LUND UNIVERSITY

STORLEKSEFFEKTER FÖR BROTTENERGI VID DRAGSPÄNNING VINKELRÄTT MOT FIBERRIKTNINGEN I BJÖRK

NICOLAS JARL

Structural Mechanics

Bachelor's Dissertation

DEPARTMENT OF CONSTRUCTION SCIENCES

DIVISION OF STRUCTURAL MECHANICS

ISRN LUTVDG/TVSM--26/4012--SE (1-40) | ISSN 0281-6679

BACHELOR'S DISSERTATION | EXAMENSARBETE I HÖGSKOLEINGENJÖRSUTBILDNINGEN

STORLEKSEFFEKTER FÖR BROTTENERGI VID DRAGSPÄNNING VINKELRÄTT MOT FIBERRIKTNINGEN I BJÖRK

NICOLAS JARL

Supervisor: **HENRIK DANIELSSON**, Associate Professor, Division of Structural Mechanics, LTH.
Assistant Supervisor: **JOHANNES JONASSON**, Lic in Eng, Division of Structural Mechanics, LTH.
Examiner: Professor **ERIK SERRANO**, 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, June 2026 *(Pl).*

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

Vid många av dagens träkonstruktioner uppstår dragbelastningar vinkelrätt mot fiberriktningen. Detta utgör en betydande risk, både ekonomiskt och säkerhetsmässigt, eftersom brott i denna riktning kan innebära omfattande skador och i värsta fall dödliga utfall. Orsaken är träets markant lägre hållfasthet vinkelrätt mot fibrerna jämfört med parallellt med fibrerna. I dag används främst gran och furu inom byggindustrin. Detta är i sig positivt ur ett klimatperspektiv, då trä har förmågan att lagra koldioxid och därmed kan bidra till att minska de betydande koldioxidutsläppen från den globala byggsektorn.

Samtidigt innebär ett skogsbruk dominerat av monokulturer en långsiktigt ohållbar utveckling, eftersom sådana skogar är mindre stabila och mer sårbara. Ökad biodiversitet i skogsbruket betraktas därför som ett centralt steg framåt. Studier pekar på att björk har positiva effekter på biodiversiteten i det svenska skogsförrådet, samtidigt som dess antal förväntas öka. Dessutom har lövträslaget björk visat sig vara konkurrenskraftigt som konstruktionsmaterial, bland annat vad gäller belastningar vinkelrätt mot fiberriktningen.

I detta examensarbete undersöktes 36 provkroppar av både björk och gran i tre olika dimensioner och insamlad data möjliggör analys av brottenergin för samtliga provserier. De experimentella testerna utfördes enligt Nordtestmetoden, en nordisk standard för trepunktsböjprov.

De experimentella resultaten visade ingen tydlig storlekseffekt för björk. Provkroppar av björk uppvisade dessutom avsevärt högre brottenergivärden jämfört med gran, i genomsnitt cirka tre gånger högre. Båda arterna uppvisade en ökad maximal lastbärande kapacitet med ökande provkroppsdimensioner, även om den relativa procentuella ökningen minskade vid varje ökning av dimensionsstorleken. Björk visade dessutom en något högre andel stabila brottförlopp; dock krävs ett större datamaterial för att kunna dra mer definitiva slutsatser. Följaktligen rekommenderas utökat experimentella studier för att stärka den statistiska tillförlitligheten i dessa resultat.

Abstract

Wood has seen a substantial increase in use within the construction sector over the past decades, predominantly sourced from pine (Pinus sylvestris) and spruce (Picea abies). A shift toward more biodiverse forest management in the Northern Hemisphere would on the other hand contribute to a more sustainable forestry in the long term, increase the forests' immunity to environmental changes and could increase the value of other wood types that have not yet been fully investigated.

In Sweden, birch (Betula pendula) constitutes the third most common tree species, representing approximately 13,1% of the national forest stock. Its relative abundance is projected to rise, positioning birch as a candidate for reducing reliance on monocultural softwood forestry. Previous studies have indicated favourable mechanical properties, suggesting that birch may serve as a viable complement within structural engineering contexts.

Current European design codes are developed based on the mechanical behaviour of dominant softwood species, which implies that established evaluation methods may not be directly transferable to birch. This leads to the need for experimental research to develop a more comprehensive understanding of birch's structural performance and to ensure its safe and reliable implementation in engineered applications.

In this study, 36 spruce and birch specimens across three dimensional size categories were produced and mechanically tested. The Nordtest method—a nordic standardized three-point bending procedure—was employed, providing defined requirements for specimen geometry, laboratory climate conditions, and parameters during test execution. The method enabled the derivation of load–displacement diagrams and fracture energy values, allowing analysis and comparisons to be made.

The experimental results did not reveal any distinct size effect for birch. Both species demonstrated increased maximum load-carrying capacity with larger specimen dimensions, although the relative percentage increase diminished with each increase in dimension size. Birch also showed a slightly higher proportion of stable fracture responses; however, a larger dataset is required to draw more definitive conclusions. Consequently, an expanded experimental study is recommended to strengthen the statistical reliability of these findings.

Förord

Detta examensarbete genomfördes under 2025 vid Avdelningen för Byggnadsmekanik, Lunds universitet, som en del av högskoleingenjörsprogrammet i byggnadsteknik.

Jag vill rikta ett varmt tack till min examinator Erik Serrano samt mina handledare Johannes Jonasson och Henrik Danielsson för möjligheten att genomföra detta examensarbete i nära anslutning till den forskning som bedrivs vid avdelningen för Byggnadsmekanik. Arbetet har varit både utmanande och lärorikt, och det har på många sätt bidragit till att fördjupa och förändra min syn på flera områden. Jag uppskattar ert tålamod, er tillgänglighet och ert engagemang.

Jag vill även tacka Johannes för att ha inkluderat mig i forskningsmiljön och skapat möjligheter att träffa andra studenter och forskare inom byggnadsteknik, särskilt under de gemensamma luncherna där jag fick lära känna flera inspirerande personer.

Ett stort tack riktas även till laboratoriepersonalen för stöd under den experimentella delen av arbetet, särskilt vid träsågning, hantering av MTS-maskinen och andra praktiska moment. Er hjälp, ert sällskap och de trevliga samtalen har gjort arbetet både effektivt och roligt.

Slutligen vill jag tacka Lunds universitet för en givande utbildning och en stimulerande akademisk miljö som möjliggjort detta arbete.

Lund, November 2025.

Nicolas Santana Melo Jarl

Beteckningar och symboler

Latinska bokstäver

A Area [m²]
A_c Brottarea [m²]
E Elasticitetsmodul [Pa]
F Kraft [N]
G_f Brottenergi [J/m²]
h Höjd [m]
h_c Höjd av brottarea [m]
k_h Höjdkorrektionsfaktor [dimensionslös]
L Longitudinell riktning
l Längd [m]
m Massa [kg]
R Radiell riktning
T Tangentiell riktning
u Fuktkvot [%]
u_0 Förskjutning vid brott [m]
W Arbete [Nm]
w Förskjutning [m]

Grekiska bokstäver

σ Spänning [Pa]
ϵ Töjning [%]
ρ Densitet [kg/m³]

Innehållsförteckning

Sammanfattning I
Abstract III
Förord V
Beteckningar och symboler VII
Innehållsförteckning IX

1 Inledning 1

1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte 2
1.3 Metod 2
1.4 Avgränsningar 3

2 Teoretisk bakgrund 5

2.1 Trä 5
2.2 Mekaniska egenskaper hos trä 6
2.3 Fukt i trä 6
2.4 Brottmekanik 7
2.5 Storlekseffekten 10

3 Metod och material 11

3.1 Nordtestmetod 11
3.2 Förberedelse av provkroppar 11
3.2.1 Fuktjämvikt innan limningen 13
3.2.2 Limning 13
3.2.3 Förberedelser för sågning och materialtest 14
3.3 Testuppställning 15
3.4 Databehandling och analys i MATLAB 15
3.4.1 Hantering av data 15
3.4.2 Framställning av diagram 15
3.4.3 Evaluering av stabiliteten 16
3.4.4 Beräkning av brottenergi 16
3.5 Mätningav brott area 17
3.6 Fuktkvot 17

4 Resultat för björk 19

4.1 Brottarea 19
4.2 Brottenergi 19
4.3 Storlekseffekt hos björk 19

5 Resultat för gran 23

5.1 Brottarea 23
5.2 Storlekseffekt hos gran 23

6 Analys och slutsatser 25

6.1 Jämförelse mellan björk och gran 25
6.2 Slutsats och diskussion 29

Referenslista 31

Appendix A Last förskjutnings kurvor 33

Appendix B Dimensioner och vikter 37

1 Inledning

Detta kapitel utgör en historisk bakgrund till arbetet. Relevanta fakta beskrivs i bakgrundsdelen och därefter beskrivs syftet med arbetet, liksom de avgränsningar som gjordes under genomförandet av examensarbetet.

1.1 Bakgrund

På 1800-talet utvecklades flera metoder för att analysera de olika parametrar som påverkar träets mekaniska egenskaper (Bodig and Jayne, 1993). En av dessa parametrar är storlekseffekter på det mekaniska beteendet under belastning. Detta varierar i sin tur beroende på belastningens riktning i förhållande till fibrernas orientering. I många byggnadslösningar är träfibrerna vinkelräta mot belastningen, vilket gör träet sårbart och kräver lösningar för att säkerställa strukturens bärförmåga.

Egenskaper hos träprovkroppar i olika storlekar kan dateras tillbaka till 1700-talet, under vilket den franske upplysningsfilosofen Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707–1788) undersökte skillnader mellan små och stora träprovkroppar (Mai, Schmitt & Niemz, 2021). I dag framstår forskningen inom detta område som ännu mer betydelsefull och relevant för samhället under rådande klimatförändringar.

Under år 2022 stod bygg- och konstruktionssektorn för cirka 33 % av världens totala koldioxidutsläpp (Li et al., 2025). En markant andel av denna utsläppsmängd består av utvinning och produktion av konstruktionsmaterial (Swedish Wood, n.d.). Detta har ökat behovet av hållbara lösningar inom flera områden. Flera studier tyder på att trä kan spela en betydande roll i denna omställningen, främst på grund av dess låga klimatpåverkan och potential att lagra koldioxid.

Den globala timmermarknaden förväntas ökas med en CAGR (Compound Annual Growth Rate) på 9.6 % de kommande åtta åren (Grand View Research, 2025). För att trä ska fungera som klimatneutralt konstruktionsmaterial krävs dock hållbart skogsbruk och biodiversitet, eftersom monokulturer är mer instabila (Hong et al., 2022). I detta sammanhang har lövträslaget björk visat sig vara konkurrenskraftigt både mekaniskt och ekologiskt, vilket ökat intresset för dess användning inom konstruktioner de senaste åren (Jonasson, 2025).

I Sverige idag består 13,1 % av skogsförrådet av björk, medan gran, ett av de dominerande träslaget inom svensk träbyggnation, står för 38,6 % (Skogskunskap, n.d.). Dessutom är björk ett trädslag som är vida spritt över norra halvklotet (Ashburner & McAllister, 2013).

