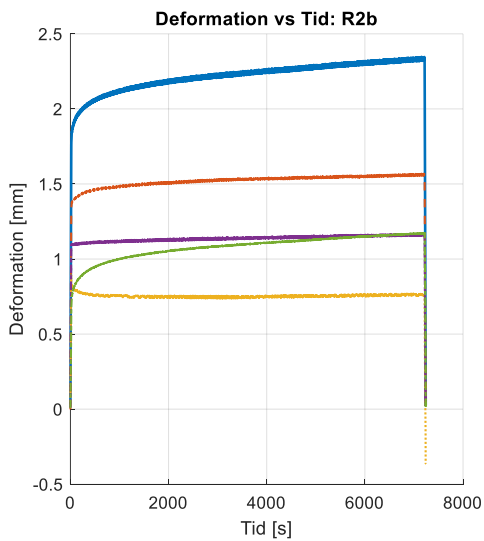
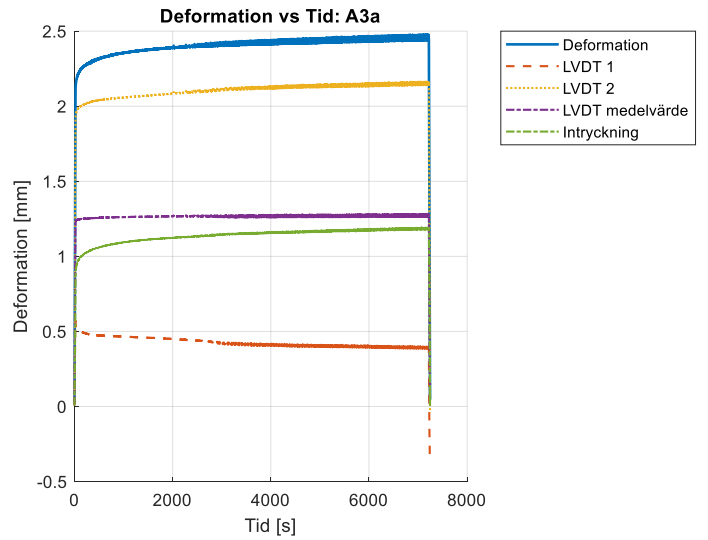
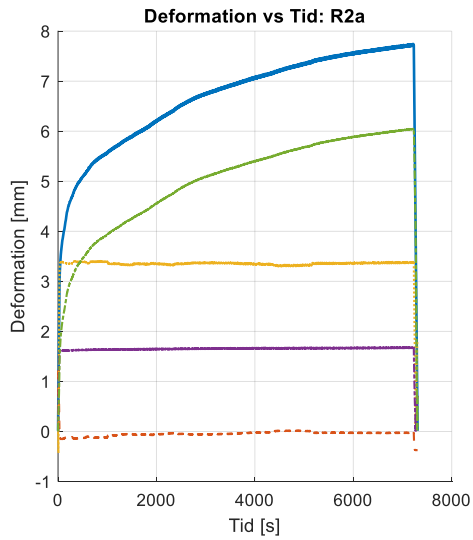


