Hållbara Livmaterial för Träbaserade Lättbalkar

En studie av hållfasthet och klimatpåverkan

Petter Stag, Raoul Turesson Kathy



LUNDS UNIVERSITET

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Lunds Tekniska Högskola

5 september 2026

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Division of Structural Engineering
Faculty of Engineering, LTH
P.O. Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Hållbara livmaterial för träbaserade lättbalkar

En studie av hållfasthet och klimatpåverkan

Sustainable Web Materials for Timber I-Joists
A Study of Structural Performance and Climate Impact

Petter Stag, Raoul Turesson Kathy

5 september 2026

Rapport TVBK/5321
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK/26/5321
Examensarbete
Handledare: Oskar Ranefjärd
5 september 2026

Abstract

This thesis investigates the potential of alternative web materials for engineered wood I-joists with respect to both climate impact and load-bearing capacity. The study aims to evaluate whether traditional web materials, such as OSB, can be replaced by alternative panel materials in order to reduce climate impact while maintaining sufficient structural integrity.

The work combines analytical calculations with experimental laboratory testing and climate impact assessments. An analytical model based on classical beam theory was used to analyze shear stresses, bending stresses, and deflection in I-joists with varying web materials. Shear strength testing was carried out using a modified standard method to determine the shear strength and shear modulus of several panel materials, including OSB, plywood, LivingBoard, PremiumBoard, and Packwall. The materials were compared with regard to climate impact based on Environmental Product Declarations (EPDs).

The results show that several alternative panel materials exhibit properties that enable their use in I-joists while simultaneously reducing climate impact. PremiumBoard demonstrated the highest shear strength, while LivingBoard also demonstrated high performance. Packwall exhibited lower stiffness but satisfied the theoretical design cases and achieved low climate impact. Plywood achieved the lowest climate impact and demonstrated favorable properties as a web material. All investigated materials fulfilled the selected deflection requirements in the analytical model.

The study indicates that alternative panel materials have the potential to contribute to more sustainable I-joists while maintaining structural performance. However, the results are based on analytical models and small-scale laboratory testing, meaning that further full-scale testing is required to verify the findings for practical applications.

Keywords: *I-joists, wood-based panel materials, climate impact, life cycle assessment, EPD, shear strength, sustainable construction.*

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker potentialen hos alternativa livmaterial för träbaserade lättbalkar med avseende på både klimatpåverkan och bärförmåga. Studien syftar till att utvärdera om traditionella livmaterial, såsom OSB, kan ersättas av alternativa skivmaterial för att minska klimatavtrycket medan tillräcklig bärförmåga bibehålls.

Arbetet kombinerar analytiska beräkningar med experimentella laboratorieförsök och klimatberäkningar. En analytisk modell baserad på klassisk balkteori användes för att analysera skjuvspänningar, böjspänningar och nedböjning i lättbalkar med varierande livmaterial. Parallellt genomfördes skjuvhållfasthetsprovning enligt modifierad standardmetod för att bestämma skjuvhållfasthet och skjuvmodul hos flera skivmaterial, däribland OSB, plywood, LivingBoard, PremiumBoard och Packwall. Materialen jämfördes därefter med hänsyn till klimatpåverkan baserat på miljövarudeklarationer (EPD).

Resultaten visar att flera alternativa skivmaterial uppvisar egenskaper som möjliggör användning i lättbalkar samtidigt som klimatpåverkan kan reduceras. PremiumBoard uppvisade högst skjuvhållfasthet medan LivingBoard också visade höga värden. Packwall uppvisade lägre styvhet men klarade de teoretiska dimensioneringsfallen och uppnådde samtidigt låg klimatpåverkan. Plywood uppnådde lägst klimatpåverkan och visade goda egenskaper som livmaterial. Samtliga undersökta material uppfyllde de valda kraven för nedböjning i den analytiska modellen.

Studien indikerar att alternativa skivmaterial har potential att bidra till mer hållbara lättbalkar med bibehållen bärförmåga. Resultaten baseras dock på analytiska modeller och småskaliga laboratorieförsök, vilket innebär att ytterligare fullskaliga tester krävs för att verifiera resultaten vid praktisk tillämpning.

Nyckelord: *lättbalkar, skivmaterial, klimatpåverkan, livscykelanalys, skjuvhållfasthet, hållbart byggande*

Förord

Examensarbetet genomfördes under våren 2026 och innebar det sista momentet i vår civilingenjörsutbildning inom väg- och vattenbyggnad. Utformningen av arbetet växte fram från en idé som presenterades av biträdande universitetslektor Oskar Ranefjärd. Examensarbetet är skrivet på avdelningen för Konstruktionsteknik vid Lunds Tekniska Högskola och omfattar 30 högskolepoäng.

Vi vill först och främst rikta ett stort tack till vår handledare Oskar Ranefjärd för all stöttning under arbetets gång. Vi vill även passa på att tacka vår examinator universitetslektor Eva Frühwald Hansson för nyttiga synpunkter på rapporten, forskningsingenjör Martin Gunder för all assistans under laboration samt Alfred Wikner och Tommy Persson på Masonite Beams AB för motivation och inspiration under arbetet.

Slutligen vill vi rikta ett tack till de personer som underlättat vid införskaffning av material, Tomasz Rajca på Pfleiderer och Joakim Jönsson på Recoma AB.

Lund, 5 september 2026

Petter Stag och Raoul Turesson Kathy

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION **1**

1.1 Syfte och Frågeställning 2

1.2 Disposition och avgränsningar 2

1.3 Individuellt bidrag till arbetet 3

1.3.1 Användning av AI 3

2 BAKGRUND **4**

2.1 Trä som byggmaterial 4

2.2 Engineered Wood Products 7

2.2.1 Limträ 8

2.2.2 Fanérträ (LVL) 8

2.2.3 Plywood 9

2.2.4 Spånskiva 10

2.2.5 Oriented Strand Board (OSB) 11

2.2.6 Träfiberskiva 12

2.3 Lättbalkar 13

2.3.1 Lättbalkens historia 13

2.3.2 Lättbalkens funktion och livmaterialets inverkan 14

2.4 Klimatberäkningar och hållbara skivmaterial 15

2.4.1 Klimatberäkning med EPD 15

2.4.2 Träbaserade skivmaterial (WBP) 18

2.4.3 Alternativa skivmaterial 19

2.4.4 Materialegenskaper och livscykelanalys 20

3 METOD **21**

3.1 Analytisk metod för spänningar och nedböjning 21

3.1.1 Skjuvspänningar över tvärsnittet 21

3.1.2 Böjspänningar över tvärsnittet 23

3.1.3 Nedböjning 25

3.2 Standardmetod för Skjuvhållfasthetsprovning - Skjuvkapacitet i Skivmaterial 27

3.2.1 Provkroppar 27

3.2.2 Testuppställning 28

3.2.3 Beräkningar 29

3.2.4 Modifierad testmetod 30

3.3 Materialprovning av Skjuvhållfasthet i Skivmaterial 31

3.3.1 Val av Provuppställning 31

3.3.2 Provplan . . . 32
3.3.3 Uppbyggnad av provuppställning . . . 35
3.3.4 Verifiering av Provuppställning . . . 37
3.3.5 Alternativa skivmaterial . . . 40
3.3.6 Behandling av data . . . 41
3.4 Jämförelse med Hänsyn till Klimatavtryck . . . 42
3.4.1 Val av livscykelskeden . . . 42
3.4.2 Skivmaterial . . . 43
3.4.3 Teoretiska balkar . . . 43

4 RESULTAT **44**
4.1 Laborativ Utvärdering av Skjuvhållfasthet och Skjuvmodul . . . 44
4.1.1 Verifiering av Metod . . . 44
4.1.2 Alternativa skivmaterial . . . 48
4.1.3 Sammanställning . . . 56
4.2 Analytisk Modell . . . 57
4.2.1 Skjuvspänningar över tvärsnittet . . . 57
4.2.2 Böjspänningar över tvärsnittet . . . 60
4.2.3 Sammanställning . . . 63
4.3 Jämförelse med hänsyn till klimatavtryck . . . 64

5 DISKUSSION **68**
5.1 Materialval . . . 68
5.1.1 Rättvis materialbedömning . . . 68
5.2 Provuppställning . . . 69
5.3 Laboration . . . 70
5.4 Fullskaliga test . . . 71
5.5 Skjuvdeformation enligt Timoshenkos teori . . . 71
5.6 Lättreglar . . . 73

6 SLUTSATS **74**
6.1 Kan alternativa skivmaterial bidra till lägre klimatavtryck för lättbalkar medan erforderlig bärförmåga bibehålls? . . . 74
6.2 Förslag till vidare studier . . . 75

Referenser **76**

Appendix **i**

1. INTRODUKTION

För nybyggnationer krävs numera inte bara en energideklaration, utan även en klimatdeklaration [1]. Detta har resulterat i större medvetenhet kring materialval, samt optimering av materialmängd. För mindre och mellanstora byggnader används typiskt konstruktionsvirke som balkmaterial, men det finns andra balktyper som limträ, *Laminated Veneer Lumber* (LVL) och olika lättbalkssystem, så kallade *Engineered Wood Products* (EWPs).

Lättbalken är en EWP som bygger på ett I-tvärsnitt där flänsarna vanligtvis består av konstruktionsvirke eller LVL och livet av något typ av skivmaterial. Som namnet antyder har lättbalken låg vikt i förhållande till dess hållfasthet, vilket gör den lätt att arbeta med och installera. Detta har lett till att lättbalken internationellt har blivit ett allt mer populärt alternativ [2]. I Sverige används lättbalkar fortfarande i begränsad omfattning och det finns få produkter på marknaden. Balkarna tillverkas traditionellt sett med flänsar i gran och liv av OSB- eller spånskiva [3]. Livet påverkar balkens styvhet, och genom rätt val av skivmaterial kan klimatavtrycket optimeras samtidigt som balkens styvhet bibehålls. Lättbalken används oftast i bjälklag men kan även användas i väggar och tak [2].

Restprodukter som träspån och flis från sågverksindustrin men även återvunnet trä kan användas som råvara vid tillverkning av OSB- och spånskivor. Det finns flera argument för att återuppta mer skivtillverkning i Sverige. Boverket arbetar mot en mer självförsörjande byggsektor, användningen i branschen har ökat och produkten kan utnyttjas för kolinlagring. I Sverige används däremot restprodukterna främst till bioenergi och pappersmassa, vilket i sin tur leder till att skivmaterial till byggbranschen importeras [4, 5].

Den hållbara utvecklingen och en ökad volym av träavfall har bidragit med innovationer inom tillverkning av skivmaterial som till viss del består av återvunnet trä. Det gäller främst spånskivor, men även MDF och OSB kan innehålla andelar återvunnet trä. Utmaningen med användningen av träavfall som byggmaterial är att det i många fall är kontaminerat, vilket kan betyda att det finns rester av kemiska medel (t.ex. färg, olja) och andra material som plast, glas och betong. Det innebär att en effektiv sortering av träavfallet krävs för att en användning som byggmaterial ska bli realistiskt [6].

1.1. Syfte och Frågeställning

I detta examensarbete undersöks potentialen hos olika skivmaterial för användning som liv i lättbalkar med hänsyn till både klimatavtryck och mekanisk prestanda. Studien omfattar befintliga skivmaterial samt nya innovativa alternativ där OSB används som referensmaterial.

Materialen jämförs utifrån skjuvhållfasthet, styvhet, nedböjning och klimatpåverkan genom analytiska beräkningar och experimentella laboratorieförsök. Syftet är att utvärdera om alternativa skivmaterial kan bidra till mer hållbara lättbalkar utan att försämra deras funktion eller bärförmåga.

För att uppnå syftet med rapporten formuleras följande forskningsfråga:

- Kan alternativa skivmaterial bidra till lägre klimatavtryck för lättbalkar medan erforderlig bärförmåga och styvhet bibehålls?

1.2. Disposition och avgränsningar

Arbetet inleds med en teoretisk översikt av trä som byggmaterial och lättbalkars bärförmåga, lastfördelning och relevanta brottmoder. Teorin omfattar grundläggande balkteori, materialegenskaper samt tidigare forskning kring lättbalkar och skivmaterial. Den teoretiska delen ligger till grund för utformning och analys av de experimentella testerna.

Därefter presenteras laboratorieförsök för att undersöka skjuvhållfasthet, styvhet och brottförlopp hos olika skivmaterial. Samtliga provkroppar provas under kontrollerade laboratorieförhållanden där geometri och tillverkningsmetod hålls konstanta, medan skivmaterialet utgör den variabla parametern. Resultaten används för att jämföra hur olika skivmaterial påverkar balkarnas mekaniska prestanda.

Arbetet avgränsas till de skivmaterial som varit tillgängliga genom LTH:s laborationssal eller via kontakt med producenter där frakt till Sverige anses befogad. Studien omfattar därför inte samtliga förekommande skivmaterial på marknaden utan fokuserar på de material som provas experimentellt, nämligen OSB, Packwall, plywood, PremiumBoard och LivingBoard. Vidare genomförs laboratorieförsöken med vissa förenklingar i förhållande till gällande standarder

för att anpassas till tillgängliga resurser och utrustning.

1.3. Individuellt bidrag till arbetet

Examensarbetet är resultatet av ett gemensamt och integrerat arbete där båda författarna har deltagit aktivt i samtliga faser med ett likvärdigt ansvar. Planering, datainsamling, laboration, analys och skrivande har utförts gemensamt och kontinuerligt diskuterats. Båda författarna har bidragit i lika stor utsträckning till uppsatsens innehåll och utformning. Arbetsfördelningen har varit flexibel men balanserad genom hela processen.

1.3.1. Användning av AI

Vid faktasökning har AI använts för att med hjälp av sökord hitta och filtrera ut relevanta källor. Det har fungerat som ett översättningsverktyg då källor på engelska har översatts. AI har dessutom assisterat med layouten vid rapportens uppbyggnad för att få rätt utseende på figurer och tabeller i LaTeX. *Large Language Models* (LMMs) har använts för korrektur av enskilda meningar.

2. BAKGRUND

Efterfrågan på träbaserade byggprodukter har ökat i takt med en växande medvetenhet om byggsektorns betydande klimatpåverkan. Globalt står bygg- och fastighetssektorn för omkring 37% av de totala koldioxidutsläppen samt nära 40% av den globala energianvändningen. Detta har lett till ett ökat fokus på utvecklingen av mer hållbara byggmaterial, där trä har framträtt som ett attraktivt alternativ. Till skillnad från traditionella material såsom stål och betong är trä en förnybar resurs med förmåga att lagra kol under sin livscykel, vilket bidrar till ett lägre klimatavtryck [7].

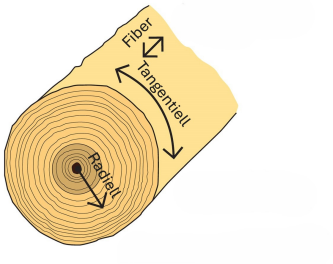
Den ökade användningen av trä föranleder samtidigt en del utmaningar. För att möta behovet har skogsbruket gått mot alltmer industriella metoder som resulterar i områden som mer liknar plantager än skogar. Det leder i sin tur till att yngre och yngre skog avverkas för att försörja byggsektorn, en konsekvens av det är sämre kvalitet på timret [8]. Samtidigt är materialet nödvändigt för att bekämpa den pågående klimatkrisen och med innovationer inom skogsbruket kan produktionen bli mer hållbar [9].

En möjlig lösning på de kvalitets- och resursrelaterade utmaningarna är en ökad användning av EWPs. Med EWPs finns möjligheten att använda en större andel av trädet, samtidigt som restprodukter och mindre träelement kan tas tillvara och förädlas till bärande konstruktionsmaterial. Genom att träfibrer och mindre trädelar sammanfogas till större konstruktionsprodukter kan råmaterialet utnyttjas mer effektivt och variationer samt naturliga defekter i virket reduceras. Detta möjliggör högre hållfasthet och bättre materialutnyttjande jämfört med traditionellt konstruktionsvirke. Mängden trä kan specifikt optimeras i lättbalkar där materialet placeras där det gör störst konstruktiv nytta, vilket minskar materialåtgången utan att bärförmågan försämras [10].

2.1. Trä som byggmaterial

Ur ett konstruktionsperspektiv är de mekaniska egenskaperna av trä det som definierar användningsområde och nytta. Trä är ett anisotropt material vilket innebär att det inte har samma kapacitet att hantera deformationer och spänningar i alla riktningar. På grund av materialets uppbyggnad har det tre huvudriktningar med olika mekaniska egenskaper: fiberns riktning, tangentiell riktning och radiell riktning. Detta beror på att trä är uppbyggt

av långa rörformade celler (fibrer) sammankopplade med varandra genom ett naturligt lim kallat lignin. Längs fibern är träet starkast och styvast, likt vilket rör som helst. Ligninet som binder samman rören till varandra är svagare än träfibrerna i sig. Se figur (1) för en illustration av de tre huvudriktningarna [11, 12].



Figur 1: De tre huvudriktningarna hos trä. Modifierat från Svenskt Trä [12]

Drag-, tryck- och skjuvhållfastheten varierar mellan riktningarna. För att beskriva egenskaperna exakt krävs det att elasticitetsmodulen(E) och skjuvmodulen(G) i de tre huvudinriktningarna definieras. Då de två vekare riktningarna (tangentiell och radiell) är så mycket vekare än fiberns riktning (och har jämförbara egenskaper) används oftast hållfasthetsvärden parallellt fiber och vinkelrätt fiber istället för att definiera alla riktningar explicit. Se tabell 1 för densitet, hållfasthets- och styvhetsegenskaper hos konstruktionsvirke (K-virke) [13, 12].

Tabell 1: Hållfasthetsvärden, styvhet och densitet angivna i MPa och kg/m^3; Svenskt Trä [13]

Hållfasthetsvärden		**C24**	**C30**
Böjning parallellt med fibrerna	$f_{m,k}$	24	30
Dragning parallellt med fibrerna	$f_{t,0,k}$	14,5	19
Dragning vinkelrätt mot fibrerna	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4
Tryck parallellt med fibrerna	$f_{c,0,k}$	21	24
Tryck vinkelrätt mot fibrerna	$f_{c,90,k}$	2,5	2,7
Längsskjuvning	$f_{v,k}$	4,0	4,0
Styvhetsvärden för analys av bärförmåga			
Elasticitetsmodul	$E_{0,05}$	7400	8000
Styvhetsvärden för deformationsberäkningar, medelvärden			
Elasticitetsmodul parallellt med fibrerna	$E_{0,mean}$	11000	12000
Elasticitetsmodul vinkelrätt mot fibrerna	$E_{90,mean}$	370	400
Skjuvmodul	G_{mean}	690	750
Densitet			
Densitet	ρ_k	350	380
Densitet	ρ_{mean}	420	460

Det finns många variabler som påverkar de mekaniska egenskaperna av K-virke, såsom densitet, fiberriktning, kvistar, splintved eller kärnved. Det medför att inom samma träslag kan hållfastheten variera kraftigt, exempelvis kan gran variera i böjhållfasthet mellan 10-90 MPa. På grund av denna variation hållfasthetsklassas K-virke beroende på dess böjhållfasthet. Hållfasthetsklasserna C14 och C24 är vanligast på marknaden, men även C30, C18 och C35 förekommer i Sverige [14, 12].

Yttre faktorer som UV-ljus, fukt, temperatur, pH-nivå, kemikalier och brand påverkar träets förmåga att motstå deformationer och spänningar. Gällande temperatur ökar hållfasthet och styvhet med lägre temperaturer. Vid högre temperaturer (95°C+) börjar termisk nedbrytning av träet, och cellulosakedjor blir kortare. Mellan temperaturer -30°C till +90°C är skillnaden inte särskilt stor. Gällande fukt ökar också hållfasthet och styvhet linjärt med minskande fuktkvoter under fibermättnadspunkten, 27–33% fuktkvot för barrträd, vilket är då cellerna är fyllda med vatten. Över fibermättnadspunkten sker inga betydande skillnader i hållfasthet och styvhet [12].

2.2. Engineered Wood Products

Trä som byggnadsmaterial har historiskt begränsats av sin anisotropa natur, samt att tvärsnittsdimensionerna är begränsade beroende på storleken av träden som används. I Sverige produceras K-virke med dimensioner upp till 245 mm och för att producera dimensioner större än så krävs det en *Engineered Wood Product* (EWP) [12].

EWP består av sågat virke, skivor, fanér, flisor, spån eller fiber, ofta sammanfogat genom limning [12]. Globalt sett använder EWP-industrin nästan uteslutande syntetiska, fossilbaserade lim som huvudsakligen bygger på reaktionen mellan formaldehyd och urea, melamin, fenol eller samkondensat av dessa komponenter. Även om fossilbaserade lim är kritiserade för deras hälso- och klimatrisker används biobaserade lim i väldigt liten utsträckning på grund av den billiga produktionen, snabba härdningen och den långa livslängden av syntetiska lim [15].

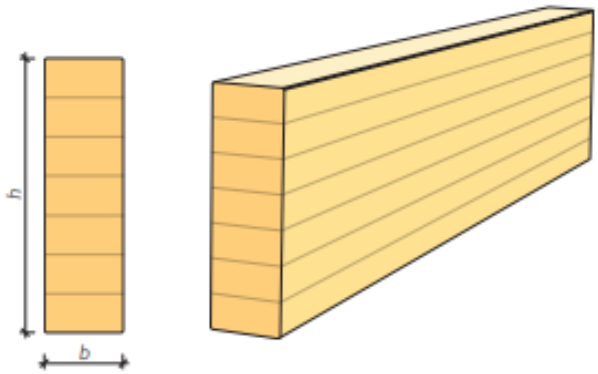
Trots detta har utvecklingen av biobaserade limsystem ökat under de senaste åren i takt med ökade krav på hållbarhet och minskad användning av fossilbaserade material. Särskilt lignin, som är en naturlig beståndsdel i trä, har visat stor potential som ersättning för fenol i traditionella fenol-formaldehydlim (PF-lim). Genom kemiska modifieringar kan ligninets reaktivitet förbättras och användas i limsystem för bland annat plywood och träbaserade skivor. Även andra biobaserade alternativ, såsom tannin-, stärkelse- och sojaproteinbaserade lim, har visat lovande resultat med avseende på hållfasthet och reducerade formaldehydutsläpp. Kombinationen av EWPs och biobaserade lim skapar därmed möjligheter att ytterligare minska träbyggandets klimatpåverkan och öka andelen förnybara material i bärande konstruktioner [15].

Användning av EWPs möjliggör inte enbart produktion av träelement i större dimensioner, utan bidrar även till förbättrade mekaniska egenskaper. Genom korslimning eller fiberorientering i flera riktningar i planet kan den svaga riktningen effektivt reduceras. Det bidrar till ett versatilt material som har mindre fuktbetingade rörelser. Användandet av flis, fiber, flera skikt av fanér eller brädor skapar även en utjämningseffekt. Kvistars, sprickors och tjurveds inverkan på materialets hållfasthet minskar på grund av denna effekt då trä fritt från defekter med stor sannolikhet överlappar områden där trä med defekter förekommer [12].

2.2.1. Limträ

Otto Hetzer utvecklade i början av 1900-talet limträ, som blev den första av en serie innovationer inom träindustrin. Limträ består av sågade lameller som med hjälp av lim binds samman så att alla lameller har fibrerna i samma riktning. I Sverige etablerades den första limträfabriken 1919 i Töreboda där produkterna med båt och järnväg kunde fraktas till Stockholm och Göteborg [12, 16].

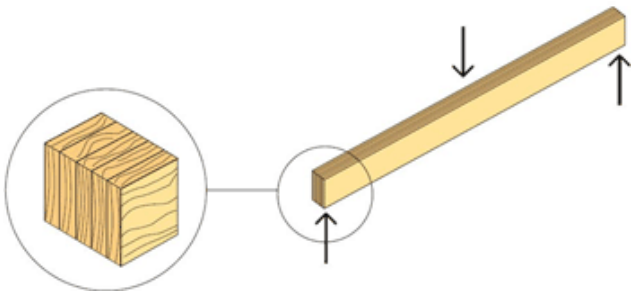
Idag tillverkas det fortfarande limträprodukter i Töreboda och samtidigt har flera andra företag etablerat sig. I Sverige tillverkas limträ generellt utav 45 mm höga lameller med en bredd upp till 215 mm. Bredare element tillverkas genom att limma ihop två eller fler färdiga limträtvärsnitt. För att det ska klassas som limträ måste minst fyra lameller limmas ihop på varandra [12, 16]. Limträ visas i figur (2).



Figur 2: Limträm, tagen från Svenskt Trä [16]

2.2.2. Fanérträ (LVL)

Fanérträ, förkortat LVL (Laminated Veneer Lumber), uppfanns i slutet av 1960-talet och har sedan dess tagit marknadsandelar på grund av sin höga hållfasthet. Den direkta skillnaden mellan LVL, limträ och KL-trä är att istället för sågade lameller byggs LVL upp av tunna fanér som limmas ihop, vilket gör att större andel av stocken kan utnyttjas [2]. LVL visas i figur (3).

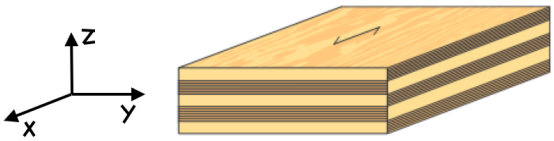


Figur 3: Fanerträ (LVL) [12]

Stora fanerskivor upp till en storlek på 3x24 m sätts ihop för att bilda mellan 20-90 mm tjocka paneler. Generellt sätt limmas fanéren så att fiberriktningen är parallell med längsriktningen. Efter torkning sågas panelerna till färdiga produktdimensioner [12].

2.2.3. Plywood

Plywood är en tidig variant av EWP som togs fram tidigt 1900-tal. Patent för plywood upprättades i USA 1865, men industrin för plywood tog fart 1905. Plywood består av korslimmad fanér av barr- eller lövträ, där ett lagers fiberriktning skiljer sig alltid 90° från ovan- och underliggande lager fanér. Det är som regel ett ojämnt antal lager fanér, med andra ord speglas lagerföljden genom tjocklekens mittpunkt [11]. Plywood visas i figur (4).



Figur 4: Plywood [12]

Fördelar med att orientera fiberriktningen i alternerande vinkel är att träets naturliga anisotropi motverkas. Trä som annars har en styv (fiberns) och två vekare (tangentiell och radiell) riktningar har i plywood 2 styvare (x,y) och en vek riktning (z). Detta bidrar till att skivmaterialet motstår krympning och andra typer av rörelser i planet bättre än hos vanligt K-virke. En ytterligare fördel med fler lager oberoende av orientering är att inverkan av potentiella svagheter i träet, exempelvis kvistar, minskar [12].

Den europeiska standarden för att klassificera plywood är EN 636 [17]. De tre vanligaste kategorierna är konstruktionsplywood, dekorativ plywood och marin plywood. Klassningen baseras med hänsyn till användningsområde, hur utsatt skivan är för miljön och hur fuktbeständig limningen är, detta visas i tabell (2).

Tabell 2: Klassificering av plywood enligt SS-EN 636 [17].