Tidigare forskning har visat potential för användning av björk i bärande konstruktioner. Trots dessa positiva indikatorer påpekar Ödlund att det saknas lämpligt hållfasthetsklassificering och CE-märkning för björk som växer i Sverige (Ödlund, 2009, citerad i Esbjörnsson & Svensson, 2024). Detta försvårar användningen av träslaget inom byggindustrin. Av dessa skäl är det viktigt att forskning bedrivs inom området för att bidra till ett ökat intresse och förståelse för användning av björk inom byggsektorn. I denna studie har provningar avseende dragbelastning vinkelrätt mot fibrernas riktning genomförts, för att bestämma brottenergin och analysera storlekseffekter. Tester har utförts på både björk- och granprovkroppar för att möjliggöra jämförelse av de två träslagens mekaniska egenskaper. Framställning av provkroppar och tester genomfördes i enlighet med Nordtest-metoden, med några mindre anpassningar.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka och analysera brottenergi för björk vid dragbelastning vinkelrätt mot fiberriktningen samt att jämföra resultaten med motsvarande provningar för gran. Speciellt studeras eventuella storlekseffekter på brottenergi. Studien baseras på experimentella tester av totalt 36 provkroppar i tre olika storlekar. För samtliga provningar har last–förskjutningsdiagram framställts och från dessa har brottenergin beräknats, för att möjliggöra en jämförande analys av materialens mekaniska beteende.

Arbetet syftar till att:

- Kvantifiera brottenergin hos gran och björk vid dragbelastning vinkelrätt mot fiberriktningen.
- Analysera skillnader i mekaniskt beteende mellan olika storlekar på provkropparna avseende brottenergi, kraft och förskjutning.
- Jämföra resultaten mellan gran och björk för att belysa eventuella skillnader.
- Bidra med experimentella data som kan användas för vidare forskning kring träkonstruktionens bärförmåga.

Genom dessa undersökningar förväntas examensarbetet öka förståelse för sprödhet och brottbeteende hos gran och björk vid dragbelastning vinkelrätt fiberriktningen, vilket är av betydelse för utvecklingen av hållbara och effektivare träkonstruktioner.

1.3 Metod

För att möjliggöra en systematisk undersökning av björk och gran genomfördes en inledande litteraturstudie med fokus på trä, fuktpåverkan, brottmekanik och andra relevanta faktorer som kan påverka provresultaten.

Examensarbetet genomfördes med riktlinjer baserade på den så kallade Nordtestmetoden, som är en standardmetod för utförande provning och beräkning av den brottenergi för provkroppar med en fördefinierad brottanvisning (ett sågsnitt). Metoden är inriktad på dragbelastning vinkelrätt mot fiberriktningen, vilket är aktuellt för denna studie.

Omkring 50 provkroppar av både björk och gran tillverkades i tre olika storlekar (20×20×20 mm, 40×40×20 mm och 80×80×20 mm) vid Lunds universitets laboratorium för byggnadsmekanik. Dessa sågades och förbereddes för efterföljande provning. Mätdata från provningarna registrerades med en provningsmaskin (MTS) och analyserades i MATLAB för att beräkna brottenergi och maximal kraft. Resultaten sammanställdes i diagram och tabeller, vilket lade grunden för analysen av storlekseffekter och jämförelse mellan träslagen.

Denna översikt ger en introduktion till det experimentella upplägget, medan den detaljerade beskrivningen av material, provberedning, provningsprocedur och dataanalys presenteras i det efterföljande metodkapitlet.

1.4 Avgränsningar

Det experimentella arbetet i denna studie är avgränsat av följande punkter:

- Minimala avvikelser från NordtestMetoden utfördes. Ett exempel är att provkropparnas massa inte ingick i beräkningen av brottenergin. Detta avvek från metoden, men bedöms som försumbar eftersom massan hos samtliga provkroppar var låg.
- Alla delar med kvistar och andra defekter togs bort. Allt trä som testades var alltså fritt från sådana defekter. Provkropparna är alltså inte helt representativa för konstruktionsvirke.
- Granprovningar av små storlek blev borttagna från resultat delen eftersom fel lastcell kopplades till MTS maskinen, vilket gav ett brus i värdena som påverkade de verkliga mätdata.

Vid framställning av diagram av provningarna med provkroppar av gran saknades av okänd orsak mätdata från en provning i stor storlek.

2 Teoretiskt bakgrund

I detta kapitel beskrivs trä och de mekaniska egenskaper som är relevanta för examensarbetet och brottmekaniska principer behandlas som en teoretisk grund för att förstå materialets beteende under belastning, vid sprickinitiering och vid sprickpropagering.

2.1 Trä

Trä är ett anisotropt material som huvudsakligen består av kol (ca 50 %), väte (ca 6 %) och syre (ca 43 %), där den mest betydelsefulla kemiska föreningen är cellulosa, $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Bodig and Jayne, 1993). Cellulosa är en polymer, vilket innebär att den består av långa kedjor av upprepade glukosenheter som ger träets cellväggar hög mekanisk styrka och stabilitet. Den centrala delen av trädet kallas märg, följt av veden, och ytterst återfinns barken. Under träets tillväxt bildas både vårved och sommarved. I vårveden är cellerna större och cellväggarna tunnare jämfört med sommarveden, vilket resulterar i lägre densitet för vårveden. Sommarvedens tätare struktur ger däremot högre densitet och gör att den framstår som mörkare än vårveden.

Träd kan delas in i två huvudkategorier: lövträd (*hardwood*) och barrträd (*softwood*). Barrträd kommer oftast från koniferer, vilka behåller sina barr året runt. Lövträd fäller däremot sina löv årligen. Vid jämförelse kan det noteras att de longitudinella trakeiderna – de smala, långsträckta och döda cellerna – generellt är cirka 75 % kortare i lövträ än i barrträ. Dessutom innehåller lövträd en varierad uppsättning longitudinella celler, såsom kärl och fibrer, vilket bidrar till ökad mekanisk styrka. Dessa strukturella skillnader gör att lövträ generellt är starkare än barrträ, enligt Schmulsky (2019).

Schmulsky (2019) anger dessutom att märgstrålar (*ray cells*), som transporterar näringsämnen i horisontell riktning i stammen, utgör cirka 5–7 % av volymen i barrträd (*softwoods*). I lövträd (*hardwoods*) uppgår den genomsnittliga volymen av märgstrålar istället till cirka 17 % av den totala volymen. Detta bidrar till en högre övergripande mekanisk styrka.

Mer generellt är hållfastheten hos trä ungefär proportionell mot träets densitet i absolut torrt tillstånd. Träets böjhållfasthet påverkas dessutom starkt av temperaturen. Detta beror på att ligninet mjuknar vid ökande temperatur, vilket minskar fibrernas styvhet (Bodig och Jayne, 1982, s. 447).

I detta examensarbete kommer gran (*Picea abies*) och björk (*Betula pendula*) att analyseras med avseende på deras mekaniska egenskaper och brottbeteende. De två träslagen skiljer sig markant, vilket påverkar hur de reagerar under belastning. Gran är ett barrträd (*softwood*) och innehåller en enkel struktur med långsträckta trakeider och en låg andel märgstrålar, vilket ger en låg densitet och begränsad draghållfasthet tvärs fiberriktningen. Björk är ett lövträd (*hardwood*) som uppvisar en mer komplex cellstruktur med kärl, fibrer och en högre andel märgstrålar (ca 17 % av volymen) som är tätare, vilket resulterar i högre densitet, större styvhet och förbättrad förmåga att motstå spänningar.

Eftersom trä är ett heterogent material, varierar densiteten mellan olika träd och inom ett träd. Därav dokumenterades densitetet av alla provkroppar som testades under processen.

2.2 Mekaniska egenskaper hos trä

Brott i träkonstrukioner uppstår i praktiken främst till följd av dragspänning vinkelrätt mot fiberriktningen (Thelandersson & Larsen, 2003). Detta kan kopplas till trädets anisotropa natur och dess evolutionära bakgrund, där materialet har utvecklats för att optimalt motstå belastningar såsom gravitationskraften under sin livstid, samt för att möjliggöra effektiv transport av vatten och näringsämnen (Thelandersson och Larsen, 2003, s. 15). Denna anpassning har medfört att träets mikrostruktur är utformad för att maximera styrkan i fiberriktningen, medan styrkan i andra riktningar är avsevärt lägre. Trädets evolutionära utveckling har därmed resulterat i att dess fysikaliska egenskaper varierar beroende på belastningsriktning.

Trots detta, menar Thelandersson att den nuvarande förståelsen av brottprocesser vid belastning vinkelrätt mot fiberriktningen fortfarande är begränsad. Å andra sidan är det känt att belastningens varaktighet har stor betydelse för materialets hållfasthet. För massivt trä kan styrkan minska med upp till 40 % efter en belastningstid på 40 år (Thelandersson och Larsen, 2003, s. 21).

En annan betydande faktor för det mekaniska beteendet hos trä är dess hygroskopiska egenskaper, alltså dess förmåga att absorbera och avge fukt, vilket är en direkt följd av dess porösa struktur. Trä interagerar kontinuerligt med fuktigheten i luften, vilket innebär att fuktkvoten i materialet varierar. Detta i sin tur påverkar både dess hållfasthet och styvhet, som beskrivs närmare i kapitel 2.2. Sven Thelandersson och Larsen (2003, s. 20) menar att förekomst av ytsprickor i träelement, orsakade av fuktinducerade spänningar, är mycket vanligt förekommande.

2.3 Fukt i trä

Trä är ett material där hållfastheten och andra mekaniska egenskaper är starkt påverkad av fuktinnehållet. Träets hygroskopiska natur, gör att fukt inom materialet blir en viktig aspekt att ta hänsyn till vid till exempel dimensionering av bärande konstruktioner. Fuktinnehållet i träkomponenter påverkar de mekaniska egenskaper betydligt (Bodig & Jayne, 1982). Dessutom kan hög nivå av fukt inom träets organiska struktur innebära snabb försämring av de mekaniska egenskaperna (Bodig & Jayne, 1982). Detta beror delvis på påverkan av fukt i graden av anfall av svamp och insekter.

Fuktnivå i trä avgörs av omgivningens relativ fuktighet och temperatur (Bodig & Jayne, 1982). Samtidigt förändras även träets sprödhet som en funktion av fuktnivån, där lägre fuktkvot tenderar att ge ett mer sprött brottbeteende.

Fuktjämviktsnivån i trä beror på om trädet förlorar (desorption) eller absorberar (adsorption) fukt från omgivningen för att uppnå jämvikt med den omgivande relativa luftfuktigheten. Detta fenomen kallas hysteres (Bodig & Jayne, 1982). Under fibermättnadspunkten gäller generellt att hållfastheten minskar med ökande fuktkvot.