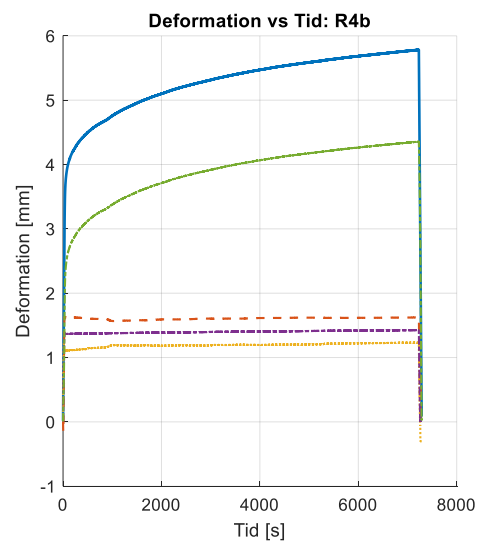
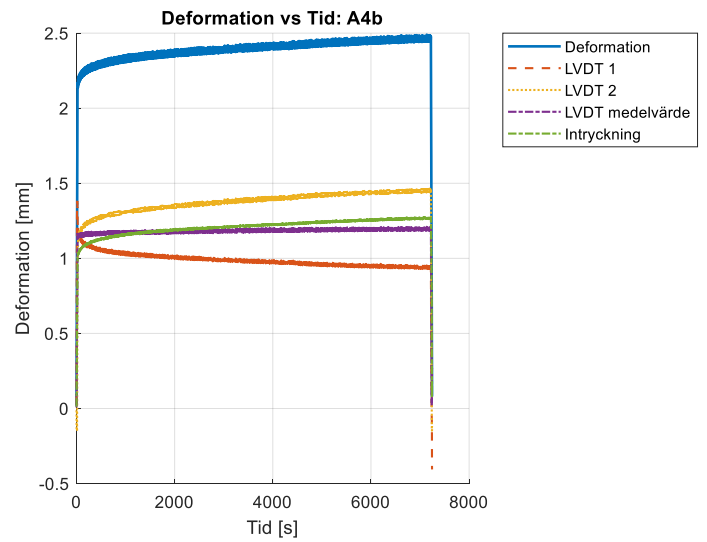
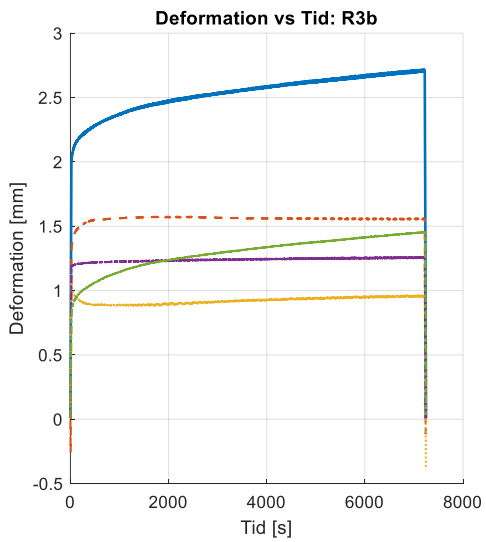




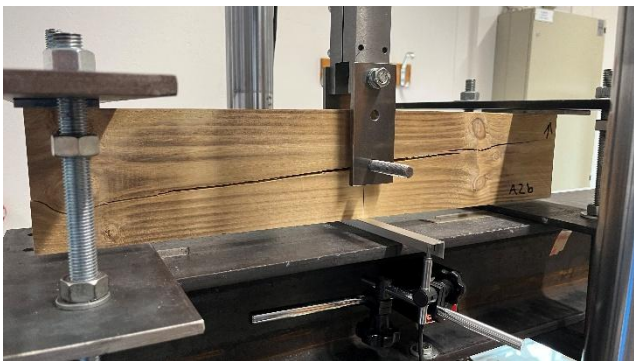
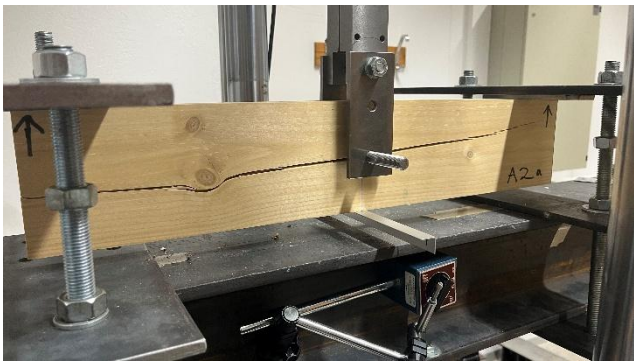
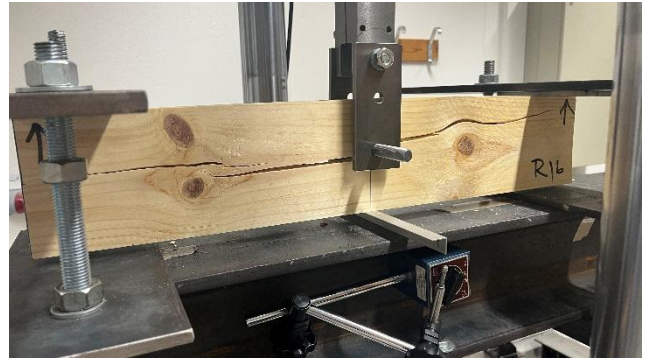
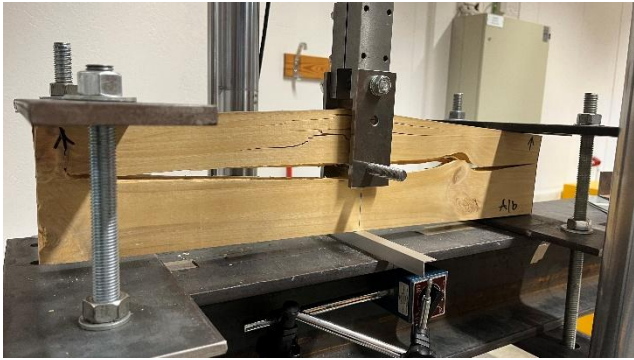
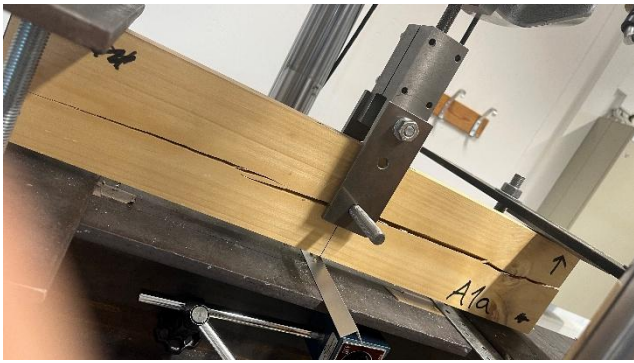
Figur A1. Total deformation-lastkurvor som visar uppsprickningslast för alla provkropparna