Miljö	**Limklass (EN 314)**	**Klimatklass (Eurokod 5)**	**Användningsklass (EN 335)**
Torra inomhusmiljöer	1	1	1
Fuktiga miljöer	2	2	1 och 2
Utomhusmiljöer	3	3	1, 2 och 3

2.2.4. Spånskiva

Spånskivan utvecklades i början av 1900-talet och blev populär under andra världskriget för att kunna utnyttja timmer av sämre kvalitet [18]. Nuförtiden används spånskivan i byggelement såsom golv, väggar och innertak, men även i möbler och inredning [19]. Förutom nämnda användningsområden är spånskivan vanligt förekommande som livmaterial i lättbalkar [20]. Skivan tillverkas genom att stockar avbarkas för att sedan brytas ner med en flismaskin till spån. Processen görs flera gånger och spånen blir mindre och mindre, och när spånen är i rätt storlek vanligtvis mindre än 2 mm torkas de innan hopsättning. Därefter limmas de ihop i form av en skiva, generellt används lim som *Urea-formaldehyd* (UF) eller *Fenol-formaldehyd* (PF) [18]. Spånskiva visas i figur (5).



Figur 5: Spånskiva [21]

Utformningen av spånskivan gör att egenskaperna blir lika i alla riktningar. Typ och mängd

lim har stor inverkan på hållfastheten. Högre klassade skivor innehåller en större andel lim. Skivorna är ofta behandlade för att få en fin yta, och kan även sprutas med flamskyddsmedel. Produkten delas sen upp i klasser efter användningsområde som presenteras i tabell (3).

Tabell 3: Spånskivsklassning enligt SS-EN 312:2010 [22].

Klass	**Användningsområde**	**Fuktförhållanden**
P1	Allmän användning, ej bärande konstruktioner (t.ex. möbler, inredning)	Torr miljö
P2	Inredningsskivor för möbler och fast inredning, ej bärande	Torr miljö
P3	Icke-bärande skivor för byggnadsändamål (t.ex. vägg- och takbeklädnad)	Fuktig miljö
P4	Bärande skivor för användning i torra miljöer	Torr miljö
P5	Bärande skivor för användning i fuktiga miljöer	Fuktig miljö
P6	Högpresterande bärande skivor med höga hållfasthetskrav	Torr miljö
P7	Högpresterande bärande skivor med höga hållfasthetskrav	Fuktig miljö

2.2.5. Oriented Strand Board (OSB)

OSB började tillverkas i Kanada på 1960-talet och har sedan mitten på 80-talet varit en populär produkt inom byggkonstruktion internationellt, dels på grund av dess mekaniska egenskaper men också dess låga pris [2]. OSB tillverkas av träflisor som utvinns från timmer med relativt liten diameter. Under värme och tryck pressas sedan flisorna ihop med lim i ett förhållande på ca 95% trä och 5% lim. I de yttersta lagren placeras flisorna så att fibrerna hamnar parallellt med längsriktningen, medans flisorna i de inre lagren läggs slumpmässigt. Skivorna tillverkas vanligtvis med måtten 1200x1400 mm och en tjocklek mellan 6-25 mm [12]. OSB visas i figur (6).



Figur 6: OSB [21]

Inom byggsektorn används OSB i både väggar, golv och tak och är också ett vanligt livmaterial i lättbalken. Det är också ett vanligt material vid tillverkning av möbler, skåp och emballage [2]. OSB klassificeras in i klass 1-4 där OSB/1 är den lägsta klassen och används till inredning i torra miljöer. De andra tre klasserna kan på olika sätt användas i dimensionering av bärande konstruktioner enligt Eurokod 5. OSB/4 är den tyngsta och mest fuktbeständiga skivan [23].

2.2.6. Träfiberskiva

Träfiberskivan kan tillverkas på ett liknande sätt som spånskivan, så kallad torrtillverkad träfiberskiva, se figur (7) [12]. Utgångsmaterialet är torra karbamidbelimmade fibrer, oftast med UF-lim. Med skivan har man lyckats nå ett väldigt homogent material och den är mycket jämn i sina egenskaper. Vid torrtillverkning kallas skivmaterialet för *Medium Density Fiberboard* (MDF) [23].

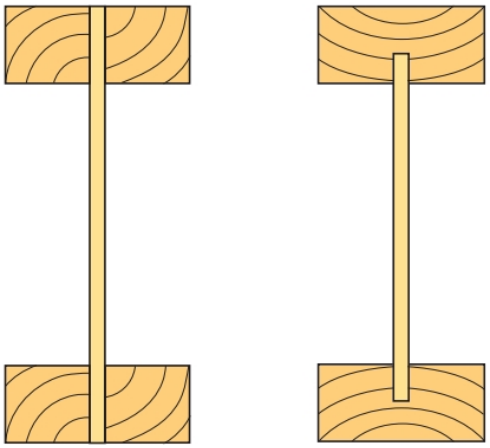


Figur 7: Våt- och torrtillverkad träfiberskiva [21]

Våttillverkade träfiberskivor använder ligninet i träet som bindemedel. Processen utvecklades av William H. Mason och refereras generellt till som masonit. Masonit används vanligtvis som konstruktionsmaterial medan de andra typerna av träfiberskiva är vanligare vid möbeltillverkning. Våttillverkning kan producera skivor med, beroende på presstryck, olika egenskaper, från porösa skivor till hårda skivor (HDF) [12].

2.3. Lättbalkar

Även lättbalken är en typ av EWP, balkarna konstrueras med flänsar av konstruktionsvirke eller LVL och livmaterial av någon typ av byggskiva. Tillverkningen av lättbalkar sätter stora krav på kvalitetskontroller, vilket har lett till att majoriteten av lättbalkar produceras i fabrik där tillverkaren ger karakteristiska hållfasthetsvärden. Livet limmas ihop med flänsarna genom frästa spår, eller mellan två delar av flänsen - se figur (8) [12].



Figur 8: Tvärsnitt av två typer av ihoplimmade lättbalkar, dubbel fläns till vänster och fräst fläns till höger [12]

2.3.1. Lättbalkens historia

Lättbalken är en typ av I-balk. I-balken har traditionellt sett tillverkats i stål. Tillverkningsmetoden att från ett stycke stål producera en I-balk patenterades 1849 av Alphonse Halbou på företaget *Forges de la Providence*. Tanken är att livet hanterar tvärkrafter medans flänsarna tar hand om böjmomentet i balken. Detta gör tvärsnittet effektivt på att hantera båda lasttyperna i balkplanet [3].

För utvecklingen av I-balkar i trä skedde ett viktigt framsteg 1934 när kemisten Dr. James Nevin på *Harbor Plywood Corporation* i Washington tog fram ett helt vattenfast lim. Trots detta framsteg tog det tid för industrin att implementera detta på en större skala. Det var först på 1960-talet som *Truss Joist Corporation*(TJ) började producera den första versionen av lättbalken, den var då baserad på publikationer från *Douglas Fir Plywood Association*, föregångaren till *The Engineered Wood Association* (APA) som publicerades 1959. Till en

början var det effektiviteten med lättbalken som drev utvecklingen framåt, både kostnads- och prestandamässigt. På 70-talet blev det populärt att bygga hus med öppna planlösningar, där möjligheten fanns att tillverka konstruktionsvirke för långa spännvidder men till en hög kostnad. Lösningen fanns då med lättbalken [3].

År 1969 kom den första standarden för lättbalkar, *ASTM D5055 - Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists*. Standarden ger riktlinjer för hur man utvärderar mekaniska och fysiska egenskaper samt kvaliteten på lättbalken. Denna standard används än idag för generell testning av lättbalkar [3].

I Sverige började lättbalken tillverkas på 70-talet då *Masonite AB* blev först i världen med fullskalig produktion av lättbalken. Till en början såldes balkarna till lösvirkes-snickare, men snabbt etablerade den sig även i husfabriker. Lättbalksproduktionen fortsatte att öka fram till början av 90-talet då byggbranschen kraschade. Sedan dess har balken långsamt tagit marknadsandelar igen [3].

2.3.2. Lättbalkens funktion och livmaterialets inverkan

En lättbalks bärverkan bygger på att flänsarna i K-virke, LVL eller liknande tar tryck- och dragkrafterna som uppstår genom momentet i tvärsnittet vid böjning, medan livets uppgift är att ta hand om skjuvkrafter [24]. Till skillnad mot rektangulära eller cirkulära tvärsnitt förekommer buckling av livet. Det sker på grund av det relativt höga och tunna livmaterialet [3]. I-tvärsnitt löper därmed risk för förlust av bärverkan vid lägre laster än brottgränsen. För att motverka buckling av livet installeras förstärkning i form av dubbelsidiga vertikala kvadratiska avstyvningar. Avstyvningar placeras vid spänningskoncentrationer eller vid upplagen, där behovet av förstärkning är som störst [24].

Den konventionella lättbalken med ett platt liv av exempelvis plywood, OSB, fiberskiva eller spånskiva används på grund av dess låga kostnad, enkla produktion och höga skjuvhållfasthet. Typer av lättbalkar med sinusformat liv används även då den profilerade livgeometrin medför ett ökat motstånd mot lokal buckling jämfört med plana livmaterial, särskilt vid skjuvbelastning. Dock kräver produktionen av dessa lättbalkar en större noggrannhet då livet måste passa i spåret [24].

Inverkan av olika skivmaterial som liv har testats, i form av plywood, OSB, fiberskivor, glas och bambu. Med plywood som livmaterial konstaterades att brottlasten ökade jämfört

med spånskiva och MDF medan I-tvärsnittets E-modul inte påverkades. Vid tester av HDF konstaterades det att nedböjning av balken till stor del berodde på skjuvhållfastheten av livmaterialet. Även analyser med finita elementmetoden har utförts på hur ett OSB-livs mekaniska egenskaper påverkar deformationerna hos I-balkar. Resultaten visade även då att skjuvhållfastheten i balkens plan är den parameter som påverkar nedböjningen mest, medan elasticitetsmodulen i drag i längs- och tvärriktning har mindre inverkan. Glas har också testats som livmaterial och resultaten visar att styvheten av dessa balkar överstiger det av träbaserade lättbalkar med 30% och brottgränsen är jämförbar [24].

2.4. Klimatberäkningar och hållbara skivmaterial

För att nå både nationella och globala hållbarhetsmål är en rationell användning av naturresurser en av de viktigaste punkterna. En cirkulär ekonomi förespråkar konverteringen av avfall och biprodukter till tillgängliga produkter, vilket leder till ett minskat behov av råvaror och lägre koldioxidutsläpp. Den ökande efterfrågan på träprodukter resulterar samtidigt i ett högre tryck på träindustrin och ökade priser [25].

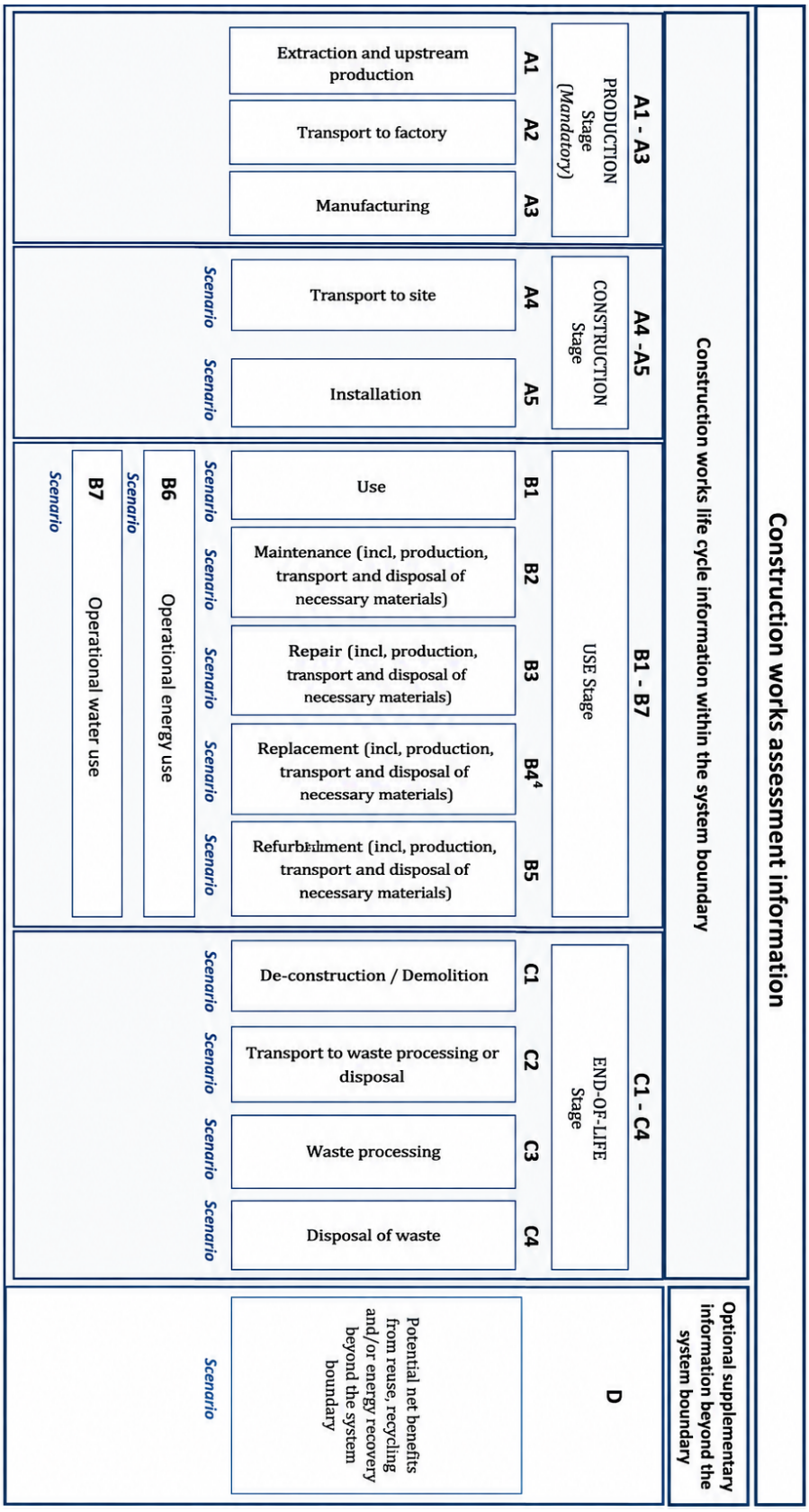
2.4.1. Klimatberäkning med EPD

En miljövarudeklaration förkortat EPD (Environmental Product Declaration) tillhandahåller objektiv och kvantifierad miljöinformation om en byggprodukt eller tjänst och dess användning. EPD är till för att främja bedömning och jämförelse av produkter baserat på deras miljöprestanda, vilket i sin tur leder till marknadsdriven förbättring av miljöpåverkan kopplad till produkten. Initiativet drivs inte bara av marknaden utan även myndigheter. Inom EU har hållbarhetskrav och standardisering av byggprodukters miljödata ökat betydelsen av EPDer, bland annat genom standarden EN 15804 och utvecklingen av EU:s *Construction Products Regulation* (CPR) som på svenska benämns *Byggproduktförordningen*. En EPD redovisas i moduler som täcker livscykelns alla skeden, alltså måste en *Livscykelanalys* (LCA) göras som underlag till EPD [26, 27].

EPD ska tillhandahålla byggproduktens eller tjänstens klimatpåverkan samt information om hälsorelaterade föroreningar under användningsfasen. Alla byggprodukter och byggmaterial ska redovisa modulerna A1-3, C1-4 och D. Däremot är det tillåtet att redovisa hela livscykeln samt potentiellt återbruk av produkten [26].

Den modulbaserade uppbyggnaden av den LCA som ligger till grund för en EPD gör det enkelt att organisera och redovisa data genom hela livscykeln. Detta medför att systemet i sig och modulerna måste vara tydligt redovisade, väldefinierade och tillämpbara på alla byggmaterial. Systemet följer två principer. Den första principen avser under vilken modul en produkt ska redovisas. Detta bestäms utifrån i vilket/vilka skeden produktens klimatpåverkan sker. Den andra principen är att avfallshantering till följd av en produkt ska fortsatt redovisas på räkningen av produkten under hela livscykeln [26].

Vid beräkning enligt LCA ska klimatkompensation inte inkluderas i beräkningen av *Global Warming Potential* (GWP). GWP är ett mått på förmågan hos en växthusgas att bidra till växthuseffekten och den globala uppvärmningen. Klimatkompensation är en minskning av koldioxidutsläpp eller andra växthusgaser som görs i syfte att kompensera för annat utsläpp. Tillfällig kolinlagring eller fördröjning av utsläpp ska inte räknas med i GWP. Effekten av permanent biogenisk kolinlagring ska inte heller vara med i beräkningen av GWP [26]. Figur (9) visar en sammanställning av livscykelstegen.



Figur 9: Livscykelmoduler för byggarbetens miljöbedömning modifierad från SS-ISO 21930 Hållbarhet hos byggnadsverk - Regler för miljödeklarationer för byggprodukter och byggtjänster [26].

2.4.2. Träbaserade skivmaterial (WBP)

Träbaserade skivmaterial förkortas WBP som står för *Wood Based Panels*. Utvecklingen av hållbara och miljövänliga lim inom WBP-industrin har blivit ett viktigt forskningsfokus som svar på nya regleringar och problem kopplade till användningen av konventionella lim. Ersättningen av formaldehydbaserade lim är en avgörande faktor för industrins hållbara tillväxt, och har lett till en mer utbredd användning av alternativa skivmaterial i tillämpningar som möbler och konstruktionsteknik [28].

Merparten av framstegen inom detta utvecklingsområde har hittills gjorts på laboratorieskala. Övergången till industriell skala är svår och präglas av både tekniska och ekonomiska utmaningar. Trots detta har vissa nyckelfrågor identifierats såsom vattenbeständighet och behovet av mer kostnadseffektiva limsammansättningar. Undersökningar för detta görs för närvarande och har gett vissa lovande resultat [28].

Samtidigt har många studier om möjligheten att använda återvunnet trä som byggmaterial gjorts under 2000-talet. Utmaningen med återvunnet trä är att det inte är ett homogent material och därför finns det fortfarande begränsningar för användning inom WBPs. I Europa finns strikta föreskrifter som kontrollerar återvinning, det har lett till att Europeiska forskningsinstitutioner ligger i framkant inom studier på träavfall. Dock saknas ett gemensamt regelverk för återvunnet trä när det gäller klassifikation och begränsningar [6].

Genom studier kan det konstateras att det finns fördelar med processen att bryta ner träavfall till spån, eftersom det leder till att spånskiveproduktion med återvunnet trä är det primära alternativet i jämförelse med OSB och plywood. För just plywood finns det få studier på hur det skulle kunna tillverkas med hjälp av träavfall [6].

Spånskivor och kärnan av OSB kan ersättas med upp till 100% återvunnet trä. Även om kontamineringar i träavfall skulle kunna leda till sämre fysiska och mekaniska egenskaper i byggskivan kan moderna sorteringsprocesser ta bort kontamineringar. Att använda återvunnet trä i WPBs ökar risken av formaldehydföroreningar. Risken kan hanteras genom att förbehandla träet och då minska emissioner, eller genom användning av biobaserat lim [6].

LivingBoard

LivingBoard P5 är ett helt formaldehydfritt skivmaterial. Tillverkaren Pfleiderer [29] beskriver skivan som ett bättre alternativ till en traditionell OSB-skiva då flisornas och spånens

geometri optimerats. Skivan ska enligt dem ha en nästan lika hög böjstyvhet i alla riktningar. LivingBoard P5 tillverkas nästan helt av gran med låg halt av kåda vilket gör att materialet till skillnad från en OSB som vanligtvis har en hög kådahalt får lägre utsläpp av lättflyktiga organiska föreningar, förkortat VOC (Volatile Organic Compounds). Tillverkningen sker också till stor del av biprodukter från sågverksindustrin, samt skadat virke från skogsindustrin. Skivan finns i tjocklekar mellan 13-25 millimeter [30].

PremiumBoard

Pfleiderers PremiumBoard MFP P5 består av ungefär 50% återvunnet trämaterial [31]. Det är en spånskiva och fibrerna är slumpmässigt utspridda i skivan vilket ger ett relativt homogent material. Även denna skiva är limmad med formaldehydfritt lim. Skivan tillverkas i en tjocklek mellan 10-25 millimeter [30].

2.4.3. Alternativa skivmaterial

För att spara träresurser och samtidigt hantera avfallsproblemet kan byggskivor produceras med en andel eller helt av biomassa och avfall från exempelvis livsmedels- och jordbruksindustrin. Faktorerna för att bestämma potentialen av ett alternativt material till användning i byggskivor är lokal tillgänglighet, lagringsmöjligheter, koldioxidneutralitet, fysiska och kemiska egenskaper. Att utnyttja biomassa och avfall förespråkar samtidigt bättre hantering av jordbruksbiprodukter och möjligheten att återvinna jordbruksavfall [25].

Packwall

Packwall är en byggskiva producerad av Recoma. Packwall är enligt produktens tekniska datablad [32] helt producerad av återvunna material. Byggskivans kärna består av förpackningar från livsmedelsindustrin och är omsluten av återvunnen papp som sammanfogas med skivan genom en återvunnen lågdensitetpolyetenfilm, också kallad *LDPE*. Byggskivan består av 65-75% papp, 25-35% LDPE och 1-5% aluminium. Råmaterialet strimlas, steriliseras, torkas och pressas sedan under hög temperatur. Under processen används inget lim, det är istället plasten (LDPE) som agerar bindemedel genom smältning och pressning i höga temperaturer. Recoma [32] menar att Packwall är ett hållbart alternativ till OSB, plywood, MDF, cementfiberplattor och gipsprodukter.

2.4.4. Materialegenskaper och livscykelanalys

För att utvärdera skivmaterialen används vissa materialegenskaper som tas direkt från tillverkaren. Detsamma gäller för klimatavtrycket - att samtliga material som testats har en EPD. De relevanta delarna av EPDerna och materialegenskaperna presenteras i tabell (4) nedan.

Tabell 4: Relevanta materialegenskaper och klimatdata för de undersökta skivmaterialen. Klimatdatan baseras på GWP-total, E-modulen presenteras vinkelrätt ($\perp$) respektive parallellt ($\parallel$) med skivans plan.

Skivmaterial	A1-3	C3	E-modul $\perp$	E-modul $\parallel$
Enhet	$KgCO_2 - eq/Kg$	$KgCO_2 - eq/Kg$	MPa	MPa
Plywood K20/70	-1,48	1,55	3831	8231
OSB/3	-1,45	1,84	1980	4930
Packwall	-1,00	1,06	488	488
LivingBoard	-1,39	1,59	2550	2550
PremiumBoard	-1,39	1,59	2550	2550

3. METOD

Detta kapitel presenterar de metoder som används under arbetet. Från bakgrunden framkommer det att livmaterialets inverkan på tvärsnittet främst är genom skjuvning. För att då kunna utvärdera olika livmaterial är det mest relevant att undersöka skjuvning. Arbetet delas in i tre delar, en analytisk metod för att bilda en hypotes för hur lättbalkens kapacitet kan tänkas variera över olika tvärsnittshöjder, en provning av skivmaterialens rena skjuvkapacitet och en teoretisk tvåpunktsböjning av hela tvärsnitt.

3.1. Analytisk metod för spänningar och nedböjning

Genom analytiska modeller går det att bilda en uppfattning för hur spänningarna i tvärsnittet varierar beroende på geometri, materialegenskaper och last. Detta görs utifrån datan i tabell (5) och analytiska modeller för skjuv- och böjspänningar som presenteras nedan.

Tabell 5: Tvärsnittsdata för analytiska modeller.

Parameter	**Beteckning**	**Förklaring**
Tvärsnittshöjd	h	Total höjd av tvärsnittet
Flänstjocklek	t_f	Tjockleken på övre och undre fläns
Flänsbredd	b_f	Bredden på flänsarna
Livtjocklek	t_w	Tjockleken på livet
Elasticitetsmodul	E_f	Elasticitetsmodul för flänsmaterialet
Elasticitetsmodul	E_w	Elasticitetsmodul för livmaterialet
Tvärkraft	V	Applicerad tvärkraft
Böjmoment	M	Applicerat böjmoment

3.1.1. Skjuvspänningar över tvärsnittet

Skjuvspänningarna i en lättbalk bestäms utifrån balkteori enligt Bernoulli-Euler [33], där skjuvspänningens fördelning över tvärsnittet ges av ekvation (1):

$$\tau(y) = \frac{VS(y)}{Ib(y)} \tag{1}$$

där:

- V är den tvärkraft som verkar i det aktuella snittet
- I är tvärsnittets tröghetsmoment kring neutralaxeln
- $b(y)$ är tvärsnittets bredd på höjden y
- $S(y)$ är det statiska momentet för arean ovanför (eller under) den aktuella nivån

Tvärsnittets uppdelning

En lättbalk består av tre huvuddelar, en övre fläns, ett liv samt en nedre fläns. För att bestämma tröghetsmomentet delas tvärsnittet upp i tre rektangulära delareor. Det totala tröghetsmomentet kring neutralaxeln erhålls med parallellaxelsatsen i ekvation (2):

$$I = \sum_{i=1}^{3} \left(I_i + A_i d_i^2 \right) \tag{2}$$

där I_i är respektive delareas tröghetsmoment kring sin egen tyngdpunkt, A_i är delarean och d_i är avståndet mellan delareans tyngdpunkt och tvärsnittets neutralaxel.

Beräkning av det statiska momentet(S)

Det statiska momentet definieras i ekvation (3):

$$S(y) = \int_{A'} y' \, dA = A' \bar{y} \tag{3}$$

där A' är arean utanför den aktuella snittnivån och $\bar{y}$ är avståndet mellan denna areas tyngdpunkt och neutralaxeln. Eftersom flänsarna har betydligt större bredd än livet kommer bidraget till S att domineras av flänsarnas area när snittet tas inom livet.

Skjuvspänningsfördelning

I flänsarna är bredden $b(y)$ stor, vilket medför låga skjuvspänningar. I livet är bredden lika med livets tjocklek t_w, vilket är betydligt mindre, och skjuvspänningen blir därför avsevärt större.

Maximal skjuvspänning uppstår i neutralaxeln (na), där S antar sitt största värde med ekvation (4):

$$\tau_{\max} = \frac{V S_{\text{na}}}{I t_w} \tag{4}$$

För en typisk lättbalk är nästan hela tvärkraften koncentrerad till livet, och skjuvspänningen i flänsarna kan i praktiken ofta försummas.

3.1.2. Böjspänningar över tvärsnittet

En lättbalk består av olika material, vilket generellt betyder olika elasticitetsmoduler. För att kunna analysera böjspänningarna används metoden med transformerat tvärsnitt.

Elasticitetsförhållanden

Skillnaden i materialstyvhet hanteras genom att i ekvation (5) definiera förhållandet n:

$$n = \frac{E_w}{E_f} \tag{5}$$

där E_f och E_w är elasticitetsmodulerna för flänsar respektive liv.

Tvärsnittet transformeras till flänsmaterialet som referensmaterial. Detta innebär att livets area multipliceras med faktorn n vid beräkning av tröghetsmomentet.