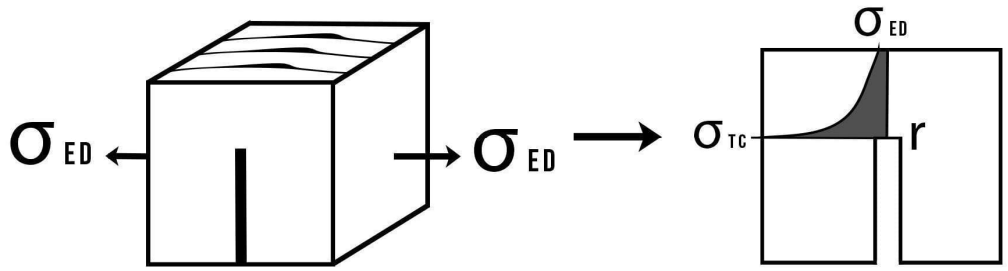
Fukttransporten i trä sker lättare i fiberriktningen än tvärs fiberriktningen. Om trä lagras under olämpliga förhållanden före sågning kan porstrukturen påverkas, vilket leder till att kärl- och ringporer öppnas i större utsträckning och därmed ökar materialets permeabilitet. Vid en fuktkvot på cirka 28–30 %, motsvarande fibermättnadspunkten, är cellväggarna fullständigt mättade med bundet vatten. Vatten utöver denna fuktnivå påverkar inte träets mekaniska egenskaper, såsom hållfasthet och rörelse. Kombinationen av träets höga hygroskopiska egenskaper – förmågan att ta upp och avge fukt från omgivande luft – och dess låga ångpermeabilitet, särskilt vinkelrätt mot fiberriktningen, innebär att materialet kan betraktas som fukttrögt.

Enligt Bodig och Jayne (1982) tyder evidens på att högre nivåer av relativ fuktighet tenderar att försvaga de molekylära bindningarna mellan fibrerna och träpartiklarna. I genomsnitt har en minskning av fuktkvoten med 1 % under fibermättnadspunkten visat sig öka hållfastheten vid drag vinkelrätt mot fiberriktningen med cirka 1,5 %.

2.4 Brottmekanik

Brottmekanik beskrivs som vetenskapen om hur och när material brister och brott uppstår (Wadsö, 2016, s. 155). Vid jämförelse mellan en provkropp med en skåra eller spricka och en utan skiljer sig spänningsfördelningen avsevärt. Den maximala spänningen vid skårans spets kan approximativt uttryckas som en funktion av spetsens radie, under antagandet att materialet är linjär-elastiskt. Spänningskoncentrationen kan bli mycket hög, och enligt Wadsö vid minskning av skårans radie (r) närmar sig spänningen oändligheten i ett idealiserat linjär-elastiskt material.

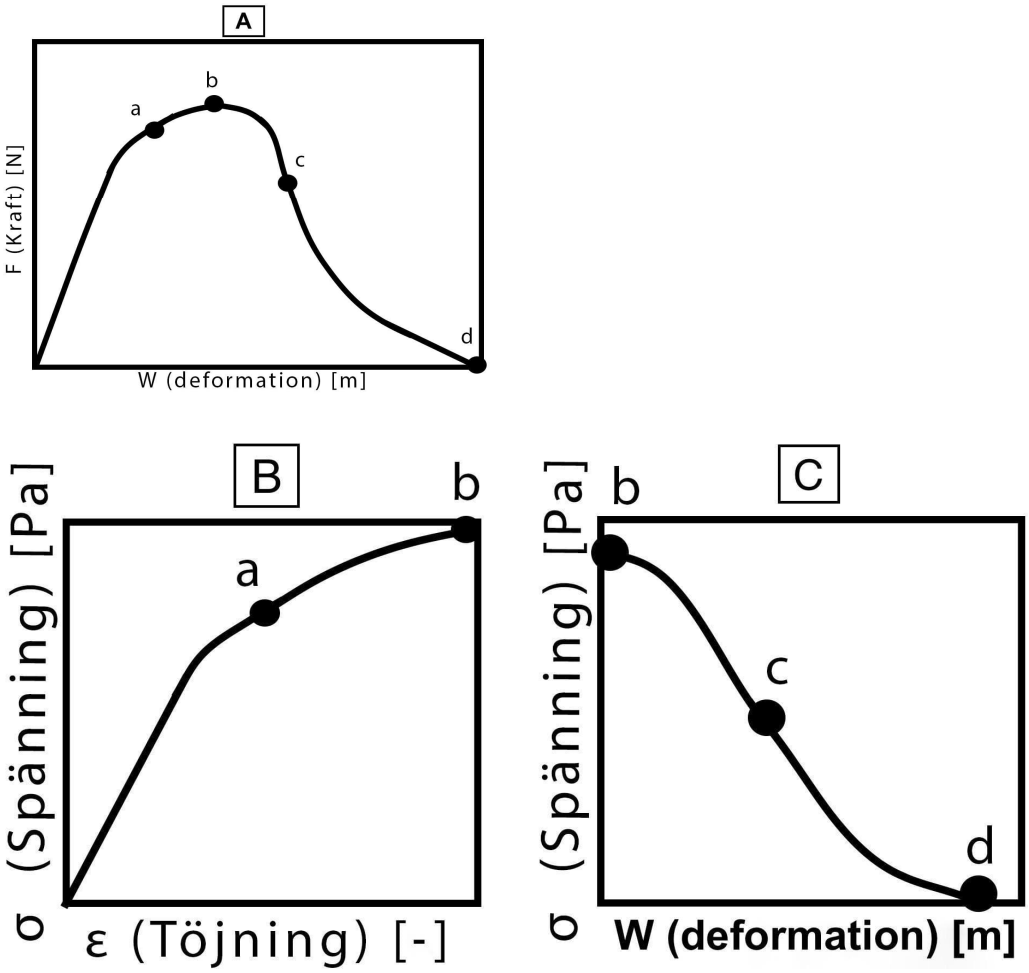
Närvaron av en skåra i materialet medför alltså spänningskoncentration, och utformningen av skåran påverkar koncentrationens grad. Ett runt hål till exempel orsakar betydligt mindre spänningskoncentration än ett hål med kvadratisk form med skarpa hörn.



Figur 2.4 Figuren visar spänningskoncentrationen i det svartfärgade området vid sprickspetsen. σ_{ED} står för en jämnt fördelad spänning och σ_{TC} är spänningen vid sprickspetsen.

Begrepp inom brottmekanik kan beskrivas och förklaras med hjälp av en fiktiv deformationsstyrd provning av en dragbelastad stång, med kraft-deformationssamband enligt figur 2.5 A. Deformationen ökar (linjärt eller olinjärt) med ökande belastning tills materialets hållfasthet uppnås vid punkt b. När hållfastheten uppnås uppstår en brottzon (skadezon) någonstans längs med stången. Inom denna zon bryts materialet ner och förmågan att överföra spänningar minskar med ökande deformation. Materialets beteende kan beskrivas med två olika materialsamband: ett spänning-töjningssamband som beskriver materialets beteende utanför brottzonen (delfigur B) och ett spänning-deformationssamband som beskriver materialets beteende inom brottzonen (delfigur C).

Om det dragbelastade elementet påtvingas ytterligare deformation efter läget b (där hållfastheten uppnås och en brottzon initieras) kommer deformationen inom brottzonen att öka och spänningen minska. Materialet utanför brottzonen avlastas samtidigt, dvs både töjningen och spänningen minskar.



Figur 2.5. Kraft-deformations- och och spänning-töjningsdiagram av utveckling av ett brott.

Vid det maximala spänningsläget (punkt b) finns mekanisk energi lagrad i provkroppen. Om mer elastisk energi finns lagrad i provkroppen utanför brottzonen än som behövs för att fullständigt brott ska ske, sker brottet på ett plötsligt och okontrollerat sätt, vilket benämns sprödbrott (*brittle*

fracture). Om den lagrade mekaniska energi däremot inte är tillräckligt stor kan deformationen ökas på ett kontrollerat sätt och brottet sker gradvis (enligt Figur 2.5), vilket benämns segt brott (*ductile fracture*).

Arean under spänning-deformationskurvan benämns som brottenergi och betecknas G_f (enhet N/m, Nm/m^2 eller J/m^2). Matematisk kan brottenergin alltså beskrivas enligt:

$$G_f = \int \sigma(w)dw \tag{2.1}$$

Som tidigare nämnt kan brott vara sprött eller ske gradvis. Vid dimensionering av strukturer önskas segt brott. Sambandet som beskriver när brottförloppet för provkroppen i Figur 2.5 är sprött kan, för ett linjärelastiskt material med linjärt mjuknande, beskrivas enlig:

$$\frac{L\sigma_t^2}{2E} > G_f \tag{2.2}$$

där σ_t är materialets draghållfasthet, E är materialets elasticitetsmodul och L är provkroppens längd. Som formeln beskriver, beter sig provkroppen annorlunda beroende på längden, L. Detta visar tydligt kopplingen av storlekseffekten till mekaniskt brottbeteende.

När trä används för bärande ändamål, utförs oförstörande utvärderingarna av träets hållfasthet. Exempel på oförstörande metoder är maskinell sortering (*machine grading*) eller visuell sortering (*visual grading*). För att direkt bestämma hållfasthet eller brottenergi hos olika material kan också förstörandet testmetoder användas. Ett exempel på en sådan metod är böjprovning genom trepunkts böjning, som är aktuellt för detta examensarbete och utfördes i enlighet till Nordtestmetoden. Testuppställningen beskrivs mer i detalj i kapitel 3.2.

För att kunna bestämma brottenergi och kontrollera brottförloppet kan provkroppar med fördefinierade skåror/sprickor användas. När provkroppen utsätts för belastning initieras en brottzon och inom denna zon minskar materialets förmåga att överföra spänningar vid ökande deformation. Kan provningen genomföras med stabil sprickpropagering och utan att spröda brott och instabilitet uppstår kan denna typ av provningsmetod användas för att bestämma ett materials brottenergi.

Från tidigare studier har densiteten av olika träslag visat sig ha betydlig effekt i resulterande brottenergi. Detta har tagits till hänsyn genom att mäta noggrant vikten på samtliga provkroppar, under och efter framställningen. Även belastningshastigheten vid provning kan påverka den uppmätta brottenergin.

2.5 Storlekseffekten

Ju mindre provkropparna är, desto högre mekaniska egenskaper uppvisar trä, enligt *Mechanical Properties of Wood* (Arriaga *m.fl.*, 2023). Detta fenomen förklaras av den så kallade storlekseffekten. Tidigare observationer tyder på att denna effekt är särskilt framträdande vid spröda brott (under dragbelastning både parallellt och vinkelrätt mot fiberriktningen).

En av förklaringarna till detta är att mindre provkroppar har en lägre sannolikhet att innehålla defekter, vilket resulterar i högre hållfasthet eftersom brott vanligtvis initieras vid dessa svaga punkter där de maximala spänningarna koncentreras. När provkroppens storlek ökar, ökar också antalet defekter, vilket leder till en reducerad hållfasthet (Arriaga et al., 2023, s. 157). Ett exempel på detta är att glasfiber uppvisar betydligt högre styrka än massivt glas, och att pianotråd är starkare än stål i bulkform (Arriaga et al., 2023, s. 157).

Inflytandet av volym kan förklaras med den så kallade *svagaste-länken*-teorin, som utvecklades av Weibull år 1938 (Arriaga et al., 2023, s. 170). Volymeffekten innebär dessutom att defekter, såsom sprickor, i större provkroppar tenderar att vara både fler och större. Storlekseffekter avseende bärförmåga kan också förklaras enligt brottmekanik.