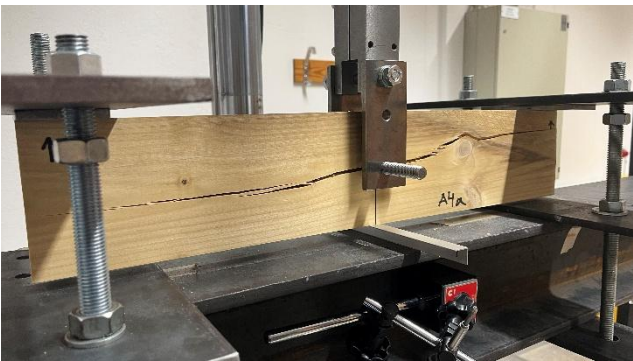
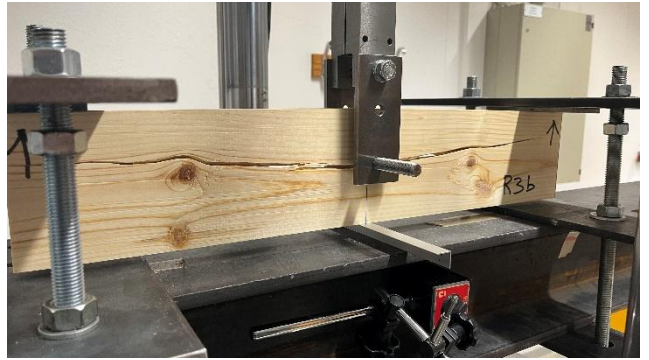
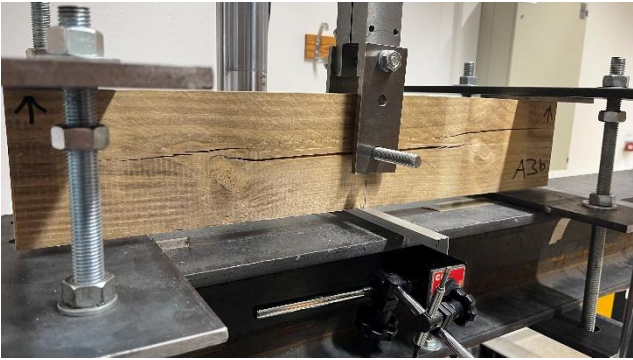






