

# Utvärdering av skjuvkapacitet hos väggar med installationsskikt

Shear capacity evaluation of walls with service cavities

**Olivia Andersson & Mathilda Andersson**

---

Avdelningen för Konstruktionsteknik  
Lunds Tekniska Högskola  
Lunds Universitet, 2026



Rapport TVBK-5314



# Abstract

A large proportion of residential buildings in Sweden are constructed using timber frame systems, which is becoming increasingly relevant due to growing demands for reduced climate impact in the building sector. Consequently, there is a growing interest in expanding the knowledge of timber construction and how it can be further optimized.

Buildings must be designed to resist horizontal loads. In low-rise residential buildings, horizontal stability is commonly achieved through shear wall action, which can reduce the need for more complex, economically demanding, and less climate friendly stabilizing systems. Today, many timber frame walls are constructed with service cavities, where the sheathing is attached to the service cavity studs instead of directly to the primary structural frame. However, the influence of this configuration on the shear action of the walls has not been sufficiently investigated, resulting in this capacity generally being neglected in structural design. This thesis therefore investigates how the horizontal stabilizing performance of timber frame walls is affected by different service cavity configurations.

Five different wall configurations are investigated to analyze how stud orientation, stud dimensions, and fastening conditions influence the racking stiffness and shear capacity of the walls. The walls have dimensions of 2,4 m  $\times$  2,4 m and are sheathed with plywood panels. The wall specimens are assembled and loaded to failure in a laboratory environment according to the testing standard *Träkonstruktioner - Styrka och styvhet hos skivbeklädda träregelement - Provning* [1]. The experimental results are subsequently compared with theoretical calculations to provide a deeper understanding of the walls' structural behavior and load transfer mechanisms.

The results show that the configuration of the service cavity has a significant influence on the load transfer and stabilizing performance of the walls. Walls with vertical service cavity studs exhibited substantially higher shear capacity and racking stiffness than walls with horizontal studs, corresponding to 64 % and 32 % of the shear capacity of the reference wall (without service cavity), respectively.

The results further indicate that the structural behavior of the walls is strongly influenced by the interaction between the sheathing, the service cavity, and the primary structural frame, as well as by the number of effective fastening points. No clear influence of increased stud dimensions within the service cavity was observed. The experimental results for walls with horizontal service cavity studs also showed relatively good agreement with the elastic calculation method according to Carling [2], indicating that the model may be applicable for this type of wall configuration. For the wall with double sheathing layers, the inner panel attached directly to the primary structural frame was observed to be the primary load-bearing layer, while the outer panel contributed through partial composite action.

Despite the observed reduction in performance, the study demonstrates that sheathing attached to service cavities still contributes significantly to the horizontal stabilizing behavior of timber frame walls. The findings therefore indicate that current design practice, where the contribution of sheathing mounted on service cavities is often completely neglected in the design of horizontal stability systems, may in some cases be unnecessarily conservative. The results may therefore provide a basis for further development of structural design models with less conservative assumptions, contributing to more resource-efficient stabilizing solutions in timber buildings.

**Keywords:** timber construction engineering, timber stud walls, service cavity, shear action, horizontal stability, shear capacity, plywood, Eurocode 5, racking stiffness.

# Sammanfattning

En stor del av dagens bostäder i Sverige byggs med trästomme, något som också blir alltmer relevant i takt med ökade krav på byggnaders klimatavtryck. Det är därför mer intressant än någonsin för branschen att utöka kunskapen om träbyggnation och hur den kan effektiviseras.

Byggnader behöver dimensioneras för horisontella laster. I låga bostadshus uppnås horisontalstabiliteten vanligen genom skivverkan i väggarna, vilket kan minska behovet av mer komplexa, kostsamma och mindre klimatvänliga stabiliseringslösningar. Idag byggs många träregelväggar med installationsskikt, där skivmaterialet monteras på installationsskiktets regler istället för direkt mot huvudstommen. Hur detta påverkar väggarnas skivverkan är dock otillräckligt undersökt, vilket medför att kapaciteten normalt inte beaktas vid dimensionering. Examensarbetet undersöker därför hur träregelväggars horisontalstabiliserande förmåga genom skivverkan påverkas av olika utformningar av installationsskikt med plywood som skivmaterial.

Fem olika väggutföranden undersöks för att analysera hur regelorientering, regeldimension och infästningsförhållanden påverkar väggarnas skjuvstyvhet och skjuvkapacitet. Väggarna har dimensionerna 2,4 m × 2,4 m och skivmaterialet som används är plywood. Dessa monteras och belastas till brott i laboratoriemiljö enligt provningsstandarden SS-EN 594:2011 [1]. De experimentella resultaten jämförs därefter med teoretiska beräkningar för att ge en djupare förståelse för väggarnas funktion och lastöverföring.

Resultaten visar att installationsskiktets utformning har stor betydelse för väggarnas lastöverföring och stabiliserande förmåga. Väggar med vertikala installationsreglar uppvisade betydligt högre skjuvkapacitet och skjuvstyvhet än väggar med horisontella regler, med relativa bärförmågor motsvarande 64 % respektive 32 % av referensväggens kapacitet, utformad utan installationsskikt. Resultaten tyder även på att väggarnas beteende i stor utsträckning påverkas av samverkan mellan skiva, installationsskikt och huvudstomme samt av antalet effektiva infästningspunkter. Däremot observerades ingen tydlig påverkan av ökad regeldimension i installationsskiktet. De experimentella resultaten för väggar med horisontella installationsreglar visar relativt god överensstämmelse med den elastiska beräkningsmetoden enligt Carling [2], vilket indikerar att modellen kan vara tillämpbar för denna typ av väggutformning. För väggen med dubbla skivlager observerades att skivan direkt mot huvudstommen är primärt lastbärande, medan den yttre skivan bidrar genom partiell samverkan.

Trots den observerade reduktionen visar studien att skivmaterial monterat på installationsskikt fortfarande bidrar med en betydande stabiliserande effekt. Studien indikerar därmed att dagens dimensioneringspraxis, där skivmaterial monterat på installationsskikt ofta försummas helt vid dimensionering av horisontalstabilitet, i vissa fall kan vara onödigt konservativ. Resultaten kan därför utgöra underlag för vidare utveckling av dimensioneringsmodeller med mindre konservativa antaganden och därmed bidra till mer resurseffektiva stabiliseringslösningar i träbyggnader.

**Nyckelord:** träbyggnadsteknik, träregelväggar, installationsskikt, skivverkan, horisontalstabilitet, skjuvkapacitet, plywood, Eurokod 5, skjuvstyvhet.

# Förord

Med detta examensarbete avslutar vi våra fem års studier inom civilingenjörsprogrammet i väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Oskar Ranefjärd vid avdelningen för konstruktionsteknik på Lunds Tekniska Högskola och Tord Isaksson vid Skanska Teknik i Malmö för ert engagemang, vägledning och stöd under arbetets gång. Era kunskaper och synpunkter har varit mycket värdefulla!

Vi vill även tacka avdelningen för konstruktionsteknik för tillgång till laboratorium, labbutrustning och material, vilket varit avgörande för genomförandet av examensarbetet.



# Innehåll

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>III</b>
<b>Förord</b>	<b>V</b>
<b>Innehåll</b>	<b>IX</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	1
1.2 Studiens inriktning . . . . .	2
1.2.1 Syfte och mål . . . . .	2
1.2.2 Frågeställning . . . . .	3
1.3 Genomförande . . . . .	3
1.3.1 Arbetsfördelning och verktyg . . . . .	3
1.3.2 Avgränsningar . . . . .	4
<b>2 Teoretisk bakgrund</b>	<b>5</b>
2.1 Lättbyggnadssystemet . . . . .	5
2.2 Stomstabilisering av trähus . . . . .	6
2.2.1 Horisontalstabilisering . . . . .	6
2.2.2 Skivverkan . . . . .	7
2.2.3 Beräkningsmodell - Plastiska förhållanden . . . . .	9
2.2.4 Beräkningsmodell - Elastiska förhållanden . . . . .	10
2.3 Installationsskiktets funktion . . . . .	12
2.3.1 Installationsskiktets utformning . . . . .	12
2.3.2 Installationsskikt ur fukt- och energisynpunkt . . . . .	13
2.4 Skivmaterial . . . . .	14
2.4.1 Plywood som skivmaterial . . . . .	14
2.4.2 Förband och förankringar vid provning . . . . .	16
<b>3 Metod</b>	<b>17</b>
3.1 Provning . . . . .	17
3.1.1 Val av provkroppar . . . . .	17
3.1.2 Provernas geometri . . . . .	18
3.1.3 Skivmaterial vid provning . . . . .	20
3.1.4 Förband och förankringar vid provning . . . . .	20
3.2 Tillverkning och montering . . . . .	25
3.2.1 Montering av installationsskikt . . . . .	25
3.2.2 Montering av skivor . . . . .	27

3.3	Provningsmetod enligt SS-EN 594:2011 . . . . .	27
3.3.1	Provningsanordning . . . . .	28
3.3.2	Belastningssätt . . . . .	29
3.3.3	Mätutrustning och mätmetoder . . . . .	29
3.3.4	Avvikelser från SS-EN 594:2011 . . . . .	29
3.4	Analys av mätdata . . . . .	30
3.4.1	Bestämning av styvhet och bärförmåga . . . . .	30
3.4.2	Hantering av feljusteringar . . . . .	31
3.5	Teoretisk bärförmåga . . . . .	31
3.5.1	Tvärkraftsbärförmåga hos skruvförband . . . . .	31
3.5.2	Bärförmåga hos väggelement . . . . .	34
3.6	Hantering av bärförmåga för väggar med installationsskikt . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>39</b>
4.1	Last– deformationsdiagram utifrån provning . . . . .	39
4.1.1	Vägg 1 - Referensvägg . . . . .	40
4.1.2	Vägg 2 – Installationsskikt 45 mm, vertikala reglar . . . . .	41
4.1.3	Vägg 3 – Installationsskikt 45 mm, horisontella reglar . . . . .	42
4.1.4	Vägg 4 – Installationsskikt 70 mm, horisontella reglar . . . . .	43
4.1.5	Vägg 5 – Installationsskikt 45 mm horisontella reglar, två skivlager . . . . .	44
4.1.6	Sammanställning givare 5 (på stommen) . . . . .	45
4.1.7	Sammanställning givare 6 (på skivan) . . . . .	46
4.1.8	Jämförelse av styvhetslinjer och mätlinjer för givare 6 . . . . .	47
4.1.9	Relativ styvhet givare 6 . . . . .	48
4.1.10	Initial styvhet upp till 40 % av brottlasten . . . . .	48
4.2	Sammanställning av provningsresultat . . . . .	49
4.2.1	Deformation och brottlast . . . . .	49
4.2.2	Skjuvstyvhet . . . . .	49
4.2.3	Brottlast och skjuvtyvhet per förbindare . . . . .	50
4.3	Teoretisk bärförmåga . . . . .	51
4.3.1	Tvärkraftsbärförmåga hos skruvförband . . . . .	51
4.3.2	Sammanställning . . . . .	52
4.3.3	Bärförmåga hos väggelement . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Analys</b>	<b>54</b>
5.1	Generella observationer . . . . .	54
5.2	Vägg 1–5 . . . . .	55
5.3	Förbindarnas påverkan . . . . .	56
5.4	Jämförelse av deformationsgivare 5 och 6 . . . . .	59
5.5	Global analys av väggarna . . . . .	60
5.5.1	Övergripande jämförelse mellan väggtyperna . . . . .	60
5.5.2	Regelorientering och lastöverföring . . . . .	61
5.5.3	Installationsskiktets tjocklek . . . . .	62
5.5.4	Samverkan mellan installationsskikt och huvudstomme . . . . .	62
5.5.5	Analys av vägg 5 (två skivlager) . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>65</b>
6.1	Resultatdiskussion . . . . .	65
6.2	Osäkerheter och felkällor . . . . .	66

6.3	Reflektion kring provningsmetodik . . . . .	73
6.4	Implikationer . . . . .	73
6.5	Förslag till vidare studier . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>76</b>
	<b>Litteratur</b>	<b>77</b>
	<b>Bilagor</b>	<b>81</b>



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Det finns en tydlig strävan att öka användningen av trä i byggsektorn i Sverige, där trästommar idag står för cirka 14 % av den nyproducerade byggnadsytan [3]. I takt med ökade krav på minskat klimatavtryck från byggnader blir det allt viktigare för byggbranschen att utveckla kunskapen kring träbyggnation samt hur byggsystemen kan utformas och effektiviseras.

I mitten av 1900-talet började isolermängden i bostadshus öka i takt med högre krav på komfort och energieffektivitet [4]. Samtidigt ökade mängden installationer i byggnader, vilket ledde till utvecklingen av ett särskilt installationskikt på väggens insida som möjliggjorde dold dragning av installationer.

Installationsskiktet skapas genom att montera reglar på den lastbärande regelstommen, vilket ger ett fritt utrymme för installationer. Det återstående utrymmet fylls därefter med isolering [4]. Denna lösning bidrar inte bara med ett extra isoleringsskikt i väggen, utan gör det också möjligt att dra installationer utan att mekaniskt påverka ångspärren. Installationsskiktets betydelse förväntas dessutom fortsätta öka i takt med ökade krav på byggnaders energiprestanda.

Vid dimensionering av byggnader behöver byggnadens horisontalstabilitet verifieras med hänsyn till vindlaster och konstruktionens styvhet i horisontalled [5]. För högre träbyggnader är inte stabiliseringssystemets styrka den största utmaningen, utan snarare dess styvhet. Otillräcklig styvhet kan leda till stora horisontalförskjutningar och accelerationer till följd av vindlaster, vilket kan orsaka skador i byggnadsdelar och försämrad boendekomfort. I lägre byggnader med träregelstomme uppnås horisontalstabiliteten ofta genom skivverkan i väggar och bjälklag, där skivbeklädnaden bidrar till att överföra horisontella laster och begränsa deformationer. Genom att utnyttja skivbeklädnaden i stabiliseringssystemet kan behovet av separata stabiliserande element, såsom snedsträvor, minska, vilket kan leda till enklare och mer materialeffektiva konstruktioner.

Träbaserade skivor eller gipsskivor fästs vanligen med spik eller skruv direkt mot träregelstommen, vilket ger en effektiv och ekonomisk stabiliseringsmetod med god duktilitet [6]. Väggens horisontella bärförmåga är starkt beroende av hur beklädnadsskivan är infäst. För att uppnå effektiv skivverkan bör skivan vara kontinuerligt fastsatt längs regelstommen, där både antalet förbindare och avståndet mellan dem har stor betydelse för väggens horisontella bärförmåga och styvhet. Vid dimensionering enligt Eurokod baseras skivverkan i stor utsträckning på att skivmaterialet är direkt infäst i den bärande regelstommen [7], vilket innebär att väggar med installationsskikt inte direkt överensstämmer med de antaganden som används i befintliga beräkningsmodeller.

## 1.2 Studiens inriktning

När träregelväggar utformas med installationsskikt innanför den bärande stommen förändras väggens uppbyggnad och lastöverföring. Skivmaterialet fästs då i installationsskiktets regler istället för direkt i huvudstommen. Detta kan begränsa antalet effektiva infästningspunkter och innebär samtidigt att skivan placeras på ett avstånd från huvudstommen, vilket kan påverka väggens horisontalstabiliserande förmåga.

Det är inte självklart hur installationsskikt påverkar väggens skjuvkapacitet och skjuvstyvhet. Hur stor denna påverkan är, samt hur den varierar mellan olika utformningar av installationsskikt, är fortfarande inte tydligt utrett. Denna kunskapsbrist medför att skivmaterial monterat på installationsskikt normalt inte tillgodoräknas i stabiliseringsberäkningar, vilket kan skapa osäkerhet vid dimensionering och projektering. Det finns därför behov av ökad kunskap om installationsskiktets inverkan på träregelväggars stabiliserande egenskaper.

Enligt den plastiska beräkningsmetoden A i SS-EN 1995-1-1:2004 [7] behandlas väggskivor med beklädnad på båda sidor genom att respektive sidas bidrag till skjuvbärförmågan beaktas separat och därefter kombineras. Vid användning av olika skivtyper beaktas den svagare sidans bidrag genom införande av reduktionsfaktorer. På motsvarande sätt är det av intresse att undersöka om liknande reduktionsfaktorer kan definieras för väggar med installationsskikt, där samverkan mellan skivor och stomme förändras och där befintliga beräkningsmodeller inte längre är direkt tillämpbara.

För att undersöka installationsskiktets inverkan på väggarnas skjuvkapacitet och skjuvstyvhet genomförs experimentella provningar, där väggar med installationsskikt jämförs med en referensvägg utan installationsskikt för att kunna bestämma den eventuella reduktionen i bärförmåga. Resultaten kan därmed bidra till ökad kunskap om i vilken utsträckning installationsskikt kan beaktas vid dimensionering av träregelväggar.

### 1.2.1 Syfte och mål

Syftet med studien är att undersöka hur olika utformningar av installationsskikt påverkar träregelväggars skjuvkapacitet och skjuvstyvhet.

Målet med rapporten är att besvara frågeställningen genom teoretiska beräkningar och provning av fullskaliga väggar. Arbetet ska även bidra till ökad kunskap om hur installationsskikt påverkar träregelväggars skjuvkapacitet och skjuvstyvhet.

Förhoppningen är att resultaten ska ge en bättre förståelse för hur stor del av väggens skjuvkapacitet som kan tillgodoräknas vid användning av installationsskikt. Om en del av denna kapacitet kan beaktas trots förekomsten av installationsskikt kan det få betydelse vid dimensionering av träregelväggar. Detta skulle potentiellt kunna minska behovet av exempelvis andra horisontalstabiliserande system, såsom stag och snedsträvor, tjockare skivmaterial, andra typer av material, fler fästdon och montering av skiva både mot stomme och installationsskikt, vilket ofta tillämpas när skivverkan bedöms som osäker i denna typ av konstruktion. Sådana lösningar är ofta mer komplexa,

kostsamma och förknippade med högre klimatpåverkan, då vissa vanligtvis utförs i stål.

## 1.2.2 Frågeställning

Arbetet har som mål att besvara följande frågeställningar:

- Hur påverkas träregelväggars horisontalstabiliserande förmåga när skivmaterial monteras på ett installationsskikt istället för direkt mot huvudstommen?
- Hur varierar den relativa skjuvkapaciteten och skjuvstyvheten mellan olika utformningar av installationsskikt?

## 1.3 Genomförande

Under arbetets gång studeras flera olika utformningar av träregelväggar med installationsskikt, med fokus på hur installationsskiktets utformning påverkar väggens skjuvkapacitet och horisontalstabilitet. Särskilt undersöks betydelsen av regelorientering och avståndet mellan skivbeklädnad och huvudstomme för att skapa en bredare förståelse för hur olika parametrar påverkar väggens lastöverföring och globala bärförmåga.

Provningarna inleds med en referensvägg utan installationsskikt, där skivan monteras direkt mot huvudstommen. Referensväggen används som jämförelsegrund för att kunna analysera hur installationsskikt påverkar väggarnas beteende. Jämförelsen mellan vertikala och horisontella regler syftar till att undersöka betydelsen av både antalet infästningspunkter och regelorienteringen i sig. Vertikala regler möjliggör fler infästningspunkter längs skivans kanter, medan horisontella regler medför en förändrad lastväg och färre effektiva infästningar. Genom provning av väggar med varierande regeldimensioner i installationsskiktet undersöks även hur avståndet mellan skivbeklädnad och huvudstomme påverkar väggens skjuvkapacitet och skjuvstyvhet.