Ett sätt att hantera storlekseffekter vid konstruktionsberäkningar är genom faktorer som finns i den europeiska standarden Eurokod 5 – Design of Timber Structures (EN 1995-1-1). Den karakteristiska hållfastheten justeras beroende på värdet som erhålls från olika ekvationer för höjdkorrektionsfaktorn k_h, som beror på det betraktade elementets djup eller bredd. Nedan visas de gällande uttrycken för höjdkorrektionsfaktorn k_h enligt Eurokod 5 för böjning och dragbelastning parallellt med fiberriktningen av konstruktionsvirke:

för $h < 150$ mm $$k_h = min\left\{\left(\frac{150}{h}\right)^{0.2}, 1.3\right\} \quad (2.3)$$

för $h \geq 150$ mm $$k_h = 1 \quad (2.4)$$

3 Metod och material

Alla provningar utfördes enligt Nordtestmetoden NT Build 422 (Nordtest, 1993). I detta kapitel beskrivs metoden, förberedelse av provkroppar, testuppställningen, framställning av resultatdiagram och alla anpassningar som avviker från Nordtestmetoden.

3.1 Nordtestmetoden

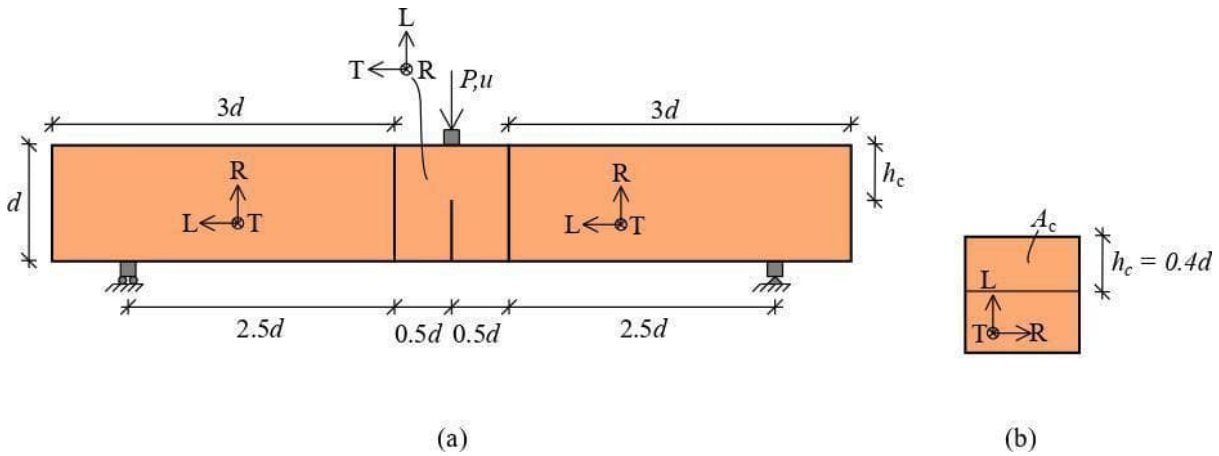
Nordtestmetoden NT BUILD 422 är en standardiserad metod som godkändes 1993 för att bestämma brottenergin hos trä vid drag vinkelrätt mot fiberriktningen. Metoden bygger på ett trepunkts böjprov av en ihoplimmad träbalk med en fördefinierad spricka/skåra vid mittsnittet. Vid provning registreras last–deformationskurvan kontinuerligt fram till brott. Före provningen konditioneras alla provkroppar till 20 °C och 60 % relativ luftfuktighet, och en sågskåra görs i mittdelen längs fiberriktningen för att initiera sprickan.

Brottenergin, G_f, beräknas som summan av det mekaniska arbetet som utförts av mittpunktskraften, W, och arbetet från provets egenvikt, dividerat med arean för brottytan. Metoden ger en tillförlitlig beskrivning av träets brottenergi och möjliggör jämförelser mellan olika träslag och fuktnivåer under standardiserade laboratorieförhållanden. Arbetet på grund av provets egentyngd har inte tagits med i denna undersökning, då denna är för liten för ha någon avgörande påverkan.

3.2 Förberedelse av provkroppar

Förberedelsen av provkropparna inleddes med att träplankorna sorterades efter sitt respektive träslag. Varje planka tilldelades ett unikt ID-nummer för att möjliggöra spårbarhet under hela processen. Därefter hyvlades plankorna med en hyvelmaskin och sågades till stavar, vilka utgjorde grunden för tillverkningen av de individuella provkropparna.

Hyvlingsprocessen för de individuella gran- och björkprovkropparna påbörjades genom framställning av längre stavar. Därefter analyserades varje stav med avseende på fiberriktningens rakhet för att identifiera de zoner med minst fiberavvikelse. Detta för att bestämma vilka delar som skulle utgöra mittdelen, alltså delen med sågsnitt och brottområdet. Kvistar undveks vid urvalet av mittdelarna för att undvika påverkan på provningsresultaten, i enlighet med avsnitt 2.4 om brottmekanik. Utifrån denna bedömning bestämdes vilka delar som skulle sågas ut som mittstycken respektive sidostycken.



Figur 3.1 Figuren visar förhållande mellan sidodelarna och mitten delen. Figuren är tagen ifrån *Jonasson* (2025).

Figur 3.1 visar provkropparnas förhållande i dimensioner för bredd, höjd och djup enligt de riktlinjer som fastställs i Nordtestmetoden. Enligt denna metod ska mittstyckena ha dimensionen *d*×*d*, medan sidostyckena ska ha dimensionerna 3*d*×*d*. För både gran och björk var de aktuella *d* värde följande:

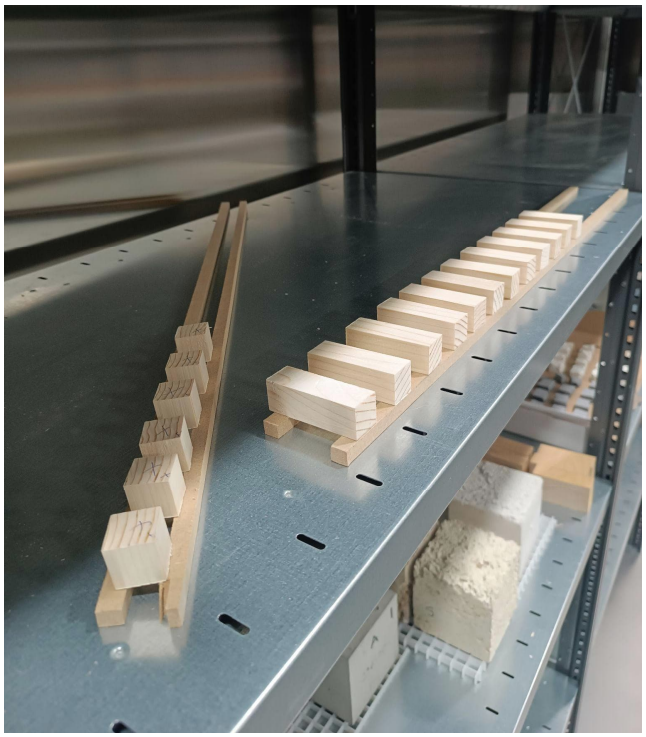
- Små provkroppar: *d* = 20 mm
- Medelstora provkroppar: *d* =40 mm
- Stora provkroppar: *d* = 80 mm

Bredden för alla provkropparna var konsekvent *d* = 20 mm.

Figur 3.2 Figuren visar provuppställningen i labbet med MTS maskinen förbered.

3.2.1 Fuktjämvikt innan limningen

Efter sågning placerades bitarna i ett klimatrum, där den relativa fuktigheten var 60% och temperaturen 20 grader Celsius. Provkropparna vägdes dagligen med en PG503-S våg, som har en noggrannhet på tre decimaler (gram). För att möjliggöra att fukten från rummet kunde tränga in i eller avges från samtliga sidor under väntetiden, placerades provkropparna på ett träupplag, vilket också illustreras i figur 3.2 nedan.



Figur 3.2 Figuren visar mitt- och sidodelar av nyligen sågat granvirke, placerade på träupplag.

För att en provkropp ska nå fuktjämvikt ska förändringen i massa vara mindre än 0.1% i ett intervall av 24 timmar. Detta beskrivs i detalj i Nordtestmetod. Alla provkroppar numrerades systematiskt och vägdes dagligen tills de uppnådde fuktjämvikt i enlighet med Nordtestmetodens riktlinjer för bestämning av fuktjämvikt.

3.2.2 Limning

När provkropparna hade uppnått fuktjämvikt inleddes limningsprocessen. Innan limning markerades sidorna av provkropparna med en penna. Därefter applicerades Trälim D3 UDE (Dana Lim) på de markerade sidorna och limtvingar användes för att pressa ihop bitarna för att säkerställa en stark limfog. Torktiden för limmet kontrollerades för att säkerställa att limningen hade fullföljts korrekt. Provkropparna torkade ungefär 15 minuter i genomsnitt, i samma rum som de limmades i. En bild som illustrerar limningen och tvingarna återfinns nedan.

Därefter placerades provkropparna åter i klimatrummet för att säkerställa att de återigen nådde fuktjämvikt innan testningen påbörjades.

Figur 3.3 Figuren visar limningen av en liten granprovkropp med tvingar.

3.2.3 Förberedelse för sågning och materialtest

Efter limning och uppnådd fuktjämvikt markerades bitarna med både penna och linjal för att underlätta deras placering i provuppställningen (i MTS-maskinen). Mitten markerades på ovansidan av varje provkropp för att förenkla korrekt placering av punktbelastning från provningsmaskinen. En linje markerades också på avståndet 0,5*d* från botten på mittstyckena enligt figur 3.1 för att exakt ange var sågsnittet skulle göras.

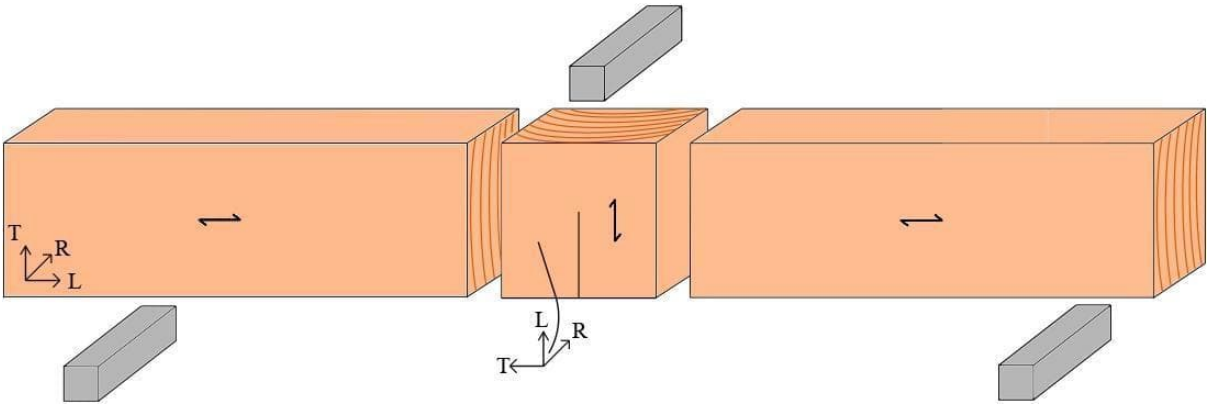
Provkropparna packades i plastpåsar innan de togs ut från klimatrummet. Detta gjordes för att förhindra uttorkning eller uppfuktning av provkroppar utanför klimatrummet.

De sex individuella provningserierna (tre olika storlekar för gran respektive björk) provades separat. De sex provkropperna i varje serie togs först till verkstaden där den fördefinierade skåran sågades. Därefter fördes provkropparna till provningsrummet där de, en i taget, placerades försiktigt på maskinens upplag och testades. All data från provningarna sparades i datafiler i en mapp och analyserades därefter.