Transformerat tröghetsmoment

Det totala tröghetsmomentet kring neutralaxeln bestäms enligt ekvation (6):

$$I_{tr} = nI_w + 2\left(I_f + A_f d^2\right) \tag{6}$$

där:

- I_w är livets tröghetsmoment kring neutralaxeln
- I_f är en fläns tröghetsmoment kring sin egen tyngdpunkt
- A_f är flänsens area
- d är avståndet från flänsens tyngdpunkt till neutralaxeln

Termen $A_f d^2$ erhålls från parallellaxelsatsen. Eftersom flänsarna är placerade långt från neutralaxeln dominerar denna term ofta tröghetsmomentet.

Böjspänningsfördelning

Böjspänningen beräknas först i referensmaterialet (flänsmaterialet) med ekvation (7):

$$\sigma_f(y) = \frac{My}{I_{tr}} \tag{7}$$

där M är böjmomentet och y avståndet från neutralaxeln.

Spänningen i livet erhålls genom korrigering med elasticitetsförhållandet enligt ekvation (8):

$$\sigma_w = n\sigma_f \tag{8}$$

Detta innebär att töjningen är linjär över hela tvärsnittet, medan spänningsnivån skiljer sig mellan materialen beroende på deras elasticitetsmodul. Flänsarna erhåller de största normalspänningarna eftersom de är placerade längst från neutralaxeln, medan livet främst bidrar till överföring av skjuvspänningar och stabilisering av tvärsnittet.

3.1.3. Nedböjning

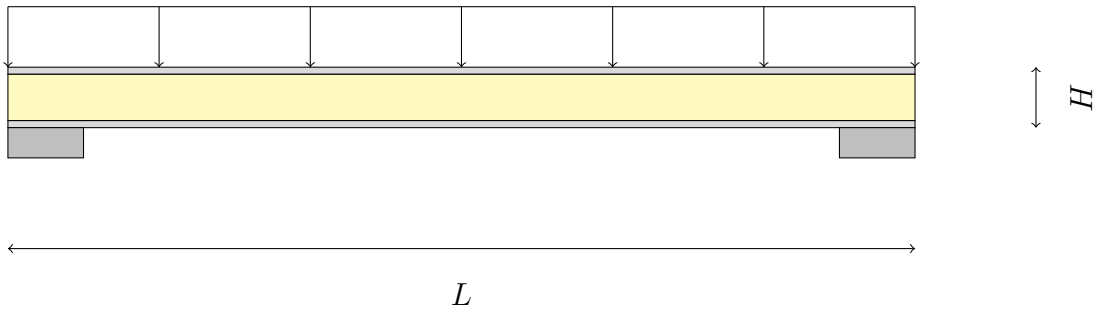
För att beräkna nedböjningen används det transformerade tröghetsmomentet (I_{tr}), ett beräknat lastfall samt lättbalkens dimensioner. Hur dessa ansätts och beräknas presenteras här.

Lättbalkens dimensioner, egenskaper och belastning

Balkens dimensioner och egenskaper hålls i denna studie konstanta för samtlig ingångsdata med skillnaden att livets tjocklek och elasticitetsmodul förändras beroende på material. Balken belastas enligt lastfall för golvbjälklag på två stöd taget från Masonite Beams projekteringshandbok [20]. I tabell (6) presenteras de dimensioner, egenskaper och laster som ansatts, balken är fritt upplagd på två stöd se schematisk bild i figur (10).

Tabell 6: Ansatta dimensioner och egenskaper för balken.

Typ	Värde	Enhet
Längd(L)	5610	mm
Tvärsnittshöjd(H)	400	mm
Flänsbredd(b_f)	47	mm
Flänstjocklek(b_t)	47	mm
Elasticitetsmodul fläns(E_f)	12000	MPa



Figur 10: Schematisk bild över balken för den analytiska modellen.

Beräkning av nedböjning

Nedböjningen beräknades enligt kapitel 5.2.3.7. i *The I-Joist Handbook* av Masonite Beams [3]. Beräkningen baseras på Bernoulli-Euler teori, se kapitel 5.5 för diskussion kring Timos-

henkos teori.

Även krypning togs i beaktning och beräkningarna gjordes för bruksgränstillståndet (SLS). Kryptalet sattes till 0,88 och partialkoefficienten för nyttig last till 0,3 enligt Masonite Beams [3]. Förutsättningarna som låg till grund för beräkningen visas i tabell (7) nedan. Det transformerade tröghetsmomentet som användes beräknades i ekvation (6).

Tabell 7: Förutsättningar för beräkning av utbredd last.

Typ	Värde	Enhet
Säkerhetsklass 3(γ_d)	1	
Centrumavstånd(S)	600	mm
Permanent Last(G_k)	0.65	kN/m^2
Nyttig Last(Q_k)	2	kN/m^2
Kryptal(k_{def})	0.88	
Partialkoefficient(Ψ_2)	0.3	

Den direkta nedböjningen beräknas först för den permanenta lasten enligt (9):

$$u_{dir,G} = \frac{5SG_kL^4}{384E_fI_{tr}} \tag{9}$$

Sedan beräknas den direkta nedböjningen för den nyttiga lasten enligt (10):

$$u_{dir,Q} = \frac{5SQ_kL^4}{384E_fI_{tr}} \tag{10}$$

Därefter beräknas den totala nedböjningen över tid enligt (11):

$$u_{tot} = u_{dir,G} \cdot (1 + k_{def}) + u_{dir,Q} \cdot (1 + k_{def} \cdot \Psi_2) \tag{11}$$

Enligt projekteringsanvisningar från Masonite Beams projekteringshandbok [20] måste nedböjningen för icke-lägenhetsskiljande golvbjälklag understiga L/300.

3.2. Standardmetod för Skjuvhållfasthetsprovning - Skjuvkapacitet i Skivmaterial

Standarden SS-EN 789:2004, *Timber Structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels*, föreskriver testmetoder menade att utvärdera mekaniska egenskaper hos träbaserade skivmaterial för användning i lastbärande konstruktioner, däribland skjuvhållfastheten. Genom testerna tas karakteristiska värden fram för att sedan ligga till grund för dimensionerande värden [34].

3.2.1. Provkroppar

För att motverka systematiskt fel och uppnå en realistisk spridning av egenskaperna ska provkropparna tas från olika skivor. För ett objektivt provkroppsurval ska provkroppar väljas enligt figur (A1) i Appendix. Tjockleken av provkroppen ska mätas vid fyra punkter, två mätpunkter vid vardera kant. Bredden ska mätas i två punkter. Både tjockleken och bredden mäts 80 mm från mittlinjen. Bredden och tjocklekens medelvärde antecknas. Provkroppen ska ha ett rektangulärt tvärsnitt och dimensionerna redovisas i figur (A2) i appendix [34].

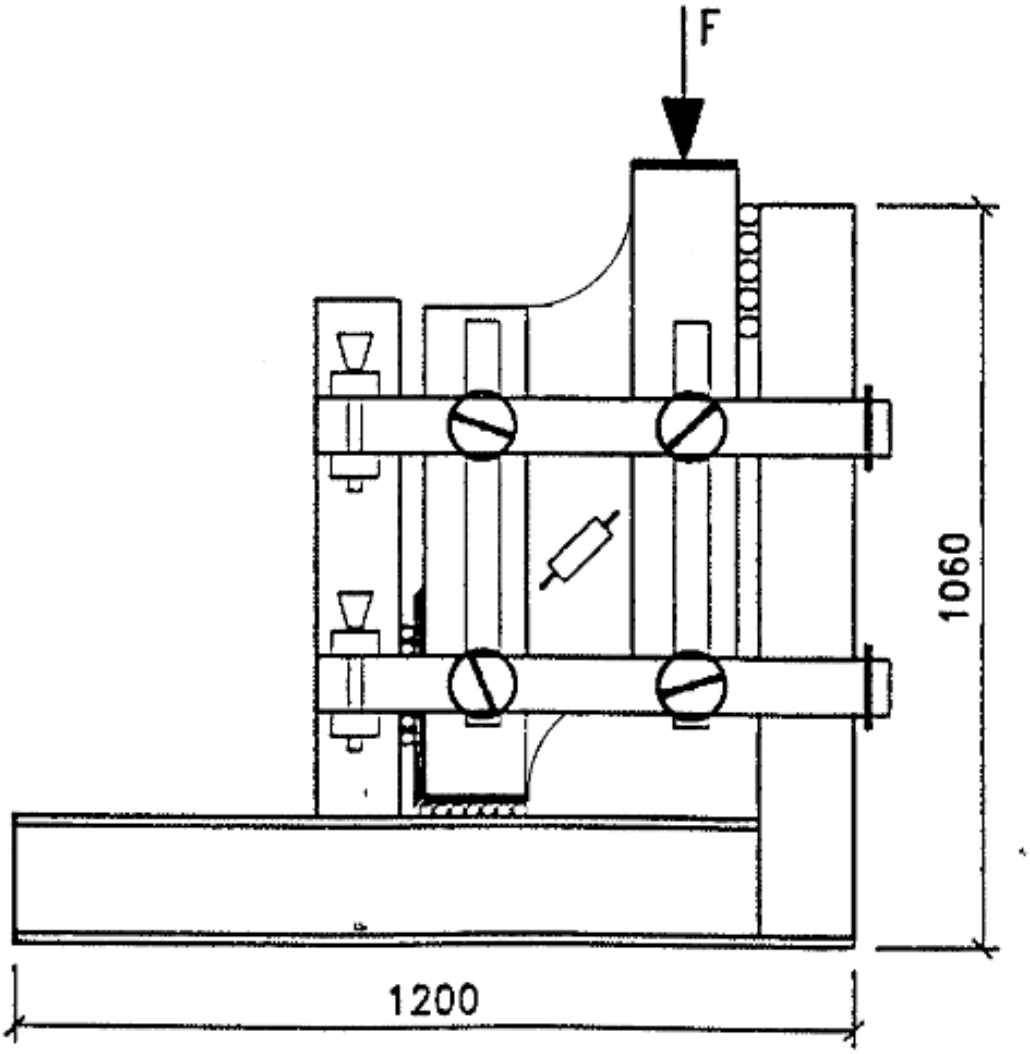
Alla provkroppar ska vara acklimatiserade i en omgivande luftfuktighet av 65 ($\pm$ 5)% i en temperatur på 20 ($\pm$ 2)°C. För att säkerställa acklimatiseringen ska vägningar av provkropparna utföras med intervall på 24 h. Vid massdifferens av högst 0,1% mellan två vägningar är provkroppen godkänd att testas, om testen utförs i annat klimat än vad provkropparna är acklimatiserade till ska testerna utföras omedelbart efter skifte av miljö [34].

Vid båda kanterna av provkroppen ska stödreglar i trä med dimensionerna 35x145x700 mm fästas mot båda sidor av provkroppen. För att undvika skjuvbrott mellan stödregel och skiva får en större bredd av stödreglarna användas. Stödreglarna ska placeras med ett avstånd på 150 ($\pm$ 2) mm från varandra, se figur (A2) . Stödreglarna och provkroppen ska ha ungefär samma fuktkvot vid limning som vid testets utförande. Ett lämpligt PRF-lim ska användas för att fästa stödreglarna [34].

Stödreglar får substitueras av stödreglar av stål och limning får substitueras av tvingar, såvida varken krossning av provkroppen eller glidning mellan provkropp och stödreglar förekommer [34].

3.2.2. Testuppställning

Deformationsmätare ska fästas vid båda sidor av provkroppen parallellt mot varandra vid utvärdering av skjuvmodul, se figur (11). Mätarna ska mäta längs trycklinjen 45° mot stödreglarna genom mitten av skjuvområdet. Mätlängden ska vara mellan 120 mm och 150 mm och centrerad mellan stödreglarna längs denna linje [34].



Figur 11: Illustration av testrigg för skjuvprovning av skivmaterial tagen från SS-EN 789:2004 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels [34].

Lasten ska verka jämnt över ytan högst upp på stödregeln och appliceras som en punktlast

parallellt med stödregeln. Punktlasten ska stegvis öka så att maxlasten nås inom 300 (± 120) s och med ett medel på ungefär 300 s för urvalet. Deformationen sätts till medelvärdet av uppmätta deformationer på vardera sida av provkroppen. Mätinstrumenten ska ha en noggrannhet av 1% av slutdeformationen och deformationen ska mätas till närmsta 0,005 mm [34].

Ytorna där laster ska påföras måste vara släta, parallella mot varandra och i räta vinklar mot provkroppen. Testriggen ska kunna mäta lasten till en noggrannhet av 1% av applicerad maxlast [34].

Brottmoden ska redovisas och alla provkroppar som har annan brottmod än skjuvbrott mellan stödreglarna ska redovisas separat [34].

3.2.3. Beräkningar

Skjuvmodul

För att bestämma skjuvmodulen är målet att skapa ett last-deformations-samband av samlad data från laboratorieförsöken där man använder intervallet $0,1F_{max}$ till $0,4F_{max}$ för att skapa en linjär anpassning [34]. Skjuvmodulen ska beräknas från datan för last och deformation enligt ekvation (12):

$$G_v = \frac{0.5(F_2 - F_1)l_1}{(u_2 - u_1)lt} \tag{12}$$

Där:

- $F_2 - F_1$ är stegringen av last mellan $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$
- $u_2 - u_1$ är stegringen av deformationen beroende på $F_2 - F_1$ genom den linjära regressionslinjen
- u_2 och u_1 är medeldeformationer mätta på båda sidor
- l_1 är mätavståndet
- l är längden av provkroppen mätt längs mittlinjen av skjuvområdet

– t är medeltjockleken av provkroppen mätt vid två punkter längs mittlinjen av skjuvområdet

Skjuvmodulen ska beräknas till en noggrannhet av 3 värdesiffror.

Skjuvhållfasthet

Skjuvhållfastheten beräknas enligt ekvation (13) [34]:

$$f_v = \frac{F_{max}}{lt} \tag{13}$$

Där:

– F_{max} är maxlasten vid brott

– l är längden av provkroppen mätt längs mittlinjen av skjuvområdet

– t är medeltjockleken av provkroppen mätt vid två punkter längs mittlinjen av skjuvområdet

Skjuvhållfastheten beräknas till en noggrannhet av 1%.

3.2.4. Modifierad testmetod

Rune Ziethén studerade i början av 90-talet möjligheten att testa andra skivmaterial än Plywood och OSB med standarden EN 789. Det framkom då att det fanns två begränsningar med metoden [35]:

– Skivmaterial med ett relativt lågt förhållande mellan drag- och skjuvkapacitet tenderar att gå till dragbrott i änden av skivan nära ett stöd

– Tunna skivor påverkas av instabilitetsfenomen innan skjuvkapaciteten nås

För att undvika detta modifierades standarden [35].

För förhållandet mellan drag- och skjuvkapacitet observerades det att de höga dragspänningarna uppkom vid de inre delarna av stöden. För att förhindra detta flyttades stöden så att provkroppen istället hamnar helt vertikalt. Det visade sig leda till mer definierade skjuvbrott [35].

För att hantera instabilitetsfenomenen undersöktes möjligheterna att förändra provkroppens geometri. Den effektivaste lösningen ansågs vara att minska förhållandet mellan tjocklek och bredd. I EN 789 används bredden 200 mm för provkroppar, men att minska den till 150 mm istället skulle leda till en större faktor. Att minska bredden mer än så konstaterades vara svårt då det kan orsaka problem med mätning av deformationer. Instabilitetsfenomen framkom även efter modifikation när tunna skivor testades [35].

Jämförelser av resultaten från provningar och FEM-analyser med EN 789 och den modifierade versionen visade försumbara skillnader mellan skjuvkapaciteten och skjuvmodulen för de båda metoderna. FEM-analysen visade samtidigt att den modifierade metoden gav en jämnare skjuvspänningsdistribution med mindre skillnad mellan max- och medelvärde [35].

3.3. Materialprovning av Skjuvhållfasthet i Skivmaterial

3.3.1. Val av Provuppställning

Efter det var bestämt att grunda provningen på EN 789 var ambitionen att komma så nära Ziethéns modifierade standard som möjligt med de förutsättningar som fanns [35].

Möjligheten att utföra provningen vertikalt ansågs från början begränsad. Tanken blev då istället att på något sätt lägga provkroppen ner och lasta den horisontellt. En ytterligare utmaning som då uppkom var friktion, som beslutades hanteras genom att mellan under- och överliggande stöd placera släta rundstänger för att minimera friktionen.

En annan ändring som gjordes på grund av praktiska skäl var att ändra dimensionerna på stödreglarna till 45x95 mm. Planen var att testa uppställningen med dessa dimensioner för att sedan utvärdera om ändringen av reglar påverkade resultaten. Då verifiering av provuppställning, se avsnitt 3.3.4, gjorts bedömdes detta ej påverka resultaten.

Med utgångspunkt i Ziethéns rapport och de tilltänkta ändringarna fanns nu en bra grund

för att skapa en provplan.

3.3.2. Provplan

En provplan upprättades för att överskåda arbetet. Provplanen omfattar materialbehov, dimensioner, skisser av provkroppar, funktion av provuppställning och mätdata. Provplanen låg till grund för laborationer som utfördes.

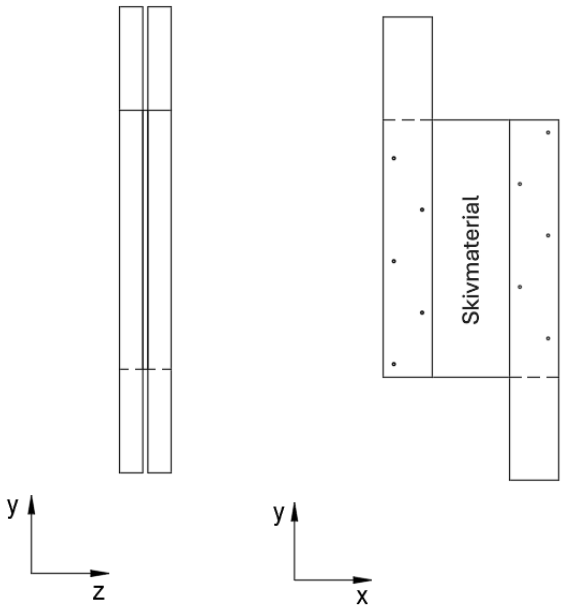
Material

Materialbehovet ställdes upp i tabell (8) där typ av material, dimensioner och mängd redovisas.

Tabell 8: Tabellering av materialbehov inför laborationer. Plywood och OSB används både vinkelrätt ($\perp$) och parallellt ($\parallel$) med skivans längsriktning.

Benämning	Material	Dimension [mm]	Mängd
Stödregel	Träregel C24	45x95x700	128 st
PLY 1-3	Plywood K20/70 $\perp$	12x340x500	3 st
PLY 4-6	Plywood K20/70 $\parallel$	12x340x500	3 st
OSB 1-3	OSB/3 $\perp$	11x340x500	3 st
OSB 4-6	OSB/3 $\parallel$	11x340x500	3 st
R8 1-5	Packwall	8x340x500	5 st
R12 1-5	Packwall	12x340x500	5 st
LB 1-5	Livingboard	13x340x500	5 st
PB 1-5	Premiumboard	10x340x500	5 st
	Trälim PVAc		5 l
	Maskinspik	3.1x90	640 st

Provkropparna består av komponenterna stödreglar, skivmaterial, maskinspik och lim. I figur (12) ges tjocklek längs z-axeln, bredd längs x-axeln och höjd längs y-axeln.



Figur 12: Schematisk skiss utav provkroppen sett i plan och från sidan.

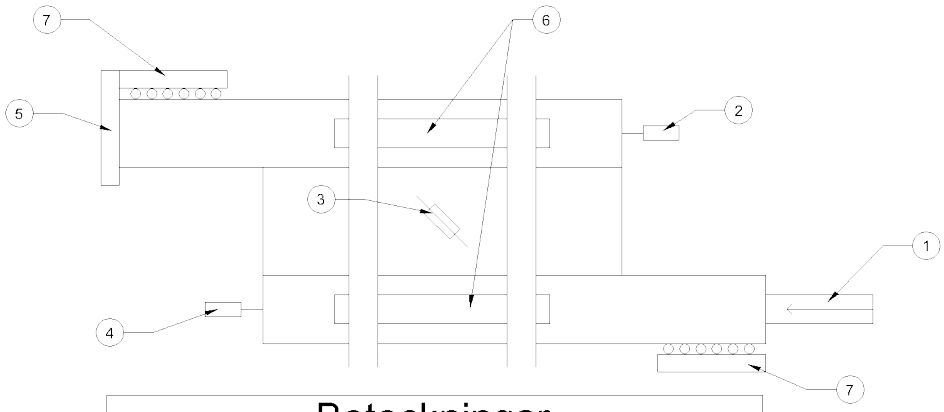
Stödreglarna spiklimmas fast på skivmaterialet. Tabell (9) anger positionering av spik i ett spikmönster. Mönstret utgår från hörnet varvid skivan och stödregeln linjerar. Båda sidor av provkroppen är spikade i ett spegelvänt mönster för att undvika att spikar möter varandra.

Tabell 9: Spikmönster med avstånd i millimeter i x- och y-led

Avstånd	x-led [mm]	y-led [mm]
C-C spik	55	100
Kantavstånd	20	25

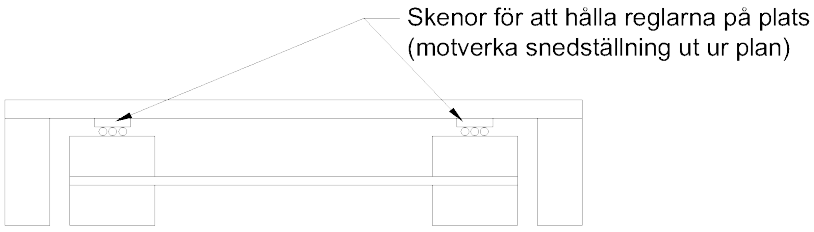
Provuppställning

För att testa skjuvkapacitet och skjuvmodul i byggskivor användes ett provningsbord med en tryckkolv och ett mothåll. Provkroppen säkrades i sidled med sidostöd med låg friktion samt ovanliggande stöd för att motverka snedställningar och lyft. Målet var att uppnå ett skjuvbrott längs tryckspänvan i skivan. Påförd last registrerades med hjälp av lastcell och deformationer registrerades med hjälp av deformationsgivare, Linear Variable Differential Transformer, ofta kallad *LVDT*. De deformationsgivare som användes hade toleranser enligt figur (13). Se figur (13,14) för schematisk skiss av provuppställningen.



Beteckningar	
1	Lastkolv
2	LVDT (0-5 mm)
3	LVDT (0-10 mm)
4	LVDT (0-20 mm)
5	Motlägg
6	Skenor
7	Sidostöd

Figur 13: Schematisk skiss av provuppställning med dimensioner. Lastkolven representeras med P, dimensioner är angivna i millimeter. Sedd uppifrån, snitt A-A i figur (14)



Figur 14: Snitt från schematisk skiss av provuppställning.

3.3.3. Uppbyggnad av provuppställning

När provplanen var etablerad började uppbyggnaden av provuppställningen. Monteringen gjordes på ett provningsbord med möjlighet att spänna fast stöd i spår längs bordet. Figur (15) visar bordet innan provuppställningen monterades.



Figur 15: Biaxiellt bord där provuppställningen sedan byggdes.

För att direkt få något visuellt att utgå ifrån tillverkades först de provkroppar som skulle komma att användas som referenser. Dessa beskrivs närmre i avsnittet *Verifiering av Provuppställning*.

När stöden kring provkroppen skulle utformas bestämdes det att de stora justerbara klossarna som kan ses i figur (15) skulle användas som stöd mot regeländarna. Provkroppen behövde då komma upp några centimeter från bordet, vilket gjordes genom att placera skenor av VKR-rör som reglarna sedan vilade mot med rundstänger mellan för att minska friktionen. Sidostöden utformades även dessa med VKR-rör med fastspända vinkelstål ovanpå, för att här minska friktionen placeras en tunn plastfilm mellan provkroppen och vinkelstålet. Utformningen beskrivs i figur (16, 17).



Figur 16: Sidostöd av L-stål med tving mot VKR.

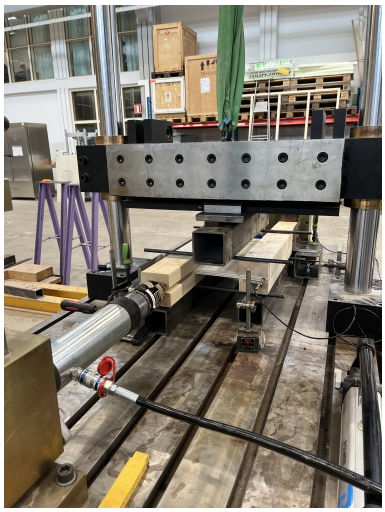


Figur 17: Ändstöd vid stödregels ände, VKR som underskena till provkropp.

Därefter behövde risken för instabilitet ur plan hanteras. Högst upp på de vertikala rören som syns i figur (15) satt ett stort ok mellan dem. Detta ok kunde sänkas ner och placeras närmre provkroppen. Mellan provkroppen och oket kunde sedan ett VKR-rör kilas fast med stålstänger mellan provkroppen och VKR-profilen för att minska friktionen. Denna lösning visas i figur (18) nedan.



(a) Brygga i originalposition

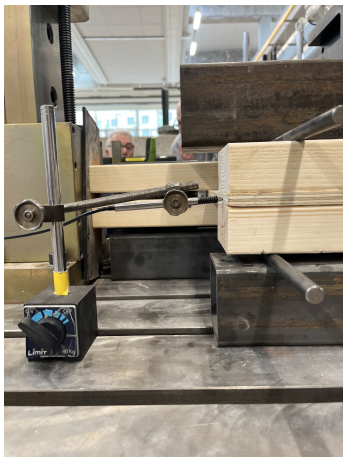


(b) Brygga i ny position

Figur 18: Bryggan flyttas ner för att kunna kila fast VKR-röret mot provkroppen.

Sedan kunde deformationsgivare och lastkolven placeras ut. Lastkolven fästes i den andra klossen som tidigare nämnts, med riktning in i änden på reglarna. Deformationsgivare place-

rades dels i linje med lastkolven fast i motsatt ände av reglarna, detta enligt standard. Utöver detta placerades också ytterligare givare mot regeln på andra sidan skivmaterialet. Detta för att kunna mäta hur mycket reglarna på den sidan initialt ger med sig. Den förskjutningen tas sedan bort för att få fram den faktiska deformationen. I figur (19) nedan visas en närmre bild av deformationsgivarna.



(a) Deformationsgivare för skivan



(b) Deformationsgivare för initial deformation

Figur 19: Givare placeras på bägge sidor av provkroppen, dels för att mäta skivans deformation men också initial deformation vid membranet på motlägget.

När provuppställningen var monterad kunde de första försöken utföras som en verifiering av uppställningens förmåga.

3.3.4. Verifiering av Provuppställning

För att säkerställa att provuppställningen ger rimliga resultat utfördes de första testerna på skivmaterial med redan kända skjuvegenskaper. Två olika skivmaterial användes för verifieringen: OSB/3 och Plywood K20/70. För att kunna skapa medelvärden för respektive material och undvika att provkroppen är icke-representativ, gjordes testet med tre provkroppar med skivmaterialets huvudriktning både parallellt respektive vinkelrätt mot påförd lasts riktning.