Slutligen undersöks en vägg utformad med en skiva direkt monterad mot regelstommen, kompletterad med ett installationsskikt där en andra skiva monteras på installationsskiktets regler. Syftet med denna väggutformning är att tydligare klargöra hur stor del av bärförmågan som den yttre skivan bidrar med samt i vilken utsträckning skivorna samverkar vid belastning.

Provningresultaten jämförs därefter med teoretiska beräkningsmodeller för att analysera hur väl befintliga beräkningsmetoder beskriver väggarnas beteende samt hur installationsskikt påverkar väggarnas skjuvkapacitet och skjuvstyvhet.

### 1.3.1 Arbetsfördelning och verktyg

Examensarbetet har genomförts gemensamt av författarna där båda har bidragit i lika stor omfattning (50/50) till planering, genomförande, analys samt rapportskrivning.

Som stöd i arbetsprocessen har ett Large Language Model (LLM)-baserat verktyg använts som hjälpmedel vid kodframtagning för bearbetning av mätdata och framställning av grafer, felsökning av MATLAB-kod samt språklig bearbetning och textförbättring av rapporten. Verktuget har inte använts för att generera rapportens innehåll, utan endast som stöd för att förbättra formuleringar och språk.

### 1.3.2 Avgränsningar

Studien omfattar endast träregelväggar med plywood som skivmaterial. Vanligt förekommande skivmaterial i träregelväggar är OSB, plywood och gipsskivor. Gipsskivor används dock normalt inte mellan huvudstomme och installationsskikt, utan främst som invändig beklädnad. En av provuppställningarna innefattar en skivplacering både mot träregelstommen och i anslutning till installationsskiktet, vilket gör plywood till ett lämpligare val som representerar ett styvt och konstruktivt bärande skivmaterial i försöksserien.

Samtliga provväggar har dimensionerna  $2,4 \times 2,4$  m och är utformade utan öppningar såsom dörrar eller fönster. Resultaten är därmed begränsade till denna typ av väggkonstruktion och kan inte utan vidare generaliseras till väggar med andra dimensioner, material eller geometrier.

För varje väggkonfiguration genomförs endast en provning. Någon statistisk analys av resultatens spridning eller variation mellan identiska provkroppar utförs därför inte. Resultaten ska därför betraktas som jämförande mellan de studerade väggtyperna snarare än som statistiskt säkerställda värden.

Endast en skivorientering studeras. Samtliga plywoodskivor monteras stående mot regelstommen, och eventuella skillnader i väggarnas egenskaper till följd av andra skivorienteringar behandlas därför inte i studien.

Studien omfattar endast väggarnas beteende vid horisontell belastning i väggens plan. Inverkan från anslutande stomdelar, såsom vertikala laster från bjälklag eller ovanliggande konstruktioner, beaktas inte. Fokus ligger på väggarnas skjuvbärförmåga och styvhet samt på jämförelsen mellan experimentella resultat och beräkningsmodeller.

## 2 Teoretisk bakgrund

### 2.1 Lättbyggnadssystemet

Det finns idag flera olika stomsystem som används vid uppförande av byggnader med trästomme. Valet av stomsystem beror i stor utsträckning på byggnadstypen eftersom det ofta är styrande för utformningen av de tekniska system som ska ingå i byggnaden [8]. Ett av de mest etablerade byggsystemen för flerbostadshus med trästomme är lättbyggnadssystemet med regelstomme, vilket behandlas i denna rapport.

Lättbyggnadsteknik med regelstomme kan utföras med olika produktionsmetoder, såsom platsbygge, öppna eller slutna planelement samt volymelement [9]. Oavsett om byggnaderna är prefabricerade eller platsbyggda är det generellt enklare att integrera installationer i träkonstruktioner jämfört med betongstommar, främst på grund av de hålrum som finns i konstruktionen [8]. Vid platsbygge eller användning av prefabricerade öppna regelstommar är förutsättningarna särskilt goda för installationer eftersom dessa kan integreras direkt i regelkonstruktionen på plats. För prefabricerade slutna väggelement installeras installationer antingen i fabriken eller genom att ett invändigt installationsskikt byggs upp på ytterväggens insida på byggarbetsplatsen.

Lättbyggnadssystemet består av lätta stomelement uppbyggda av ett regelverk i trä, där golv- och väggreglar av konstruktionsvirke placeras med ett centrumavstånd på vanligtvis 450 eller 600 mm, varav mellanrummen fylls med isolering [10]. Konstruktionen bekläs därefter med skivmaterial som genom skivverkan bidrar till väggens horisontalstabilisering. För att förbättra ytterväggens värmeisolerande förmåga kompletteras regelstommen ofta med ett ytterligare lager av reglar, vanligtvis med en tjocklek omkring 45 mm. Detta skikt benämns installationsskikt och utförs oftast med horisontella reglar monterade utanpå den bärande vertikala regelstommen, men kan även utformas med vertikala reglar i vissa utföranden. Ångspärren placeras vanligtvis mellan det invändiga installationsskiktet och den bärande regelstommen, när ett sådant installationsskikt finns. Denna placering möjliggör att installationer kan dras i väggens hålrum utan mekanisk påverkan på ångspärren, vilket underlättar installation och minskar risken för skador [8]. Detta ger större flexibilitet och förenklar installationssamordningen jämfört med mer slutna stomsystem, såsom massivträ- eller KL-träkonstruktioner, där kompletterande lösningar som undertak, övergolv eller urspårningar ofta krävs.

Det lätta stomsystemet baserat på regelväggar fyllda med isolering och skivbeklädnad, utvecklades i USA under 1830-talet och fick snabbt stor spridning till följd av den ökande efterfrågan på bostäder. Kombinationen av industrialiserad virkesproduktion och maskintillverkad spik möjliggjorde ett rationellt och kostnadseffektivt byggande, vilket bidrog till att den lätta trästommen etablerades som en dominerande byggnadsteknik. I större byggnader med trästomme kan horisontalstabilisering, utöver stabilisering med

skivor, även utföras med vindsstag eller vindfackverk [11]. I de nordiska länderna har utvecklingen gått mot en hög grad av prefabricerade lätta stommar, särskilt i småhusproduktionen, där väggelement och bjälklag tillverkas industriellt i fabrik och monteras på plats [10].

Den låga massan hos lätta trästommar medför utmaningar ur akustisk synpunkt, då ljudisoleringen ofta blir sämre jämfört med tyngre stomsystem [10]. Detta är en bidragande orsak till att skivmaterial, särskilt gipsskivor, fått en viktig funktion i moderna träkonstruktioner eftersom de kan förbättra både ljudisolering och brandskydd. Vidare finns begränsningar i hur höga byggnader som kan uppföras med lätta trästommar, där den praktiska höjdgränsen idag ligger på cirka 6–8 våningar.

## 2.2 Stomstabilisering av trähus

Byggnader med träbyggnadssystem kan uppföras med olika konstruktionslösningar beroende på byggnadstyp, spännvidder och belastningsförhållanden [10]. För mindre byggnader, såsom enbostadshus, är konstruktionssystemet ofta relativt enkelt, medan större byggnader med längre spännvidder medför fler konstruktiva utmaningar [12]. Flerbostadshus skiljer sig byggnadstekniskt från småhus, främst till följd av större vertikallaster och högre skjuvkrafter från horisontella laster [13]. Samtidigt ställs även högre krav på bland annat brandmotstånd och ljudisolering. Dessa krav uppfylls vanligtvis genom en ökad användning av skivmaterial, såsom gips- eller träbaserade skivor.

Inom småhusbyggnad, som omfattar bostadshus i en till två våningar, består cirka 90 procent av husen av trästomme [12], vilket gör trä till det dominerande konstruktionsmaterialet inom denna byggnadskategori. Enligt Carling [2] bedöms kontroll av stabilitet mot horisontallaster normalt inte vara nödvändig för byggnader i upp till två våningar, förutsatt att samtliga ytterväggar är beklädda med skivmaterial på minst en sida.

För småhus med få och korta tvärgående väggar krävs däremot kontroller för att säkerställa tillräcklig horisontalstabilitet [2]. Både ytterväggar och innerväggar bidrar till konstruktionens stabilisering, men i takt med att öppna planlösningar blivit vanligare har antalet tvärgående innerväggar minskat. Därmed kan tillräcklig horisontalstabilitet inte förutsättas utan vidare kontroll, särskilt eftersom byggnaders utformning förändras över tid. Att anta att en konstruktion uppfyller kraven enbart baserat på tidigare erfarenhet och byggpraxis är idag inte tillräckligt, då byggnaders bärförmåga avseende horisontella laster behöver verifieras.

### 2.2.1 Horisontalstabilisering

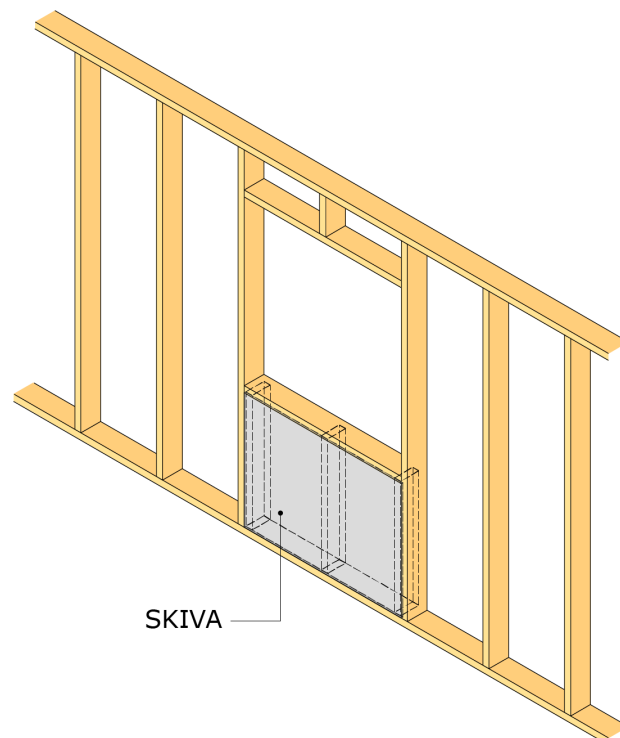
I Norden dimensioneras byggnader huvudsakligen för horisontella laster orsakade av vind. I andra delar av världen måste även horisontella laster från seismiska rörelser, såsom jordbävningar beaktas [10]. Vid vindpåverkan uppstår horisontella krafter på byggnadens fasader, vilka via bjälklag och tak förs vidare till de stabiliserande väg-

garna [10]. Kraftöverföringen sker vanligtvis genom väggskivor, krysstagningar eller ramar och vidare ner till grunden. I mindre träkonstruktioner uppnås ofta tillräcklig horisontalstabilisering genom skivbeklädnad och skivverkan. I avsnitt 2.2.2 beskrivs skivverkan som metod för horisontalstabilisering, då det är den princip som ligger till grund för den utredning som presenteras i denna rapport.

## 2.2.2 Skivverkan

Byggnader som uppförs med lättbyggnadssystem stabiliseras i regel mot horisontella laster som uppkommer från vind eller snedställningslast, genom att skivverkan utnyttjas [14]. Skivverkan innebär att ett konstruktionsskikt kan ta upp horisontella krafter i sitt eget plan, förutsatt att skiktet inte bucklar [15]. Genom att klä en träregelstomme med skivmaterial kan en hög styvhet uppnås vid belastning i väggens plan, vilket bidrar till att stabilisera byggnaden mot horisontalkrafter [2]. Denna metod kan därmed ersätta andra vanliga stabiliserande system, såsom vindfackverk och snedsträvor. Skivbeklädnaden kan monteras på en eller båda sidor av regelstommen och fästs i regler, syll och hammarband för att väggen ska fungera som en sammanhängande styv skiva [16]. Vanliga skivmaterial är träbaserade skivor, såsom OSB eller plywood, men även gipsskivor och olika typer av cementbundna skivor förekommer.

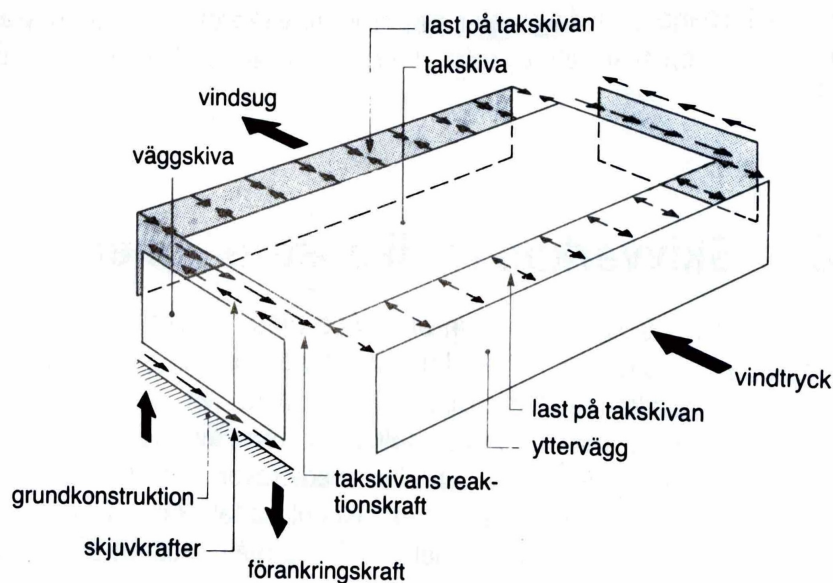
Stommen i väggkonstruktioner, bestående av vertikala regler samt syll och hammarband, tillverkas vanligtvis av konstruktionsvirke [16]. Figur 2.1 illustrerar de huvudsakliga komponenterna i en typisk regelväggskonstruktion.



**Figur 2.1:** Principiell uppbyggnad av en regelvägg med vertikala regler, syll, hammarband samt skivbeklädnad fäst mot stommen.[17] återgiven med tillåtelse.

Skivmaterialet fästs på stommen med hjälp av skruv eller spik. I sådana väggar med skivverkan är beklädnaden relativt styv när det gäller deformation i skivans plan. Väggens skjuvstyvhet påverkas främst av hur styv infästningen mellan beklädnad och stomme är. Infästningen mellan beklädnad och stomme spelar även en avgörande roll för väggens kapacitet att ta upp krafter i sitt eget plan när yttre horisontella laster appliceras. För låga byggnader är den stabiliserande förmågan hos dessa väggar betydligt större än de horisontella laster som verkar på konstruktionen. För att förhindra att väggen lyfts och glider horisontellt används förankringar som fäster syllen i underlaget. Om inte tillräckliga förankringslösningar används kan lyft kring det nedre hörnet uppstå, särskilt i väggar med ett stort förhållande mellan höjd och bredd.

Vid utvärdering av horisontalstabilitet betraktas ofta det mest kritiska lastfallet som det där byggnadens långsida utsätts för vindlast. Detta beror på att gavlarna vanligtvis har en mindre skivarea tillgänglig för lastupptagning jämfört med långsidorna. När byggnadens långsida belastas av vind antas väggen verka som en fritt upplagd balk mellan två stöd, vilket innebär att lasten fördelas med hälften ned till grunden och hälften upp till takets kantbalk. Vindlasten förs sedan ut till upplagen i gavlarna genom balkverkan. Denna lastöverföring motsvarar den horisontella skjuvkraft som verkar i ytterväggen och som efterliknas i de provningar som genomförs i denna studie [2]. Väggsnivåerna i väggen kan i detta sammanhang idealiseras som inspända konsoler, vilka genom skivverkan överför vindlasten ner till grunden, se figur 2.2.



**Figur 2.2:** Stomstabilisering genom skivverkan i väggar och tak för en envåningsbyggnad [2] återgiven med tillåtelse.

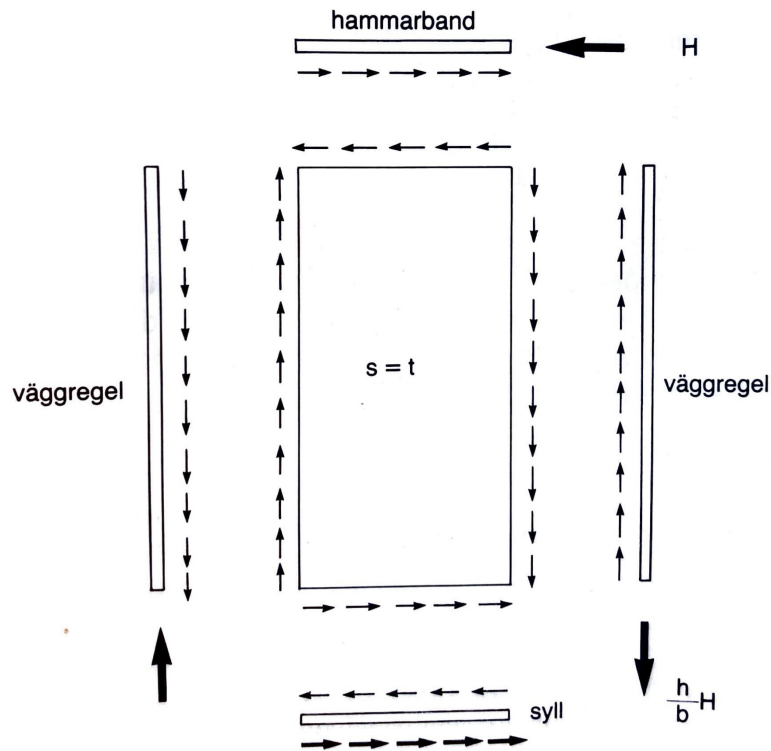
Det finns olika modeller för utvärdering av skjuvbärförmåga vid skivverkan i en väggskiva, två av dessa är beräkningsmodeller för plastiska och elastiska beteenden, vilka beskrivs i avsnitt 2.2.3 och 2.2.4.

### 2.2.3 Beräkningsmodell - Plastiska förhållanden

Den plastiska beräkningsmodellen baseras på antagandet att förbanden mellan skiva och regelstomme uppvisar ett idealt plastiskt beteende, vilket är rimligt vid användning av träbaserade skivmaterial [16]. Vid användning av skivmaterial med ett mer sprött beteende, såsom gipsskivor, kan den elastiska modellen vara mer lämplig eftersom möjligheten till plastisk omfördelning är begränsad.

Den plastiska metod som beskrivs i handboken av Källsner och Girhammar [18] framställs som en enkel och flexibel metod, applicerbar även på komplicerade konstruktioner. Metoden förutsätter plastiska egenskaper hos skiv-regelförbanden. Metoden möjliggör ett mer effektivt materialutnyttjande och kan underlätta dimensioneringen av konstruktioner med komplex geometri, exempelvis byggnader med öppna planlösningar. Dimensioneringsmetoden anses även bättre spegla konstruktionens verkliga beteende, vilket kan minska behovet av omfattande förankringar mot grundkonstruktionen. Den tar även hänsyn till byggnadens tredimensionella samverkan, vilket innebär att tvärväggar kan användas för att minska eller helt ersätta behovet av särskilda förankringar av stabiliserande väggar. Dessutom gör metoden det möjligt att räkna med den bärande effekt som vägghälften med öppningar, som fönster och dörrar, bidrar med, vilka i den elastiska metoden räknas bort.