Ordningen för framställningen och provningen var följande:

- Fyra granprovkroppar av varje storlek tillverkades och testades i syfte att bli bekant med provningsmaskinen och testproceduren. Under denna inledande fas ansvarade Johannes Jonasson (handledare) för instruktioner mig och för att säkerställa förståelsen av hela processen.
- 18 provkroppar av gran framställdes och testades.
- 18 provkroppar av björk framställdes och testades.

3.3 Testuppställning



Figur 3.4 Figuren visar aktuell testuppställning i enlighet med Nortestmetoden. Figuren är tagen från Jonasson (2025).

Alla provkroppar placerades på två upplag. I den ena änden stöddes provkroppen av ett stålprisma ovanpå en stålkula, medan den i den andra änden vilade i en stålcylinder. Figuren ovan visar principen för uppställningen. Provkroppen positionerades så att belastningen applicerades exakt i mitten. Mellan belastningshuvudet och provkroppen placerades även ett stålprisma. Försöken utfördes i en MTS-maskin vid Lunds universitet, i V-husets laboratorium för byggnadsmekanik.

3.4 Databehandling och analys i MATLAB

Detta kapitel beskriver hur den insamlade datan hanterades efter provningen av samtliga provkroppar, hur diagram genererades samt hur brottenergin beräknades utifrån den insamlade datan. Vidare redogörs för den metod som användes för att bedöma provningarnas stabilitet.

3.4.1 Hantering av data

Efter att samtliga tester hade genomförts organiserades alla textfiler i separata mappar. Filerna redigerades därefter så att de kunde användas i MATLAB för framställning av diagram, beräkning av brottenergi samt bestämning av maximal kraft för varje provning. Detta utfördes med hjälp av sök- och automatiseringsverktyg för att effektivisera de repetitiva arbetsmomenten.

3.4.2 Framställning av diagram

Med hjälp av handledaren Johannes Jonasson utvecklades MATLAB-kod för att läsa in textfiler och skapa last-förskjutningsdiagram. Datafilerna analyserades för att identifiera den punkt där lasten började öka tillräckligt mycket för att användas som startpunkt i diagrammet. Förskjutningsvärdet vid denna punkt kopierades och subtraherades från samtliga datapunkter, så

att kurvorna kunde jämföras på ett jämlikt sätt. Diagram för alla individuella tester finns i slutet av denna rapport.

3.4.3 Evaluering av stabiliteten

För att den experimentella datan ska kunna användas för beräkning av brottenergi får, enligt Nordtest-metoden, endast stabila provkroppar ingå i analysen. För att bedöma provningarnas stabilitet infördes därför ett mått baserat på den procentuella kraftförändringen mellan två efterföljande datapunkter, LC, enligt

$$LC = \frac{|F_i - F_{i+1}|}{F_{max}} \times 100 \tag{3.1}$$

där F_i betecknar lasten i en given datapunkt, F_{i+1} lasten i den efterföljande datapunkten och F_{max} avser den maximala uppmätta lasten för respektive provning. LC utgör ett mått på lastvariation mellan två intilliggande mätpunkter och kriteriet som användes för att avgöra om en provning bedömdes som stabil var LC < 15 %.

LC-metoden är inte en del av Nordtest-metoden, eftersom denna endast specificerar att last-deformationsresponsen måste vara stabil för att ett provresultat ska vara giltigt. Den ovan angivna metoden är föreslagen av Forsman (2021).

Formeln 3.1 användes i detta arbete genom att ta alla datapunkter i datafilerna och med hjälp av MATLAB bestämma LC enligt ekvation (3.1).

3.4.4 Beräkning av brottenergi

I MATLAB beräknades brottenergi enligt formeln 3.1 nedan i enlighet med avsnitt 5.6 av NT Build 422 (Nordtestmetod).

$$G_{I,c} = \frac{W}{h_c b} \tag{3.1}$$

Där W representerar det utförda arbetet (energin), vilket beräknas som integralen av kraft-förskjutningssambandet.

Matlab-funktionen “trapz” användes för att beräkna arbetet W. Arbetet från provkroppens egenvikt inkluderades inte i beräkningen, eftersom massan bedömdes vara för liten för att ha någon nämnvärd inverkan på resultatet. Ett specifikt uppmätt värde på brottarean användes för varje provkropp, värdena finns i figur 6.1 och 6.2 för björk respektive gran. Hur denna brottarea mättes beskrivs i detalj i nästa delkapitel. Parallellt extraherades den maximala kraften från varje enskild datafil med hjälp av MATLAB.

3.5 Mätning av brottarea

Brottarean för samtliga provkroppar mättes med hjälp av ett elektroniskt skjutmått. För att uppnå högre noggrannhet mättes höjden av brottarean på både höger och vänster sida, samt bredden på den övre och nedre sidan av provkroppen. Utifrån dessa fyra mätvärden beräknades två medelvärden, vilka användes för att beräkna ett representativt värde för respektive provkropps brottarea.

För vissa provkroppar fanns det få greppunkter för skjutmåttet, vilket gjorde denna delen utmanande.

3.6 Fuktkvot

Fuktkvoten bestämdes genom ugnstorkning enligt NT Build 422. Först vägdes mittdelar vid jämvikt med fuktrummet, alltså 20 °C och 60% RF. Därefter placerades samtliga prover i en ugn vid runt 105 °C under flera dygn, tills massförändringen över 24 timmar understeg 0,1 %, vilket indikerar att torr massa uppnåtts. Den initiala massan och den ugnstorkade massan användes för att bestämma fuktkvoten enligt:

$$u = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_1}\right) \times 100 \tag{3.2}$$

där m_1 betecknar provets massa före torkning och m_0 dess massa efter torkning. Fuktkvoten u uttrycks i procent. Tabell 3.1 nedan redovisar de framtagna resultaten.

Tabell 3.1 Fuktkvoten u för alla provkroppar av både björk och gran.

	Små	Medium	Stor
Björk	12.39%	12.00%	12.08%
Gran	12.80%	12.71%	13.18%

4 Resultat för björk

I detta kapitel presenteras resultaten för björkprovningarna. Här redovisas tabeller över samtliga individuella värden för brottarea samt medelvärden och variationskoefficient. Vidare inkluderas de beräknade värdena för brottenergi och tillhörande variationskoefficient. Resultaten analyseras och diskuteras med avseende på storlekseffekter och materialbeteende.

4.1 Brottarea

Tabellen med samtliga värden för brottarea, genomsnittlig brottarea för de olika storlekarna samt respektive variationskoefficient redovisas i Tabell 6.1 i kapitel 6.1. En något högre varians kan observeras för de små provkropparna. Detta antas bero på en ökad mätosäkerhet till följd av provkropparnas begränsade dimensioner, vilket dels försvårar positioneringen av skjutmåttet på tydliga greppunkter, dels medför att små absoluta mätavvikelser resulterar i relativt stora procentuella skillnader.

4.2 Brottenergi

Medelvärdet för brottenergin ökar med ökande storlek på provkropparna, se Tabell 6.1. Den procentuella ökningen av brottenergin från små till medelstora provkroppar är ca 7% men bara ca 1.5% från medelstor till stora provkroppar. Det bör dock påpekas att det finns variation inom varje provserie och att medelvärden för provserierna med medelstora och stora provkroppar endast är baserade på tre respektive två mätvärden (dvs endast de provkroppar som uppvisat ett stabilt brottförlopp).

4.3 Storlekseffekter hos björk

Skillnaden blev mycket tydligare vid analys av den genomsnittliga maximala punktlasten för varje serie. En ökning med omkring 61 % observeras mellan de små och medelstora provkropparna, medan motsvarande skillnad mellan små och stora provkroppar blir 87,5 %. Den procentuella ökningen från medelstor till stor provkropp är däremot avsevärt lägre – cirka 15 % – vilket motsvarar mindre än en tredjedel av ökningen som erhölls vid den föregående fördubblingen av provkropparnas dimensioner. Detta antyder en avtagande storlekseffekt i den övre delen av storleksintervallet. Detta kan observeras tydlig i figur 6.1.

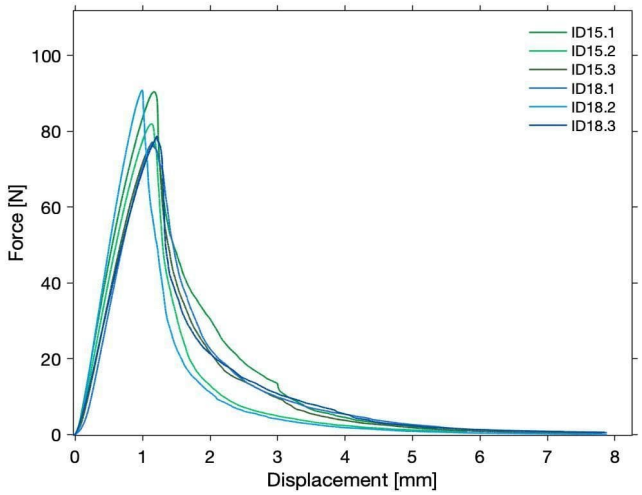
Som framgår av Tabell 6.1 är variansen mellan de olika provkroppsdimensionerna relativt jämn, både avseende maximal kraft och brottenergi. Observationerna indikerar att större provkroppar uppvisar en högre sannolikhet för instabila brottförlopp, vilket är förenligt med den teoretiska förståelsen inom storlekseffekter (kapitel 2.5).

Viktigt att påpeka är att en enskild provkropp har haft en tydlig påverkan på resultatet för stora provkroppsgruppen. Om provkropp BIG ID18.2 exempelvis hade exkluderats ur datamängden skulle den genomsnittliga brottenergin för den största provkroppsgruppen ha varit betydligt

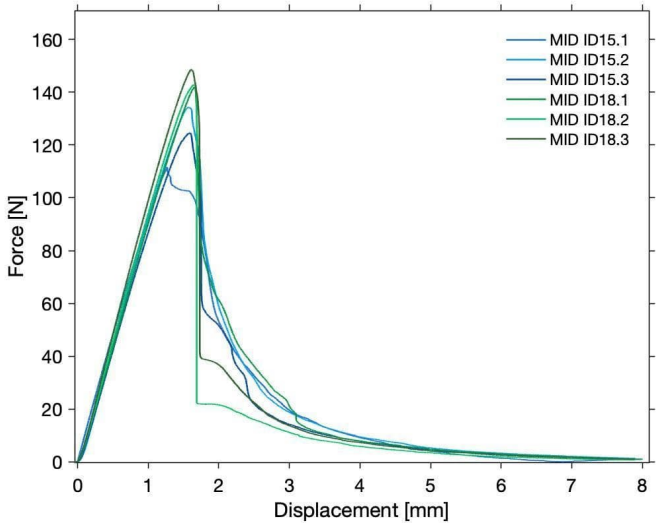
högre jämfört med de små och medelstora provkropparna. Den justerade genomsnittliga brottenergin skulle då uppgå till 690.13 J/m², vilket motsvarar en skillnad på 10 % istället för cirka 1.5 %. Av denna anledning är det inte möjligt att dra några slutsatser om ökande brottenergi från och med medelstor storlek till skillnad från stora provkroppar. Dessa avvikelser belyser vikten av att ha en stor mängd data för att kunna beakta individuella variationer vid statistisk analys av materialegenskaper. En medveten hantering av sådana avvikande datapunkter är avgörande för att säkerställa tillförlitlighet i de slutliga slutsatserna.