Reglarna limmades på skivan, tillförlitlig vidhäftning skapades med hjälp av klammer och spik. Därefter fick limmet torka i 7 dagar. Samtliga tester utfördes under en kort period med minimala förändringar i klimat. Både reglar och skivor är acklimatiserade till klimatet i

laborationssalen och kan anses som torra. Provkropparna numrerades och märktes med PLY respektive OSB. Nedan visas bilder på två av provkropparna i figur (20).



(a) OSB-skiva



(b) Plywoodskiva

Figur 20: Två färdigmonterade provkroppar för verifieringsprovning.

Provkropparna monterades en efter en i den konstruerade provriggen. Redan vid första försöket uppmärksammades en del förbättringsmöjligheter på provuppställningen. Den första skivan som testades var PLY 1, och började snabbt efter lastpåföring att deformera upp ur plan. Det hanterades genom att istället för ett VKR-rör mitt över provkroppen sattes en på var sida om skivan över stödreglarna, vilket går att se i figur (21).



Figur 21: Förbättring av överliggare för att hantera instabilitet ur plan.

Samtidigt framkom det att sidostödens konstruktion var för vek. Detta hanterades genom att ersätta skruvtvingarna med bultar för att få en bättre infästning mellan VKR-rör och

vinkelstål. Utöver detta förstärktes även infästningen mellan bordet och VKR-rören. Dessa förbättringar presenteras i figur (22) nedan.



Figur 22: Förstärkt sidostöd, skruvat mellan VKR och vinkelstål samt U-stång i VKR-röret.

Provuppställningen visade efter ovan beskrivna förbättringar goda resultat och resten av provkropparna testades för att kunna utvärdera uppställningens förmåga. För att få fram deformationen i skivorna tas mätdatan från den belastade kanten och subtraheras med mätdatan från den stödda kanten. Detta gör att den initiala deformationen från sättningar i uppställningen t.ex neoprenmembran vid motlägget räknas bort. Sedan plottas grafer för varje provkropp med last i kilonewton (kN) på y-axeln och deformation i millimeter på x-axeln. Utifrån dessa grafer tas sedan ett medelvärde av respektive skivas provkroppar samt en linjär funktion mellan 10% och 40% av lasten.

Enligt standard mäts deformationen i skjuvområdet på skivan. Tanken var att bortse från detta och få en renare deformation vid skivans kant. Efter att ha genomfört verifieringstesten beslutades det att vid senare provning även mäta deformationen i skjuvområdet av skivan för att beräkna skjuvmodulen. Deformationen i skjuvområdet mättes ej i OSB1-3, OSB4-6, Plywood 1-3 och Plywood 4-6. Således kan inte skjuvmodulen beräknas för dessa provkroppar genom ekvation (12).

Anpassad skjuvmodul

Då uppmätta deformationer i skjuvområdet av proverna OSB1-3, OSB4-5, Plywood 1-3 och Plywood 4-5 saknades skapades en anpassad skjuvmodul. För att beräkna en anpassad skjuvmodul ställdes ett förhållande mellan skjuvmodul och deformation vid en given last upp mellan ett materialprov med känd deformation och skjuvmodul och ett annat prov av samma material med känd deformation och okänd skjuvmodul.

$$G_{unknown,2} = \frac{Def_{known,1} \cdot G_{known,1}}{Def_{known,2}} \tag{14}$$

3.3.5. Alternativa skivmaterial

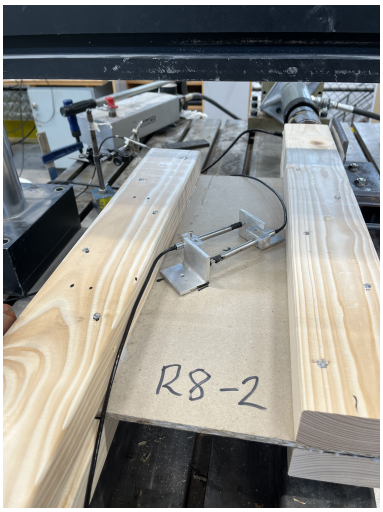
Alternativa skivmaterial som utvärderats har valts huvudsakligen utifrån klimatpåverkan. Hänsyn har även tagits till skivmaterialets ändamål, alltså om skivmaterialen är menade att användas inom byggnadskonstruktion. Dessutom har skivmaterial vars producenter vill utvärdera lastbärande egenskaper ingått i urvalet.

Detta resulterade i ett provurval av 3 olika skivmaterial. Ett av skivmaterialen utvärderas i två tjocklekar. Produkt, provbenämning och skivtjocklek redovisas i tabell (10).

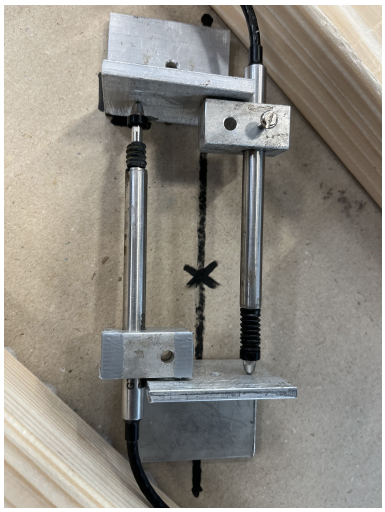
Tabell 10: Material för respektive provkropp

Skivmaterial	Provbenämning	Tjocklek [mm]
Packwall	R8	8
Packwall	R12	12
LivingBoard	LB	13
PremiumBoard	PB	10

Enligt tillverkarens rekommendationer användes samma trälim som för plywood och OSB [32]. Även spikmönstret förblev detsamma. Det som gjordes annorlunda var att fästa givare som mäter deformationen direkt i skjuvplanet på skivan. Två givare limmades fast på skivan för att sedan kunna ta medelvärdet av de två uppmätta deformationerna enligt standard. För att få rätt avstånd mellan mätpunkterna fästes givarna på vinkeljärn, en bild av detta visas i figur (23).



(a) Placering på provkroppen



(b) Bild ovanifrån

Figur 23: Givare som mäter deformationen direkt i skjuvplanet på skivan.

3.3.6. Behandling av data

Testutrustningen som användes registrerar data i programmet Catman Easy. Data registrerades med en frekvens av 10 Hz och sparades sedan i en excelfil. Data som registrerades är deformation vid angivna mätpunkter, påförd last genom lastkolv och lastcell, samt tid vid varje mätning. Deformation mättes i millimeter, last i kilonewton och tid i sekunder. Då datan hämtats i en excelfil behandlades den manuellt. Tiden testet tog presenterades ej och togs bort, även irrelevanta mätpunkter togs bort. Irrelevanta mätpunkter ansågs vara:

- efter att maxlasten har uppnåtts, då brott har uppstått.
- innan lasten har nått 0,1 kN.
- som tas efter att ett oväntat fel inträffat som ger felaktiga mätningar för både last och deformation.

Uppmätta deformationer togs i skjuvområdet med två deformationsgivare och utifrån värdena skapades ett medelvärde av de två mätningarna i varje mätpunkt. Mellan provkropparna och mothållet ligger neopren för att ge en jämnare spänningsfördelning. Neoprenet deformerar något och därför mäts detta med en deformationsgivare. Vid varje mätpunkt subtraheras

neoprenets deformation från uppmätt deformation i änden av andra stödregeln. Då nollställningen av deformationsgivarna inte är absolut subtraheras ursprunglig deformation vid första mätpunkten från alla kommande mätpunkter.

För att visuellt presentera data genom grafer och diagram har Python använts. Programmen som skapats läser excel-filerna och presenterar last-deformationsförhållandet i en linjegraf. Varje laboratorietest presenteras i en graf tillsammans med laboratorietester av samma skivmaterial i samma riktning. En medelkurva skapas utifrån tester utan mätfel eller oönskade brottmoder, vilket i sin tur ligger till grund för beräkningar av egenskaper presenterade i kapitel 3.2.3.

3.4. Jämförelse med Hänsyn till Klimatavtryck

För att kunna presentera resultat då hänsyn tas till klimatavtryck används produkternas EPD:er i relation till produktens mekaniska egenskaper. Jämförelser är tänkta att göras både mellan provkroppar och teoretiska balkar. LCA-modulerna som ingår i produkternas EPD kommer att presenteras utifrån indikator GWP-total, vilket är menat att vara ett mått på produktens totala klimatpåverkan. GWP-total tar hänsyn till indikatorerna GWP-biogenic, GWP-fossil samt GWP-luluc [26]. Produkternas EPD är alla baserade på samma standard med undantaget att EPD för OSB är framtagen genom en tidigare utgåva av samma standard. Det innebär att GWP-total är presenterad medan de indikatorer som ingår i GWP-total inte är presenterade explicit, dock är massan bundet kol uttryckt i text [36]. Med tanke på att de ingående indikatorerna i GWP-total inte är uttryckta i EPD för OSB kommer de ej presenteras separat.

3.4.1. Val av livscykelskeden

En EPD är som beskrivet i kapitel 2.4.1 uppbyggd av skeden och moduler. I denna studie är syftet att jämföra produkter och material. Följande moduler valdes därför att ingå i urvalet:

- A1-3: Produktskedet
- C3: Avfallshantering för återbruk, återföring och/eller återvinning

A4, transport till byggplats, är vid en LCA-beräkning för en produkt baserad på generisk data i landet produkten är producerad och tänkt att användas i. Eftersom denna rapport inte avser att använda ett referensprojekt och produkterna som ingår i urvalet inte alla är producerade i samma land, alltså inte har liknande klimatpåverkan, ingår ej modulen i urvalet. A5, bygg- och installationsprocessen, är likt A4 baserad vid LCA-beräkning av en produkt också baserad på generisk data. Utifrån samma logik som för A4 är modulen inte med i urvalet.

Rapporten tar inte hänsyn till produktens tänkta livslängd, och använder sig ej av ett referensprojekt, därmed används inte modulerna B1-B7 i urvalet.

Moduler i slutskedet tas med i urvalet förutom C1 och C2. Det följer samma logik som A4-A5. C1 gäller demolering och demontering av produkterna vid byggplats. Då byggplatsen inte är specificerad exkluderas C1 från urvalet. C2 avser transport från byggplats till förbränning, deponi, återbruk eller liknande. Då varken byggplats eller stationer för detta är specificerat används ej modul C2 i urvalet. C3, restproduktbehandling, och C4, bortskaffning, ingår i urvalet.

3.4.2. Skivmaterial

Jämförelse mellan skivmaterialen sker genom att sätta provkroppens skjuvhållfasthet respektive skjuvmodul i relation till skivans klimatpåverkan enligt relevanta livscykel-moduler. Klimatpåverkan räknas i kilogram koldioxid-ekvivalenter per kilogram skivmaterial.

3.4.3. Teoretiska balkar

Jämförelse mellan teoretiska balkar med olika livmaterial görs genom att ange en satt nedböjning. Nedböjningen ansätts till 18,7 mm vilket är L/300 då L=5610 mm, $\mathbf{G_k} = 0,65$ och $\mathbf{Q_k} = 2$ enligt kapitel 3.1.3. Nedböjningen beräknas med ekvation (11), då en nedböjning är satt anpassas höjden av balken för att påverka I_{tr} tills nedböjningen stämmer med en tolerans på ± 0,1 mm. Då skivorna är olika breda och höga varierar den totala volymen skivmaterial per teoretisk balk vilket följaktligen ger en klimatpåverkan per teoretisk balk. För att mäta klimatpåverkan för de teoretiska balkarna används den summerade mängden koldioxid-ekvivalenter från modulerna A1-3 och C3.

4. RESULTAT

4.1. Laborativ Utvärdering av Skjuvhållfasthet och Skjuvmodul

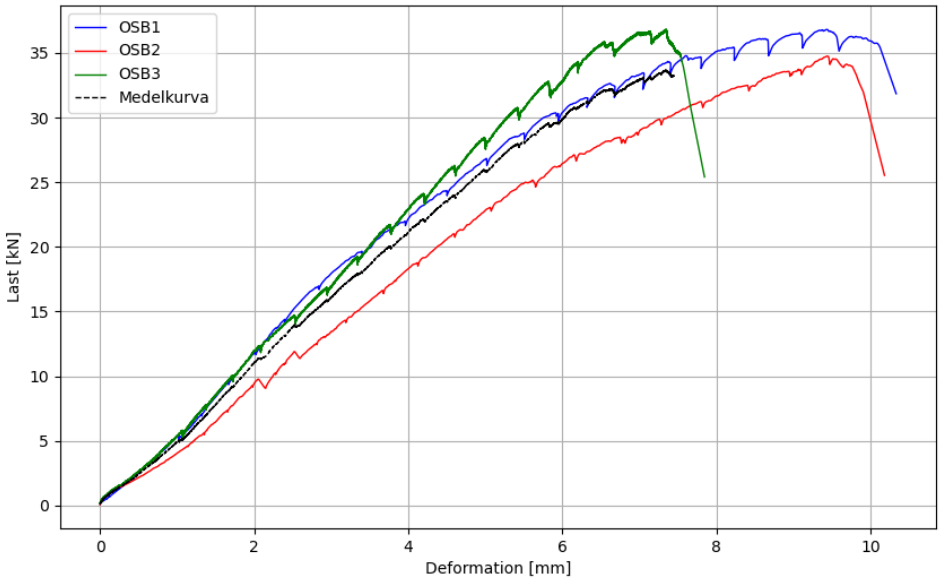
Resultaten från laborationen består av skjuvhållfastheter och skjuvmoduler för de olika skivorna. Det visar också de brottmoder som framkommit då skivan inte gått till skjuvbrott. Se tabell (11) för sammanställning av uppmätt skjuvhållfasthet och skjuvmodul av samtliga material.

4.1.1. Verifiering av Metod

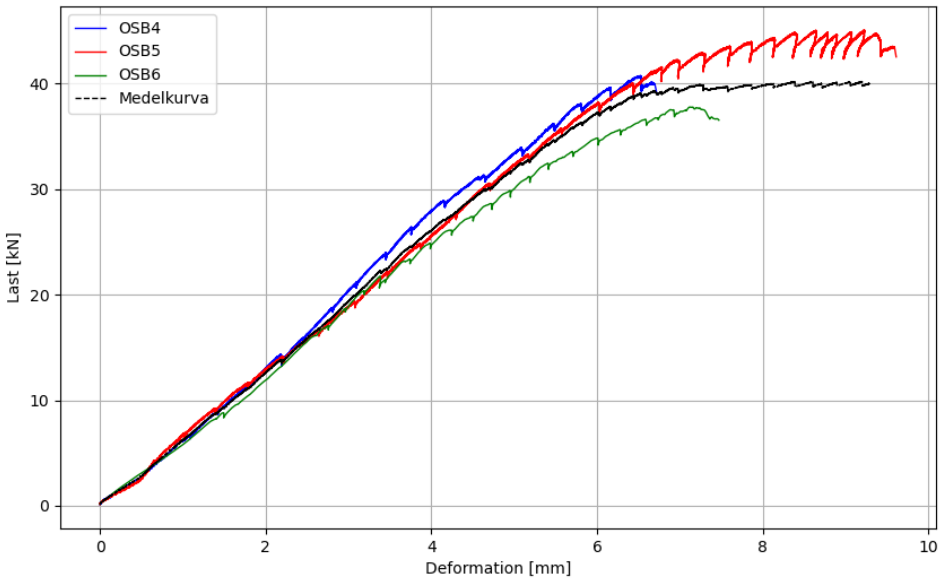
De första resultaten kommer från redan väl provade och utvärderade skivmaterial, OSB och plywood. Dessa resultat används för att bekräfta funktionsdugligheten hos provuppställningen. Detta görs genom att jämföra resultaten från provningen med tidigare tester som gjorts, både direkt från tillverkarens datablad men även genom jämförelser av deformationer i publicerade laborationer. Både OSB och plywood utvärderas med fiberns huvudriktning vinkelrätt (provkroppar 1-3) och parallellt (provkroppar 4-6). Graferna presenteras med last i kN på y-axeln och deformationen i mm på x-axeln.

OSB

Testerna för OSB resulterade i skjuvbrott på samtliga prover, se appendix 6.2 för brottmoder av proverna. Figur (24) visar last-deformationsdiagram för provkroppar 1-3, figur (25) för provkroppar 4-6. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv. Medelkurvorna baserades på alla prover i figuren.



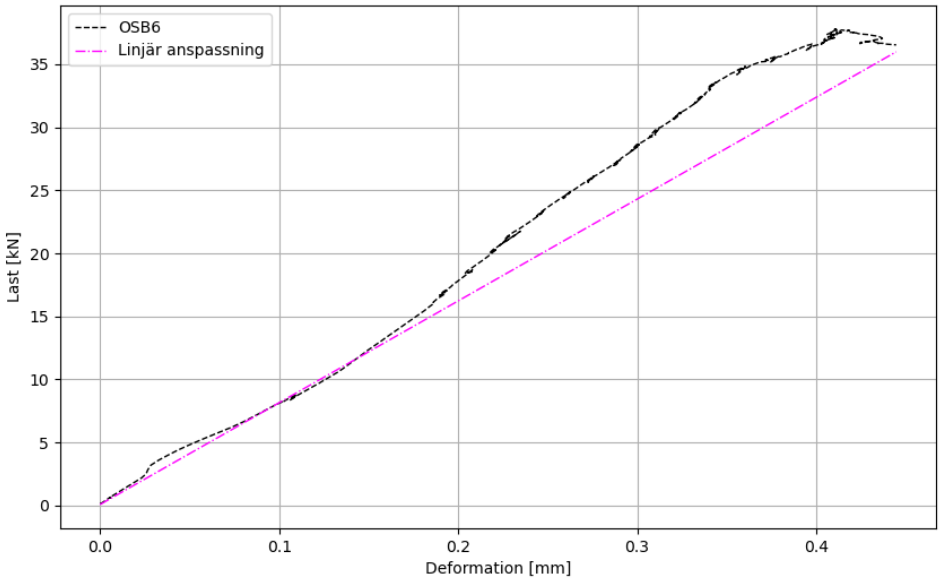
Figur 24: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för OSB 1-3.



Figur 25: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för OSB 4-6.

OSB6 låg till grund för den linjära anpassningen som syns i figur (26). Deformationen mättes

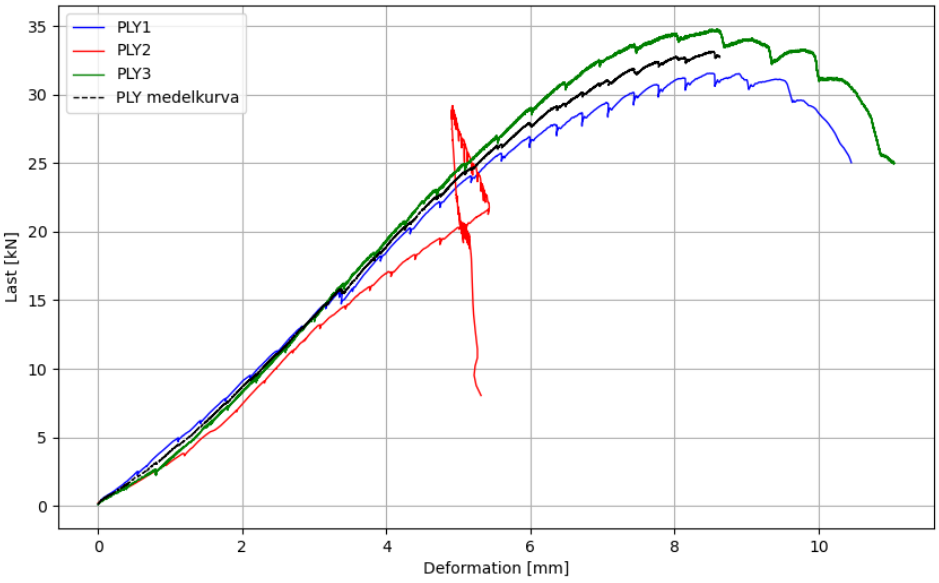
nu i skjuvområdet och de tidigare mätningarna visade på att OSB 6 deformationkurva kunde liknas med OSB 4-5.



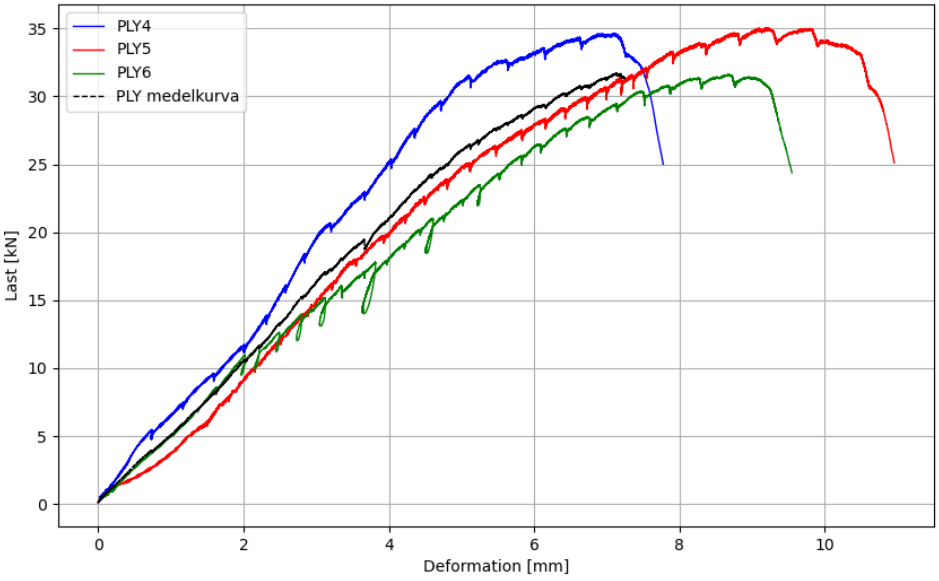
Figur 26: Last-deformationsdiagram med deformation i skivans skjuvplan samt linjär regression mellan punkterna $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$, OSB 6.

Plywood

Testerna för Plywood resulterade i skjuvbrott på samtliga prover, se appendix 6.2 för brottmoder av proverna. Figur (27) visar last-deformationsdiagram för provkropparna 1-3, figur (28) för provkropparna 4-6. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv. Medelkurvan i figur (27) baseras på proverna 1 och 3 då deformationsgivaren vid provning av PLY 2 gav mätfel. Medelkurvan i figur (28) baseras på alla prover.



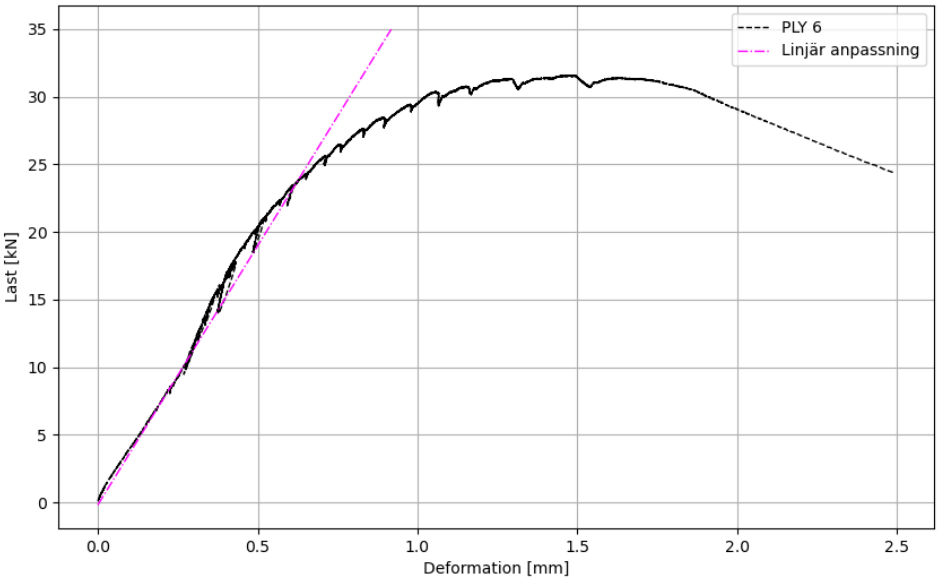
Figur 27: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för PLY 1-3.



Figur 28: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för PLY 4-6.

PLY 6 låg till grund för den linjära anpassningen som syns i figur (29). Deformationen mättes

i skjuvområdet och även här kunde PLY 6 bedömmas likvärdig PLY 4-5.



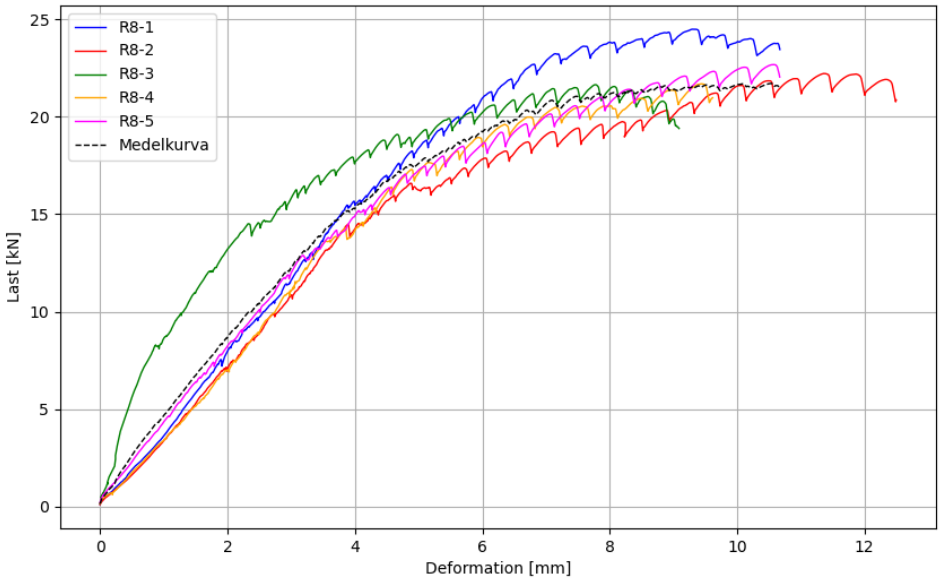
Figur 29: Last-deformationsdiagram uppmätt i skivans skjuvplan samt linjär regression mellan punkterna $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$, PLY 6.