Den plastiska metoden skiljer sig från den elastiska genom att den tillåter en mer flexibel kraftfördelning i konstruktionen [18]. Den antagna kraftfördelningen för väggelement med plastiska förhållanden visas i figur 2.3. Metoden möjliggör även kombinationer av olika förankringslösningar, exempelvis partiell förankring i kombination med kraftöverföring via skiv-regelförband längs syllén. Vid dimensionering enligt den plastiska metoden erhålls både ett övre och ett undre gränsvärde. Det undre gränsvärdet ligger ofta nära det värde som erhålls med den elastiska modellen, medan det övre gränsvärdet motsvarar en mer fullständig plastisk omfördelning [2].



**Figur 2.3:** Kraftfördelning i ett väggelement vid plastiskt beräkningsantagande [2] återgiven med tillåtelse.

I detta arbete används den förenklade analysmetoden, benämnd Metod A enligt SS-EN

1995-1-1:2004 [7], för att bestämma skjuvbärförmågan hos träregelväggar med skivverkan. Metoden är en analytisk beräkningsmodell baserad på antagandet om plastiskt beteende hos förbanden mellan skiva och regelstomme.

Metoden förutsätter att väggens kantreglar är vertikala och direkt förankrade i underliggande konstruktion. Vidare antas väggen kunna delas upp i ett antal delement, där varje delement utgörs av en skiva fastsatt på en sida av regelstommen. För att metoden ska vara tillämpbar krävs att förbindarna längs skivans kanter har konstant inbördes avstånd samt att varje delement har en bredd som är minst en fjärdedel av dess höjd.

Beräkningsmodellen bygger på antagandet att skjuvkrafterna i väggen huvudsakligen tas upp av förbanden längs skivornas kanter. Metoden är förenklad och beskriver inte deformationer eller kraftomfördelning i detalj, vilket innebär att resultaten i viss mån blir konservativa. Samtidigt gör metodens enkelhet den lämplig för jämförande analyser, vilket är en fördel i detta arbete.

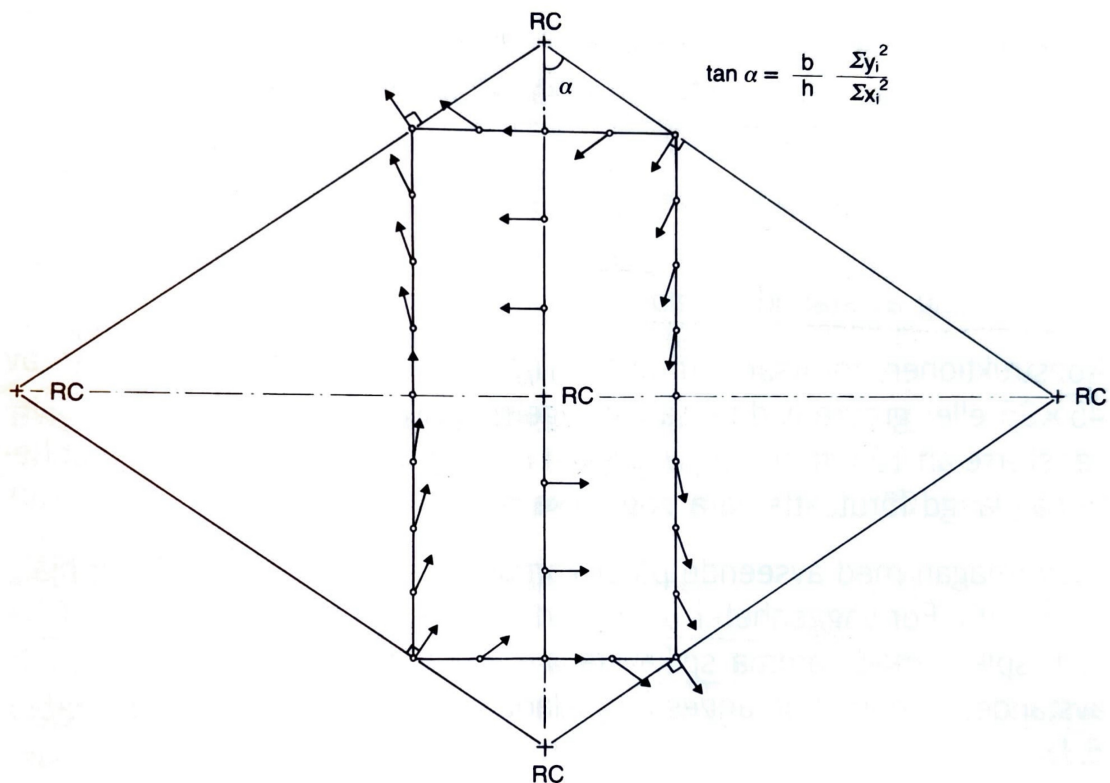
## 2.2.4 Beräkningsmodell - Elastiska förhållanden

Vid användning av den elastiska beräkningsmodellen styrs skjuvbärförmågan av stora kraftkoncentrationer i ett begränsat antal förbindare, främst i närheten av väggens

hörn [16]. Detta innebär att modellen ofta ger en underskattning av väggens verkliga bärförmåga, eftersom förbanden i praktiken kan uppvisa plastiskt beteende och därmed omfördela laster. Den bärförmåga som erhålls med den elastiska modellen kan därför betraktas som ett nedre gränsvärde för väggens kapacitet att bära horisontella krafter. Modellen ger därmed en konservativ dimensionering jämfört med plastiska beräkningsmodeller [14].

Den elastiska beräkningsmodell som används i detta arbete redovisas i Carling [2], och bygger på ett antal förenklande antaganden om väggens beteende. Regelstommen antas bestå av stela element som är ledat infästa i underlaget och skivorna antas vara plana, styva och förhindrade mot buckling. Skivorna monteras med mellanrum till varandra samt till angränsande byggnadsdelar. Vidare antas deformationerna vara små i förhållande till väggens dimensioner. Fästdonen modelleras som linjärt elastiska och bärförmågan anses vara uppnådd när det mest belastade fästdonet når sin flytgräns. För den elastiska beräkningsmodellen har förbandens placering stor betydelse, eftersom kraftfördelningen i väggen bestäms utifrån förbandens tvärkraftsbärförmåga och läge. Placeringen av fästdonen påverkar därmed både väggens styvhet och den beräknade skjubbärförmågan.

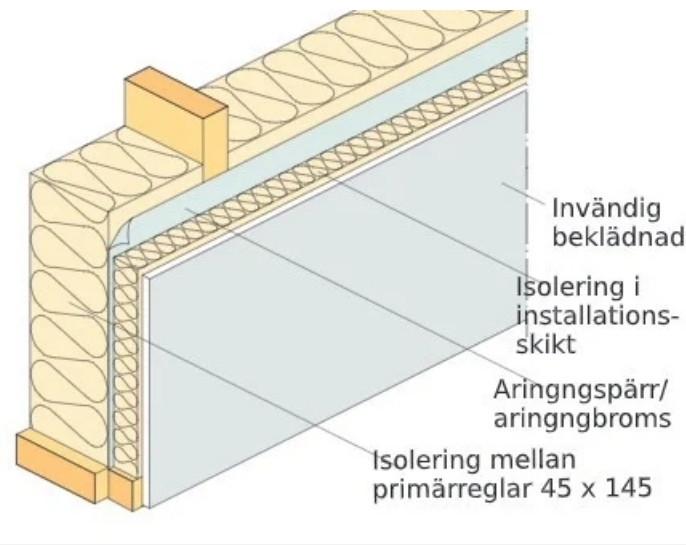
Beräkningsgången för den elastiska metoden beskrivs i avsnitt 3.5.2. Den antagna kraftfördelningen för ett väggelement med plastiska förhållanden visas i figur 2.4.



**Figur 2.4:** Kraftfördelning i ett väggelement vid elastiskt beräkningsantagande [2] återgiven med tillåtelse.

## 2.3 Installationsskiktets funktion

Ett installationsskikt är ett skikt i väggen som lämnar utrymme för installationer så som el- och rördragningar. Detta görs genom att montera regler mot den lastbärande regelstommen och därmed lämna fri yta till installationer, för att sedan fylla resterande utrymme med isolering [19]. Detta ger inte bara ett extra skikt med isolering i väggen, utan också en lösning som smidigt gömmer installationer utan att ge mekanisk påverkan på ångspärren. Ett exempel på uppbyggnaden av en regelvägg med installationsskikt visas i figur 2.5.



**Figur 2.5:** Exempel på uppbyggnad av regelvägg med installationsskikt [20] återgiven med tillåtelse.

### 2.3.1 Installationsskiktets utformning

Installationsskiktet monteras direkt mot huvudstommen, oftast med en ångspärr emellan och utformas med antingen horisontella eller vertikala regler. Valet av regelorientering kan bero på flera faktorer.

I flervåningsbyggnader kan vertikalt orienterade regler vara fördelaktiga eftersom de möjliggör en mer effektiv vertikal dragning av installationer mellan våningsplanen. Horisontella installationsdragningar kräver i dessa fall genomföringar i reglarna, exempelvis i form av borrarade hål. Vid behov av omfattande horisontell installationsdragning kan en konstruktion med horisontellt orienterade regler vara fördelaktig. Denna utformning bidrar även till att reducera köldbryggor, då korslagda regler minskar den kontinuerliga värmeledande vägen genom konstruktionen jämfört med en lösning där regler placeras i samma riktning och i direkt kontakt med varandra [4]. En mer utförlig beskrivning av köldbryggor ges i avsnitt 2.3.2. Vertikala regler kan däremot bidra till en ökad horisontalstabilitet i väggen. Detta beror på att antalet effektiva infästningspunkter för skivmaterialet ökar, särskilt när även över- och underreglar inkluderas, vilket i sin tur ofta leder till en högre skjувkapacitet i konstruktionen.

## 2.3.2 Installationsskikt ur fukt- och energisynpunkt

### Lufttätthet och fuktsäkerhet

Mellan den bärande stommen och det inre isoleringsskiktet (installationsskiktet) monteras vanligen en ångspärr. Ångspärren består oftast av plastfolie och har till uppgift att både förhindra luftströmning och göra byggnaden lufttät genom att begränsa fukttransport genom väggen via diffusion och konvektion [11].

Fukttransport genom konvektion kan transportera stora mängder fukt och drivs av skillnader mellan utvändigt och invändigt lufttryck [11]. Skadlig fuktkonvektion kan uppstå när det råder invändigt övertryck i byggnaden i kombination med otätheter i väggkonstruktionen. Under sådana förhållanden kan varm och fuktig luft tränga in i ytterväggens kallare delar där kondensation kan uppstå. För att motverka detta krävs lufttäta tak- och väggkonstruktioner med hjälp av ett lufttätt skikt, exempelvis plastfolie. Det är då avgörande att skiktet hålls intakt utan hål, otäta skarvar eller bristfällig tätning. Skiktets placering har därför stor betydelse för väggens fuktsäkerhet och bör placeras på väggens varma sida för att minimera risken för kondens på skiktet.

Fukttransport genom diffusion sker däremot vanligtvis långsamt och drivs av skillnader i ånghalt mellan väggkonstruktionens båda sidor [11]. För att begränsa diffusion används därför ett diffusionstätt skikt i form av plastfolie. Plastfolien fungerar således både som en barriär mot ångtransport och som ett lufttätt skikt som förhindrar luftläckage och värmeförluster.

Genom att utforma väggen med ett installationsskikt, där ångspärren placeras en bit in i konstruktionen, se figur 2.5, möjliggörs installation av eldosor och rör i det inre isoleringsskiktet (installationsskiktet) utan att plastfolien punkteras [11]. Detta minskar risken för fuktskador till följd av konvektion och diffusion. För väggar som byggs utan installationsskikt placeras plastfolien längst in i konstruktionen, direkt bakom den invändiga beklädnaden [4]. Detta försvårar möjligheten att upprätthålla en lufttät konstruktion eftersom installationer såsom eldosor kräver håltagning i plastfolien, vilket kan vara svårt att tätta. Användningen av ett installationsskikt på insidan av den bärande ytterväggen innebär därmed att antalet håltagningar i plastfolien kan reduceras, vilket skapar bättre förutsättningar för en lufttät byggnad med små energiförluster och god fuktsäkerhet.

### Värmeförluster genom köldbryggor

Ytterväggar utgör en del av byggnadens klimatskärm vilket skiljer uteluft från inomhusmiljö [11]. Klimatskärmens utformning har stor betydelse för byggnadens värmeförluster. Korrekt byggda och välisolerade hus bidrar till lägre energianvändning, vilket gör ytterväggens utformning viktig. Det är speciellt viktigt med en väl utformad och uppförd klimatskärm i dagens byggnader, då varje materialskikt har en specifik funktion och brister kan få stora konsekvenser.

Köldbryggor uppstår i termiskt svagare delar av klimatskärmen, där värmekonduktiviteten är högre och där det är svårt att uppnå tillräcklig värmeisolering, vilket innebär att värme lättare leds ut än genom den omgivande konstruktionen [11]. Det sker of-

ta där olika byggnadsdelar möts, till exempel vid anslutningar mellan yttervägg och grund, mellanbjälklag eller balkong. I dessa områden bryts isoleringen av material som leder värme bättre, vilket gör att värme transporteras ut snabbare där än i resten av väggen. Detta leder till ökade värmeförluster från byggnaden.

I ytterväggar med träregelstomme är det ofta träreglarna som fungerar som köldbryggor på grund av deras högre värmekonduktivitet än omgivande material. Det innebär att ju större kontakt och andel trä-mot-trä i väggen, desto större blir andelen köldbryggor och därmed även värmeförlusten. Köldbryggor bidrar alltså till energiförluster och kan även vara negativa ur en hälsosynpunkt då de kan bidra till kondensbildning och vidare mögel i väggen [21].

I ytterväggar med installationsskikt kan installationsskiktet byggas upp av antingen vertikala eller horisontella regler vilket har betydelse för andelen köldbryggor. Med horisontella regler i installationsskiktet möts dessa endast i de punkter där de korsar de vertikala reglarna i trästommen, medan vertikala regler i installationsskiktet möter reglarna i stommen längs med hela sin längd, vilket skapar större områden av köldbryggor. Ett alternativ är att placera de vertikala reglarna i installationsskiktet förskjutet i förhållande till reglarna i stommen.

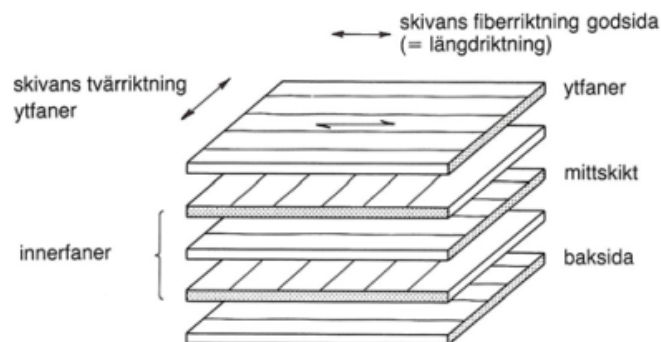
Genom att bygga en yttervägg med installationsskikt möjliggörs, utöver dess andra fördelar, en ökad mängd värmeisolering. Utrymmet i installationsskiktet fylls med värmeisolering, vilket ökar väggens totala värmemotstånd och bidrar till minskade värmeförluster.

## 2.4 Skivmaterial

### 2.4.1 Plywood som skivmaterial

Plywood är ett vanligt skivmaterial som består av ett udda antal sammanlimmade lager av faner. Dessa lager är korslimmade vinkelrätt mot varandra, se figur [22]. Det ojämna antalet lager gör att de två yttersta lagren får samma fiberriktning. De fanerskikt vars fiberriktning sammanfaller med belastningsriktningen bidrar mest till skivans styvhet och bärförmåga och är därmed den starka riktningen i materialet [23]. Vanligtvis limmas plywood med fenolhartslim, vilket i princip anses vattenfast. Det vattenfasta limmet gör därför plywood till ett material som kan användas för många andra användningsområden som betonggjutningar, fasader, tak, båtar.

Vid tillverkning av andra sorters träbaserade skivor, mals materialet ned till flisor [24]. Detta görs inte med plywood vilket gör det till det starkaste träbaserade skivmaterialet och därmed ett väldigt användbart byggnadsmaterial. Vissa typer av plywood beläggs med ett tunt ytskikt av melamin eller plastimpregnerat papper för att ge ett annorlunda utseende [23]. Plywood med en stor andel kvistar kan för vissa kvaliteter spacklas för att få en slät yta.



**Figur 2.6:** Uppbyggnad av plywoodskiva [2] återgiven med tillåtelse.

## Olika typer och kvalitet av plywood

Plywood är ett samlingsnamn för olika typer av träbaserade flerskiktsskivor, som fanerplywood, lamellträ, läktlamellträ och fanerlamellträ [23]. Plywood tillverkas i olika kvaliteter anpassade för olika användningsområden där ett flertal standarder reglerar materialets uppbyggnad, tekniska egenskaper, utseendeklasser samt olika klassificeringar och hållfasthetsvärden.

Plywood har olika egenskaper och styrkor beroende på dess träslag [25]. Björkplywood används ofta för inredning och betonggjutning, medan granplywood är vanligare vid byggnation av golv, väggar och tak.

En vanligt förekommande form av lövträbaserad plywood är björkplywood. Björkplywood kännetecknas av ett slätt och ljust utseende samt hög styrka och styvhet, vilket gör materialet användbart i både tekniska och estetiska sammanhang [25]. Dess höga densitet bidrar till materialets hållfasthet men innebär samtidigt en större känslighet för fuktvariationer, vilket kan leda till en ökad svällning och krympning. Granplywood är lättare och har lägre styvhet än björkplywood, men är samtidigt starkt och tåligt. Materialet används ofta i bärande konstruktioner såsom golv, väggar och tak, eftersom gran har en sluten trästruktur som gör att materialet bättre klarar varierande klimatförhållanden och generellt påverkas mindre av fukt än björk [25].

Konstruktionsplywood är den typ som huvudsakligen används i bärande konstruktioner på grund av dess goda hållfasthet, styvhet och beständighet mot klimatets påfrestningar [2]. I Sverige tillverkas konstruktionsplywood av barrträ av gran eller furu. Det finns även typer där plywooden är uppbyggd av olika träslag och kvaliteter med den sämre varianten i de inre fanererna.

Vid skjuvkraftpåverkan av plywood i form av skivverkan, då krafter verkar i skivans plan, uppträder så kallad panelskjuvning i plywooden [2]. Vid panelskjuvning är hållfastheten störst då vinkeln mellan påkänningsriktningen och fiberriktningen är 45 grader, medan den är som minst vid 0 och 90 grader. Detta innebär att plywoodens orientering kan påverka skivans skjuvbärförmåga.

Konstruktionsplywood klassificeras och betecknas enligt ISO och Europastandarder, men även enligt Amerikanska regler [23]. I de Europeiska standarderna klassificeras

plywooden efter ytans kvalitet. Ytorna delas in i klasserna I, II, III och IV, där klass I har minst kvisthål och därmed högst ytkvalitet. Ofta används en dubbel beteckning för både fram- och baksidan av plywoodskivan, vilket betecknas exempelvis II/III.