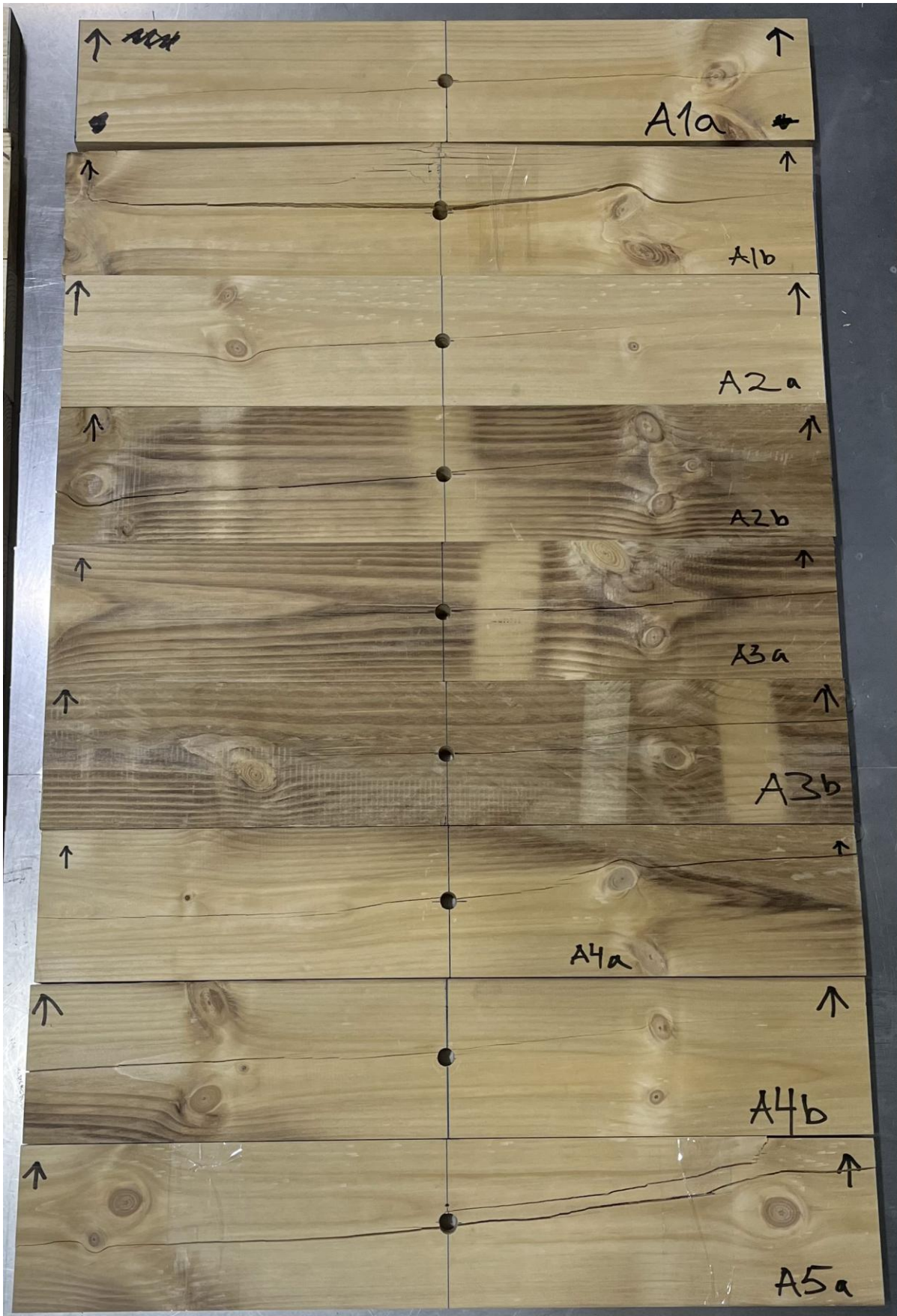
Figur A2. Tids-deformationskurvor för de olika provkroppar (total deformation och intryckning)







Figur A3. Provkropparna efter uppsprickning i provuppställningen





Figur A4. Provkropparna efter uppsprickning



Figur A5. Provkropparna före sågning i förberedande momentet.