4.1.2. Alternativa skivmaterial

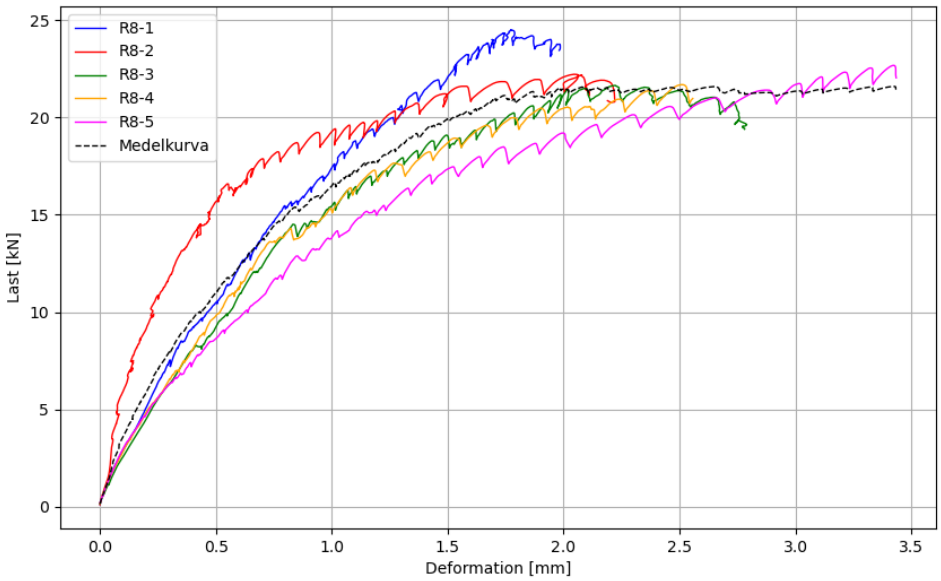
Vid laborationen av dessa skivor observerades olika brottmoder, endast de skivor som gick till skjuvbrott används för att beräkna skjuvhållfastheten och skjuvmodulen.

Packwall 8 mm (R8)

Testerna R8 1, 2, 3 och 5 resulterade i buckling/separation av skivmaterialet ur plan, medan test R8 4 resulterade i separation i limfogen. Se appendix 6.2 för brottmoder av proverna. Figur (30) visar last-deformationsdiagram för samtliga provkroppar, med last i kN på y-axeln och deformationen i mm på x-axeln. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv. Medelkurvan baseras på alla prover med buckling, separation och skjuvbrott som brottmod, testet med separation i limfog exkluderades vid beräkningen av medelkurvan. Figur (31) visar last-deformationsdiagram för R8 1-5. Deformationen nu mätt i skjuvområdet av skivan.



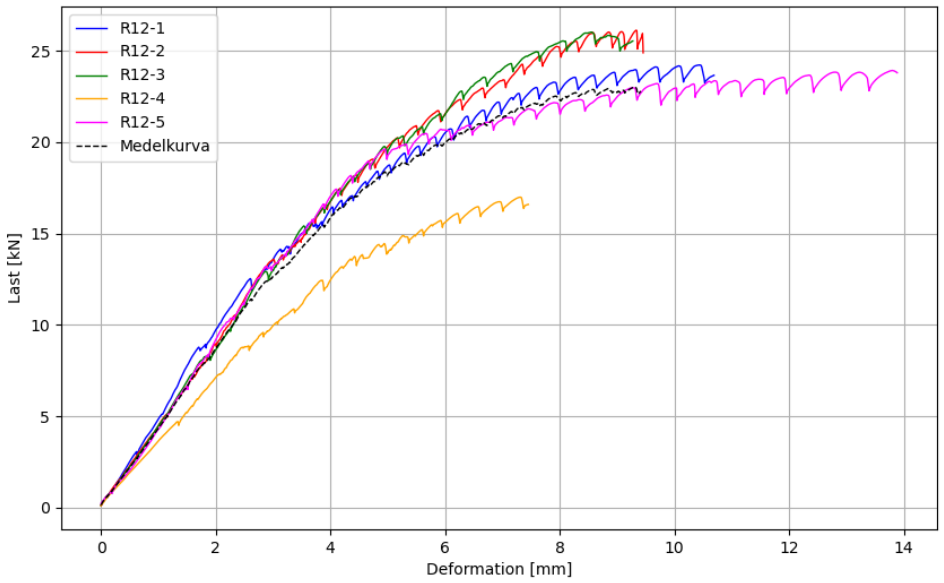
Figur 30: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för R8 1-5.



Figur 31: Last-deformationsdiagram, uppmätt i skivans skjuvplan samt medelkurva för provkropparna R8 1-5.

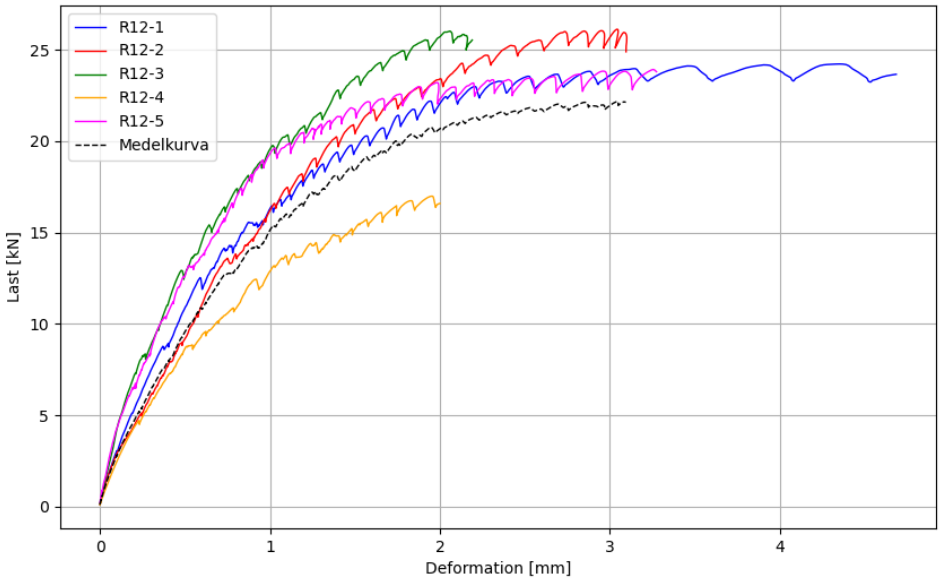
Packwall 12 mm (R12)

Testerna R12 1, 2, och 4 resulterade i buckling/separation av skivmaterialet ur plan, medan test R12 3 och 5 resulterade i separation i limfog. Se appendix 6.2 för brottmoder av proverna. Figur (32) visar last-deformationsdiagram för provkroppar R12 1-5. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv. Medelkurvan baseras på alla prover med buckling/separation som brottmod, se Appendix (6.2), testerna med separation i limfog exkluderades vid beräkningen av medelkurvan.

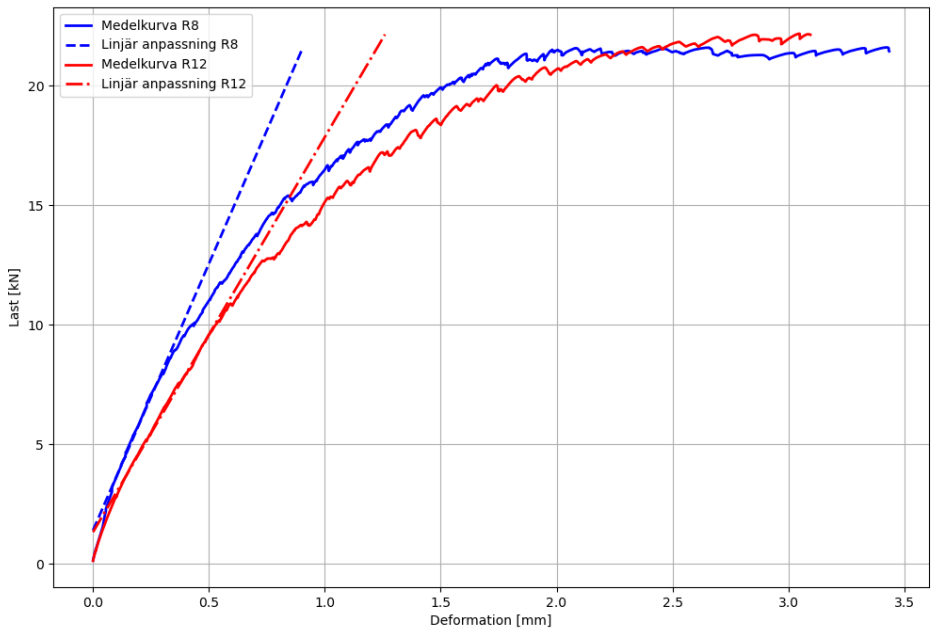


Figur 32: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för R12 1-5.

Figur (33) visar last-deformationsdiagram för provkroppar R12 1-5. Deformationen nu mätt i skjuvområdet av skivan. Medelkurvorna som visas i figur (33) respektive figur (31) låg till grund för de linjära anpassningar som visas i figur (34).



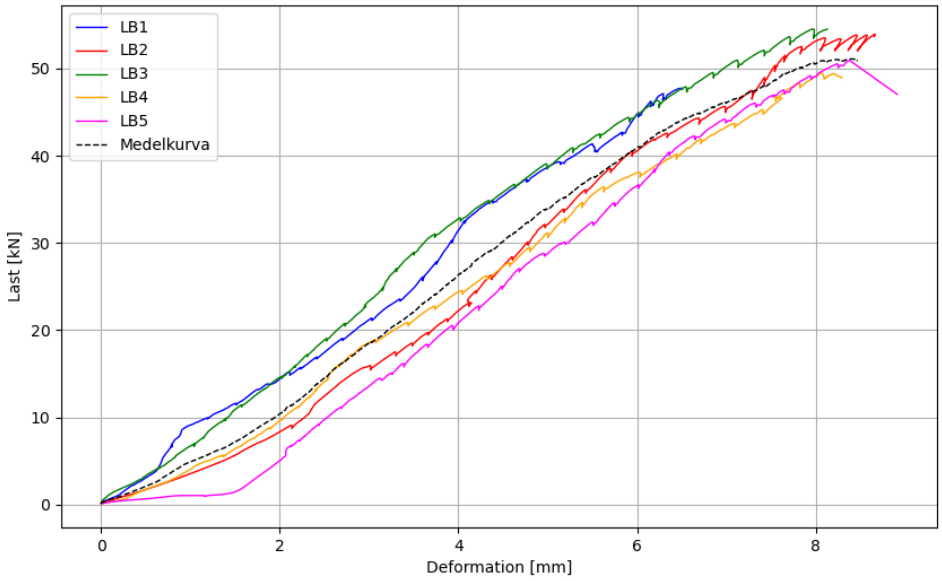
Figur 33: Last-deformationsdiagram, uppmätt i skivans skjuvplan samt medelkurva för provkropparna R12 1-5.



Figur 34: Last-deformationsdiagram med medeldeformation i skivans skjuvplan samt linjär anpassning mellan punkterna $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$, för provkroppar R8 1-5 och R12 1-5.

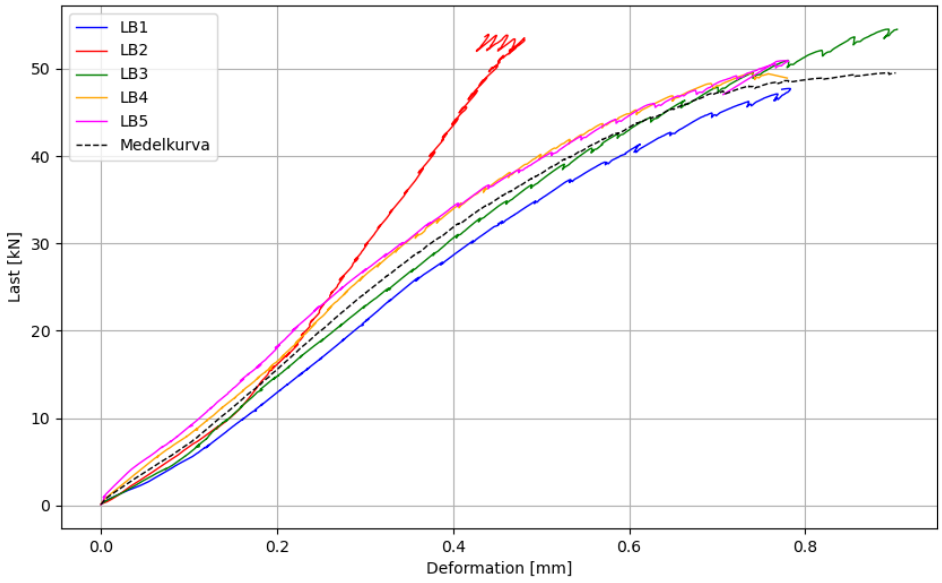
LivingBoard

För detta material gick samtliga provkroppar till skjuvbrott. Figur (35) visar last-deformationsdiagram för provkroppar LB 1-5. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv, medelkurvan baseras på alla provkropparna.

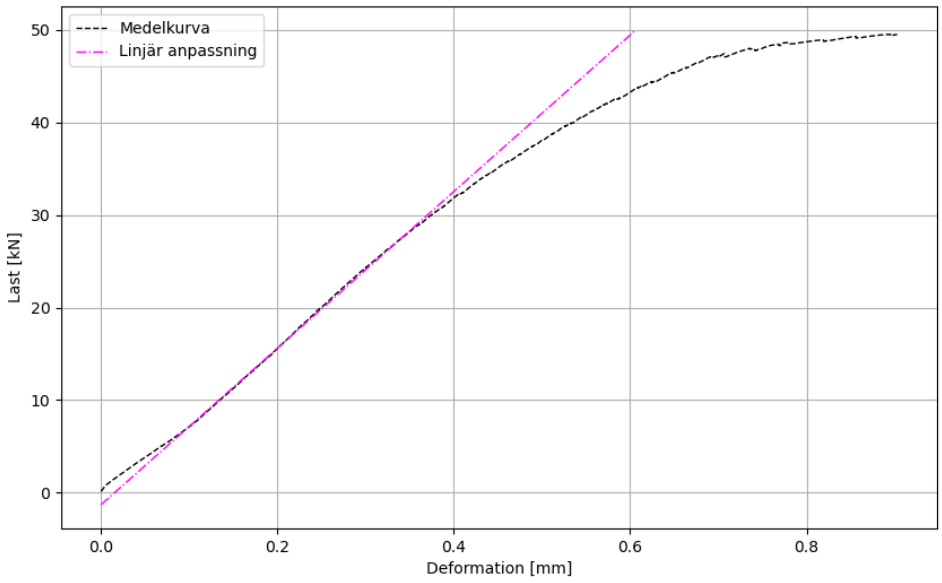


Figur 35: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för LB1-5.

Figur (36) visar last-deformationssamband uppmätt i skivans skjuvområde för LB 1-5 samt deras medelkurva. Vid provning av LB 2 inträffade ett mätfel vid skjuvområdet. Samtidigt visar deformationen vid stödregeln liknande deformation som de andra provkropparna, se figur (35). LB 2 användes inte till medelkurvan för den linjära anpassningen i figur (37).



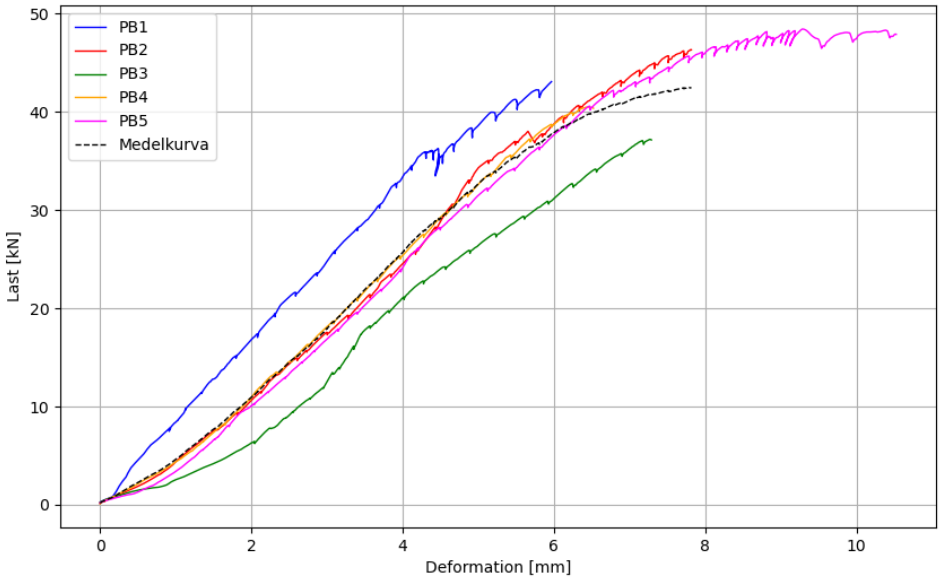
Figur 36: Last-deformationsdiagram, uppmätt i skivans skjuvplan samt medelkurva för provkropparna LB 1-5.



Figur 37: Last-deformationsdiagram med medeldeformation i skivans skjuvplan samt linjär anpassning mellan punkterna $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$, LB 1-5.

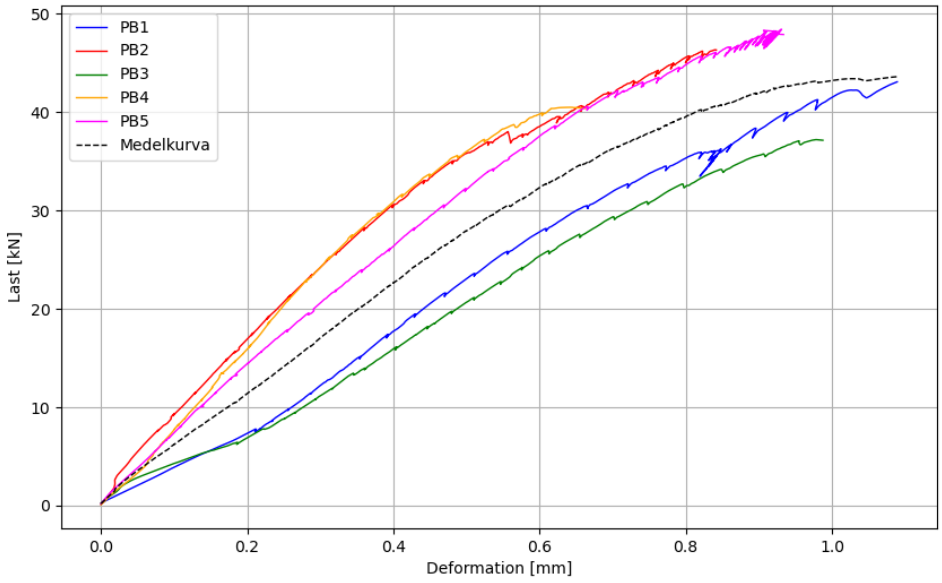
PremiumBoard

Även för detta material gick samtliga provkroppar till skjuvbrott. Figur (38) visar last-deformationsdiagram för samtliga provkroppar. Deformationen är mätt i motsatt ände av tryckt stödregel mot tryckkolv, medelkurvan baseras på alla prover (PB 1-5).

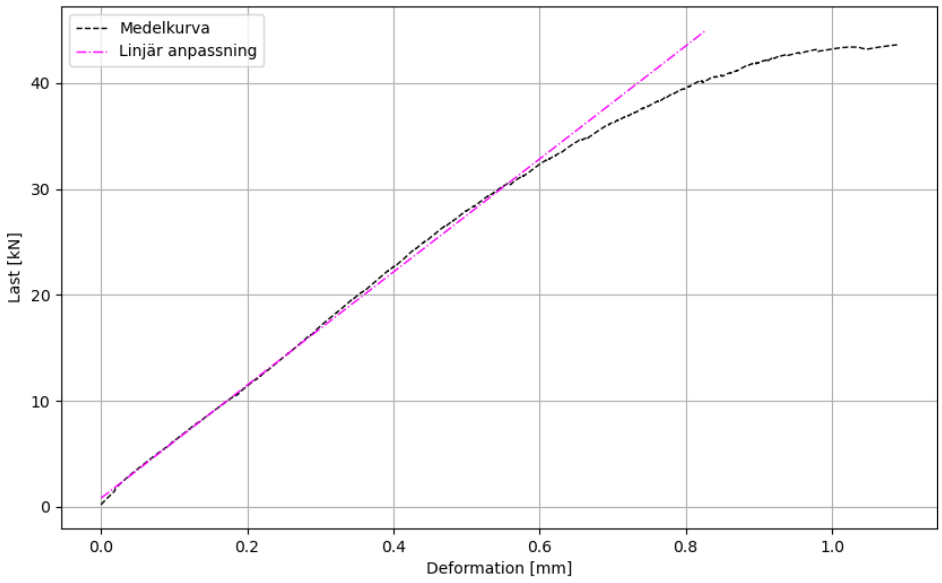


Figur 38: Last-deformationsdiagram, uppmätt vid den tryckta stödregelns motsatta hörn för PB 1-5.

Figur (39) visar last-deformationssamband i skivans skjuvområde för samtliga provkroppar samt deras medelkurva. Samma medelkurva och den linjära anpassningen i figur (40) grundar sig sedan i dessa samband.



Figur 39: Last-deformationsdiagram, uppmätt i skivans skjuvplan samt medelkurva för provkropparna PB 1-5.



Figur 40: Last-deformationsdiagram med medeldeformation i skivans skjuvplan samt linjär anpassning mellan punkterna $0.1F_{max}$ och $0.4F_{max}$, PB 1-5.

4.1.3. Sammanställning

I tabell (11) visas en sammanställning av de skjuvhållfastheter och skjuvmoduler som beräknats utifrån laborationen samt elasticitetsmoduler i böjning enligt tillverkare.

Tabell 11: Uppmätt skjuvhållfasthet och skjuvmodul av provkroppar, E-moduler enligt tillverkare.

Provkropps-benämning	Skivmaterial	Skjuvhållfasthet f_v [MPa]	Skjuvmodul G_v [MPa]	Elasticitetsmodul E_m [MPa]
PLY 1-3	Plywood 12 mm $\perp$	5,5	439,8	3826
PLY 4-6	Plywood 12 mm $\parallel$	5,3	499,8	8231
OSB 1-3	OSB/3 $\perp$ 11 mm	6,1	979,1	1980
OSB 4-6	OSB/3 $\parallel$ 11 mm	7,2	1096,6	4930
R8 1-5	Packwall 8 mm	5,4	424,4	488
R12 1-5	Packwall 12 mm	3,7	212,7	488
LB 1-5	Livingboard 13 mm	7,62	938,7	2550
PB 1-5	Premiumboard 10 mm	8,72	797,6	2550

Skjuvhållfastheten som beräknats enligt avsnitt (3.2.3) varierar mycket mellan skivmaterialen. LivingBoard uppnådde högst brottlast men PremiumBoard uppnådde högst skjuvhållfasthet. Det beror på att PremiumBoard, 10 mm, är tunnare än Livingboard, 13 mm, vilket motsvarar 30% mer tvärsnittsyta. Då LivingBoard hade en ca 16 % högre medelbrottlast jämfört med PremiumBoard resulterar det ändå i en lägre skjuvhållfasthet. Lägst skjuvhållfasthet uppnåddes av Packwall. Under laborationer upptäcktes störst avvikelser i brottmoder, jämfört med resterande skivmateral, vid provning av Packwall. Brotten bestod delvis av att limfogen gick till brott och ytskiktet separerade från skivan. Stor andel av Packwall-skivor separerade eller bucklade ut ur planet, se appedix (6.2). Att skivorna bucklade kan bero på att skivan inte är lika styv jämfört med resterande skivmaterial. Att skivorna separerade ut ur planet kan bero på att vidhäftningen, som utgörs helt av plast, inte var tillräcklig. Detta tros vara anledningen till att Packwalls resultat skiljer sig mellan 8 mm och 12 mm tjocklek.

Skjuvmodulen som beräknades enligt avsnitt (3.2.3) varierar också mycket beroende på skivmaterial. Variationen verkar inte bero av E-modulen då exempelvis plywood med högst E-modul uppvisade skjuvmoduler lägre än exempelvis Livingboard som har betydligt lägre E-modul. Dock verkar skivmaterial med olika E-moduler i olika riktningar ha både högre E-modul och skjuvmodul i samma riktning. Skjuvmodulen verkar dessutom öka med andelen

lim i materialet.

4.2. Analytisk Modell

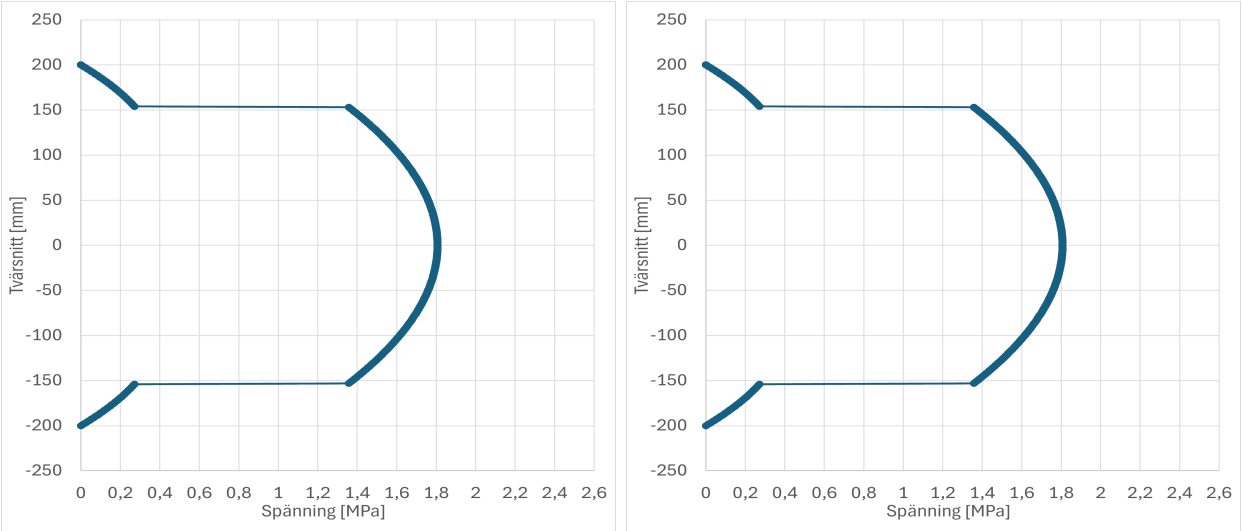
Med den analytiska modellen kan teoretiska jämförelser göras genom att ansätta materialegenskaperna från de testade materialen. Detta gör att en uppfattning om hur skivmaterialen fungerar som livmaterial kan bildas. Resultat har tagits fram för skjuvspänningar, böjspänningar och nedböjning av balken. Se tabell (12) för en sammanställning av resultaten.

4.2.1. Skjuvspänningar över tvärsnittet

I detta avsnitt presenteras de teoretiska balkarnas skjuvspänning över tvärsnittet. Figurerna som presenteras har skjuvspänning i MPa längs x-axeln och tvärsnittets höjd centrerad kring tvärsnittets tyngdpunkt på y-axeln.

OSB

Figur (41a) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av en teoretisk balk med OSB-skivans huvudriktning vinkelrätt mot balkens riktning medan figur (41b) visar teoretisk balk med OSB-skivans huvudriktning parallellt med balkens huvudriktning.