I detta arbete används plywood av typen K20/70 och kvalitet III/III, bestående av 5 lager faner med oputsade och obehandlade ytor. Detta är konstruktionsplywood av gran med höga hållfasthetsvärden. Bokstaven K i K20/70 betecknar att det är konstruktionsplywood och 20/70 betecknar skivans hållfasthetsvärden för karakteristisk böjhållfasthet respektive karakteristisk styvhet (elasticitetsmodul) [22].

## 2.4.2 Förband och förankringar vid provning

Skiv-regelväggens randvillkor och förbandens egenskaper är avgörande för väggens horisontella bärförmåga och styvhet [18]. Randvillkoren bestäms av hur de vertikala reglarna förankras samt hur väggen ansluts till tvärväggar, bjälklag och takkonstruktioner. Även egenskaperna hos förbanden mellan skivmaterial och regler har stor inverkan på väggens förmåga att uppta och överföra krafter. Förbandens styvhet och hållfasthet påverkar därmed hela väggens stabiliserande funktion. Därför är det viktigt att infästningarna dimensioneras och placeras med hänsyn till att de ska kunna överföra de horisontella krafter som uppstår utan att brott, utdragning eller oacceptabla deformationer sker.

Vid infästning av skivmaterialet i regelverket används vanligen spik eller skruv. Dessa förbands beteende varierar beroende på lastnivån [18]. Vid låga belastningar uppvisar förbindare hög styvhet, vilket innebär att deformationerna är små i förhållande till den påförda kraften. När lasten ökar blir förbanden successivt mer eftergivliga och större deformationer uppstår. Så länge deformationerna är begränsade kan sambandet mellan kraft och förskjutning antas vara linjärt elastiskt. Det innebär att deformationen är proportionell mot lasten och att förbandet återgår till sitt ursprungliga läge när lasten avlägsnas. Detta beteende är representativt för de förskjutningar som normalt uppstår då väggen befinner sig i bruksgränstillståndet. Vid större deformationer förändras förbandens beteende och det är mer korrekt att beskriva det som plastiskt. Det innebär att permanenta deformationer uppstår och att sambandet mellan kraft och förskjutning inte längre är linjärt. Detta tillstånd motsvarar i praktiken en vägg som närmar sig eller befinner sig i brottgränstillståndet.

Den dimensioneringsmetod som beskrivs i handboken Källsner och Girhammar [18] för träbaserade skivor bygger på en plastisk undre gränsvärdesmetod. Metoden utgår från att konstruktionen ska uppfylla statisk jämvikt samt att förbanden har ett plastiskt beteende med tillräcklig duktilitet. Det innebär att de ska kunna deformeras markant utan att deras bärförmåga minskar kraftigt. Först när stora deformationer uppstår får kapaciteten börja avta i någon större omfattning. Denna typ av beteende kallas för segt brott vilket krävs för den plastiska dimensioneringsmetoden, medan sprött beteende bör undvikas.

# 3 Metod

## 3.1 Provning

Det primära syftet med denna studie är att undersöka hur styvhet och skjuvkapacitet påverkas i en yttervägg med träregelstomme och installationsskikt, där horisontalstabiliseringen sker genom skivverkan. I väggkonstruktioner med installationsskikt monteras skivmaterialet vanligtvis inte direkt mot den bärande stommen, vilket medför förändrade lastvägar och en annan infästningsprincip jämfört med traditionella lösningar.

Praktiska laboratorieförsök på ett flertal väggar genomförs i laboratoriet vid Lunds tekniska högskola i syfte att undersöka funktionssättet hos skjuvbelastade träregelväggar med installationsskikt. Försöken syftar även till att undersöka i vilken utsträckning skivmaterial monterat på installationsskiktet kan tillgodoräknas i väggens horisontalstabiliserande funktion. Provväggarna varierar i utformning för att analysera hur olika utföranden av installationsskikt påverkar deras bärförmåga och styvhet. Väggarnas styvhet bestäms genom mätning av skivornas deformation under horisontalbelastning, varav även brottlast registreras.

Detta kapitel beskriver provningarnas omfattning och framtagandet av proverna, hur uppställningen för respektive provningsförsök är utformad, samt hur själva provningen genomförs.

### 3.1.1 Val av provkroppar

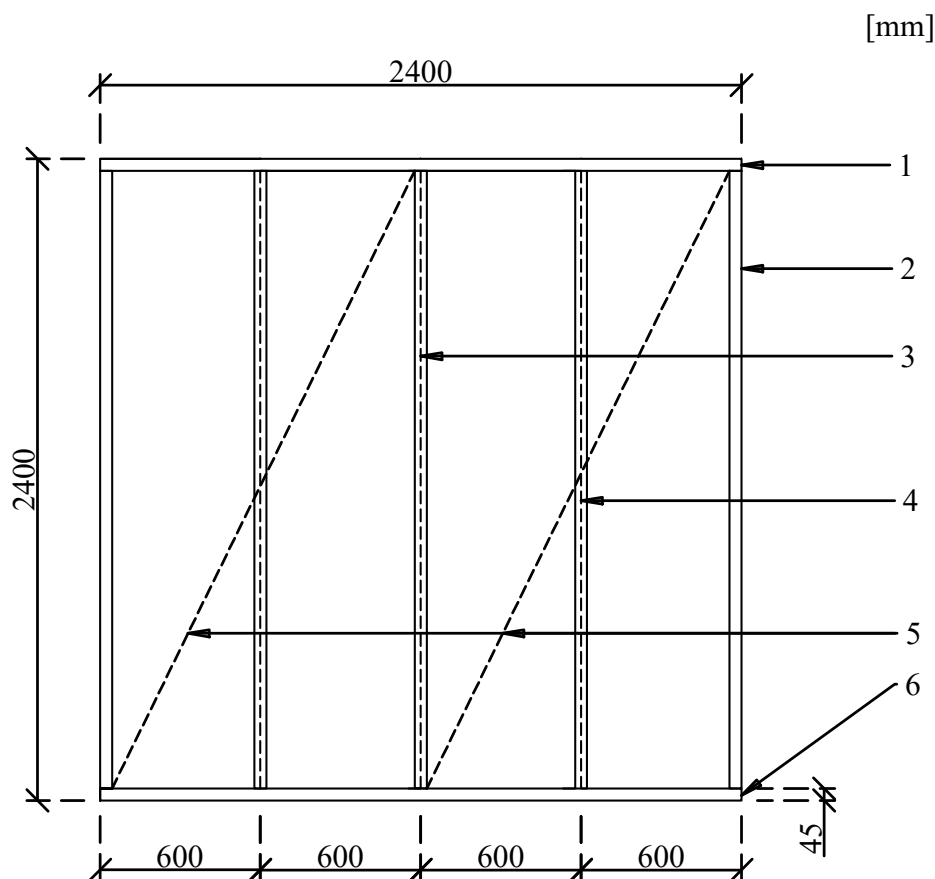
För att undersöka hur installationsskiktets utformning påverkar skjuvkapaciteten hos träregelväggar, studeras fem olika väggutföranden. Samtliga provkroppar har en identisk huvudstomme för att säkerställa jämförbarhet och möjliggöra en tydlig bedömning av installationsskiktets inverkan. Huvudstommen kompletteras med installationsskikt av olika utföranden. Varje väggtyp testas endast en gång, vilket kan medföra en ökad osäkerhet och begränsar möjligheten att dra statistiskt säkra slutsatser.

Variationerna mellan väggutförandena avser installationsskiktets tjocklek och regelorientering. Installationsskiktet utformas dels med korsande regelsystem, där den stående huvudstommen kompletteras med ett invändigt skikt av horisontella regler och dels med ett kompletterande skikt bestående av vertikala regler. Dessa utformningar väljs för att representera vanligt förekommande lösningar i praktiken samt för att möjliggöra en systematisk jämförelse av hur olika utformningar påverkar väggarnas bärförmåga och styvhet. Genom att variera en parameter i taget skapas förutsättningar för att identifiera respektive parameters betydelse för väggens horisontalstabiliserande funktion.

Skjuvkapaciteten analyseras därmed avseende installationsskiktets tjocklek och regelorientering för att möjliggöra en kontrollerad och jämförbar försöksserie. Provningsarna genomförs i enlighet med standarden *Träkonstruktioner - Styrka och styvhet hos skivbeklädda träregellement - Provning* [1], vilken beskriver provningsmetoder för bestämning av hållfasthet och styvhet hos skivbeklädda träregelstommar.

### 3.1.2 Provernas geometri

Samtliga provkroppar har en huvudstomme med dimensionerna  $2400 \times 2400$  mm, uppbyggd av syll, hammarband och fem vertikala regler med centrumavstånd 600 mm enligt figur 3.1. Skivbeklädningen monteras enbart på insidan av regelstommen och består i samtliga fall av två stående plywoodskivor med dimensionen  $1200 \times 2400 \times 12$  mm. Stommen utförs i konstruktionsvirke av hållfasthetsklass C24 med dimensionerna  $45 \times 95$  mm medan reglarna i installationsskiktet istället utgörs av konstruktionsvirke med hållfasthetsklass C14, då högre kvalitet för dessa dimensioner är sällsynt.



#### Komponentlista: Väggsektion

1. Hammarband
2. Kantregel
3. Centralregel
4. Mellanliggande regel (c/c 600 mm)
5. 2 st plywoodskivor 1200x2400 mm
6. Syll

**Figur 3.1:** Försöksuppställning referensvägg/huvudstomme [1].

Försöksuppställningen utgår från en referensvägg, benämnd Väg 1, med skivor monterade direkt mot huvudstommen, vilken används som jämförelsegrund för övriga väggutföranden.

De fyra resterande väggutförandena erhålls genom att referensväggen kompletteras med installationsskikt i olika utföranden enligt de variationer som beskrivs i avsnitt 3.1.1. Skivmaterialet monteras stående i samtliga provkroppar för att säkerställa en enhetlig försöksuppställning och därmed möjliggöra jämförbara resultat.

För varje väggtyp redovisas hur huvudstommen kompletteras med ett installationskikt samt vilka variationer som förekommer i regeldimension, regelorientering och skivbeklädning.

### **Provväg 1 - Referensvägg**

Referensväggen utgörs av den huvudstomme som beskrivs i avsnitt 3.1.2, samt två plywoodskivor monterade bredvid varandra i ett lager direkt mot stommen.

### **Provväg 2 - Installationsskikt 45 mm, vertikala regler**

Provväg 2 består av huvudstommen kompletterad med ett 45 mm tjockt installationsskikt som monteras på stommen. Installationsskiktet utförs med vertikala regler placerade i linje med huvudstommens vertikala regler med centrumavstånd 600 mm samt med syll och hammarband av samma dimension, 45 x 45 mm. Plywoodskivor monteras sedan mot installationsskiktets regler.

### **Provväg 3 - Installationsskikt 45 mm, horisontella regler**

Provväg 3 består av huvudstommen kompletterad med ett 45 mm tjockt installationsskikt monterat på stommens insida. Installationsskiktet utförs med horisontella regler med dimensionen 45 × 45 mm och centrumavstånd 600 mm, vilket resulterar i ett korsande regelsystem i förhållande till huvudstommens vertikala regler. Plywoodskivor monteras sedan mot installationsskiktets regler.

### **Provväg 4 - Installationsskikt 70 mm, horisontella regler**

Provväg 4 överensstämmer i utformning med provväg 3, med undantaget att installationsskiktets tjocklek ökas till 70 mm. Övriga parametrar och utföranden är oförändrade.

### **Provväg 5 - Installationsskikt 45 mm, horisontella regler, skiva innanför och utanför installationsskikt**

För provväg 5 utförs installationsskiktet med 45 mm tjocka horisontella regler, placerade med centrumavstånd 600 mm. I detta utförande monteras plywoodskivor både

direkt mot huvudstommen och på installationsskiktets regler. Syftet med denna utformning är att möjliggöra en tydlig utvärdering av installationsskiktets bidrag till väggens styvhet i jämförelse med referensväggen, där skivbeklädnaden enbart är monterad direkt mot huvudstommen.

### 3.1.3 Skivmaterial vid provning

Skivmaterialet som monteras på samtliga provkroppar är konstruktionsplywood från WISA av typen K20/70 och kvalitet III/III, med en tjocklek på 12 mm. Valet av plywood som skivmaterial motiveras av dess höga styvhet och bärförmåga i jämförelse med exempelvis gipsskivor, vilket ger goda förutsättningar för att studera väggarnas skjuvkapacitet. Genom att använda samma skivmaterial i alla provkroppar undviks variationer i materialegenskaper, vilket gör att eventuella skillnader i resultaten kan kopplas till installationsskiktets utformning.

### 3.1.4 Förband och förankringar vid provning

Flera spröda brottyper kan uppstå i skiv-regelväggar och bör därför beaktas vid dimensionering eftersom de inträffar utan förvarning i form av plastiska deformationer. En för tät placering av förbindare i förhållande till virkes- eller skivkanter kan leda till sprickbildning i virket eller utstansningsbrott i skivan till följd av höga spänningskoncentrationer [18]. För att säkerställa tillräckliga kant- och ändavstånd för förbindarna utförs dimensioneringen enligt riktlinjerna i SS-EN 1995-1-1:2004 [7].

#### Val av förbindare

Vid montering av både stomme och skivmaterial används skruv som fästdon. Valet motiveras av skruvens högre utdragshållfasthet jämfört med spik, vilket bidrar till en mer tillförlitlig sammanhållning av konstruktionen. Skruvens gängande geometri bidrar till en mer effektiv mekanisk förankring i materialet vilket generellt ger högre utdragskapacitet jämfört med spik. Vid infästning av skivmaterial möjliggör skruv dessutom en kontrollerad kraftöverföring och reducerar risken för lokala skador kring infästningspunkterna. En ytterligare fördel med skruvförband är att de möjliggör relativt enkel demontering av konstruktionen, vilket kan underlätta framtida återbruk och materialåtervinning samt bidra till ökad cirkularitet inom byggsektorn.

#### Skiv- regelförband

En skiv-regelvägg innehåller normalt ett stort antal skiv-regelförband som samverkar för att ta upp horisontella krafter. Förbanden placeras längs skivans fyra kanter samt längs mellanliggande regler i referensväggen och provvägg 2. För provvägg 3–5, där installationsskiktet är utformat med horisontella regler, kan skivorna endast fästas längs två skivkanter samt mot mellanliggande regler. Detta medför en markant skillnad i antal fästdon per skiva mellan de olika provkropparna.

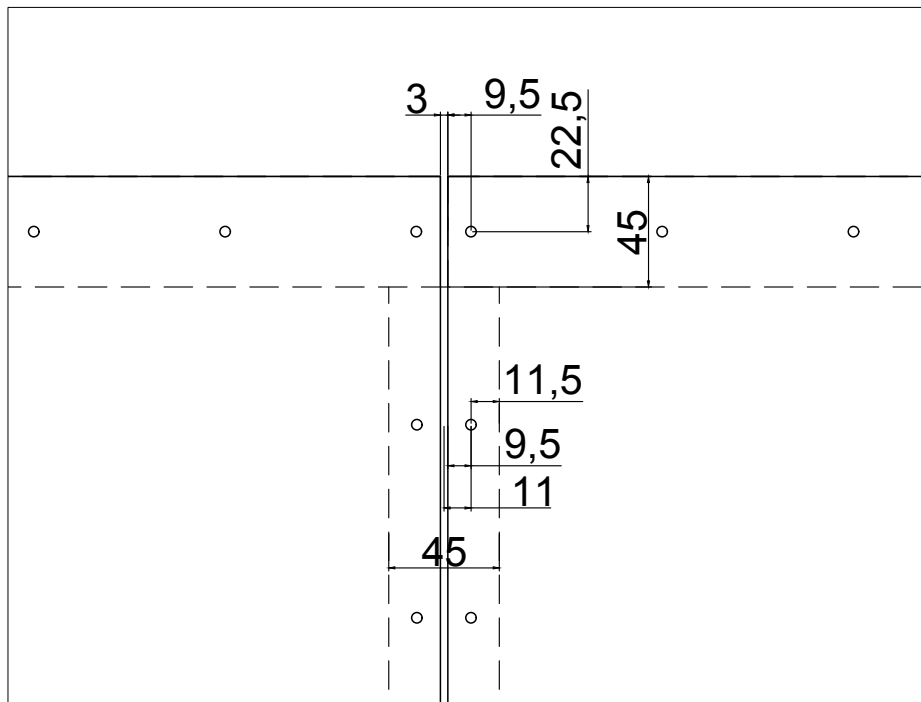
Skivmaterialet, som i detta fall utgörs av plywood, fästs med träskruv. Vid dimensionering av förband med tvärkraftsbelastade skruvar anger Eurokod 5 [7] att träskruvar med slät hals och diameter mindre än 6 mm får dimensioneras enligt reglerna för tvärkraftsbelastade spikförband i avsnitt 8.3.1. I föreliggande fall bedöms skruvar med större diameter än 6 mm inte vara nödvändiga och några förborrade hål används inte. Dimensioneringen av förbanden baseras därför på reglerna i detta avsnitt.

För spikförband mellan skiva och virke anges att minsta kant- och ändavstånd för plywood bör vara  $3d$  vid obelastad kant eller ände [7]. För den anslutande virkesdelen gäller motsvarande krav som för förbandstypen ”trä mot trä”, där minsta avstånd till obelastad kant uppgår till  $5d$  enligt tabell 8.2 i SS-EN 1995-1-1:2004 [7]. Förbindarnas placering vid skarvning av skivor över regel redovisas i figur 3.2 för referensväggen med 45 mm breda vertikala regler.

Utifrån dessa krav kan den största tillåtna förbindardiametern bestämmas. Eftersom reglarna har en bredd på 45 mm är det denna dimension som är dimensionerande för beräkningen. Med hänsyn till minsta kantavstånd på  $3d$  för skivan och  $5d$  för den bakomliggande regeln, kan den maximala förbindardiametern fastställas enligt ekvation 3.1.

$$3d + 5d = 8d < 45/2\text{mm} \rightarrow d < 2,81\text{mm} \quad (3.1)$$

Beräkningen ger en maximal tillåten skruvdiameter på 2,81 mm. Då skruvar med mindre diameter än detta är svåra att tillgå på marknaden väljs istället skruvar med diametern 3,8 mm för provningen.



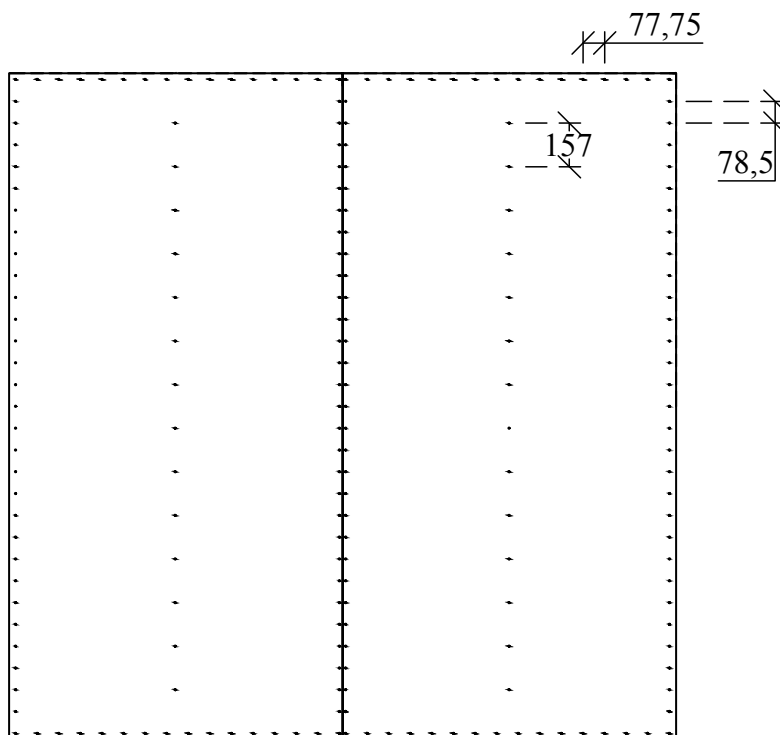
**Figur 3.2:** Placering av fästdon vid skivskarv i referensvägg.