Som slutsats kan konstateras att brottenergin ökas från små till medelstor storlek. Däremot uppvisar större provkroppar en högre sannolikhet för instabila brottförlopp. Vad gäller den maximala punktlasten kan dock konstateras att provkropparna tål högre belastning vid större storleks dimensioner, men ökningen blir successivt mindre ju större provkroppen är.

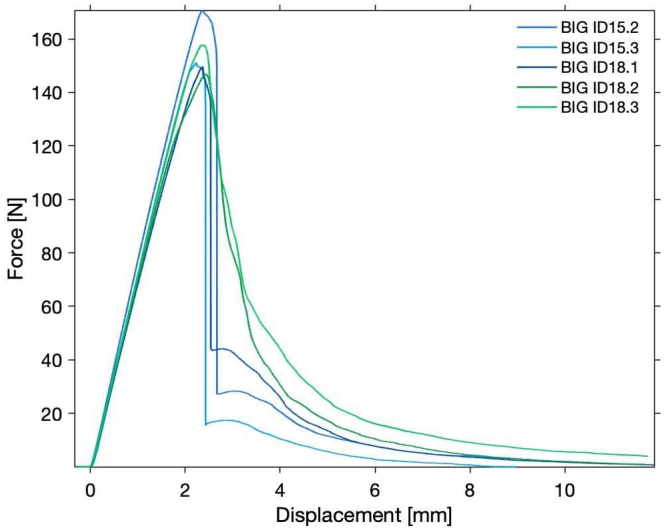
På nästa sida visas framställda diagram för de 3 olika serierna av björkprovkroppar. Det framgår tydligt av dessa diagram att små provkroppar ger stabilare förlopp.



Figur 4.1 Små provkroppar, björk.



Figur 4.2 Medelstora provkroppar, björk.



Figur 4.3 Stora provkroppar, björk.

5 Resultat för gran

För granprovningar av den minsta provkroppsstorleken (20×20×20 mm) saknas resultat. Anledningen till detta är att fel lastcell kopplades till testmaskinen för dessa provningar, vilket gav felaktiga lastvärden samt kraftigt brus i lastsignalen.

5.1 Brottarea

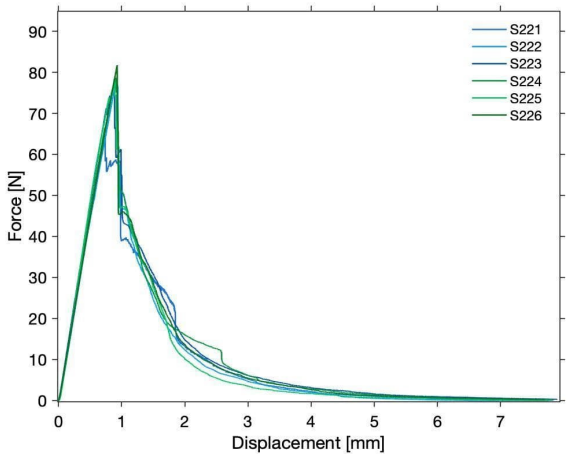
Mätningar på brottarea för gran uppvisade en varians runt 2% gällande de två större provkroppsstorlekarna, vilket påpekar på ett pålitlig mätsäkerhet. Detta framgår i tabell 6.2.

5.2 Storlekseffekt hos gran

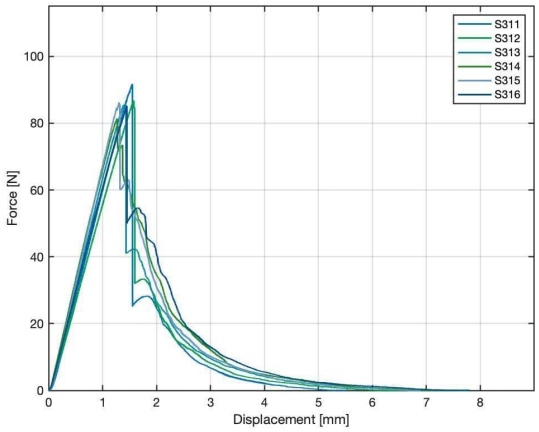
Det är svårare att dra några generella slutsatser utifrån resultaten från provningarna med provkroppar av gran. Skillnaden mellan den genomsnittliga brottenergin av medelstora provkroppar jämfört med stora blev betydligt högre än för björkprovkropparna. Slutsatsen är dock att det inte går att säkerställa någon tydlig storlekseffekt för brottenergin hos granprovkroppar på grund av få stabila resultat och behovet av ett större antal provningar för att kunna vara mer säker.

Den genomsnittliga maximala lasten för gran däremot uppvisade ett mer konsekvent mönster. Ökningen av den maximala kraften för de stora provkropparna jämfört med de medelstora provkropparna är ca 13%.

Jämfört med björkprovningar var andelen stabila brottförlopp för gran lägre. Detta kan dock inte leda till någon slutsats eftersom antal provningar är för få.



Figur 5.2 Medelstora provkroppar, gran.



Figur 5.3 Stora provkroppar, gran.

6 Analys och slutsatser

Detta kapitel diskuterar skillnader mellan björk och gran och ger slutsatser av arbetet.

6.1 Jämförelse mellan björk och gran

Tabell 6.1 Tabellen visar resultat för björk avseende brottarea, densitet, maximalt kraft, brottenergi samt om kurvan blev stabil för alla björk provningar i alla storlekar.

Björk					
Provkropp ID	**Brottarea [mm²]**	**Densitet [kg/m³]**	**Maximalt kraft [N]**	**Brottenergi Gf [J/m²]**	**Stabil kurva**
Små Provkroppar					
ID15.1	205.37	602.37	90.50	631.25	Ja
ID15.2	178.56	601.42	82.03	522.51	Ja
ID15.3	171.98	604.93	77.24	624.00	Ja
ID18.1	176.14	588.43	76.93	635.39	Ja
ID18.2	189.35	587.23	90.89	479.65	Ja
ID18.3	170.27	586.34	78.77	648.27	Ja
Medelvärde	182	595	83	**590**	
Variationskoefficient	7.31%	1.45%	7.78%	12.0%	
Medelstora Provkroppar					
MID ID15.1	329.86	628.7	111.66	603.20	Ja
MID ID15.2	330.37	657.26	134.25	644.91	Ja
MID ID15.3	330.12	622.85	124.61	572.58	Nej
MID ID18.1	331.24	622.33	142.04	641.91	Ja
MID ID18.2	339.99	617.48	142.86	501.07	Nej
MID ID18.3	333.67	625.72	148.59	592.30	Nej
Medelvärde	333	629	134	**630**	
Variationskoefficient	1.17%	2.28%	12.20 %	3.69 %	
Stora Provkroppar					
BIG ID15.1	674.37				
BIG ID15.2	661.15	590.67	170.46	511.76	Nej
BIG ID15.3	650.78	593.24	151.12	376.06	Nej
BIG ID18.1	622.23	576.82	149.56	501.88	Nej
BIG ID18.2	630.49	589.35	146.74	588.56	Ja
BIG ID18.3	631.19	594.11	157.80	690.13	Ja
Medelvärde	645	589	155	**639**	
Variationskoefficient	3.16%	1.19%	5.14 %	11.23 %	
OBS: Medelvärden för brottenergi är baserade på endast provningar med stabil respons					

Tabell 6.2 Tabellen visar resultat för gran avseende brottarea, densitet, maximalt kraft, brottenergi samt om kurvan blev stabil för alla gran provningar i medelstora och stora storlekar.

Gran					
Provkropp ID	**Brottarea [mm²]**	**Densitet [kg/m³]**	**Maximalt kraft [N]**	**Brottenergi Gf [J/m²]**	**Stabil kurva**
Medelstora Provkroppar					
S221	323.74	532.78	63.8178	253.81	Nej
S222	326.05	535.25	76.88	245.81	Ja
S223	319.53	547.2	78.4446	289.02	Ja
S224	317.7	543.09	78.6972	282.95	Ja
S225	329.44	578.55	78.1749	246.09	Nej
S226	317.42	562.25	81.7346	274.05	Nej
Medelvärde	322	550	76	**273**	
Variationskoefficient	1.52%	3.19%	1.26%	8.58%	
Stora Provkroppar					
S311	686.41	443.26	91.75	147.45	Nej
S312	650.95	438.71	86.7915	161.0825	Nej
S313	646.57	437.37	85.5796	172.5545	Nej
S314	655.47	444.23	81.4057	191.0943	Ja
S315	671.54	442.01	86.2546	177.7111	Nej
S316	669.44	439.66	85.21	191.4732	Nej
Medelvärde	663	440	85	**191**	
Variationskoefficient	2.27%	0.61%	5.14 %	-	
OBS: Medelvärden för brottenergi är baserade på endast provningar med stabil respons					

Det framgår av tabell 6.1-2 att för björk karakteriseras beteendet av en kontinuerlig men avtagande ökning av brottenergin med större provstorlekar. För gran, mellan medelstora och stora provkroppar är ökningen liknande.

Tabell 6.3 Beräknade brottenergi för olika storlekar i björk respektive gran.

	Små	Medelstora	Stora
Björk	590.18 (11.99%)	630.01 (3.69%)	639.35 (11.23%)
Gran	Borttagen	272.59 (8.58%)	191.09 (0%)

Brottenergi i J/m². Variationskoefficient i parentes.

Tabell 6.3 tyder på att björk har högre brottenergi vinkelrätt mot fiberriktningen jämfört med gran. För små provkroppar är brottenergin cirka 3,6 gånger högre, för medelstora prover 2,3 gånger högre och för stora prover 3,3 gånger högre. Variationskoefficienterna är relativt jämna

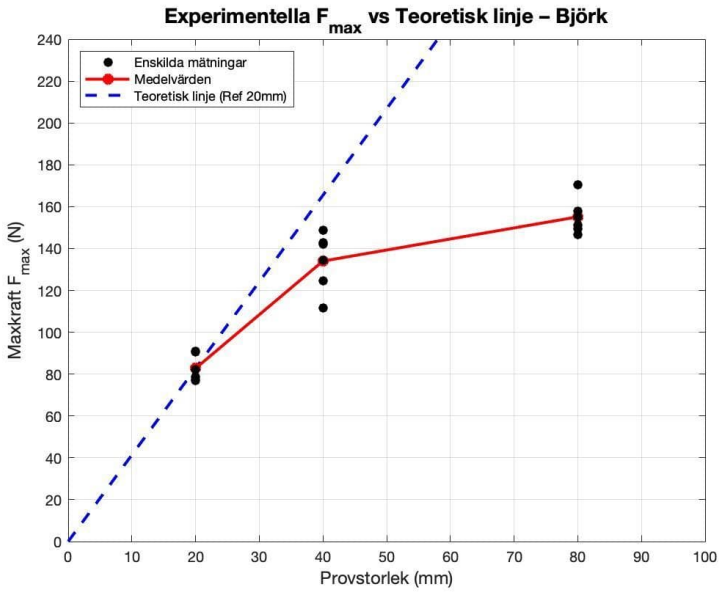
mellan storlekarna och ligger generellt runt 10 %, vilket indikerar en måttlig spridning i resultaten. Ett speciellt undantag finns dock för stora granprovkroppar eftersom endast ett enskilt prov uppvisade ett stabilt brott förlopp, därav blev CoV för den 0%. Det är däremot viktig att mer provningar utförs för att säkrare bedöma högre brottenergi hos björk jämfört med gran.