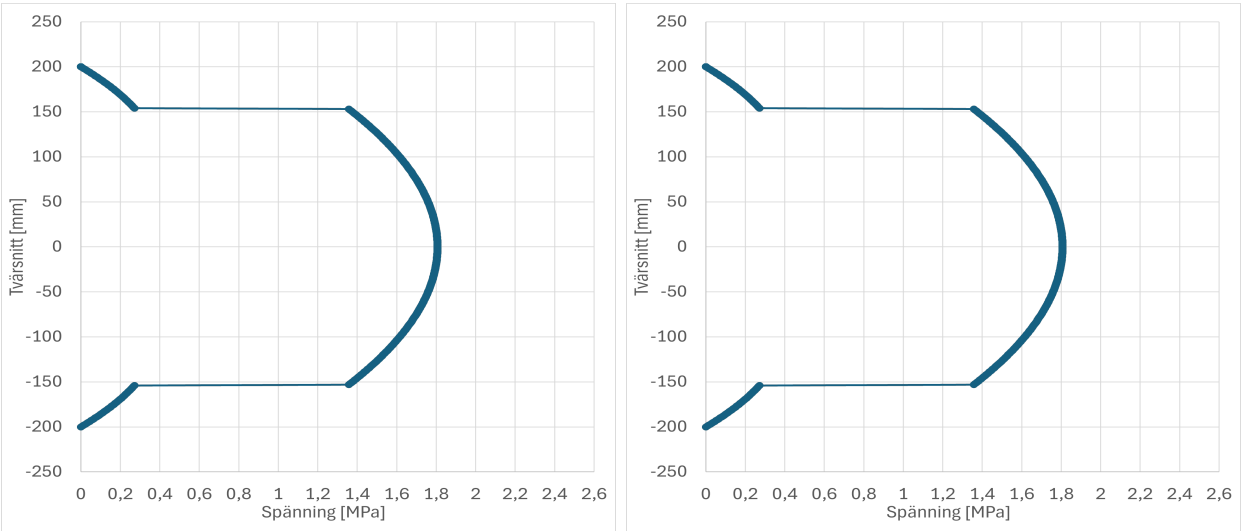


(a) OSB 1-3 **(b)** OSB 4-6

Figur 41: Skjuvspänningar med OSB som livmaterial, (a) med skivan orienterad vinkelrätt, (b) med skivan orienterad parallellt med balkens längsriktning.

Plywood

Figur (42a) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med plywoodskivans huvudriktning vinkelrätt mot balkens riktning medan figur (42b) visar teoretisk balk med plywoodskivans huvudriktning parallellt med balkens huvudriktning.

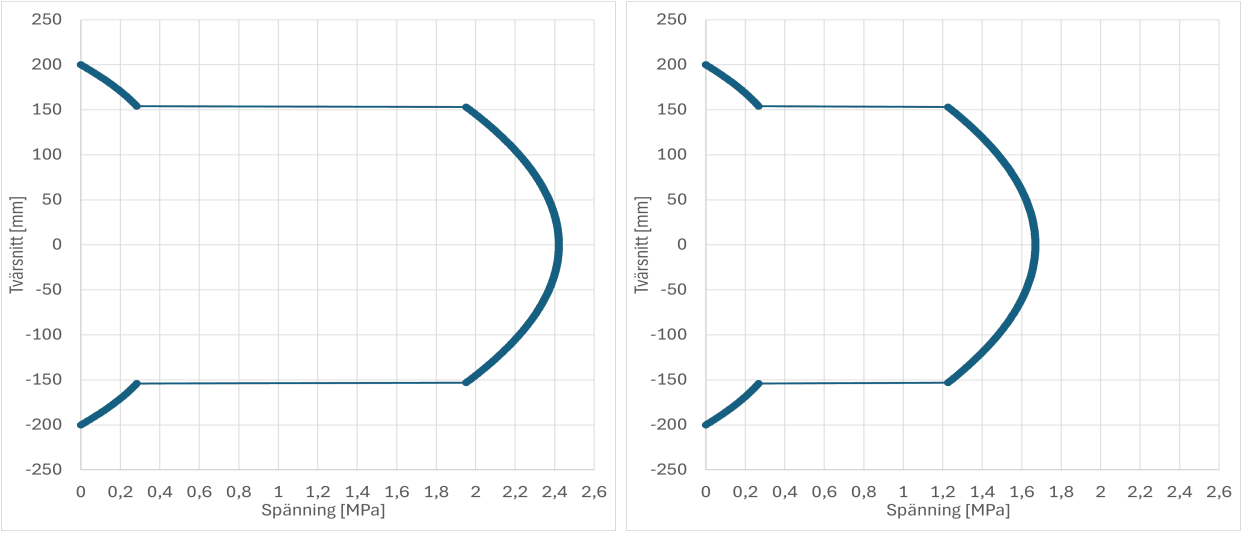


(a) PLY 1-3 **(b)** PLY 4-6

Figur 42: Skjuvspänningar med plywood som livmaterial, (a) med skivan orienterad vinkelrätt, (b) parallellt.

Packwall

Figur (43a) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 8 mm tjock skiva. Figur (43b) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 12 mm tjock skiva.

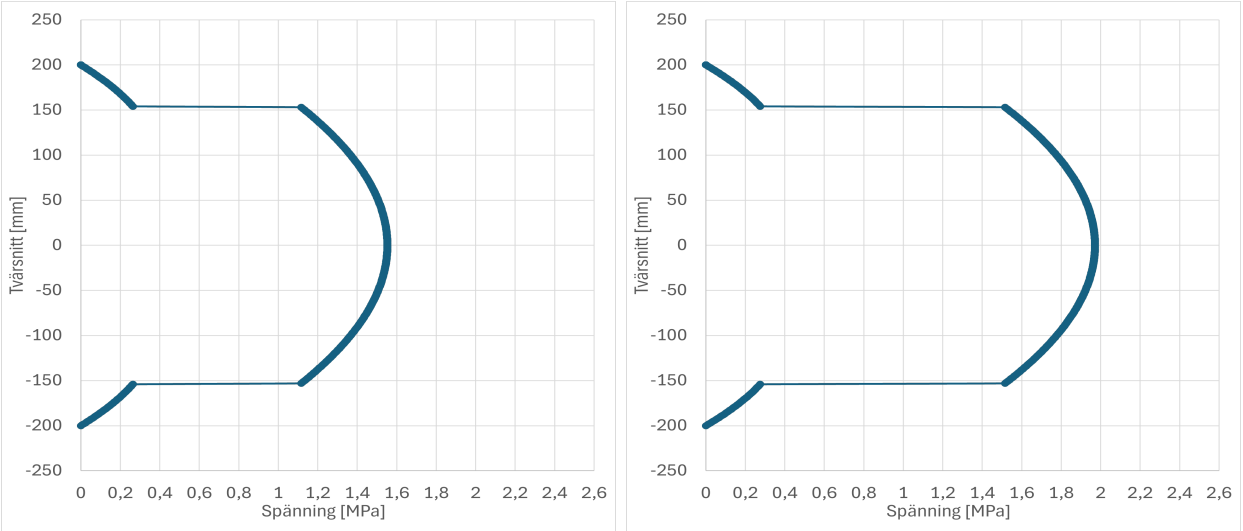


(a) R8 1-5 **(b)** R12 1-5

Figur 43: Skjuvspänningar med Packwall som livmaterial, (a) 8 millimeter tjock, (b) 12 millimeter tjock.

LivingBoard & PremiumBoard

Figur (44a) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av LivingBoard. Figur (44b) visar skjuvspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av PremiumBoard.



(a) LivingBoard **(b)** PremiumBoard

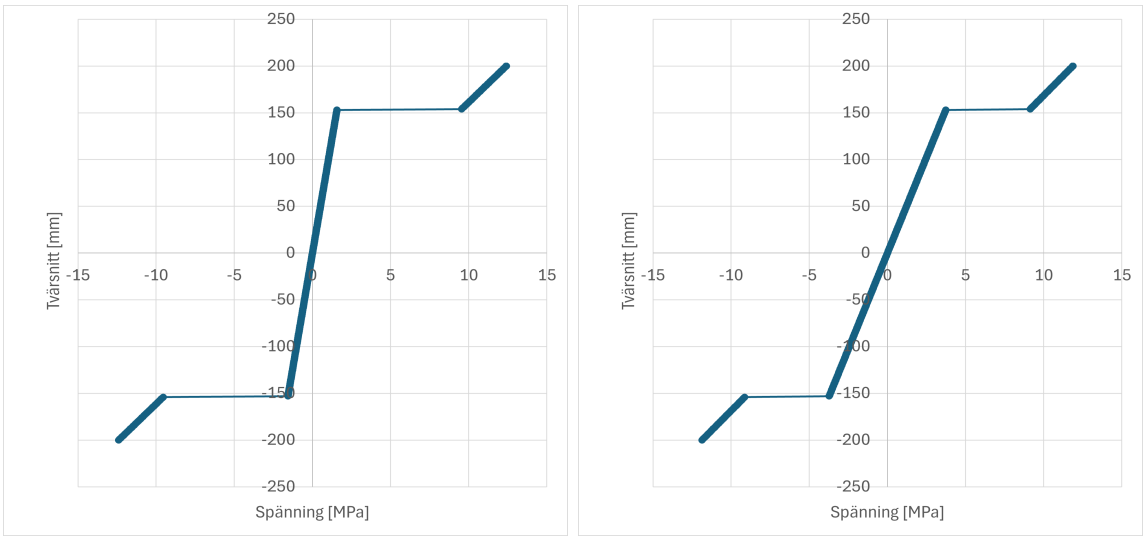
Figur 44: Skjuvspänningar med Pfleiderers skivor som livmaterial.

4.2.2. Böjspänningar över tvärsnittet

I detta avsnitt presenteras de teoretiska balkarnas böjspänning över tvärsnittet. Figurerna som presenteras har böjspänning i MPa längs x-axeln och tvärsnittets höjd centrerad kring tvärsnittets tyngdpunkt på y-axeln.

OSB

Figur (45a) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med OSB-skivans huvudriktning vinkelrätt mot balkens riktning medan figur (45b) visar teoretisk balk med OSB-skivans huvudriktning parallellt med balkens huvudriktning.

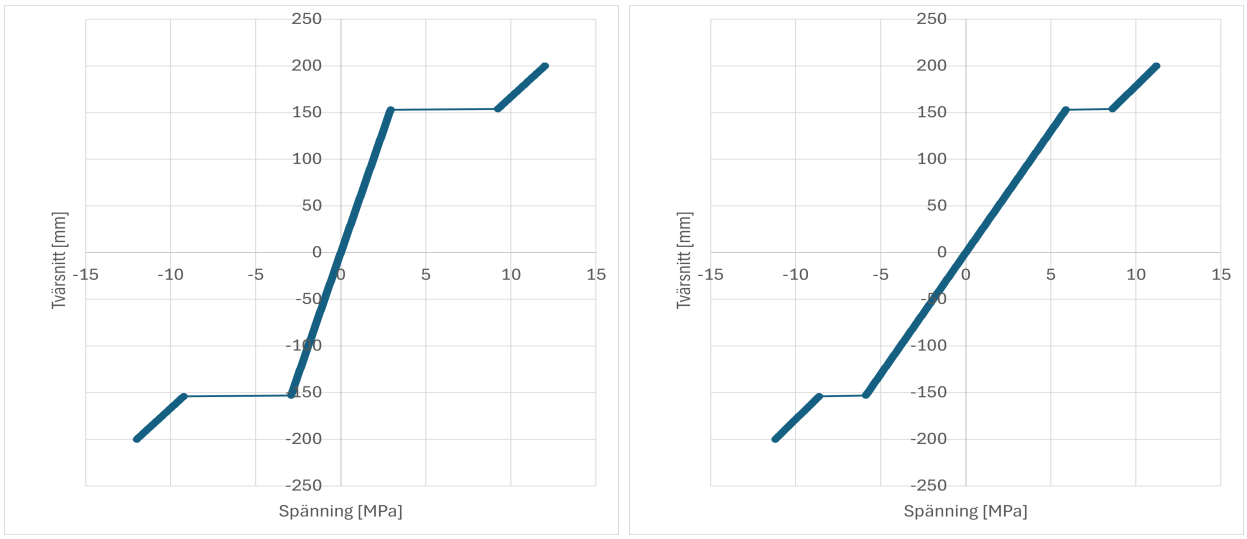


(a) OSB 1-3 **(b)** OSB 4-6

Figur 45: Böjspänningar med OSB som livmaterial, (a) med skivan orienterad vinkelrätt, (b) parallellt.

Plywood

Figur (46a) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med plywoodskivans huvudriktning vinkelrätt mot balkens riktning medan figur (46b) visar teoretisk balk med plywoodskivans huvudriktning parallellt med balkens huvudriktning.

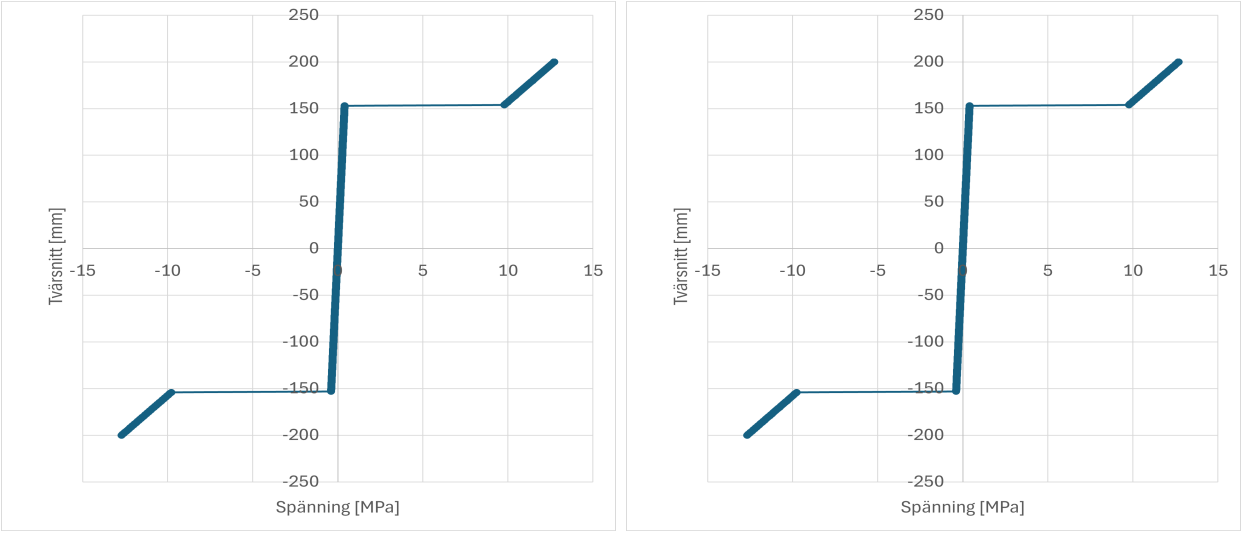


(a) PLY 1-3 **(b)** PLY 4-6

Figur 46: Böjspänningar med plywood som livmaterial, (a) med skivan orienterad vinkelrätt, (b) parallellt.

Packwall

Figur (47a) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 8 mm tjock skiva. Figur (47b) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 12 mm tjock skiva.

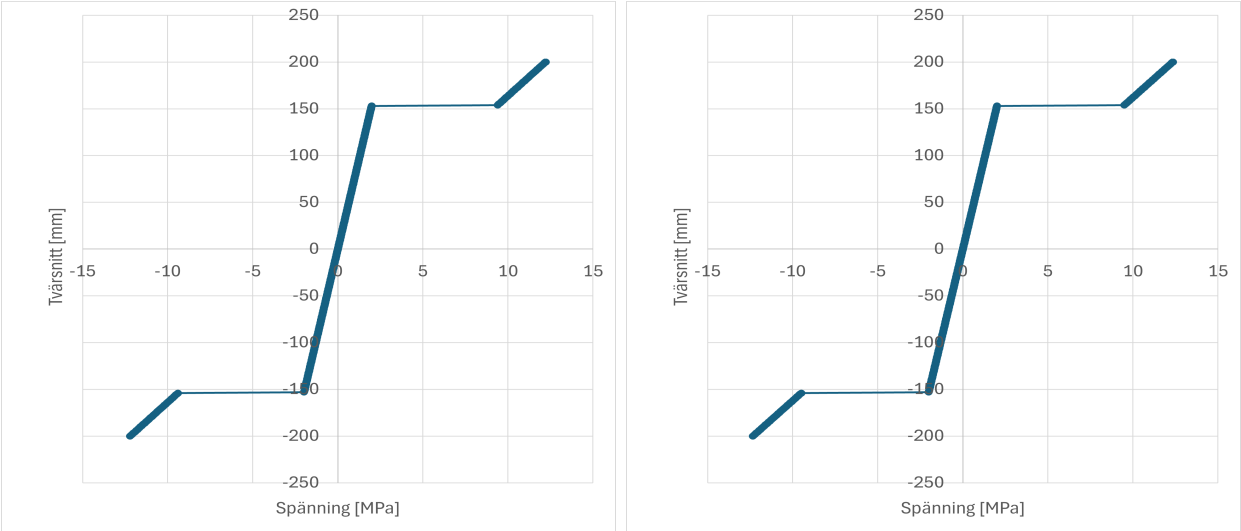


(a) R8 1-5 **(b)** R12 1-5

Figur 47: Böjspänningar med Recomaskiva som livmaterial, (a) 8 millimeter tjock, (b) 12 millimeter.

LivingBoard & PremiumBoard

Figur (48a) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 13 mm tjock LivingBoard-skiva. Figur (48b) visar böjspänningen över tvärsnittet av teoretisk balk med livmaterial av 1 mm tjock PremiumBoard-skiva.



(a) LivingBoard **(b)** PremiumBoard

Figur 48: Böjspänningar med LivingBoard och PremiumBoard som livmaterial.

4.2.3. Sammanställning

De resultat som tagits fram från den analytiska modellen presenteras i tabell (12), samtliga skjuv- och böjspänningar samt nedböjning för den teoretiska balken. Resultaten kommer att ligga till grund för jämförelser mellan teoretiska balkar med olika livmaterial och avseende på klimatavtryck.

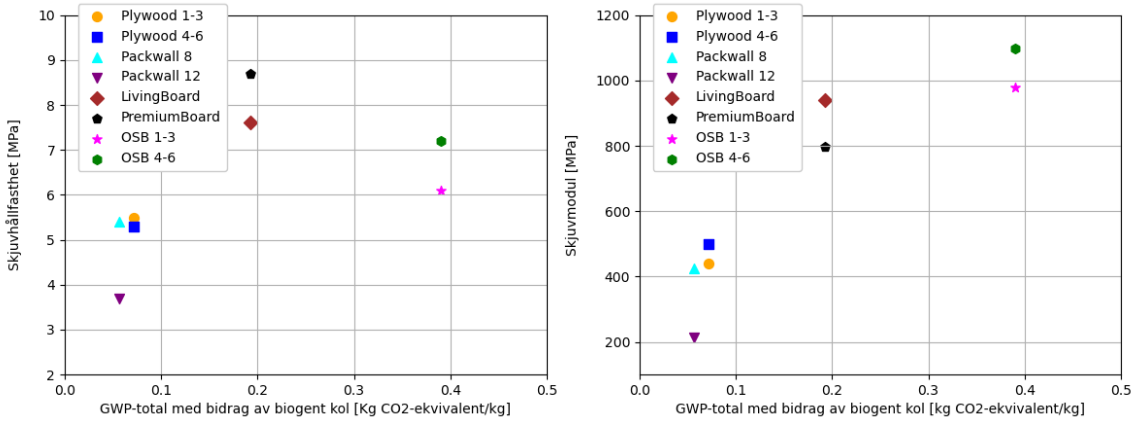
Tabell 12: Maximala skjuvspänningar, böjspänningar och nedböjningar från analytisk modell då balken har en höjd på 400 mm

Skivmaterial	Skjuvspänning f_v [MPa]	Böjspänning f_t [MPa]	Nedböjning v [mm]
Plywood K20/70 $\perp$	1,67	12,00	15,77
Plywood K20/70 $\parallel$	1,67	11,19	14,84
OSB/3 $\perp$	1,81	12,40	16,23
OSB/3 $\parallel$	1,81	11,87	15,61
PackWall 8 mm	2,42	12,72	16,6
PackWall 12 mm	1,67	12,68	16,56
LivingBoard	1,55	12,21	16,01
PremiumBoard	1,97	12,34	16,16

De maximala skjuvspänningarna i tvärsnittet beror främst på tvärsnittsarean vilket medför att Packwall 8 mm har störst spänningar medan LivingBoard har lägst. Böjspänningarna i flänsarna beror främst på E-modulen i skivmaterialet, ju lägre E-modul desto högre spänningar i flänsarna och desto lägre i skivmaterialet. E-modulen har också störst påverkan på nedböjningen vilket visar sig i plywood som uppnår lägst nedböjning. Skjuvspänningar, böjspänningar och nedböjningar av balkar med 400 mm balkhöjd beräknas för att jämföra mot brottgränser av materialen i lättbalken samt nedböjningskravet på 18,7 mm. Packwall 8 mm ligger närmast gränsvärdena. Det har konstaterats att Packwall har en skjuvhållfasthet på 5,4 MPa vilket jämförs mot den maximala skjuvspänningen på 2,42 MPa. Nedböjningen av Packwall på 16,6 mm är också under gränsvärdet 18,7 mm. Slutligen är brottgränsen av k-virket i drag 14,5 MPa vilket jämförs mot den maximala böjspänningen på 12,72 MPa.

4.3. Jämförelse med hänsyn till klimatavtryck

Avsnittet presenterar samtliga utvärderade skivmaterial och teoretiska balkar med liv av samtliga skivmaterial och jämför dem mot varandra. I figur (49) summeras modul A1-A3 och C3 för utvärderade skivmaterial, vilka jämförs mot både skjuvhållfastheten och skjuvmodulen.



(a) Jämförelse med hänsyn till klimatpåverkan i relation till skjuvhållfasthet.

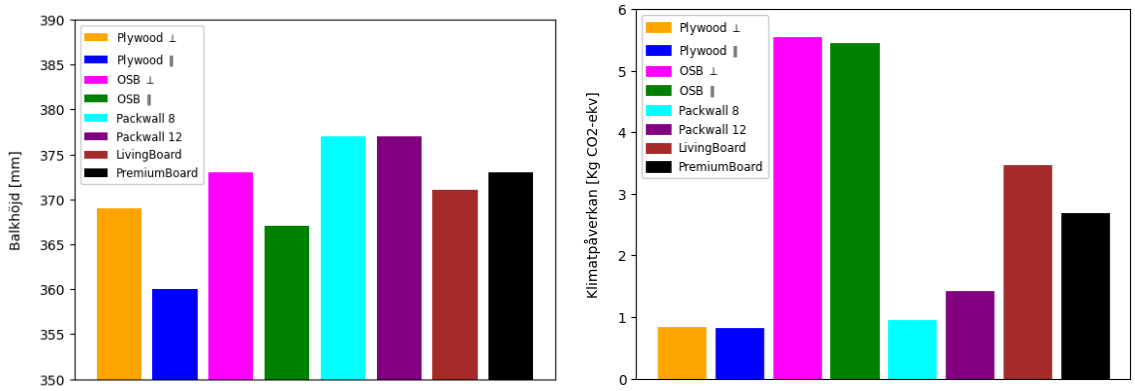
(b) Jämförelse med hänsyn till klimatpåverkan i relation till skjuvmodul.

Figur 49: Klimatpåverkan enligt GWP-total-modulerna A1-A3 och C3 i relation till **(a)** skjuvhållfasthet respektive **(b)** skjuvmodul för utvärderade skivmaterial. X-axeln visar klimatpåverkan uttryckt i Kg CO2-ekv/Kg. Y-axeln visar **(a)** skjuvhållfasthet respektive **(b)** skjuvmodul båda uttryckta i MPa.

Ur figur (49) kan det beräknas att plywood då fiberns huvudriktning ligger vinkelrätt mot påförd lasts riktning har 76,7 MPa skjuvhållfasthet och 6130,6 MPa skjuvmodul per kilogram koldioxid-ekvivalent. Dessa relationer kommer benämnas $f_v/kgCO_2-ekv$ och $G/kgCO_2-ekv$ i detta avsnitt. Plywood då fiberns huvudriktning ligger parallellt med påförd lasts riktning har däremot 73,9 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 6966,9 $G/kgCO_2 - ekv$. Alltså är plywood-skivan styvare då fiberns huvudriktning är parallell med lasten men har högre hållfasthet då den är vinkelrät mot lasten. Packwall med tjocklek 8 mm uppnår de mest klimateffektiva resultaten i diagrammen på 95 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 7469,4 $G/kgCO_2 - ekv$. Det till skillnad från PackWall 12 mm med 65,1 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 3743,5 $G/kgCO_2 - ekv$. PremiumBoard uppnår 45,2 $f_v/kgCO_2 - ekv$ 4148,2 $G/kgCO_2 - ekv$. Medan Livingboard uppnår 39,5 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 4882,0 $G/kgCO_2 - ekv$. LivingBoard är alltså något styvare än PremiumBoard men samtidigt lite mindre hållfast. Slutligen är referensmaterialet (OSB) då fiberns huvudriktning är vinkelrätt lasten det minst klimateffektiva skivmaterialet med 15,6 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 2510,5 $G/kgCO_2 - ekv$. Då fiberns huvudriktning är parallellt lasten uppnår OSB 18,5 $f_v/kgCO_2 - ekv$ och 2811,8 $G/kgCO_2 - ekv$.

Bortsett från klimateffektiviteten är det enligt figur (49) ovan generellt så att material med högre skjuvhållfasthet och skjuvmodul har en högre klimatpåverkan.

I figur (50a) presenteras balkhöjder som fås då nedböjningen sätts till 18,7 mm, med andra ord har balkarna samma styvhet men olika dimensioner. Figur (50b) visar massan koldioxidekvivalenter de teoretiska balkarna skulle bidra till med modulerna A1-3 och C3 som utgångspunkt för klimatavtrycket.



(a) Balkhöjder av teoretiska balkar med utvärderade livmaterial.

(b) Klimatpåverkan av teoretiska balkar med utvärderade livmaterial.

Figur 50: **(a)** Jämförelse av balkhöjder vid satt nedböjning för teoretiska balkar med liv av utvärderade skivmaterial. Y-axeln visar balkhöjd i hela mm. **(b)** Jämförelse av klimatpåverkan av teoretisa balkar med liv av utvärderade livmaterial. Y-axeln visar klimatpåverkan uttyckt i Kg CO2-ekv enligt GWP-total-modulerna A1-A3 och C3.

Värden av staplar presenterade i figur (50) sammanställs i tabell (13).

Tabell 13: Klimatpåverkan enligt modul A1-A3 och C3 av teoretiska balkar med höjder för att uppnå en nedböjning på 18,7 mm

Skivmaterial	Koldioxidekvivalenter [$kgCO_2 - ekv$]	Balkhöjd [mm]
Plywood ⊥	0,82	369
Plywood ∥	0,80	360
OSB ⊥	5,52	373
OSB ∥	5,43	367
PackWall 8 mm	0,94	377
PackWall 12 mm	1,40	377
LivingBoard	3,44	371
PremiumBoard	2,66	373

Det framgår ur figur (50a) att då plywood orienteras med fiberns huvudriktning längs balkens riktning erhålls den styvaste teoretiska balken. Den nödvändiga balkhöjden för att uppnå nedböjningen i detta fall är 360 mm. Nedböjningen beror kraftigt av E-modulen i skivmaterialet som redovisats i tabell (11). Därför följer högsta E-modul och lägsta balkhöjd varandra rätt väl. En annan variabel som gör skillnad är tjockleken av skivmaterialet. Detta visar

sig tydligt av skillnaden i balkhöjd mellan LivingBoard och PremiumBoard som har samma E-modul men olika tjocklekar.