Förbindarnas minsta inbördes avstånd för spikade förband mellan skiva och virke bestäms enligt tabell 8.2 i Eurokod 5 [7] där kanterna antas vara obelastade. Förbindaravståndet multipliceras även med en faktor 0,85 enligt reglerna i avsnitt 8.3.2.3 i [7]. Detta resulterar i ett minsta inbördes avstånd enligt ekvation 3.2.

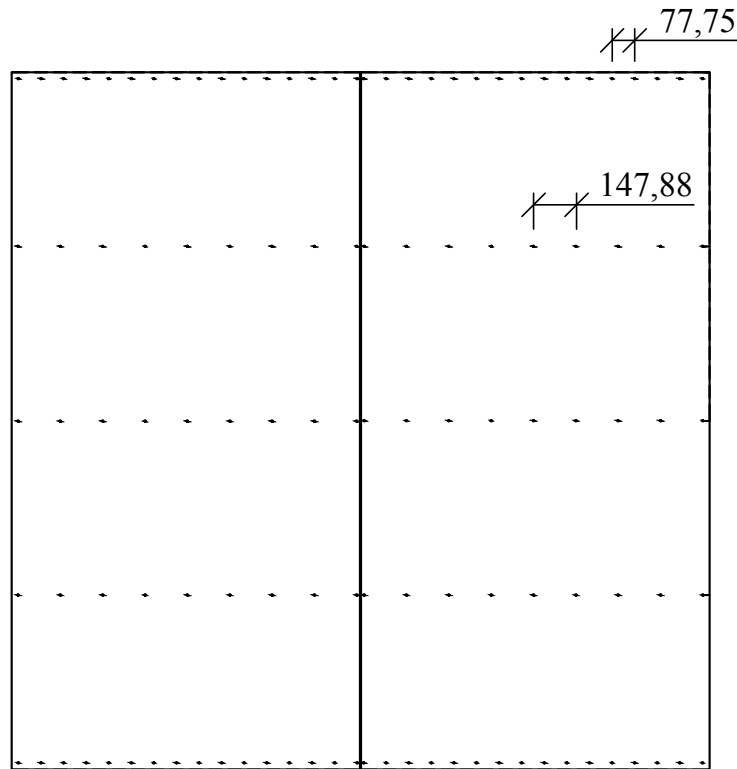
$$0,85 \cdot (5 + 5 \cos \alpha)d = 0,85 \cdot 10d = 32,3\text{mm}. \quad (3.2)$$

För fästdon i inre regler, det vill säga infästningar som inte är placerade längs skivans kanter, kan ett större inbördes avstånd tillämpas jämfört med kantinfästningar. Studier visar att en utebliven infästning i inre regler endast medför en reduktion av bärförmågan med cirka 10 % [2]. Infästning mot inre regler är dock viktig för att motverka buckling av skivan och bör därför utföras, om än med större centrumavstånd än vid skivkanterna.

Vid dimensionering enligt standard får centrumavståndet för fästdon längs skivans kanter maximalt uppgå till 200 mm [7]. För att inre regler ska kunna betraktas som ett effektivt stöd för skivan bör avståndet mellan förbindarna inte överstiga det dubbla avståndet längs skivkanten. Utifrån dessa förutsättningar väljs ett centrumavstånd på cirka 78 mm längs skivkanterna. Längs de inre reglarna väljs centrumavståndet 157 mm för vertikala regler och 148 mm för horisontella regler, se figur 3.3 och 3.4, vilka illustrerar de valda avstånden.



**Figur 3.3:** Placering av fästdon för skiva på installationsskikt med vertikala regler.



**Figur 3.4:** Placering av fästdon för skiva på installationsskikt med horisontella regler.

För spikade förband mellan trädelar bör inträngningsdjupet för slät spik vara minst  $8d$ , medan det för andra typer av spik bör vara minst  $6d$  enligt avsnitt 8.3.1.2 i SS-EN 1995-1-1:2004 [7]. I detta fall, med en förbindardiameter på 3,8 mm, väljs inträngningsdjupet på den säkra sidan, det vill säga minst  $8d$ . Detta resulterar i en erforderlig skruvlängd på minst 42 mm för en 12 mm tjock plywoodskiva. Skruvlängden fastställs därför till 42 mm.

### Förband mellan vertikala regler, syll och hammarband

Förankring mellan vertikala regler, syll och hammarband sker i dessa provningar genom skruvning parallellt med fiberriktningen i den vertikala regeln. Skruvarna kan beaktas som axiellt belastade och utifrån minsta kant- och ändavstånd enligt tabell 8.6 i SS-EN 1995-1-1:2004 [7] kan den maximala förbindardiametern bestämmas enligt ekvation 3.3.

$$a_{2,CG} + a_2 + a_{2,CG} = 4d + 5d + 4d = 9d < 95\text{mm} \rightarrow d < 10,56\text{mm} \quad (3.3)$$

I denna provning väljs skruvar med diametern 6 mm. För axiellt belastade skruvar bör inträngningsdjupet för den gängade delen i den spetsmottagande virkesdelen vara minst  $6d$ . Detta ger en erforderlig skruvlängd enligt ekvation 3.4.

$$45 + 6d = 81\text{mm} \quad (3.4)$$

Skruvlängden avrundas uppåt till 100 mm.

### Förband mellan huvudstomme och installationsskikt

För infästning av både horisontella och vertikala regler i installationsskiktet används träskruv som fästdon. Skruvarna antas vara tvärkraftsbelastade och för träskruvar med  $d \leq 6$  får reglerna för tvärkraftsbelastade spikförband enligt SS-EN 1995-1-1:2004 avsnitt 8.3.1 [7], tillämpas vid bestämning av minsta kantavstånd, längd och inbördes avstånd.

Vid bestämning av största förbindardiameter avläses minsta avstånd till obelastad kant till  $5d$  ur tabell 8.2 i SS-EN 1995-1-1:2004 [7]. Detta innebär att den maximala förbindardiametern kan bestämmas enligt ekvation 3.5.

$$5d + 5d = 10d < 45\text{mm} \rightarrow d < 4,5\text{mm} \quad (3.5)$$

Minsta tillåtna dimension för att uppfylla kraven på kantavstånd är därmed 4,5 mm. Trots detta väljs skruvar med diametern 6 mm för att säkerställa tillräcklig kraftöverföring mellan huvudstommen och installationsskiktets regler. Den större skruvdiametern kan dock innebära en ökad risk för fläkning i träet vid provning.

Skruvlängden fastställs enligt samma princip som för skiv-regelförband. För skruvar med diameter  $\leq 6$  mm ska reglerna för tvärkraftsbelastade spikar tillämpas, vilket medför krav på ett minsta inträngningsdjup om  $8d$ . Vid infästning i regler med tjockleken 45 mm blir den minsta erforderliga skruvlängden enligt ekvation 3.6.

$$l \geq 45 + 8 \cdot d = 93\text{mm} \quad (3.6)$$

Därmed väljs en standardskruv med längden 100 mm.

För infästning av ett installationsskikt med tjockleken 70 mm krävs en längre skruv där den erforderliga längden beräknas enligt ekvation 3.7.

$$l \geq 70 + 8 \cdot d = 118\text{mm} \quad (3.7)$$

Därmed väljs en standardskruv med längden 120 mm.

## Sammanställning förbandsdimensioner

**Tabell 3.1:** Sammanställning av fästdon och deras dimensioner.

Plats	Typ av fästdon	Dimension d x l [mm]
Stomme	Försänkt träskruv	6 x 100
Installationsskikt 45 mm	Försänkt träskruv	6 x 100
Installationsskikt 70 mm	Försänkt träskruv	6 x 120
Plywood	Träskruv OSB/spån/plywood	3,8 x 42

## 3.2 Tillverkning och montering

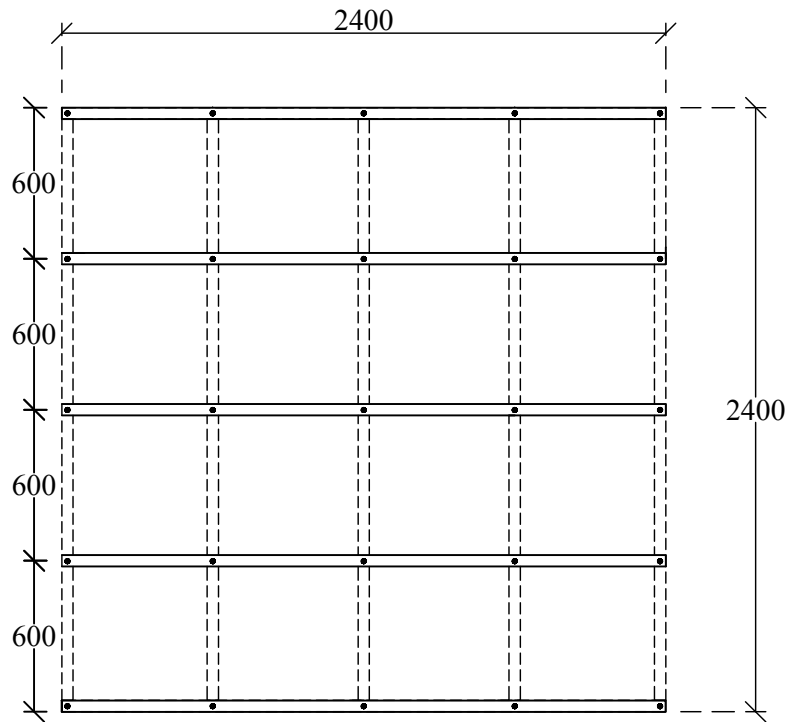
Vid uppförandet av provkonstruktionen monteras huvudstomme, installationsskikt och skivmaterial enligt principer som efterliknar verkligt byggutförande. Syftet är att konstruktionens beteende ska motsvara hur en regelvägg fungerar i praktiken, särskilt med avseende på lastöverföring och samverkan mellan dess olika delar. Skivorna monteras för att fungera som stabiliserande element genom att uppta och överföra horisontella laster i sitt eget plan, så kallad skivverkan. För att denna funktion ska uppnås är infästningarna mellan huvudstomme, installationsskikt och plywoodskivor av avgörande betydelse.

### 3.2.1 Montering av installationsskikt

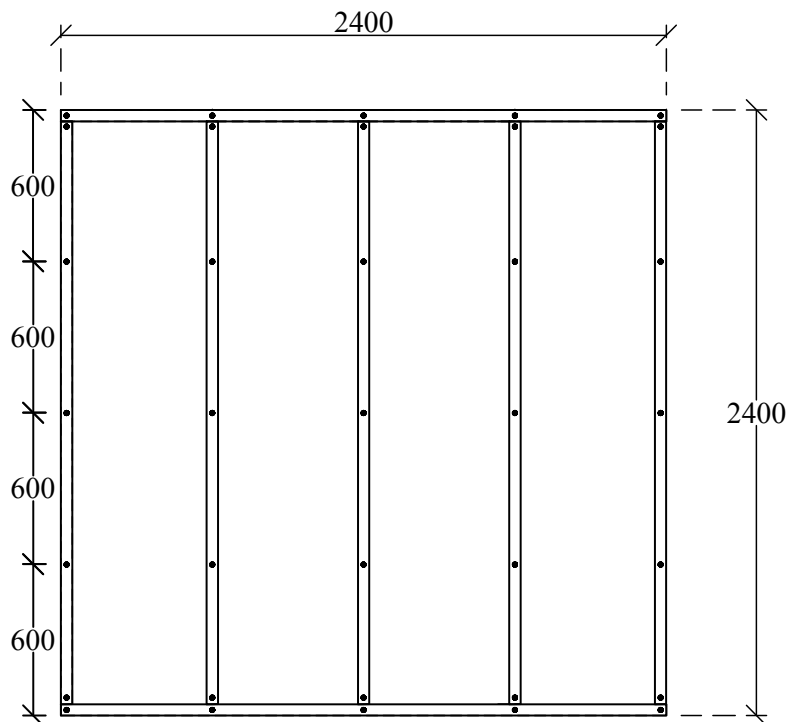
Montering av installationsskikt utförs med både vertikala och horisontella regler i olika dimensioner med skruvdimensioner enligt tabell 3.1.

Vid utförande med horisontella regler monteras fem identiska regler på huvudstommens insida med ett centrumavstånd på 600 mm. Varje regel förankras med fem fästdon längs sin längd, vilket ger totalt 25 infästningspunkter för hela provkroppen, se figur 3.5.

Vid utförande med vertikala regler monteras först en syll och ett hammarband, mellan vilka fem vertikala regler placeras med centrumavstånd 600 mm. Varje regel förankras med fem fästdon. Tillsammans med infästningarna för syll och hammarband innebär detta att provkroppen totalt omfattar 35 infästningspunkter, se figur 3.6.



**Figur 3.5:** Utformning av horisontella regler i installationsskikt samt deras infästningspunkter.



**Figur 3.6:** Utformning av vertikala regler i installationsskikt samt deras infästningspunkter.

### 3.2.2 Montering av skivor

Skivorna som monteras på provkropparna har dimensionerna  $1200 \times 2400$  mm och monteras stående mot stommen i stående i samtliga provningar. Plywoodens yttre faner har en fiberriktning längs skivans långsida, vilket innebär att fiberriktningen blir vertikal vid montering. Samtliga skivor monteras på detta sätt för att hålla fiberriktningen konstant mellan provningarna och därmed undvika att denna parameter påverkar resultaten.

Infästning av skivorna utförs med skruv avsedda för OSB, spån- och plywoodskivor med dimensionen  $3,8 \times 42$  mm. Skruvarna monteras med ett centrumavstånd på 78 mm längs skivkanterna och med högst dubbelt så stort avstånd längs regler i skivans mitt.

De två olika regelorienteringarna i installationsskiktet medför skillnader i hur skivmaterialet kan fästas mot konstruktionen. Vid utförande med horisontella regler möjliggörs infästning av skivan längs två av dess kanter samt mot de mellanliggande horisontella reglarna. Vid utförande med vertikala regler möjliggörs däremot infästning längs samtliga fyra kanter av skivan samt mot de mellanliggande vertikala reglarna. Detta medför en tydlig skillnad i antal fästdon per skiva mellan de olika provkropparna. För provkropp 1 (referensvägg) och 2 (vertikala installationsskiktsreglar) uppgår antalet fästdon till 104 per skiva, medan det för provkropp 3, 4 och 5 (yttersta skivan) är 59 fästdon per skiva. För provkropp 5, där dubbla skivlager förekommer, både direkt mot huvudstommen och mot installationsskiktet, uppgår det totala antalet fästdon till 163 per skiva för de två lagren.

För varje provkropp monteras de två angränsande skivorna med ett mellanrum sinsemellan. Eftersom träbaserade skivor är hygroskopiska och ändrar dimension vid variationer i fuktkvot, krävs en rörelsemån för att undvika utbuktning, sprickbildning och påverkan på infästningarna [26]. För plywood rekommenderas en rörelsemån på cirka 1 mm per löpmeter skivlängd eller skivbredd [27]. I denna provning används därför ett mellanrum på cirka 2,5 mm mellan skivorna.

## 3.3 Provningsmetod enligt SS-EN 594:2011

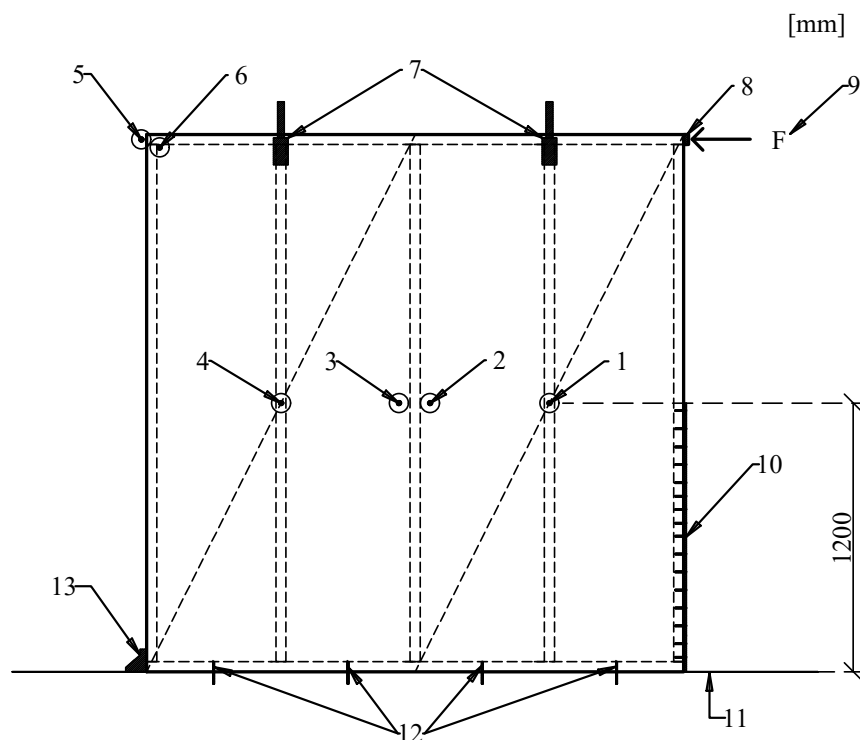
I detta avsnitt beskrivs genomförandet av laboratorieförsöken, inklusive provkropparnas utformning, provningsuppställning, mätmetoder samt hur belastningen appliceras och resultaten registreras.

Provningsmetoden baseras på standarden SS-EN 594:2011 [1], som avser provningsmetod för bestämning av styrka och styvhet hos skivbeklädda träregelväggar utsatta för horisontell last. Avvikelser från standarden redovisas i avsnitt 3.3.4.

### 3.3.1 Provningsanordning

Provningsanordningen utformas i enlighet med SS-EN 594:2011 [1] med syftet att efterlikna väggens beteende vid horisontalbelastning samt att möjliggöra noggrann avläsning av last och deformation.

Väggproverna monteras stående i provriggen på en plan och styv yta enligt figur 3.7. Provkroppens bottenregel förankras i provriggens bas för att förhindra att den glider, roterar eller buktar vid upplyftande krafter. Denna förankring görs med fyra skruvpar med ett centrumavstånd om 600 mm. På höger sida om väggen skruvas provkroppen in i en 1200 mm hög metallplatta för att motverka lyft, se punkt 10 'Nedhåll', i figur 3.7. Denna infästning tillåter rotation i skivans plan och bidrar därför inte till provkroppens skjuvkapacitet. Ett mothåll i det nedre vänstra hörnet installeras även för att förhindra horisontell förflyttning av väggen, se punkt 13. 'Mothåll', i figur 3.7. Fyra rulllager monteras på en överhängande stålbalk och hänger ned över väggens övre del för att motverka förflyttning ut ur väggens plan vid belastning, utan att påverka den horisontella deformationen. Den verkliga utformningen av respektive provuppställning redovisas i kapitel 7.