Analysen av brottstabilitet indikerar att björkprovkroppar uppvisar en högre andel stabila brottförlopp än gran, med 11 av 18 respektive 4 av 12 stabila prover. Alltså omkring 33% av granprovningar var stabila medans 61 % av björkproningar var stabila. Denna observation överensstämmer med tidigare forskning (Johannes, 2023), där björk konsekvent uppvisar en mer stabil respons än gran. Dock är det svår att dra tydliga slutsatser om det på grund av lågt antal provningar. En större studie skulle krävas för att kunna dra säkrare slutsatser om större stabilitet hos björk.

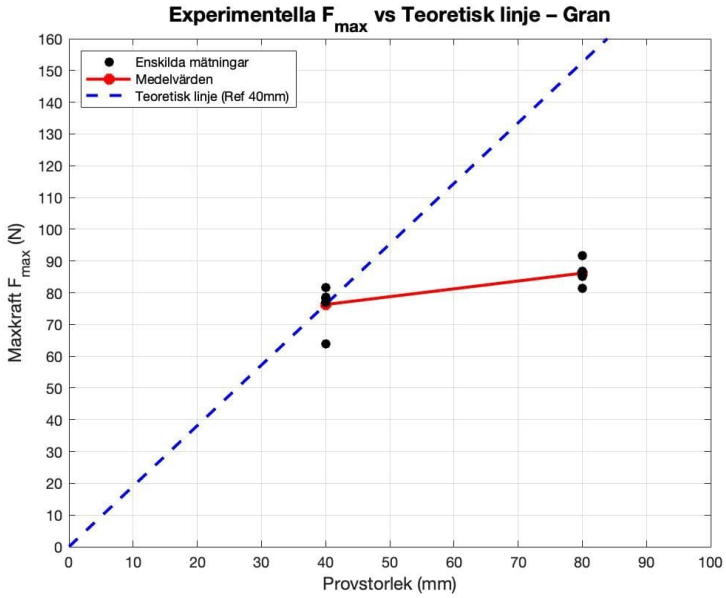
Diagrammet nedan redovisar uppmätta experimentella data för maximalkraften vid samtliga provdimensioner för både gran och björk. I diagrammet visas även en teoretisk referenslinje som baseras på medelvärdet för den minsta provstorleken. Denna linje illustrerar den teoretiska bärförmågan vid en linjär skalning. Baserad på linjärelastiskt materialbeteende och spänningsbaserat brottkriterium förväntas maximalkraften öka linjärt, det vill säga ge ett fördubblat värde på maxlasten vid en fördubbling av dimensionerna i provkroppens plan.

Av figur 6.1 framgår att maxlasten från provningarna av björk inte ökar linjärt med provkropparnas storlek.

Figur 6.2 för gran uppvisar ett liknande beteende med en ökning av maximalkraften som hamnar under den teoretiska referenslinje vid storleks fördubblingen. Detta beteende hos båda trädslagen är direkt kopplat till skåran som sågades i mitten delarna. Viktig att påpeka här är att referensen för granprovningar här var medelstora provkroppar med höjden 40 mm.



Figur 6.1 Diagram för björk



Figur 6.2 Diagram för gran

6.2 Slutsats och diskussion

Resultaten tyder på att brottenergin inte påverkas av provkroppsstorleken vid provning av björk. Även om en avtagande ökning kan observeras vid varje fördubbling av dimensionen, bedöms variationen vara för liten för att betraktas som en storlekseffekt. För gran går det däremot inte att dra samma slutsats på grund av ett stort antal instabila provningar. Dock tyder det delvis på samma slutsats. Dessutom visade sig björk har betydligt högre brottenergi jämfört med gran provningar. Medelvärdet för brottenergi för gran uppmättes till 209.0 J/m^2 medan för björk 619.7 J/m^2, alltså björk visade närmare tre gånger så hög brottenergi som gran.

Samma trend observerades även för den maximala kraften inom samtliga storlekserier. För provkroppar i medelstora dimensioner uppmättes en 1,76 gånger högre maximal kraft för björk, och för de största provkropparna var motsvarande värde 1,85 gånger högre jämfört med gran.

Slutsatsen som kan däremot dras är att bärförmågan tydligt påverkas av provkropparnas storlek för både björk och gran när ett sågsnitt införs. För antaganden om linjärelastiskt materialbeteende, linjärt varierande normalspänning över brottytan och ett spänningsbaserat brottkriterium förväntas en fördubbling av provkroppens storlek leda till en fördubbling av den maximala kraften, men detta observerades inte i detta examensarbete. Tvärtom orsakar sågsnittet en procentuellt sett avtagande ökning av maximalkraften vid varje storleksfördubbling, vilket bekräftar att det finns en tydlig storlekseffekt på bärförmågan.

Just att granprovningar vid medelstor storlek skildes så markant från de andra storlekar är förmodligen något värdefullt att undersöka vidare. Samtidigt som flera provningar för björk i alla dessa storlekar kan bidra till större pålitlighet i resultat som fick av detta examensarbete.

Referenslista

Mai, C., Schmitt, U. & Niemz, P. (2021). *A brief overview on the development of wood research*. Holzforschung, 76(2), s. 102–119. doi: 10.1515/hf-2021-0155

Arriaga, F., Wang, X., Iñiguez-González, G., Llana, D.F., Esteban, M. & Niemz, P. (2023). Mechanical Properties of Wood: A Review. Forests, 14(6), 1202. Available at: https://www.mdpi.com/1999-4907/14/6/1202

Bodig, J. and Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Thelandersson, S. and Larsen, H.J. (eds.) (2003). *Timber Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

Wadsö, L. (2016). *Building Material Science*. Course material for Building Material Science, Faculty of Engineering (LTH), Lund University.

Ödlund, L.-O. (2009) *Varför sågas så lite björk i Sverige? / Why isn't more birch wood being sawn in Sweden?* Växjö universitet, Institutionen för teknik och design.

Swedish Wood. (n.d.). *Wood construction cuts climate footprint*. Tillgänglig på: https://www.swedishwood.com/wood-facts/about-wood/wood-and-sustainability/wood-construction-cuts-climate-footprint (Hämtad: 14 november 2025) Swedish Wood

Li, C., Pradhan, P., Chen, G., Kropp, J.P. & Schellnhuber, H.J. (2025). *Carbon footprint of the construction sector is projected to double by 2050 globally*. Scientific Reports, 15, artikelnummer 13547.

Grand View Research. (2025). *Timber Construction Market (2025-2033) Size, Share & Trends Analysis Report by End Use, by Timber Type, and by Region*. San Francisco: Grand View Research, Inc. Tillgänglig på: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/timber-construction-market-report
(Hämtad: 14 november 2025).

Hong, P., Schmid, B., De Laender, F., Eisenhauer, N., Zhang, X., Chen, H., Craven, D., De Boeck, H.J., Hautier, Y., Petchey, O.L., Reich, P.B., Steudel, B., Striebel, M., Thakur, M.P. & Wang, S. (2022). *Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change.* Ecology Letters, 25(2), pp.555-569. Available at: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34854529/ (Accessed: 14 November 2025).

Nordtest (1993). *NT BUILD 422, Edition 3: Method for determination of fracture energy of wood*. Nordtest, Espoo, Finland.

Jonasson, J. (2025). *Experimental and Computational Analysis of Mode I Fracture in Wood: Likelihood-based inference and finite element model updating.* Licentiate thesis, Division of Structural Mechanics, Lund University. Available at: https://lup.lub.lu.se/record/8e8686d8-5040-4871-bf49-f62c7227f0c9

Skogskunskap. (n.d.). *Lövskogen i Sverige*. Tillgänglig på: https://www.skogskunskap.se/aga-skog/fakta-om-skogen/fakta-om-skogen/lovskogen-i-sverige (Hämtad: 14 november 2025).

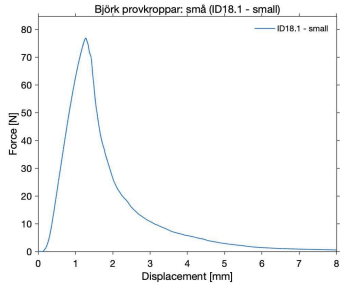
Forsman, K., Fredriksson, M., Serrano, E., & Danielsson, H. (2021). Moisture-dependency of the fracture
energy of wood: A comparison of unmodified and acetylated Scots pine and birch. Holzforschung,
75 (8), 731–741. https://doi.org/10.1515/hf-2020-0174

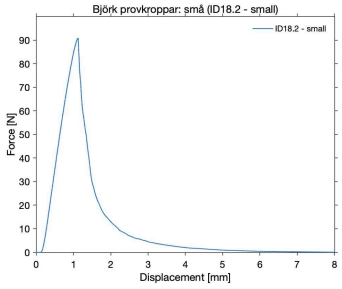
Shmulsky, R. and Jones, P.D., 2019. *Forest Products and Wood Science: An Introduction.* 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.