Gällande figur (50b) är variablerna densitet, klimatpåverkan per kilogram skivmaterial och balkhöjd de variabler som påverkar resultatet. Som redovisat i tabell (4), där summan av klimatpåverkan per kilogram material i modul A1-3 och C3 är väsentlig, bidrar plywood och Packwall till lägst klimatpåverkan medan OSB bidrar till högst klimatpåverkan per kilogram material. Varför teoretiska balkar med plywood i slutändan har lägre total klimatpåverkan än PackWall beror på att det är ett styvare och lättare material. Teoretisk balk av OSB som har relativt hög E-modul då fiberns huvudriktning orienteras i balken riktning uppvisar ändå högst klimatpåverkan. Detta beror på den höga klimatpåverkan per kilogram skivmaterial som OSB motsvarar. Balkhöjderna varierar som högst med 17 mm vilket motsvarar ungefär 4,6% av balkernas höjd. Summan klimatpåverkan varierar kraftigare mellan materialen och har därför större påverkan på resultaten. Den stora skillnaden i total klimatpåverkan mellan OSB och plywood beror antagligen på att det är mindre mängd lim i plywood jämfört med OSB. En plywoodskiva behöver bara adderat lim mellan fanérlager medan en OSB som inte har fanér behöver lim mellan varje spån i skivan. Dessutom har plywood lägre densitet och högre styvhet, då lika fiberriktningar jämförs, än OSB. LivingBoard och PremiumBoard är båda framställda helt med biobaserat lim och delvis med återvunnet trä vilket antagligen är anledningen till att klimatpåverkan är lägre än referensmaterialets (OSB).

5. DISKUSSION

I diskussionen beskrivs de delar av arbetet som på olika sätt kunnat påverka resultatet. Resultatet är en konsekvens av de val som gjorts i samtliga delar av arbetsprocessen. I många fall går det att beskriva hur ett visst val kan ha påverkat, men i några fall där resultatet kan ha påverkats är det svårt att säga hur. Trots detta är det viktigt att ta upp dessa delar då de uppmuntrar till vidare fundering och diskussion.

5.1. Materialval

De resultat som presenterats har tagits fram genom en process som började redan vid material-val. Urvalet gjordes med hänsyn till dimensioner, tillgång, egenskaper och klimat-påverkan. Samtidigt blir det en intressantare jämförelse med material som skiljer sig åt på något sätt. Utifrån detta blev den uppsättning material som testats bra, resultaten visar tydliga skillnader i både deformation, skjuvmodul och skjuvhållfasthet.

Då tillverkning av skivmaterial i Sverige är begränsad ingick även skivmaterial från övriga Europa. Då arbetet är tids- och kostnadsbegränsat blev möjligheten till fler material i urvalet begränsad. En större pool av material hade bidragit till en bättre översikt av marknaden men med tanke på tidsbegränsningen hade detta bidragit till mindre antal provkroppar av enskilda material, vilket ger större osäkerhet i resultatet.

5.1.1. Rättvis materialbedömning

Det valdes att modulerna A1-A3 samt C3 skulle användas för att jämföra skivmaterialens klimatavtryck. Med standarden som följs vid upprättandet av en EPD är varje ingående indikator i GWP-total redovisade. Dock är EPD för OSB gjord enligt en äldre utgåva av samma standard än resterande material vilket innebär att OSB var tvungen att exkluderas då A1-A3 och C3 utan bidraget av biogent kol presenterades. Detta försämrar jämförelsen då ett av de material som ingick i jämförelsen saknar data. Det valdes att subtrahera bidraget från det biogent bundna kolet från modulerna A1-A3 men det går inte att säkerställa att värdena stämmer.

Arbetet har inte tagit hänsyn till modul D och därför tas inte hänsyn till effekter av återvinning av material. Då skivmaterial som ingår i urvalet innehåller återvunnet material kan denna indikator ge bättre förståelse för klimatpåverkan orsakad av skivmaterialet.

Vid upprättandet av en EPD anges det hur produkten omhändertas vid slutskedet. I samtliga EPD:er antas det att sluthantering sker i modul C3 och inte C4. Skivmaterialets sluthantering varierar något beroende på EPD och tillverkningsland. Att det inte är säkert vad som sker med produkten i slutskedet gör att dessa värden inte är exakta, vilket i sin tur gör att presenterade resultat i denna rapport inte är exakta.

Laboratorieresultaten för plywood visade relativt låg skjuvmodul och relativt låg skjuvhållfasthet. Resultat för plywood i den analytiska modellen visade däremot låg nedböjning på grund av hög elasticitetsmodul och lägst klimatpåverkan som teoretisk lättbalk. Plywood kräver större mängd jungfruligt material än resterande utvärderade skivmaterial i denna studie. Detta visar sig inte i studien då modul D inte redovisas. Dessutom utreds det inte hur skjuvmodul och skjuvhållfasthet påverkar nedböjning i en riktig lättbalk. Som nämnt i avsnitt 2.3.2 har livmaterialets skjuvhållfasthet störst inverkan på den slutliga nedböjningen medan elasticitetsmodulen var av mindre vikt. Hade nedböjning testats laborativt skulle ett trovärdigare resultat åstadkommits.

5.2. Provuppställning

Standarden som använts vid laborationen är anpassad för träbaserade skivor. Den standarden användes för samtliga material för att testa enligt samma förutsättningar. Med hänsyn till att alla skivmaterial inte är träbaserade kan det betyda att laborationsmetoden enligt EN 789 inte ger trovärdiga resultat för icke-träbaserade skivmaterial. Det bedömdes dock att det är viktigare att utföra alla tester enligt samma standardmetod än att anpassa varje provning till materialet i fråga.

Provuppställningen togs fram iterativt genom att testa de material som användes för att verifiera provuppställningen. Det ledde till att vissa tester gav mätfel eller oönskade brottmoder och exkluderades från medelvärdesbildningen. Då ett problem med provuppställningen upptäcktes modifierades den för att lösa problemet. För en säkrare verifiering skulle verifieringen av provuppställningen skett efter att alla problem lösts.

5.3. Laboration

Vid de laborativa försöken ska man enligt standard EN 789 lasta provkroppen till maxlast under 300 s ± 120 s. Provkropparna uppnådde i regel maxlast snabbare än 300 sekunder och samtliga provkroppar uppnådde maxlast inom toleransen, men detta lämnar fortfarande en viss skillnad i tid. Lasten appliceras med hjälp av en manuell hydraulisk tryckkolv och varken deformation eller last ökar linjärt. Detta kan potentiellt påverka resultaten då utförandet vid varje test inte sker under samma exakt samma förutsättningar.

Vid de initiala försöken mättes endast deformation vid skivans kant. Målet var att deformationen skulle användas för att beräkna skjuvmodulen, dock valdes det vid sista testet av respektive provkropp under verifieringen att mäta även deformationen i skjuvområdet. Detta resulterade i ett test som användes för att verifiera att deformationen stämde överens med tidigare mätningar enligt standarden. För att utvärdera deformationen i skjuvområdet för de resterande testerna användes ett förhållande mellan deformation vid kant och applicerad last, vilket gör beräknad skjuvmodul i plywood och OSB osäker. I resultatet presenteras både deformationen vid skivans kant och i skjuvområdet då den större deformationen vid skivans kant fortfarande anses ge en intressant beskrivning av deformationen under last.

Vid provning av Livingboard och Premiumboard som hade hög skjuvhållfasthet utsattes uppställningen för större laster än tidigare provat. Det ledde till att sidostöden, vars uppgift var att motverka snedställning av provkroppen, rörde på sig och tillät snedställning. Detta kan ha påverkat resultatet då skivan inte längre belastades helt vinkelrätt. Då provkroppen snedställs kan detta förstora deformationerna mätta vid stödregelns ände. Dessutom kan provkroppen ha klarat av lite mer last än om provkroppen var helt rak.

Under testning separerade eller bucklade Packwall-skivorna istället för att gå till skjuvbrott. Detta kan bero på att skivan inte innehåller lim utan är sammanbunden genom att skivan värmts upp tills plasten smält. Det kan vara detta som gjort att flera av skivorna separerade och deformerade ut ur planet under provning. Dessa brottmoder skilde sig från tester med provkroppar av andra skivmaterial vilket gör resultaten osäkra. Dessutom är skivan belagd med en papp som vid ett par tester släppte. Dessa tester exkluderades från medelvärdesbildningen vilket ger färre tester att skapa ett medelvärde från.

Enligt standard ska PRF-lim användas men vid laborationer användes PVAc-lim. Då PRF-lim ofta används för att motstå tuffa miljöer ansågs detta inte vara nödvändigt med tanke på att alla provkroppar och tester är inomhus i kontrollerade miljöer. Under tillverkningsproces-

sen behövde nytt lim beställas, då beställdes lim från en annan tillverkare. Detta påverkade inte resultaten märkbart då inga provkroppar gick till brott i limfogen. Dock släppte översta lagret vid testning av ett par Packwall-prover. Då endast samma lim användes under testningen av Packwall-prover går det inte att säkerställa att detta är på grund av limmet. Men då alla prover inte använde precis samma lim skedde inte alla tester under exakt samma förutsättningar.

Tillverkningen av provkroppar skedde i takt med att skivorna levererades, det försvårade möjligheten att vara konsekvent. Limmet som penslades på var inte samma mängd varje gång och några av stödreglarna var skeva. Skivmaterialet levererades direkt från brädgård eller producent till labbhallen och förvarades inomhus till laborationerna utfördes. Materialet ansågs därför vara acklimatiserat till miljön i labbet men kontroller enligt standarden utfördes ej på grund av tidsbrist. Potentiell påverkan av resultatet till följd av missade kontroller bedöms vara små. Utförda kontroller och konditionering enligt standard hade minskat felkällor.

5.4. Fullskaliga test

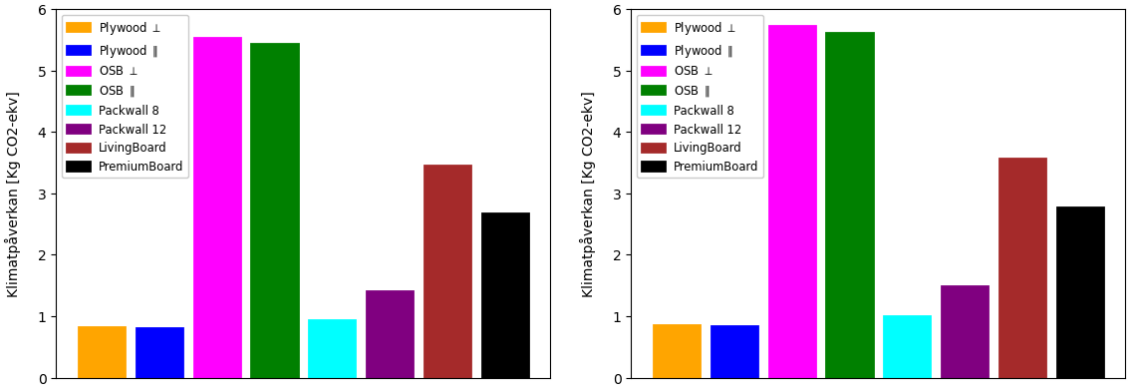
Vid beräkningen av de teoretiska balkarna används endast E-modul i böjning, men skjuvmodulen har tagits fram laborativt. Skjuvmodulen beskriver styvheten vid skjuvtöjning vilket spelar roll vid nedböjning. Då en Masonite Beams beräkningsexempel för nedböjning inte tar hänsyn till skjuvtöjningar används inte skjuvmodulen vid dessa beräkningar. Det leder till att skjuvmodulen som utvärderats inte kommer till särskild användning.

Eftersom de teoretiska balkar som analyserats inte har ett högt tvärsnitt i jämförelse med spännvidden antogs detta inte göra nämnvärd skillnad. För att ta reda på om våra antaganden stämmer skulle laborativa tester av fullskaliga balkar gjorts. Dessa laborativa tester hade erbjudit en chans att finkalibrera de analytiska modeller som användes. Förutom detta hade ett förhållande mellan skjuvmodul och nedböjning kunnat bestämmas.

5.5. Skjuvdeformation enligt Timoshenkos teori

Under skrivandet av detta arbete uppkom frågan om Timoshenkos teori kunde användas för att nyttja skjuvmodulen som tagits fram laborativt. Nedböjningen i figur 50 har beräknats en-

ligt Masonite Beams projekteringsanvisningar [20] och baseras på Bernoulli-Eulers teori utan hänsyn till skjuvdeformationer. Inverkan av skjuvdeformationer i de analytiska moddellerna beräknades därför enligt Svenskt Träs publikation *KL-trähandboken* [37] för att utvärdera inverkan av skjuvdeformationer. I figur (51) presenteras stapeldiagram utan och med hänsyn till skjuvtöjning enligt Timoshenkos teori. I tabell (14) presenteras klimatpåverkan samt tillhörande balkhöjder.



(a) Balkhöjder av teoretiska balkar med utvärderade livmaterial. Nedböjning enligt Bernoulli Eulers teori utan sjkuvtöjningar.

(b) Klimatpåverkan av teoretiska balkar med utvärderade livmaterial. Nedböjning enligt Timoshenkos teori med hänsyn till skjuvtöjning.

Figur 51: Jämförelse av klimatpåverkan av teoretisa balkar med liv av utvärderade livmaterial. Y-axeln visar klimatpåverkan uttyckt i Kg CO2-ekv enligt GWP-total-modulerna A1-A3 och C3.

Tabell 14: Jämförelse i nedböjning och klimatpåverkan. Jämförelsen presenteras genom klimatpåverkan enligt modul A1-A3 och C3 av teoretiska balkar med tillhörande balkhöjder för att uppnå en nedböjning på 18,7 mm. BE indikerar att nedböjningen räknats enligt Bernoulli-Eulers teori utan hänsyn till skjuvtöjning och TI indikerar att skjuvtöjning enligt Timoshenkos teori adderats.

Skivmaterial	Klimatpåverkan BE	Klimatpåverkan TI	Balkhöjd BE	Balkhöjd TI
	$[kgCO_2 - ekv]$	$[kgCO_2 - ekv]$	[mm]	[mm]
Plywood ⊥	0,82	0,86	369	387
Plywood ∥	0,80	0,84	360	376
OSB ⊥	5,52	5,72	373	387
OSB ∥	5,43	5,61	367	379
PackWall 8 mm	0,94	1,0	377	399
PackWall 12 mm	1,40	1,49	377	400
LivingBoard	3,44	3,56	371	383
PremiumBoard	2,66	2,77	373	388

Skillnaderna av skjuvtöjningen utgör en ökning på mellan 3,5-6,5%. OSB-skivan med huvudriktning av fiber parallellt med balken påverkades minst av skjuvdeformationer och hade en ökad nedböjning på 3,5%. Packwall 12 mm påverkades mest av skjuvtöjningar och hade en ökad nedböjning på 6,5%. Jämförelsen påverkas alltså som högst med 3% mellan den mest påverkade balken och den minst påverkade balken. De påverkas olika på grund av skillnad i skjuvmodul. Påverkan av skjuvtöjning bedömdes inte vara relevant för studien men har en viss inverkan på klimatpåverkan och nedböjning.

5.6. Lättreglar

Det finns fler möjligheter än att endast använda lättbalken som just balk. Att optimera materialmängd och klimatavtryck även i regelkonstruktioner kan vara ett lämpligt alternativ för ett material som Packwall där skjuvhållfastheten och styvheten är lägre. Att använda lättbalkar med ett livmaterial som har låg styvhet och hållfasthet men mycket lågt klimatavtryck kan vara särskilt intressant när elementen används som väggreglar snarare än som balkar. I väggar är belastningarna vanligtvis mindre och består främst av tryckkrafter och mindre böjspänningar. Därför behöver livet inte bära lika stora skjuvkrafter som i en balk med lång spännvidd. Flänsarna tar fortfarande huvuddelen av krafterna, medan livet främst håller isär flänsarna och stabiliserar tvärsnittet.

6. SLUTSATS

6.1. Kan alternativa skivmaterial bidra till lägre klimatavtryck för lättbalkar medan erforderlig bärförmåga bibehålls?

Målet med rapporten var att utvärdera möjligheten att med alternativa livmaterial minska lättbalkens klimatpåverkan utan att försämra kapaciteten i balken. Genom de jämförelser som gjorts i arbetet framkommer tydliga indikationer på att det genom rätt val av livmaterial är möjligt att avsevärt minska lättbalkens klimatavtryck. Utifrån de teoretiska resonemang och experimentella resultat som redovisats i rapporten kan följande slutsatser dras:

- De alternativa skivmaterial som utvärderats bidrar till en lägre klimatpåverkan än det referensmaterial (OSB) som ingått i studien.
- Analyserna genomförda i detta arbete visar att samtliga skivmaterial har kapacitet att klara de skjuvspänningar som uppstår i det teoretiska lastfallet.
- Nedböjningen för den teoretiska balken med höjd 400 mm klarar gränsvärdet med samtliga skivmaterial som liv.
- Analyserna i detta arbete visar på att Packwall är ett skivmaterial med lägre skjuvhållfasthet som avsevärt minskar lättbalkens klimatpåverkan i jämförelse med referensmaterialet. Materialet hade kunnat användas i mindre krävande tillämpningar då en lägre klimatpåverkan är en prioritet.
- Resultaten visar att plywood är ett mycket material- och klimateffektivt alternativ som liv jämfört med referensmaterialet. Plywood lämpar sig då hög styvhet och minskad klimatpåverkan är prioriterat.
- Premiumboard och Livingboard är utifrån analysen de skivmaterial med högst skjuvhållfasthet och lägre klimatpåverkan jämfört med referensmaterialet. Skivmaterialen hade kunnat användas i krävande tillämpningar och samtidigt minska klimatpåverkan.

6.2. Förslag till vidare studier

För att vidare utveckla arbetet som gjorts genom denna rapport är laborativ utvärdering av fullskaliga balkar ett naturligt steg. Provkropparna som testats med olika skivmaterial har en resulterande skjuvhållfasthet, men den kan inte översättas direkt till lättbalkar. Ett potentiellt förhållande mellan provkropparnas skjuvhållfasthet och lättbalkars skjuvhållfasthet kan upprättas med hjälp av fullskaliga försök. En lättbalk utsätts inte för samma typ av laster som provkropparna gjorde i laborationen, vilket dessutom medför att samverkan mellan flänsar och skivmaterial kan se annorlunda ut än vid utförda laborationer. Ytterligare kan inverkan av skjuvmodul och skjuvhållfasthet på nedböjning och styvhet utvärderas.

Med fullskaliga lättbalksprovningar kan samtidigt utmaningar med vidhäftning mellan fläns- och livmaterial undersökas vidare. Detta kan även göras i mindre skala genom fokuserade studier på limmet, limfogen och kontaktytorna.

Arbetet tog inte hänsyn till modul D vid utvärdering av klimatavtryck vilket skulle kunna ge intressanta resultat. Då de alternativa skivmaterialen som ingick i denna studie innehåller stor andel återvunnet material hade detta kunnat påverka resultaten. Vidare kan referensmaterialets resultat påverkas av denna modul. Detta hade gett mer nyans till resultaten.

Slutligen är kostnad ett perspektiv som hade varit intressant att utreda. Även om branschen jobbar mot klimateffektiva lösningar är ofta entreprenader eller beställare begränsade av budget. Då arbetet inte tagit kostnad i beaktning hade detta gett intressanta slutsatser gällande möjligheten till att implementera alternativa skivmaterial i byggbranschen.

Att byta livmaterial i en lättbalk för att minska klimatavtrycket innebär flera ekonomiska avvägningar. Material med lägre klimatpåverkan exempelvis biobaserade eller återvunna material kan innebära högre inköpskostnad eftersom produktionen ännu inte är storskalig, bearbetning av denna typ av material kan även innebära mer avancerade tillverkningsprocesser. Samtidigt kan ett mer materialeffektivt liv minska den totala mängden material i balken, detta kan sänka både transport- och montagekostnader. Därmed kan vissa klimatåtgärder även ge ekonomiska fördelar. Produktionsprocessen för lättbalken kan också påverkas av ett materialbyte. Nya material kan kräva anpassade tillverkningsmetoder, nya limsystem eller förändrade kvalitetskontroller vilket initialt kan öka kostnaderna. Om materialet däremot är lättare att bearbeta eller ger mindre spill kan produktionskostnaderna minska på längre sikt.

Referenser

[1] Regeringen och Regeringskansliet. Klimatdeklaration för byggnader, March 2021. URL https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/proposition/2021/03/prop.-202021144.

[2] Ranjana Yadav, Jitendra Kumar, Ranjana Yadav, and Jitendra Kumar. Engineered Wood Products as a Sustainable Construction Material: A Review. In *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen, August 2021. ISBN 978-1-83962-772-9. doi:10.5772/intechopen.99597. URL https://www.intechopen.com/chapters/78315.

[3] Masonite Beams. *The I-joist Handbook*. Masonite Beams AB, 2022.

[4] Alexander Olsson, Adrian Lefvert, and Stefan Grönkvist. An alternative pathway to negative emissions – revitalising the wood-based panel production in Sweden. *Environmental Development*, 50:100973, June 2024. ISSN 2211-4645. doi:10.1016/j.envdev.2024.100973. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464524000113.

[5] Försvarsdepartementet. Förordning (2022:524) om statliga myndigheters beredskap, 2022. URL https://beta.rkrattsbaser.gov.se/sfs/item?bet=2022%3A524&tab=grundforfattning.

[6] Duy Linh Nguyen, Jan Luedtke, Martin Nopens, and Andreas Krause. Production of wood-based panel from recycled wood resource: a literature review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(3):557–570, June 2023. ISSN 1436-736X. doi:10.1007/s00107-023-01937-4. URL https://doi.org/10.1007/s00107-023-01937-4.

[7] Ciyuan Jin, Shiyao Zhu, and Haibo Feng. Life Cycle Assessment of Engineered Wood Products in the Building Sector: A Review. *Buildings*, 15(22):4193, January 2025. ISSN 2075-5309. doi:10.3390/buildings15224193. URL https://www.mdpi.com/2075-5309/15/22/4193.

[8] Julie Barrette, Alexis Achim, and David Auty. Impact of Intensive Forest Management Practices on Wood Quality from Conifers: Literature Review and Reflection on Future Challenges. *Current Forestry Reports*, 9:1–30, March 2023. doi:10.1007/s40725-023-00181-6.

[9] Pierre Blanchet, Cédric Perez, and Matheus Cabral. Wood Building Construction: Trends and Opportunities in Structural and Envelope Systems. *Current Forestry Reports*, December 2023. doi:10.1007/s40725-023-00196-z.

[10] H.R. Milner and A.C. Woodard. Sustainability of engineered wood products. In *Sustainability of Construction Materials*, pages 159–180. Woodhead Publishing, January 2016. doi:10.1016/B978-0-08-100370-1.00008-1. URL https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780081003701000081.

[11] Sheldon Shi and John Walker. Wood-based composites: Plywood and veneer-based products. In *Primary Wood Processing*, pages 391–426. Springer Dordrecht, September 2006. ISBN 978-1-4020-4392-5. doi:10.1007/1-4020-4393-7_11.

[12] Swedish Wood. *Design of Timber Structures*, volume 1. Swedish Forest Industries Federation, Stockholm, 3 edition, 2019.

[13] SS-EN 338:2016. Träkonstruktioner – Konstruktionsvirke – Hållfasthetsklasser, 2016.

[14] Swedish Wood. *Design of Timber Structures*, volume 2. Swedish Forest Industries Federation, Stockholm, 3 edition, 2019.

[15] Venla Hemmilä, Stergios Adamopoulos, Olov Karlsson, and Anuj Kumar. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A Review. *RSC Advances*, 7(61):38604–38630, August 2017. ISSN 2046-2069. doi:10.1039/C7RA06598A. URL https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ra/c7ra06598a.

[16] Svenskt Trä. *Limträhandboken - Fakta om limträ*, volume 1. Föreningen Sveriges Skogsindustrier, Stockholm, March 2016.

[17] SS-EN 636. Plywood - Specifikationer, 2015. URL https://www.sis.se/produkter/trateknik-15e6ae2b/trabaserade-skivor/plywood/ssen6362012a12015/.

[18] Dennis Jones and Christian Brischke. Wood as bio-based building material. In *Performance of Bio-based Building Materials*, pages 21–96. Woodhead Publishing, January 2017. doi:10.1016/B978-0-08-100982-6.00002-1. URL https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780081009826000021.

[19] Svenskt Trä. Spånskivor - TräGuiden, 2017. URL https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/trabaserade-produkter/skivmaterial1/spanskivor/.

[20] Masonite Beams. Projekteringsanvisning. Technical Report Utgåva 4, Masonite Beams AB. URL https://handbok.masonitebeams.se/hem#laddaner.

[21] Svenskt Trä. Träbaserade skivmaterial. URL https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/tra-och-trabaserade-produkter/trabaserade-skivmaterial/.

[22] SS-EN 312:2010. Standard - Particleboards - Specifications, 2010. URL https://www.sis.se/en/produkter/wood-technology/woodbased-panels/fibre-and-particle-boards/ssen3122010/.

[23] Svenskt Trä. Bra att veta om träskivor. *Byggbeskrivningar*, October 2017. URL https://www.byggbeskrivningar.se/allmant/bra-att-veta-om-traskivor/.

[24] Guo Chen, Chuang Tan, Wenqi Yang, Jing Wu, Tong Zhou, Hao Jiang, and Yongxing Zhang. Wood I-joists with web holes and flange notches: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 38:102224, June 2021. ISSN 2352-7102. doi:10.1016/j.jobe.2021.102224. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000802.

[25] Marta Pędzik, Dominika Janiszewska, and Tomasz Rogoziński. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. *Industrial Crops and Products*, 174:114–162, December 2021. ISSN 0926-6690. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114162. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021009274.

[26] SS-ISO 21930:2020. Hållbarhet hos byggnadsverk - Regler för miljödeklarationer för byggprodukter och byggtjänster, 2020.

[27] SS-EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products, 2019. URL https://www.sis.se/en/produkter/construction-materials-and-building/construction-industry/other-aspects/ss-en-158042012a22019/.

[28] Nicolas Neitzel, Reza Hosseinpourpia, Thomas Walther, and Stergios Adamopoulos. Alternative Materials from Agro-Industry for Wood Panel Manufacturing—A Review. *Materials*, 15(13), June 2022. ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma15134542. URL https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4542.

[29] Pfleiderer. LivingBoard - the better OSB boards | Pfleiderer. URL https://www.pfleiderer.com/global-en/products/raw-wood-based-panels/livingboard-the-better-osb-boards.

[30] Pfleiderer. Workbook - Wood-based Materials for Construction Application 2025-2028, 2025. URL https://www.pfleiderer.com/file_pim/Werbemittel/

workbook-construction-wood-based-materials-for-construction-...
-im0038919.pdf.