#### Komponentlista: Provningsanordning

1. Deformationsgivare (1)
2. Deformationsgivare (2)
3. Deformationsgivare (3)
4. Deformationsgivare (4)
5. Deformationsgivare (5), På hammarbandet
6. Deformationsgivare (6), På skivan
7. Rulllager (hindrar väggens rörelse ur plan)

8. Stålblåt
9. Last F, horisontell påförd last mot en stålblåt
10. Nedhåll (infäst med skruvar längs hela dess längd)
11. Provriggerens bas, limträbalk
12. Infästning av syll i provriggerens bas, 2 x 4 träskruv
13. Mothåll

Figur 3.7: Utformning av provriggen samt placering av deformationsgivare.

### 3.3.2 Belastningsätt

Väggen belastas med en horisontell punktlast i dess övre högra hörn med hjälp av en hydraulcylinder med uppgift att simulera hur horisontella laster angriper en vägg. Konstruktionen belastas kontinuerligt fram till att brottlasten nås, vilket anses inträffa när provkroppen kollapsar eller uppnår en deformation på 100 mm. Om inget av dessa kriterier uppnås avbryts provningen istället när väggen bedöms vara så pass deformerad ut ur planet att fortsatt mätning inte längre är relevant.

Den horisontella lasten registreras med en lastcell med noggrannhet inom  $\pm 3$  % av den applicerade lasten, i enlighet med standarden. I enlighet med provningsstandardens styrs pålastningen så att 90 % av brottlasten uppnås inom  $300 \pm 120$  s.

Mellan kolvens ände och hammarbandet placeras en metallplatta för att fördela lasten över en större area och därigenom förhindra lokal intryckning i väggen vid belastningspunkten. Lasten appliceras i linje med väggens plan för att undvika att lasten påverkar väggens deformation ut ur plan.

### 3.3.3 Mätutrustning och mätmetoder

Sex lägesgivare installeras på provkroppen för att mäta deformationer. Samtliga givare monteras mot varsin fastlimmad metallplatta på de positioner som redovisas nedan och illustreras i figur 3.7.

#### Placering av givare:

- **Givare 1 och 4** placerade 1200 mm från väggens underkant, centralt placerade vid skivans mitt, en på respektive skiva, med uppgift att mäta skivornas vertikala förflyttning.
- **Givare 2 och 3** placerade 1200 mm från väggens underkant, intill kanten där plywoodskivorna möts, en på respektive skiva, med uppgiften att mäta skivornas vertikala förflyttning.
- **Givare 5** placeras i väggens övre vänstra hörn, centralt på änden av hammarbandet i regelstommen, används för att mäta huvudstommens horisontella förskjutning.
- **Givare 6** placeras i väggens övre vänstra hörn på skivan, med mätpunkten cirka 50 mm in från skivans hörn, används för att mäta skivans horisontella förskjutning.

### 3.3.4 Avvikelser från SS-EN 594:2011

Provnings utförs i huvudsak i enlighet med gällande standard. Vissa avvikelser är dock nödvändiga med hänsyn till tillgänglig utrustning och provningens syfte. Dessa avvikelser bedöms inte påverka studiens slutsatser men kan ha en viss inverkan på

jämförbarheten med resultat från provningar som strikt följer standarden. Samtliga identifierade avvikelser redovisas.

- **Distanskloss mellan syll och provriggens bas – ej använd**

Enligt standarden ska regelstommen monteras på en distanskloss mellan syll och provriggens bas för att säkerställa ett stabilt stöd och möjliggöra fri rörelse hos skivbeklädningen. I den aktuella provningen monteras regelstommen direkt mot provriggens bas utan distanskloss, varvid skivan placeras kant i kant med syllens underkant. Detta kan begränsa skivbeklädningens fria rörelse och därmed påverka dess deformationsbeteende vid större förskjutningar.

- **Vertikal belastning – ej genomförd**

Enligt standarden ska provkroppen, utöver skjuvlast, utsättas för en vertikal last ovanifrån, jämnt fördelad till varje regel. I den aktuella provningen appliceras dock ingen vertikal last.

- **Styv överliggare – ej använd**

Standarden anger att en styv överliggare (head binder) ska fästas vid provkroppens toppregel för att säkerställa en jämn lastöverföring mellan den vertikala lasten och regelväggen. I denna provning används ingen fördelningsbalk eftersom ingen vertikal last appliceras.

- **Bestämning av deformation enligt standardens mätpunkter – delvis avvikande**

I denna provning avviker mätningen av deformation från standardens föreskrivna mätpunkter. Standardens mätpunkter, benämnda 2 och 3, utförs inte i denna provning, då dessa bedöms ha begränsad betydelse för studiens syfte baserat på tidigare provningar. Istället används en alternativ mätuppställning med sex deformationsgivare, placerade för att bättre mäta den deformation som är relevant för undersökningen.

- **Fukthalt och densitet ej uppmätt**

Någon bestämning av densitet och fukthalt genom provtagning av regelvirket eller skivmaterialet utförs inte.

## 3.4 Analys av mätdata

Mätdata från samtliga provningar bearbetas och analyseras i MATLAB, en programvara för numeriska beräkningar, dataanalys och visualisering [28]. Programvaran används för att skapa grafer utifrån registrerad mätdata samt för att identifiera och korrigera eventuella avvikelser i provningsresultaten.

### 3.4.1 Bestämning av styvhet och bärförmåga

I enlighet med standarden [1] bestäms provkropparnas styvhet och bärförmåga för att möjliggöra jämförelser mellan olika väggutformningar. Styvheten bestäms baserat

på mätdata från både givare 5 och 6, vilket möjliggör jämförelser mellan skivans och huvudstommens deformationsbeteende. Detta avviker något från standarden, där endast huvudstommens styvhet rekommenderas att mätas. Väggarnas bärförmåga vid provning bestäms utifrån den registrerade brottlasten  $F_{\max}$ .

Den maximala lasten  $F_{\max}$ , definieras som den högsta uppmätta lasten under provningen. Utifrån detta värde bestäms lastnivåerna motsvarande 20 % respektive 40 % av  $F_{\max}$ . Eftersom dessa lastnivåer inte nödvändigtvis sammanfaller med direkt uppmätta datapunkter, bestäms tillhörande deformationer  $v_2$  samt  $v_4$  genom interpolation av mätdata i MATLAB.

Skjuvstyvheten beräknas enligt ekvation (3.8).

$$R = \frac{F_4 - F_2}{v_4 - v_2} \quad [\text{N/mm}] \quad (3.8)$$

Där:

$F_2$  är lasten vid 20 % av  $F_{\max}$  [N]

$F_4$  är lasten vid 40 % av  $F_{\max}$  [N]

$v_2$  samt  $v_4$  är deformationerna vid motsvarande laster [mm]

### 3.4.2 Hantering av feljusteringar

Vid ett flertal provningar uppstår avvikelser i mätserierna till följd av att en eller flera givare lossnar eller är nära att lossna. När detta inträffar avbryts belastningsökningen tillfälligt för att möjliggöra justering av mätutrustningen, varefter provningen återupptas. De störningar som detta ger upphov till i mätdata hanteras genom att de tidsintervall där avbrott och justeringar sker exkluderas. Felintervallen identifieras genom analys av plottade diagram över last som funktion av tid samt deformation som funktion av tid. Genom att jämföra dessa diagram kan avvikande beteenden, såsom plåtåer eller oregelbundna hopp i kurvorna, lokaliseras. Utifrån denna analys tas de felaktiga mätpunkterna bort, varefter återstående mätdata används för fortsatt bearbetning.

## 3.5 Teoretisk bärförmåga

### 3.5.1 Tvärkraftsbärförmåga hos skruvförband

Förbandens tvärkraftsbärförmåga beräknas enligt kapitel 8 i SS-EN 1995-1-1:2004 [7] för ett skruvförband med ett skjuvplan och används vidare för beräkning av väggelementens skjuvbärförmåga i avsnitt 3.5.2.

## Skiva – huvudstomme

För beräkning av karakteristisk tvärkraftsbärförmåga hos förband vid infästning av plywoodskiva används materialdata som redovisas i tabell 3.2. För den använda skruven tillhandahåller tillverkaren inga uppgifter om brottgräns. Denna bestäms därför genom att medelvärdet av uppmätt brottlast från tillverkarens provningar, uttryckt i N, divideras med skruvens area, uttryckt i  $m^2$ , enligt ekvation 3.9.

$$f_u = \frac{7364}{11,34 \cdot 10^{-6}} = 649,3 \text{ MPa} \quad (3.9)$$

För beräkning av tvärkraftsbärförmåga per skruv i anslutning skiva mot huvudstomme redovisas materialdata i tabell 3.2.

**Tabell 3.2:** Materialdata för beräkning av tvärkraftskapacitet av förbindare mellan plywood och huvudstomme.

Parameter	Värde	Enhet
Karakteristisk densitet plywood $\rho_{k,1}$ [29]	420	kg/m <sup>3</sup>
Karakteristisk densitet konstruktionsträ C24 $\rho_{k,2}$ [30]	350	kg/m <sup>3</sup>
Brottspänning skruv $f_u$	649,3	MPa
Diameter skruv $d$	3,8	mm
Diameter skruvhuvud $d_h$ [31]	7	mm

Den karakteristiska hålkantshållfastheten  $f_{h,1,k}$  för plywood beräknas enligt ekvation 3.10 och hålkantshållfastheten  $f_{h,2,k}$  för stomreglarna av kvalitet C24 beräknas i ekvation 3.11. Ekvation 3.10 och 3.11 gäller för spikar, men används i detta fall även för skruvar eftersom de har diameter  $\leq 6$  mm [7].

Materialdel 1 är plywoodskivan med tjocklek  $t_1 = 12$  mm och materialdel 2 är regeln. Skruvarna som används är 42 mm långa, vilket ger inträngningsdjupet  $t_2$  i regeln  $42 - t_1 = 42 - 12 = 30$  mm.

$$f_{h,1,k} = 0,11 \cdot \rho_{k,1} \cdot d^{-0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.10)$$

$$f_{h,2,k} = 0,082 \cdot \rho_{k,2} \cdot d^{-0,3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.11)$$

Förhållandet mellan de ingående träelementens hålkantshållfastheter  $\beta$  beräknas i ekvation 3.12.

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (3.12)$$

Det karakteristiska flytmomentet för skruvarna presenteras i ekvation 3.13.

$$M_{y,Rk} = \frac{f_u}{600} \cdot 180 \cdot d^{2,6} \quad [\text{Nmm}] \quad (3.13)$$

Inverkan av karakteristisk utdragsbärförmåga  $F_{ax,k}$  hos icke släta skruvar adderas till hållfastheten vid vissa brottmoder på grund av linverkan och beräknas i ekvation 3.16, där  $t_{pen} = t_2 = 30$  mm och  $d_h$  är skruvhuvudets diameter 7 mm [7].

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{k,1}^2 \quad (3.14)$$

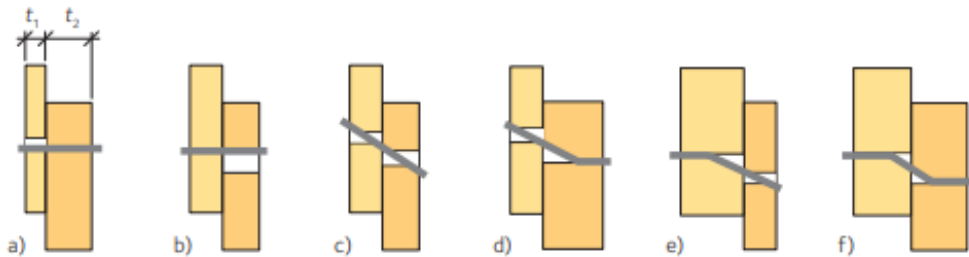
$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{k,1}^2 \quad (3.15)$$

$$F_{ax,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{ax,k} d t_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

‘Värden för  $f_{ax,k}$  och  $f_{head,k}$  bör bestämmas genom försök enligt SS-EN 1382, SS-EN 1383 och SS-EN 14358. I praktiskt konstruktionsarbete inhämtas dessa värden från spiktillverkarnas prestandadeklarationer’ enligt Svenskt Trä [30]. Då dessa materialdata inte kan tillgodoses från leverantör måste linverkans inverkan antas. Eftersom det i dessa fall är så pass lite deformation per förbindare, försummas linverkan och sätts därmed till 0.

I ekvation 3.17 beräknas den karakteristiska tvärkraftsbärförmågan  $F_{v,Rk}$  per förbindare, där det lägsta värdet är dimensionerande. De olika möjliga brottmoderna visas i figur 3.8. Brottmoder a–c innebär att skruven förblir rak och att inga flytleder bildas. I dessa fall uppstår brott i träet till följd av hålkanttryck. För brottmoder d och e bildas en flytled i skruven. Detta sker när tjockleken hos ett av virkesstyckena är tillräckligt stor, vilket medför att skruven böjs inne i träet och bildar en flytled. Vid brottmod f böjs skruven i båda virkesstyckena, vilket resulterar i att två flytleder bildas. Denna brottmod anses vara den mest fördelaktiga när hög duktilitet eftersträvas [6].

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{(a)} \quad f_{h,1,k} t_1 d \\ \text{(b)} \quad f_{h,2,k} t_2 d \\ \text{(c)} \quad \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\right) + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1}\right) \right] \\ \quad + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ \text{(d)} \quad 1.05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ \text{(e)} \quad 1.05 \frac{f_{h,2,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ \text{(f)} \quad 1.15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (3.17)$$



**Figur 3.8:** Brottmoder för förband [30] återgiven med tillåtelse.

### Skiva-installationsskikt

För beräkning av karakteristisk tvärkraftsbärförmåga hos förband vid infästning av skiva mot installationsskikt används samma beräkningsgång som i avsnitt 3.5.1 med justerad data enligt tabell 3.3.

**Tabell 3.3:** Materialdata för anslutning plywood - installationsskikt [30].

Parameter	Värde	Enhet
Karakteristisk densitet konstruktionsträ C14 $\rho_{k,2}$	290	kg/m <sup>3</sup>

### 3.5.2 Bärförmåga hos väggelement

#### Plastisk beräkningsmodell - Metod A i Eurokod 5

Utifrån arbetets syfte att undersöka installationsskiktets inverkan på väggens horisontella bärförmåga beräknas den teoretiska skjuvbärförmågan för provväggarna. För

att möjliggöra jämförelse mellan provningsresultat och teoretiska värden används den plastiska beräkningsmetoden enligt Eurocode 5 [7], baserad på den förenklade analysen av väggskivor (Metod A).

Beräkningarna utförs för referensväggen (vägg 1), där skivmaterialet är monterat direkt mot huvudstommen.

I den aktuella provningen delas varje vägg upp i två delelement, där varje delelement motsvarar en plywoodskiva med tillhörande infästningar. Dessa två delelement utgör tillsammans en provkropp. Den karakteristiska skjubbärförmågan för hela väggen bestäms genom att summera bidragen från samtliga delelement enligt ekvation 3.18, där  $F_{i,v,Rk}$  utgör den karakteristiska skjubbärförmågan för respektive delelement. Varje delelements bärförmåga bestäms utifrån förbindarnas bärförmåga, skivans geometri samt infästningsmönster.

$$F_{v,Rk,plastisk} = \sum_i F_{i,v,Rk} \quad (3.18)$$

För ett enskilt delelement beräknas den karakteristiska skjubbärförmågan enligt ekvation 3.19, där  $F_{v,Rk}$  är den karakteristiska tvärkraftsbärförmågan per förbindare,  $b_i$  är delelementets bredd och  $s$  är avståndet mellan förbindarna. För förbindare längs skivans kanter beaktas en förstärkningsfaktor på 1,2.

$$F_{i,v,Rk} = \frac{1,2 \cdot F_{v,Rk} \cdot b_i \cdot c_i}{s} \quad (3.19)$$

Reduktionsfaktorn  $c_i$  tar hänsyn till delelementets relativa bredd och definieras enligt ekvation 3.20. För bredare element erhålls full kapacitet, medan smalare element reduceras proportionellt. Faktorn  $b_0$  är halva elementets höjd, dvs  $h/2$ .

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{för } b_i \geq b_0 \\ \frac{b_i}{b_0} & \text{för } b_i < b_0 \end{cases} \quad (3.20)$$

## Elastisk beräkningsmodell

Den plastiska beräkningsmetoden, beskriven i avsnitt 3.5.2, är endast direkt tillämpbar på väggar med utformning motsvarande referensväggen (vägg 1). För att även kunna uppskatta den teoretiska bärförmågan hos övriga väggtyper med installationsskikt används därför en elastisk beräkningsmodell baserad på metodik från Carling [2]. Genom att tillämpa denna beräkningsmodell möjliggörs en analys av hur förändringar i konstruktionen, såsom införandet annorlunda regelorientering, påverkar väggens skjubbärförmåga. Resultaten från den teoretiska analysen kan därmed jämföras med de experimentella provningarna.

Väggen modelleras som en sammansättning av väggenheter, där varje enhet utgörs av en skiva med tillhörande delar av regelstommen. Utifrån modellen kan både refe-

rensväggens bärförmåga och bärförmågan hos andra konstruktionsvarianter med varierande regelorientering och skivinfästning beräknas. Modellen möjliggör därmed även analyser av hur införandet av horisontella regler påverkar väggens totala bärförmåga. Modellen är dock inte direkt applicerbar på väggar med installationsskikt, vilka utgörs av dubbla regelstommar, utan avser enkla regelstommar med specifika infästningsmönster. Beräkningsmetoden används därför här som en förenklad approximation för att möjliggöra jämförelser mellan olika väggutföranden.

Bärförmågan hos väggen bestäms genom att den maximala kraften i ett enskilt fästdon inte får överskrida dess karakteristiska hållfasthet. Detta ger ett uttryck för den maximala horisontella last som väggen kan uppta, vilket redovisas i ekvation 3.21, där  $F_{vk}$  är den karakteristiska tvärkraftskapaciteten per förbindare och  $h$  är skivans höjd.

$$F_{v,Rk,elastisk} = \frac{F_{vk}}{h\sqrt{\left(\frac{x_{\max}}{\sum x_i^2}\right)^2 + \left(\frac{y_{\max}}{\sum y_i^2}\right)^2}} \quad (3.21)$$

Den maximala kraften uppstår i det fästdon som är beläget längst från skivans rotationscentrum. Storheterna  $x_{\max}$  och  $y_{\max}$  representerar därför avstånden från skivans centrum till det mest belastade fästdonets tyngdpunkt och kan uttryckas enligt ekvation 3.22 och 3.23.

$$x_{\max} = \frac{b}{2} \quad (3.22)$$

$$y_{\max} = \frac{h}{2} \quad (3.23)$$

Storheterna  $\sum x_i^2$  och  $\sum y_i^2$  utgör uttryck för summorna av fästdonens kvadrerade koordinater, vilka är beroende av väggens geometri samt fästdonens placering. Dessa uttryck möjliggör en förenklad beräkning av bärförmågan hos regelstommar med olika utformning och infästningsmönster. I Carling [2] redovisas sådana förenklade uttryck för ett flertal olika utföranden av regelstomme.