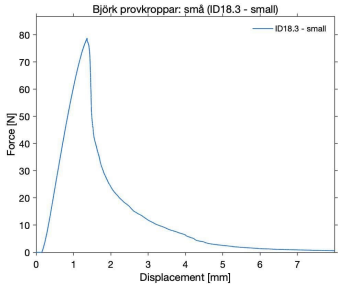
Appendix A

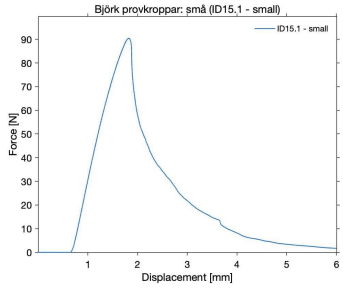
Last-förskjutnings kurvor

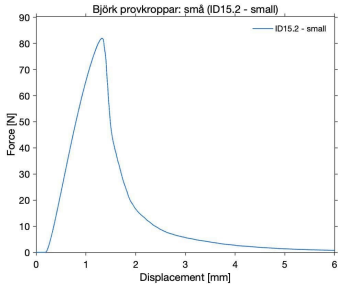
Björk provningar

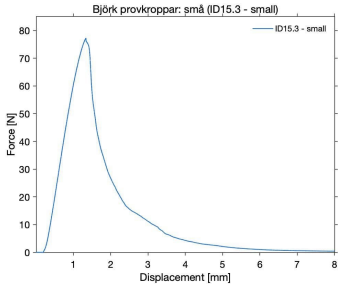


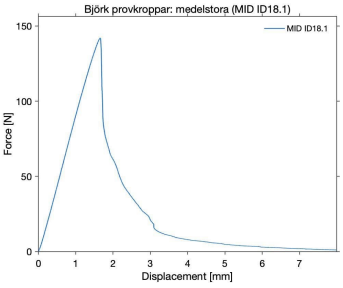


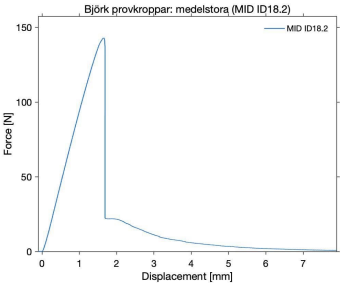


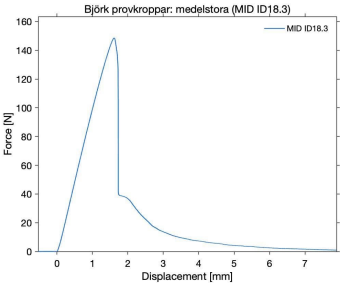


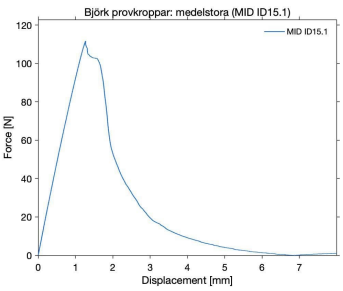


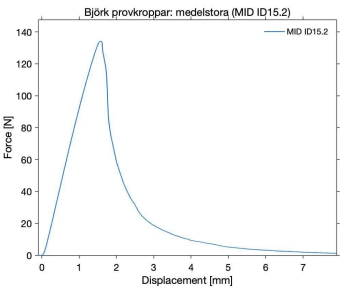


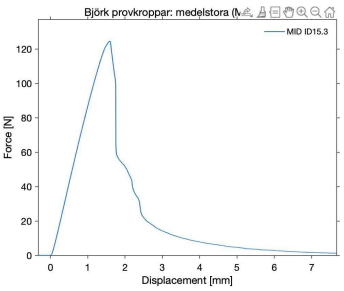


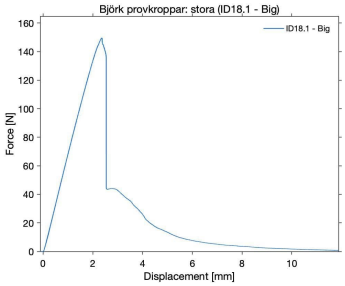


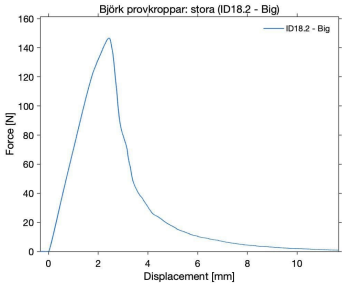


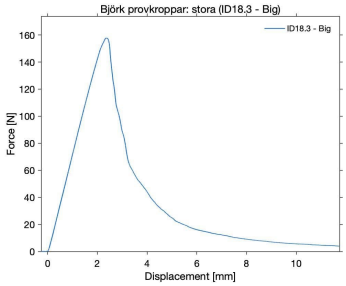


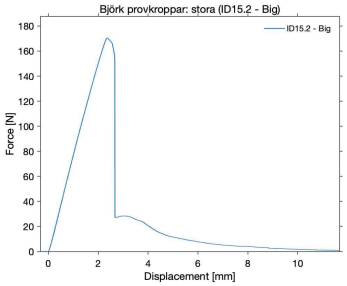


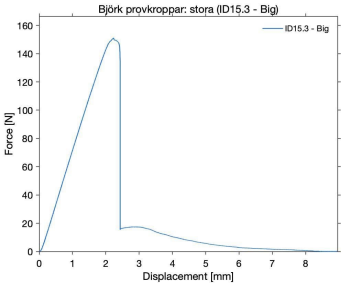



Björk provkroppar: stora (ID18.1 - Big)
ID18.1 - Big
Force [N]
Displacement [mm]

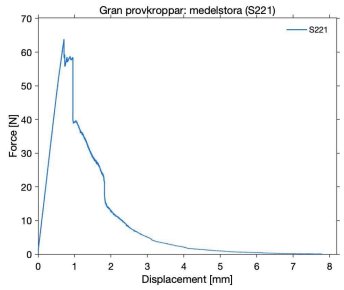

Björk provkroppar: stora (ID18.2 - Big)
ID18.2 - Big
Force [N]
Displacement [mm]

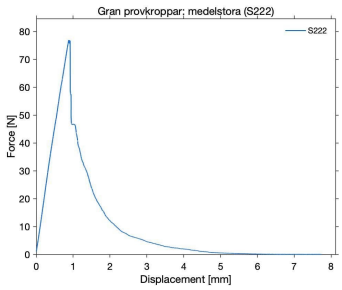

Björk provkroppar: stora (ID18.3 - Big)
ID18.3 - Big
Force [N]
Displacement [mm]

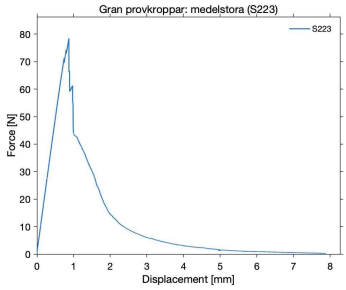

Björk provkroppar: stora (ID15.2 - Big)
ID15.2 - Big
Force [N]
Displacement [mm]

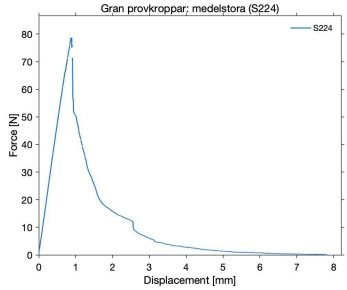

Björk provkroppar: stora (ID15.3 - Big)
ID15.3 - Big
Force [N]
Displacement [mm]

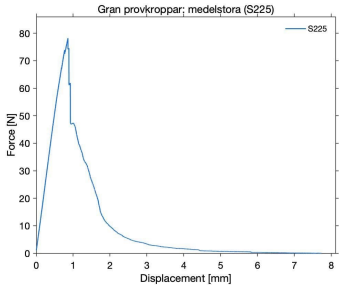
Gran provningar

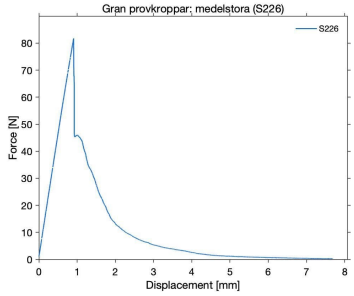


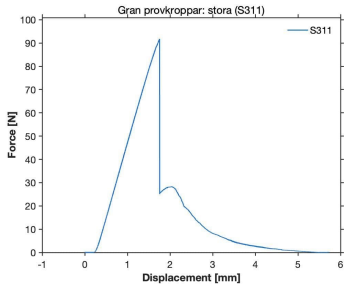


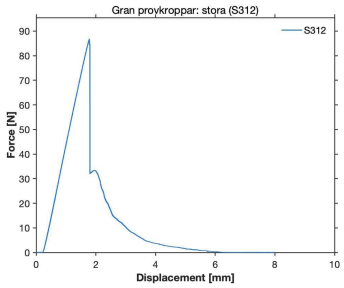


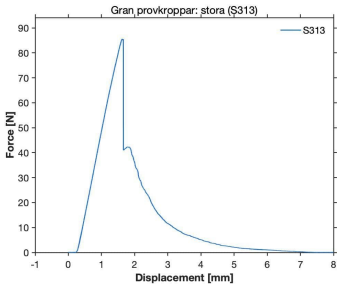


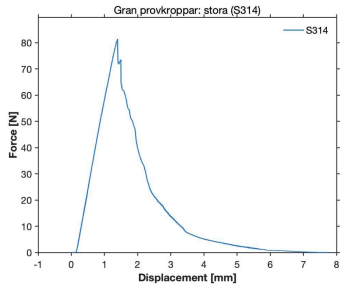


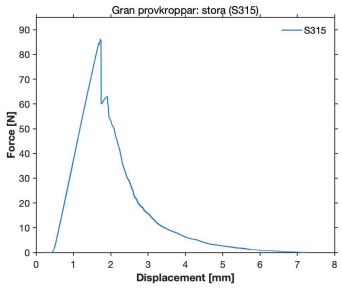


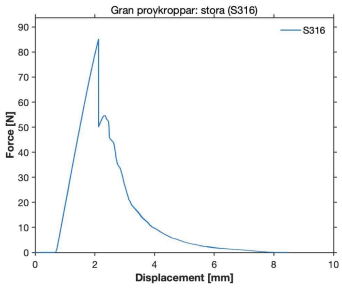












Appendix B

Dimensionerna och vikter

Tabell 1: Björk mitten delar

Storlek	Provkropp ID	Vikt [g]	Längd [mm]	Bredd [mm]	Höjd [mm]	Volym [m³]	Brottarea [mm²]
Små	ID15.1	4.73	19.89	19.87	19.86	7848.96	205.37
	ID15.2	4.73	19.85	19.91	19.9	7864.7	178.56
	ID15.3	4.78	19.9	19.89	19.98	7908.3	171.98
	ID18.1	4.85	20.3	20.15	20.15	8242.3	176.14
	ID18.2	4.82	20.14	20.12	20.26	8209.7	189.35
	ID18.3	4.80	20.21	20.14	20.1	8181.3	170.27
Medium	ID15.1	20.11	20.07	40.07	39.79	31999.31	329.86
	ID15.2	21.19	20.14	40.06	39.99	32264.27	330.37
	ID15.3	19.85	20.04	40.06	39.72	31887.31	330.12
	ID18.1	20.03	19.93	40.43	39.93	32174.39	331.24
	ID18.2	20.06	19.93	40.39	40.35	32480.65	340
	ID18.3	20.31	19.95	40.35	40.31	32448.84	333.67
Stor	ID15.1	76.79	20.47	79.79	79.62	130043.45	-
	ID15.2	77.65	20.6	79.84	79.61	130934.89	661.15
	ID15.3	75.64	20.65	79.85	79.55	131170.19	650.77
	ID18.1	74.82	19.89	80.06	79.75	126993.37	622.23
	ID18.2	75.99	19.95	80.14	80.02	127935.42	630.5
	ID18.3	75.88	19.95	80.18	79.65	127407.42	631.19

Tabell 2: Gran mitten delar

Storlek	Provkropp ID	Vikt [g]	Längd [mm]	Bredd [mm]	Höjd [mm]	Volym [m³]	Brottarea [mm²]
Små	S211	4.31	19.84	20	20.12	7983.62	170.32
	S212	4.47	19.98	20	20.19	8067.92	171.46
	S213	4.50	19.88	20	20.32	8079.23	178.99
	S214	4.51	20	20	20.37	8148	176.44
	S215	4.44	20.04	20	20.58	8248.46	176.1
	S216	4.49	20	20	20.37	8148	170.43
Medelstor	S221	16.86	19.83	40.19	39.7	31639.62	323.74
	S222	17.01	19.84	40.11	39.94	31783.55	326.05
	S223	17.47	19.91	40.23	39.85	31919.03	319.53
	S224	17.36	19.88	40.23	39.97	31966.9	317.7
	S225	18.48	19.87	40.23	39.95	31934.84	329.44
	S226	17.81	19.8	40.22	39.77	31671.08	317.42
Stor	S311	57.91	20.38	81.02	79.12	130641.96	686.41
	S312	57.72	20.35	80.89	79.92	131557.23	650.95
	S313	57.30	20.31	80.82	79.82	131020.87	646.57
	S314	58.39	20.29	80.84	80.14	131449.12	655.47
	S315	58.88	20.28	81.5	80.6	133217.29	671.54
	S316	58.41	20.38	81.48	80	132844.99	669.44