[31] Pfleiderer. Enviromental Product Declaration - Particleboard, April 2025. URL https://www.pfleiderer.com/file_pim/Dokumente/environmental-product-declaration-epd-raw-particleboard-im0037217.pdf.

[32] Recoma. Technical Datasheet Packwall. URL https://cdn.prod.website-files.com/63c50bc07d33ed9d18aa8a88/66bd93e1525c0937e7f97f6f_RECOMA%20Technical%20Datasheet%5BEng%5D.pdf.

[33] Andreas Öchsner. *Classical Beam Theories of Structural Mechanics*. Springer Nature Switzerland AG, June 2021. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-76035-9.

[34] SS-EN 789:2004. Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels, 2005.

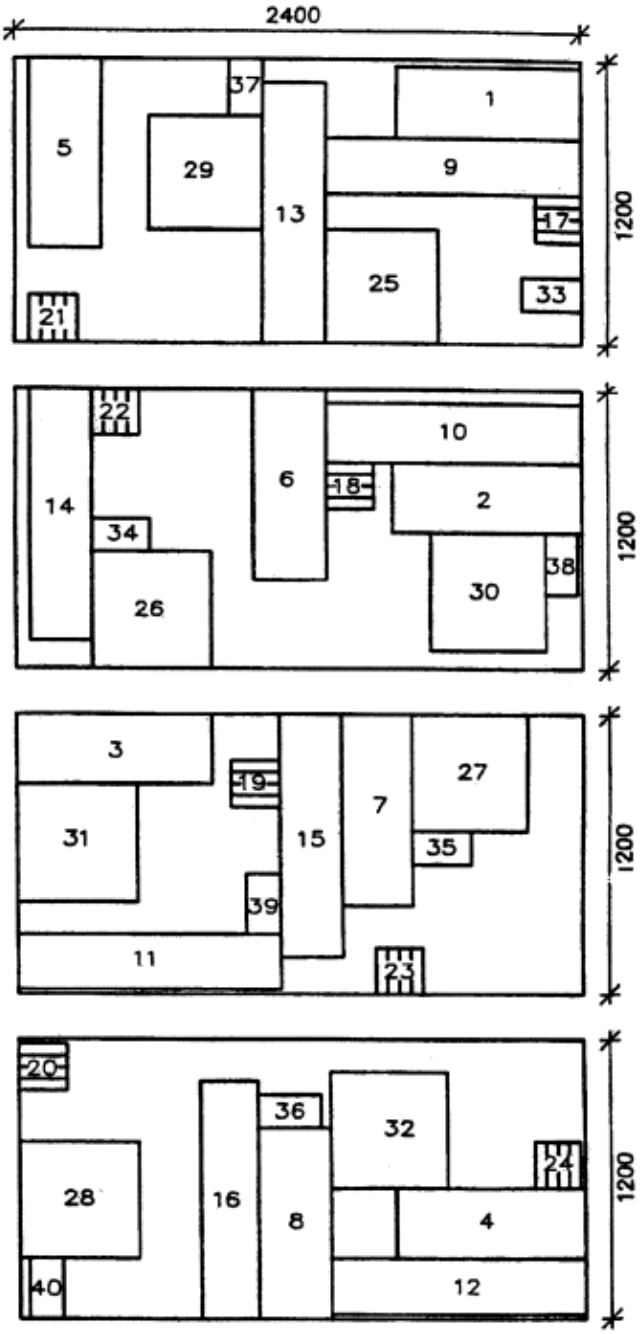
[35] Rune Ziethén. *Evaluation of test methods for wood based panels*. Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1994. URL https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:961865/FULLTEXT01.pdf.

[36] SWISS KRONO TEX GmbH & Co. KG. SWISS KRONO Group - Environmental Product Declaration, June 2021. URL https://www.swisskrono.com/pl-en/certificates/?tx_downloadcenter_downloadcenter%5Baction%5D=download&tx_downloadcenter_downloadcenter%5Bcontroller%5D=Downloadcenter&tx_downloadcenter_downloadcenter%5Buid%5D=4116&cHash=feda10439bda360b787528103656072c.

[37] Svenskt Trä. *KL-trähandbok*. Föreningen Sveriges Skogsindustrier, Stockholm, first edition, May 2017. ISBN 978-91-981922-5-4.

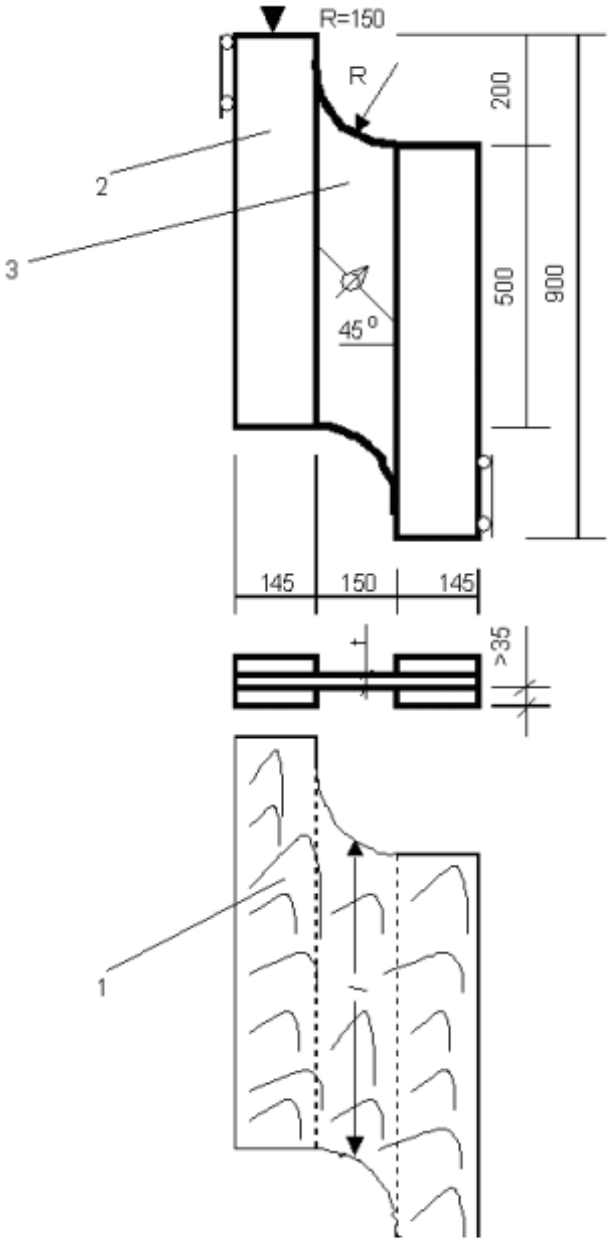
Appendix

A. Ytterligare Tabeller och Figurer



Test	Specimen number
Bending	
longitudinal	1 to 4
lateral	5 to 8
Tension	
longitudinal	9 to 12
lateral	13 to 16
Compression	
longitudinal	17 to 20
lateral	21 to 24
Panel shear	
longitudinal	25 to 28
lateral	29 to 32
Planar shear	
longitudinal	33 to 36
lateral	37 to 40

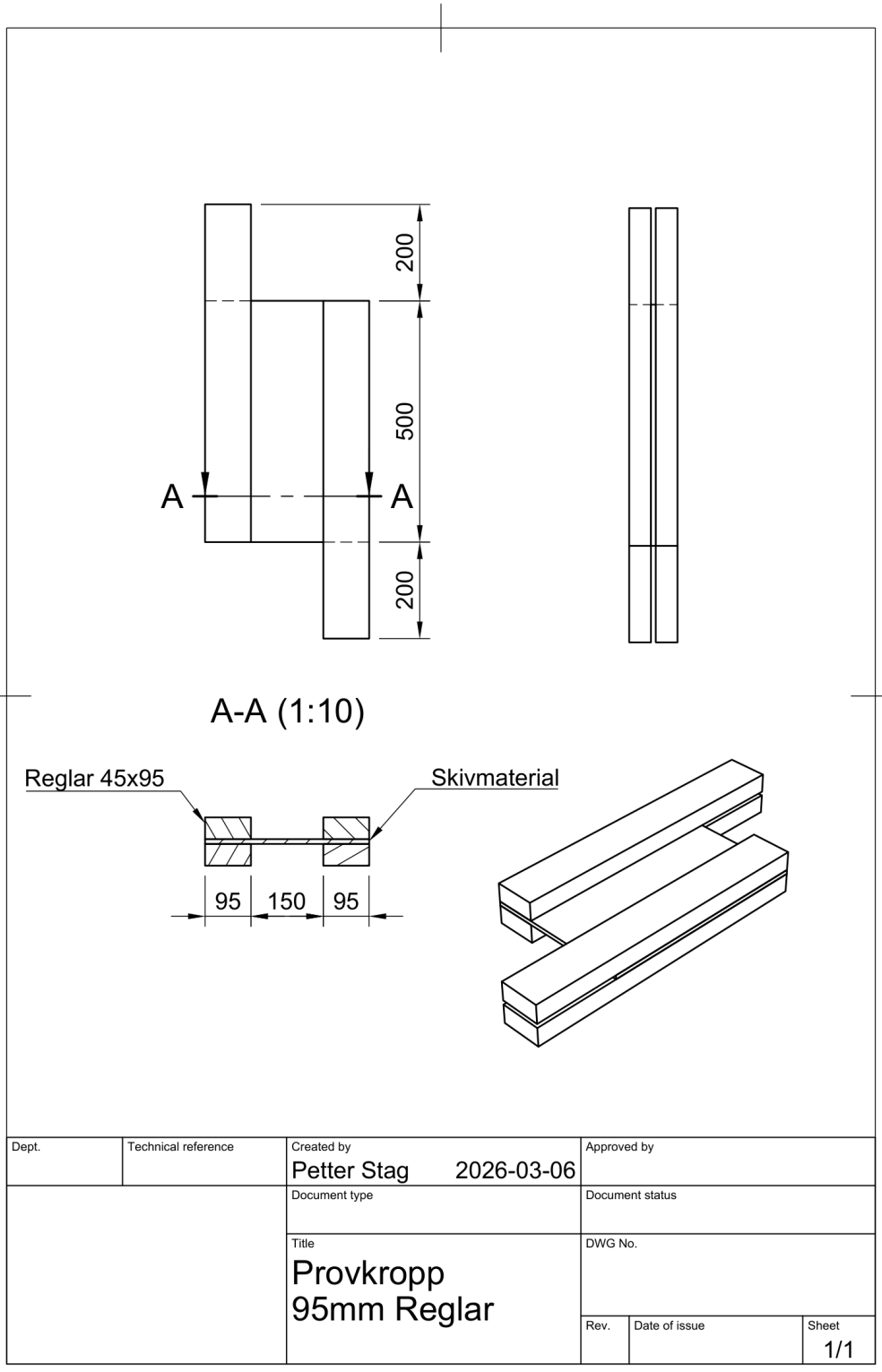
Figur A1: Positioner för uttagning av provbitar tagen från SS-EN 789:2004 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels [34].



Key

1	Panel
2	Rail
3	Test piece
4	Radius
5	Load
t	Thickness

Figur A2: Provkropp tagen från SS-EN 789:2004 Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels EN 789 [34].



Figur A3: Provkropp enligt modifikationer som gjorts från EN 789.

B. Brottmoder

BA. OSB



Figur BA1: Brott OSB 1.



Figur BA2: Brott OSB 2.



Figur BA3: Brott OSB 3.



Figur BA4: Brott OSB 4.



Figur BA5: Brott OSB 5.



Figur BA6: Brott OSB 6.

BB. Plywood



Figur BB1: Brott PLY 1.



Figur BB2: Brott PLY 2.



Figur BB3: Brott PLY 3.



Figur BB4: Brott PLY 4.



Figur BB5: Brott PLY 5.



Figur BB6: Brott PLY 6.

BC. Recoma 8 mm



Figur BC1: Brott R8-2.



Figur BC2: Brott R8-5.

BD. Recoma 12 mm



Figur BD1: Brott R12-3.



Figur BD2: Brott R12-4.



Figur BD3: Brott R12-5.

BE. Livingboard



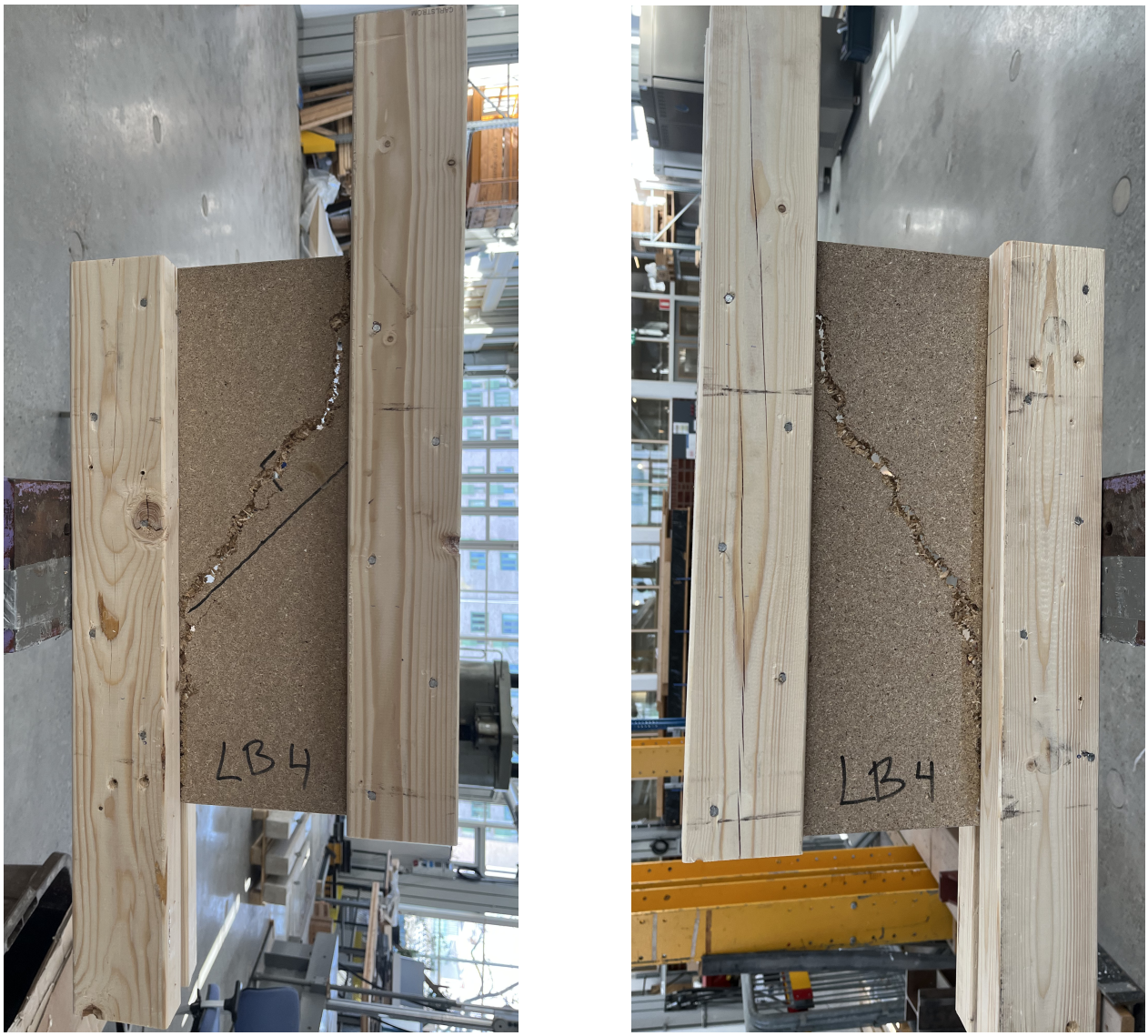
Figur BE1: Brott LB 1.



Figur BE2: Brott LB 2.



Figur BE3: Brott LB 3.

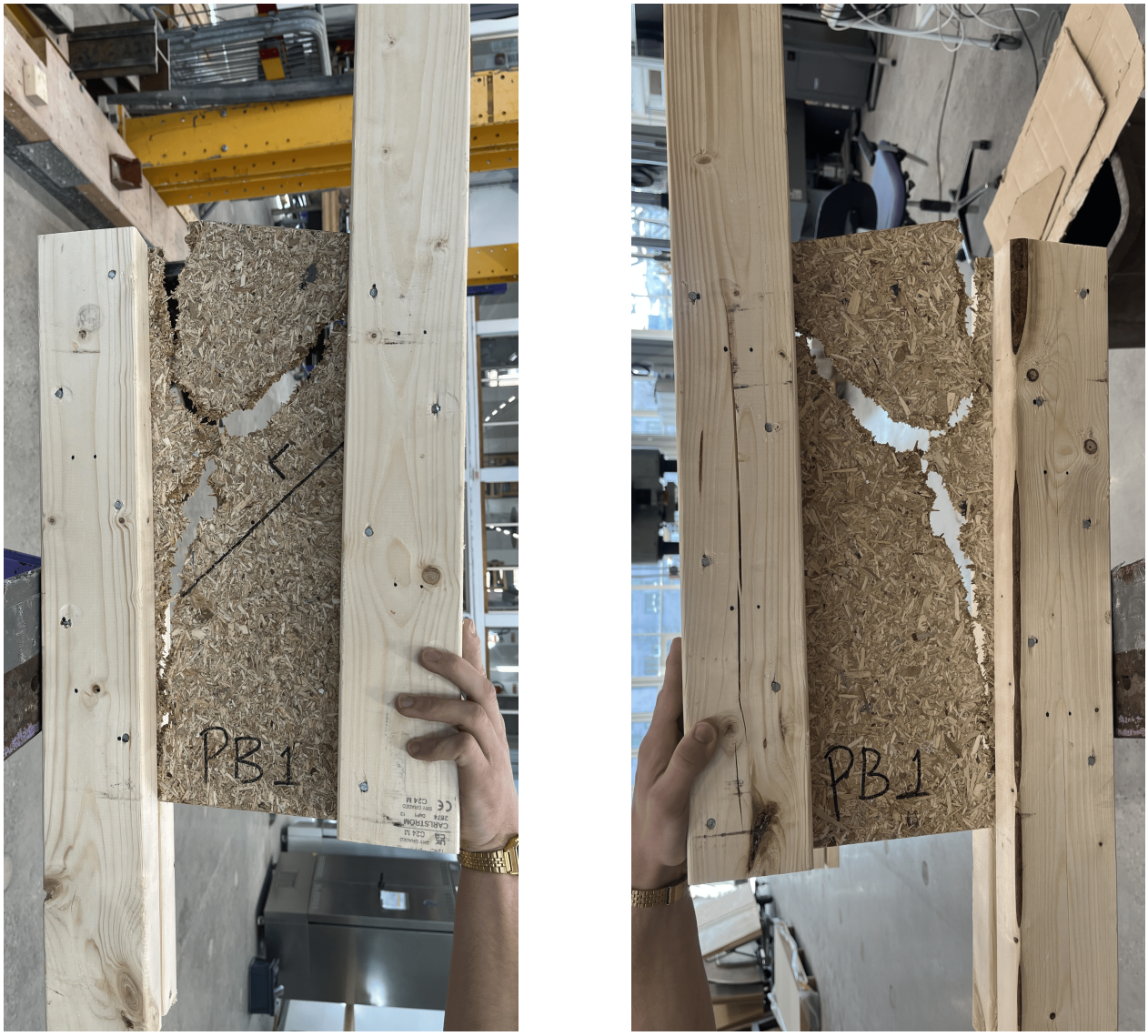


Figur BE4: Brott LB 4.



Figur BE5: Brott LB 5.

BF. Premiumboard



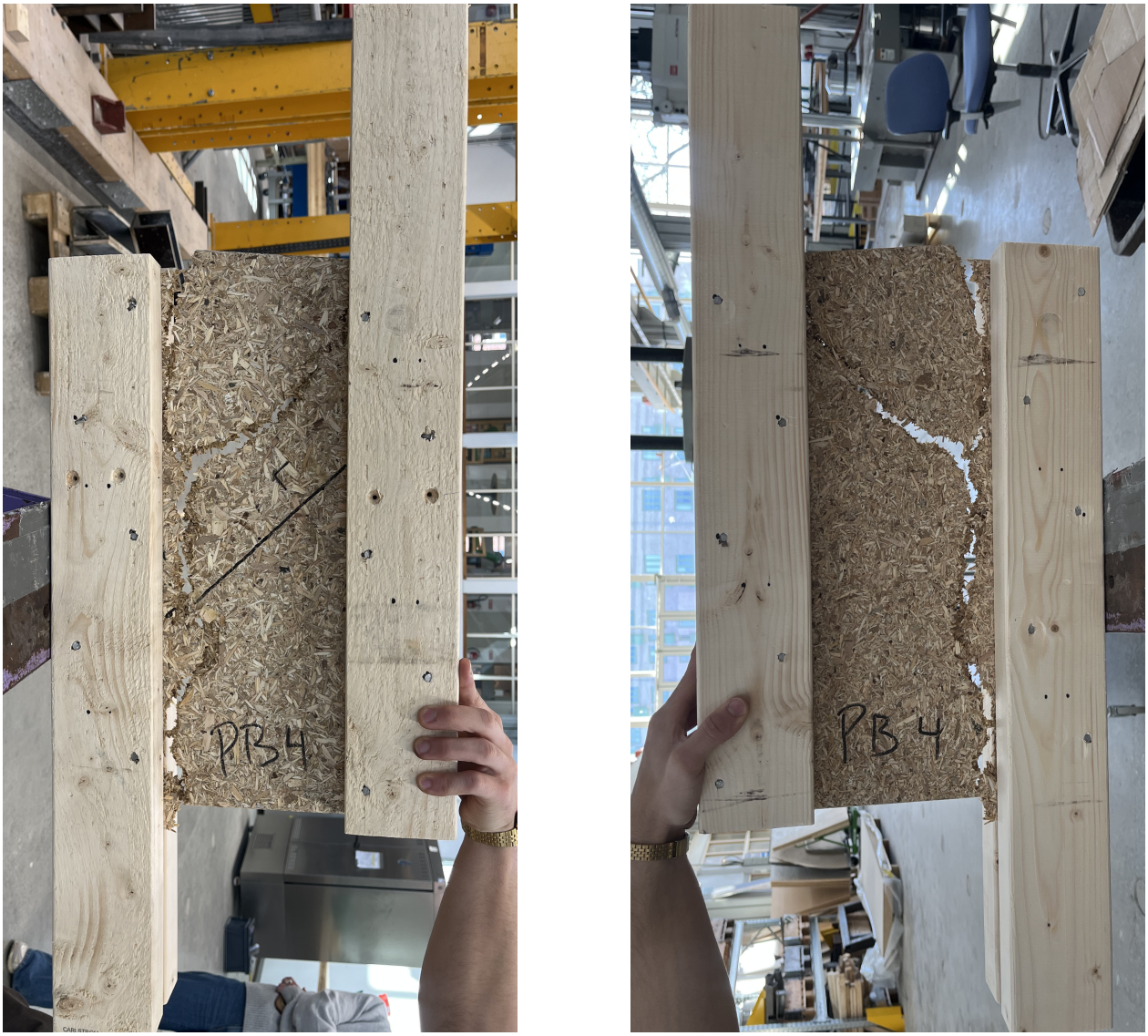
Figur BF1: Brott PB 1.



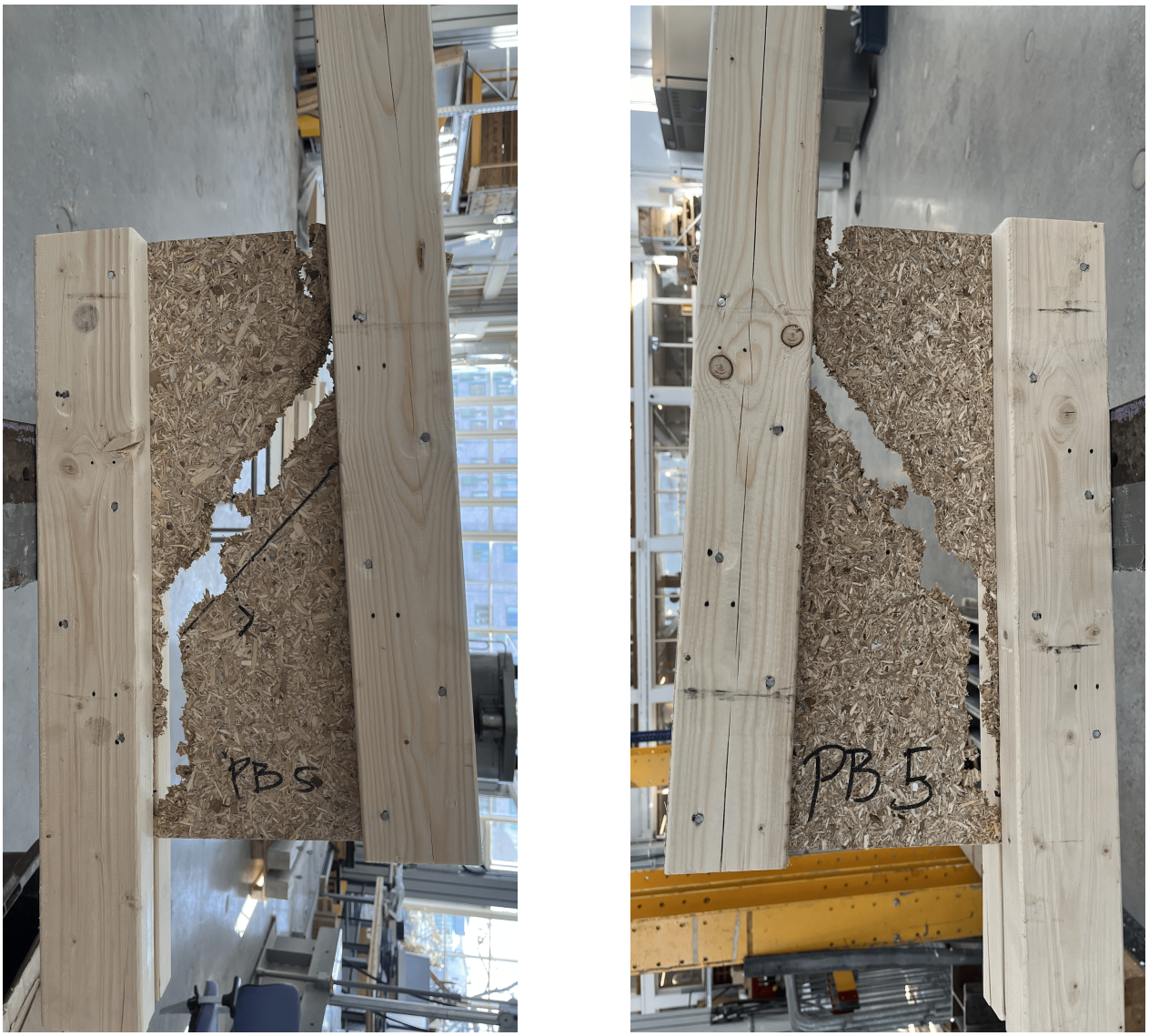
Figur BF2: Brott PB 2.



Figur BF3: Brott PB 3.



Figur BF4: Brott PB 4.



Figur BF5: Brott PB 5.