För referensväggen, provvägg 1, bestående av stomme med skivor direkt monterade på stommen, fästs skivorna längs samtliga fyra kanter och mellanliggande regel och uttryck 3.24 och 3.25 kan därmed användas.

$$\sum x_i^2 = \frac{b^2}{12}(2n + 6m) \quad (3.24)$$

$$\sum y_i^2 = \frac{h^2}{12}(6n + 2m + p - 3) \quad (3.25)$$

med ingående variabler enligt nedan:

$b$  = skivans bredd

$h$  = skivans höjd

$s$  = avstånd mellan fästdon längs skivans bredd

$t$  = avstånd mellan fästdon längs skivans höjd

$u$  = avstånd mellan fästdon längs vertikal mellanliggande regel

$$n = \frac{b}{s}$$

$$m = \frac{h}{t}$$

$$p = \frac{h}{u}$$

För en regelstomme med horisontella regler, med infästning längs skivans kortsidor samt längs mellanliggande horisontella regler, kan uttryck 3.26 och 3.27 användas.

$$\sum x_i^2 = \frac{b^2}{12}(2n + 3q + 15) \quad (3.26)$$

$$\sum y_i^2 = \frac{h^2}{12}(6n + 1.5q + 7.5) \quad (3.27)$$

med ingående variabler som beskrivs enligt nedan:

$b$  = skivans bredd

$h$  = skivans höjd

$s$  = avstånd mellan fästdon längs skivans bredd

$v$  = avstånd mellan fästdon längs horisontell mellanliggande regel

$$n = \frac{b}{s}$$

$$q = \frac{b}{v}$$

Slutligen beräknas den totala karakteristiska skjubbärförmågan för hela väggen genom att summera bidraget från samtliga element enligt ekvation 3.28.

$$F_{v,Rk,elastisk} = \sum_i F_{i,v,Rk,elastisk} \quad (3.28)$$

### 3.6 Hantering av bärförmåga för väggar med installationsskikt

Enligt den plastiska beräkningsmetoden A i SS-EN 1995-1-1:2004 [7], behandlas väggskivor med beklädnad på båda sidor genom att respektive sidas bidrag till skjuvbärförmågan beaktas separat och därefter kombineras. Om skivor och förbindare är identiska antas den totala bärförmågan vara summan av de två sidornas kapacitet, medan bidraget från den svagare sidan reduceras till 75 % eller 50 % om olika skivtyper används. Denna beräkningsmodell förutsätter att båda skivorna är direkt infästa i samma bärande regelstomme och därmed kan samverka. Vid införandet av installationsskikt bryts denna samverkan, eftersom den ena skivan inte längre är mekaniskt kopplad till stommen på samma sätt. Metoden kan därför inte tillämpas för att bestämma skjuvbärförmågan hos väggar med annan utformning än Provvägg 1.

Den elastiska beräkningsmetoden kan däremot tillämpas för olika väggutformningar och infästningsmönster. Eftersom metoden inte är direkt anpassad för väggar med installationsskikt krävs dock en alternativ metod för att kunna bedöma hur installationsskiktet påverkar väggarnas skjuvbärförmåga.

Genom att jämföra provresultaten från referensväggen med motsvarande väggar försedda med installationsskikt kan den reduktion i skjuvbärförmåga som installationsskiktet medför uppskattas. Denna reduktion jämförs därefter med teoretiskt beräknade bärförmågor enligt den elastiska beräkningsmetoden. För väggar med horisontella regler i installationsskiktet analyseras även om den elastiska beräkningsmodellen enligt Carling [2] kan beskriva väggarnas beteende och skjuvbärförmåga vid denna typ av väggutformning.

# 4 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från provningarna och de teoretiska beräkningarna. Resultaten baseras på mätvärden från givare 5 (placerad på hammarbandet) och givare 6 (placerad på plywoodskivan), se figur 3.7. Generella observationer kring resultatet analyseras i avsnitt 5.1.

Utifrån kurvorna analyseras väggarnas brottlast och deformationsegenskaper, medan exakta värden för brottlast och skjuvstyvhet presenteras i avsnitt 4.2.

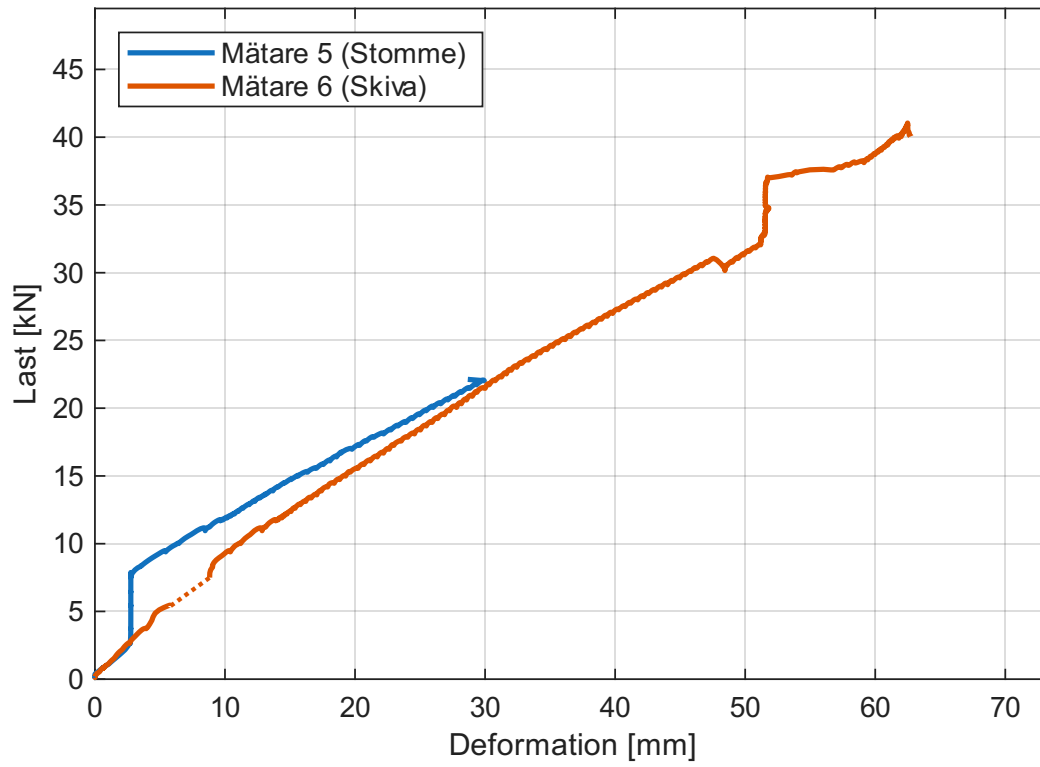
Mätvärden från givare 1–4 används inte vidare i rapporten eftersom givarna vid flera tillfällen lossnar från sina metallplattor under provningen. Dessa mätningar bedöms dessutom inte tillföra någon avgörande information för analysen.

## 4.1 Last– deformationsdiagram utifrån provning

För respektive väggtyp redovisas last–deformationsdiagram för givare 5 i bilaga K, M, O, Q och S, samt i ett sammanställt diagram i figur 4.6. Motsvarande resultat för givare 6 redovisas i bilaga L, N, P, R och T, samt i ett sammanställt diagram i figur 4.7.

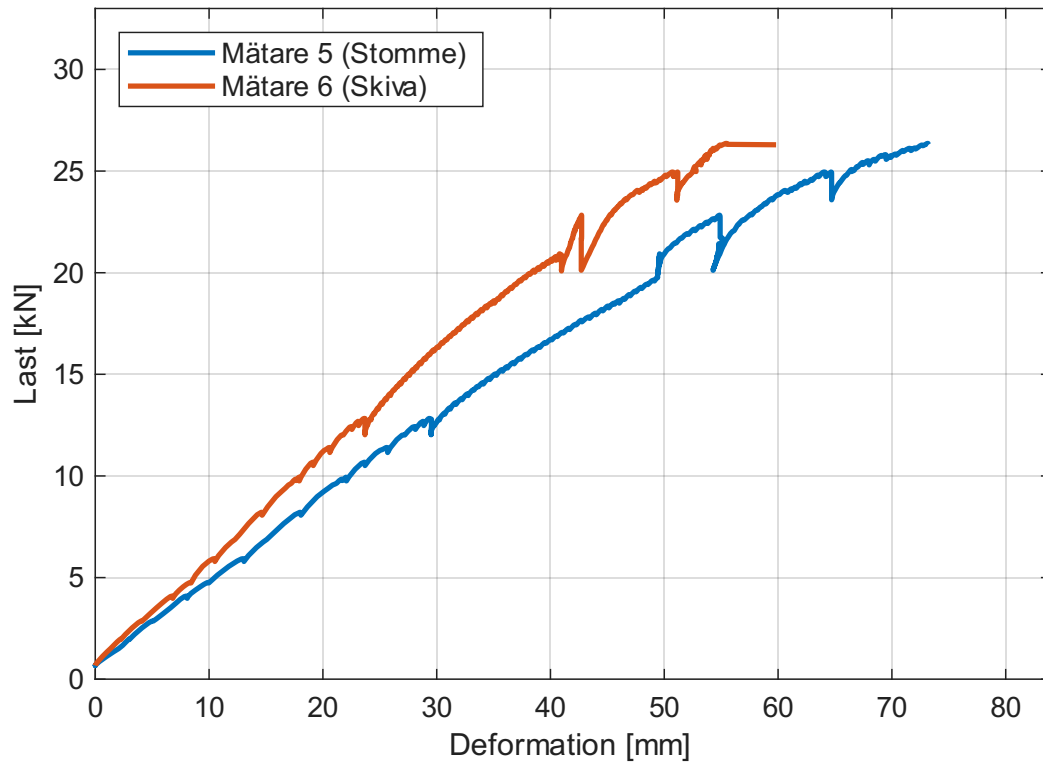
För varje väggtyp jämförs resultaten från givare 5 och 6 för att möjliggöra en analys av skivans beteende i förhållande till stommen, vilket visas i figur 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 och analyseras i avsnitt 5.4.

### 4.1.1 Vegg 1 - Referensvägg



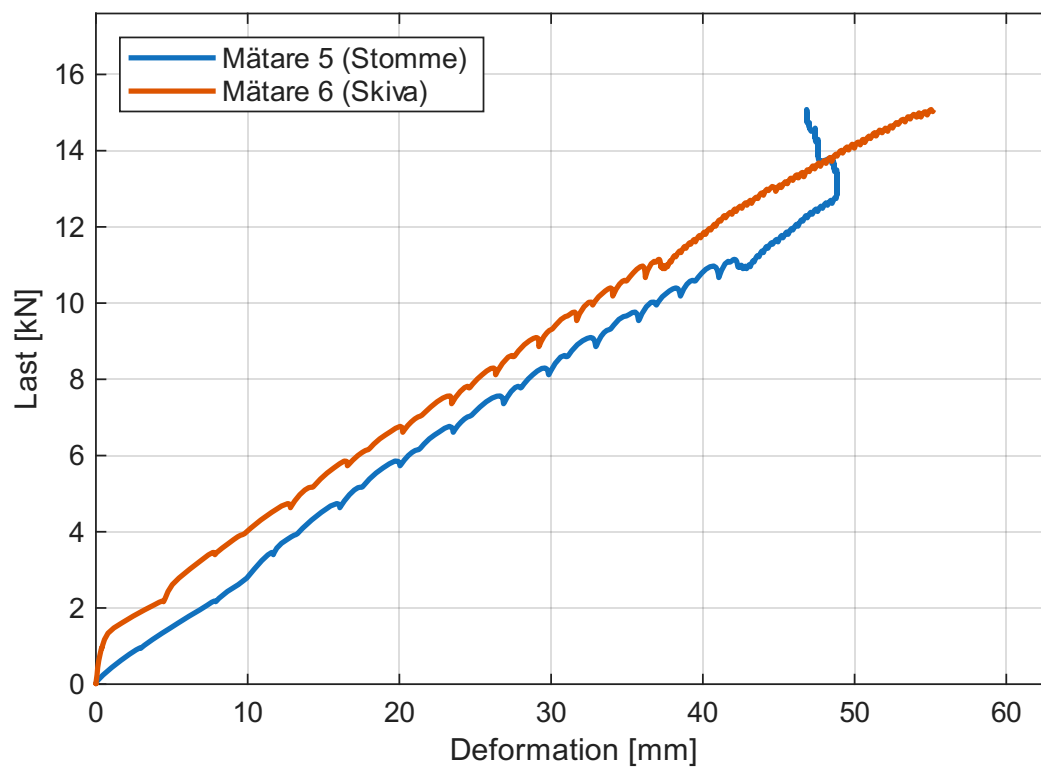
Figur 4.1: Last-deformation för Vegg 1 - jämförelse givare 5 och 6.

#### 4.1.2 Vegg 2 – Installations-skikt 45 mm, vertikala reglar



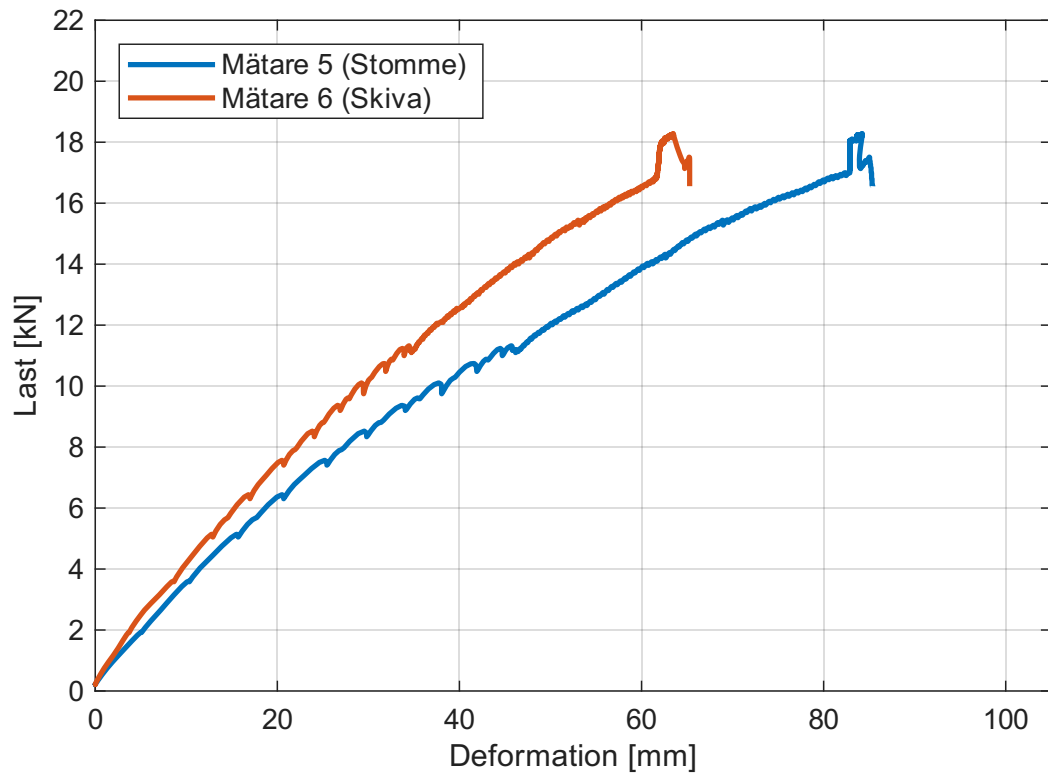
Figur 4.2: Last-deformation för Vegg 2 - jämförelse givare 5 och 6.

### 4.1.3 Vegg 3 – Installationsskikt 45 mm, horisontella regler



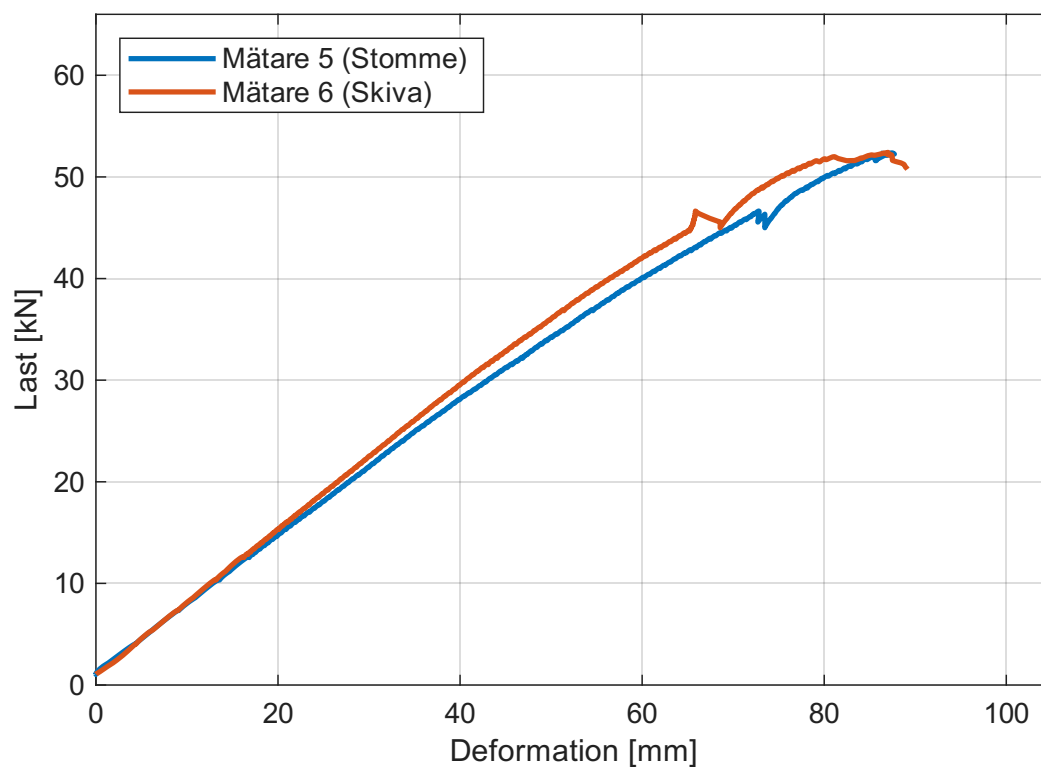
Figur 4.3: Last-deformation för Vegg 3 - jämförelse givare 5 och 6.

#### 4.1.4 Väg 4 – Installationsskikt 70 mm, horisontella regler



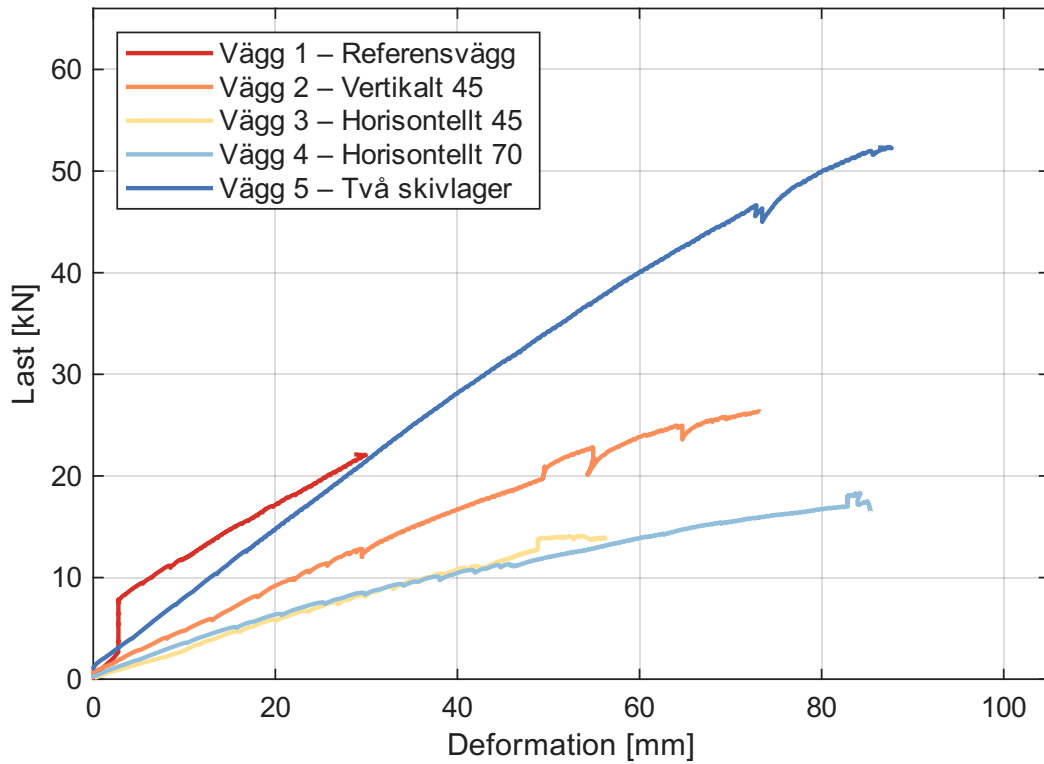
Figur 4.4: Last-deformation för Väg 4 - jämförelse givare 5 och 6.

#### 4.1.5 Vegg 5 – Installationsskikt 45 mm horisontella reglar, två skivlager



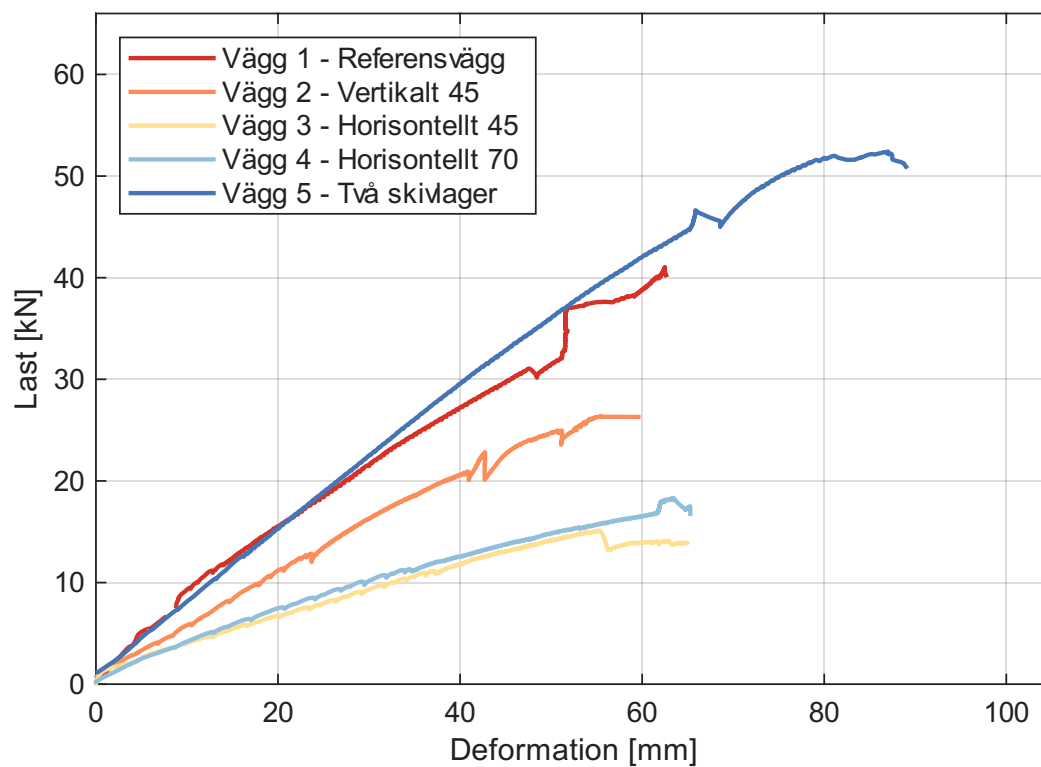
**Figur 4.5:** Last-deformation för Vegg 5 - jämförelse givare 5 och 6.

#### 4.1.6 Sammanställning givare 5 (på stommen)



Figur 4.6: Last-deformation för givare 5 för samtliga väggar 1-5.

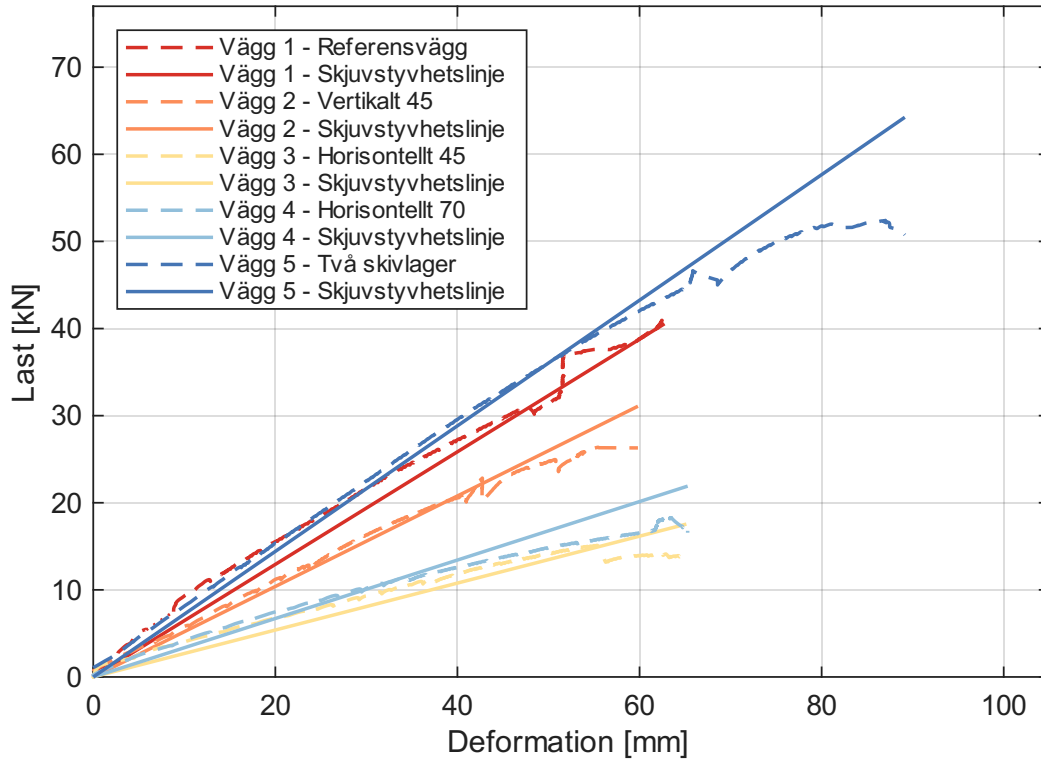
#### 4.1.7 Sammanställning givare 6 (på skivan)



Figur 4.7: Last-deformation för givare 6 för samtliga väggar 1-5.

### 4.1.8 Jämförelse av styvhetslinjer och mätlinjer för givare 6

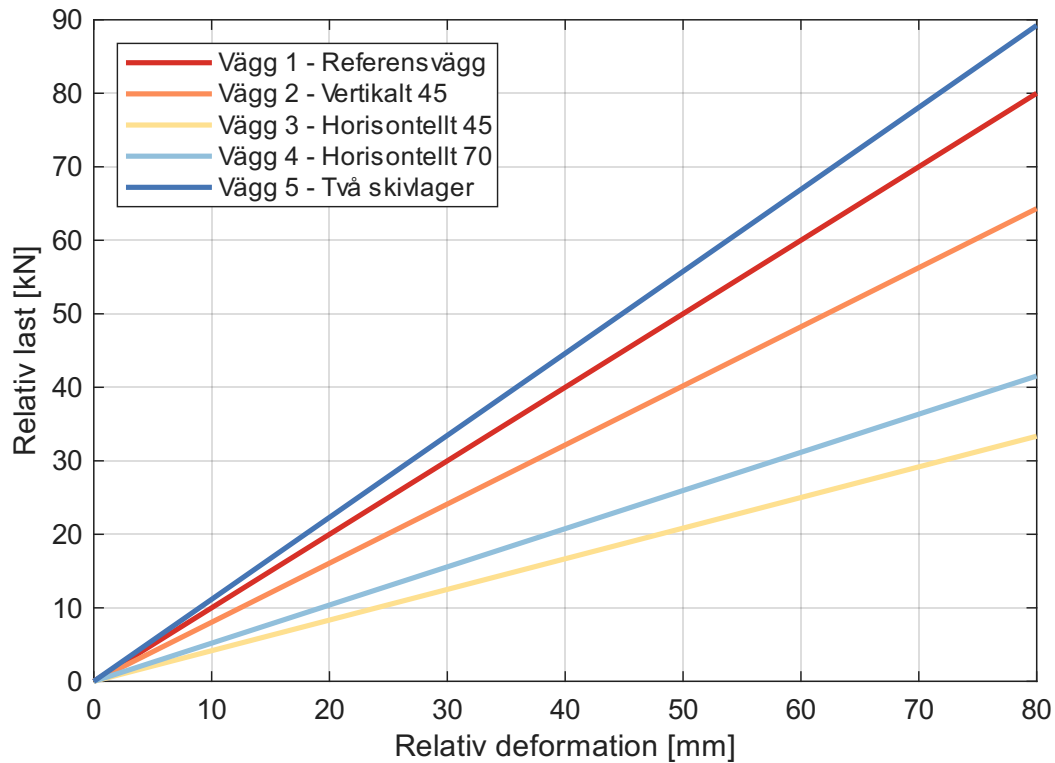
En brantare last–deformationskurva motsvarar en högre styvhet hos väggen. Styvheten beräknas enligt avsnitt 3.4.1, baserat på intervallet mellan 20% och 40% av brottlasten. För att jämföra väggarnas beräknade styvhet med deras uppmätta last–deformationskurvor presenteras figur 4.8, för givare 6. Figuren används för att analysera hur väl de beräknade styvheterna beskriver väggarnas faktiska beteende.



**Figur 4.8:** Jämförelse mellan styvhetslinje och provningens mätkurva för givare 6 för samtliga väggar.

### 4.1.9 Relativ styvhet givare 6

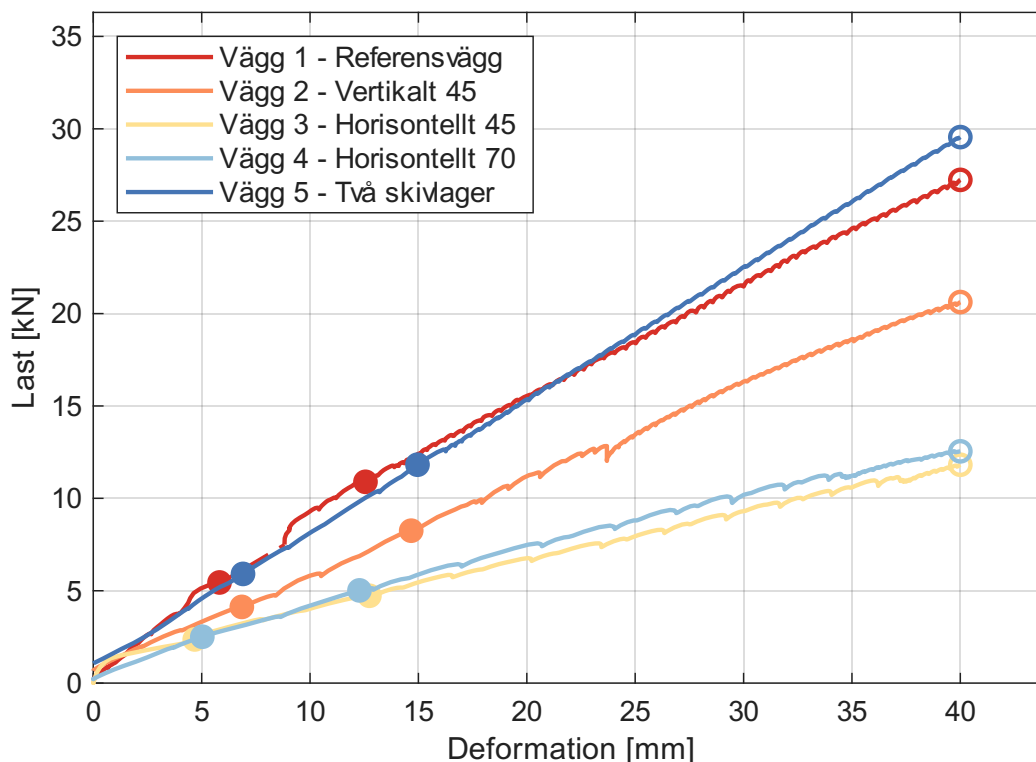
Vidare redovisas även den relativa styvheten för givare 6 för vägg 2–5, med vägg 1 som referens. Detta tydliggör hur skjuvstyvheten varierar mellan väggtyperna i förhållande till referensväggen och illustreras i figur 4.9.



Figur 4.9: Relativ styvhet av samtliga väggar för givare 6, med provvägg 1 som referens.

### 4.1.10 Initial styvhet upp till 40 % av brottlasten

Den initiala styvheten för respektive vägg undersöks för att analysera om den beräknade styvheten påverkas av vilket intervall på last–deformationskurvan som studeras. Figur 4.10 visar väggarnas beteende i det inledande belastningsskedet för vägg 1–5. Styvheten har här bestämts inom ett tidigt lastintervall där mätpunkterna motsvarar 20 % respektive 40 % av den last som uppmätts vid 40 mm deformation.



**Figur 4.10:** Last–deformationskurvor för vägg 1–5 med markerade punkter för bestämning av initial styvhet mellan 20 och 40 % av lasten vid 40 mm deformation.

## 4.2 Sammanställning av provningsresultat

### 4.2.1 Deformation och brottlast

Ur last-deformationsdiagrammen kan total deformation och brottlast tas fram för givare 5 och 6. Relativ brottlast i förhållande till vägg 1 (referensväggen) tas även fram. Dessa resultat redovisas i tabell 4.1.

**Tabell 4.1:** Resultat över brottlast, deformation vid brottlast och relativ brottlast från provning.

Vägg	Def 5 [mm]	Def 6 [mm]	Brottlast [kN]	Relativ brottlast till vägg 1 [%]
Vägg 1	ej definierad	62,49	41,05	-
Vägg 2	73,11	55,40	26,36	64,21
Vägg 3	46,84	55,36	15,11	36,81
Vägg 4	84,25	63,48	18,28	44,53
Vägg 5	87,48	86,99	52,42	127,70

### 4.2.2 Skjuvstyvhet

En brantare kurva i last-deformationsdiagrammen visar på en högre skjuvstyvhet, medan en flackare kurva indikerar på att väggtypen har en lägre skjuvstyvhet. För

att beräkna skjuvstyvheter används graferna för givare 5 och 6 för samtliga väggar, se bilaga K - T, där 20 % respektive 40 % av brotthasten avläses, samt deformationen vid dessa tillfällen. Dessa värden, tillsammans med skjuvstyvheter för givare 5 och 6, beräknas enligt ekvation 3.8 och redovisas i tabell 4.2 och tabell 4.3. För givare 6 beräknas även en skjuvstyvheter relativt referensväggen för vidare analys i avsnitt 5. Den relativa skjuvstyvheter för givare 5 har däremot inte beräknats och ingår därför inte i den fortsatta analysen, eftersom mätresultaten för referensväggen bedöms vara otillförlitliga till följd av att givaren lossnade under provningen.

**Tabell 4.2:** Skjuvstyvheter för samtliga väggar baserat på givare 5 (på stommen).

Vägg	$F_4$ [kN]	$F_2$ [kN]	$v_4$ [mm]	$v_2$ [mm]	Skjuvstyvheter [N/mm]
Vägg 1 - Referensvägg	16,42	8,21	18,58	3,28	536,56
Vägg 2 - Vertikalt 45	10,55	5,27	23,73	11,09	416,91
Vägg 3 - Horisontellt 45	6,05	3,02	20,73	10,44	293,97
Vägg 4 - Horisontellt 70	7,31	3,66	24,02	10,44	269,30
Vägg 5 - Två skivlager	20,97	10,48	29,22	13,71	675,54

**Tabell 4.3:** Skjuvstyvheter för samtliga väggar baserat på givare 6 (på skivan).

Vägg	$F_4$ [kN]	$F_2$ [kN]	$v_4$ [mm]	$v_2$ [mm]	Skjuvstyvheter [N/mm]	Relativ skjuvstyvheter till vägg 1 [%]
Vägg 1	16,42	8,21	21,70	9,00	646,23	–
Vägg 2	10,55	5,27	19,18	9,03	519,50	80,4
Vägg 3	6,05	3,02	17,42	6,20	269,37	41,7
Vägg 4	7,31	3,66	19,61	8,72	335,55	51,9
Vägg 5	20,97	10,48	27,88	13,33	720,80	111,5

### 4.2.3 Brotthast och skjuvstyvheter per förbindare

I tabell 4.4 redovisas empiriskt framtagna värden för brotthast och skjuvstyvheter per förbindare för att möjliggöra jämförelse mellan de olika väggtyperna. Värdena utgör jämförelsemått och motsvarar inte nödvändigtvis den faktiska lastfördelningen mellan samtliga förbindare.

Brotthast per förbindare och skjuvstyvheter per förbindare bestäms genom att dividera de uppmätta värdena med antalet förbindare som skivan är infäst med i respektive väggelement för varje väggtyp. För vägg 5, som består av dubbla skivor, används det totala antalet förbindare i både den inre och den yttre skivan.

**Tabell 4.4:** Resultat av brottlast och skjuvstyvhet (givare 6) per förbindare mellan skiva och installationsskikt.

Vägg	Antal förbindare [st]	Brottlast per förbindare [kN]	Skjuvstyvhet per förbindare [N/mm]
Vägg 1	208	0,197	3,107
Vägg 2	208	0,127	2,498
Vägg 3	118	0,128	2,283
Vägg 4	118	0,155	2,844
Vägg 5	326	0,161	2,211

## 4.3 Teoretisk bärförmåga

### 4.3.1 Tvärkraftsbärförmåga hos skruvförband

#### Skiva - huvudstomme

Resultat över den teoretiskt beräknade karakteristiska tvärkraftsbärförmågan per förbindare beräknas enligt kapitel 3.5.1 och resultatet presenteras i tabell 4.5 och ekvation 4.1.

**Tabell 4.5:** Resultat för beräkning av bärförmåga hos skruvförband skiva mot stomme.

Parameter	Värde	Enhet
Karakteristisk hålkantshållfasthet plywood $f_{h,1,k}$	30,95	MPa
Karakteristisk hålkantshållfasthet C24 $f_{h,2,k}$	19,23	MPa
Förhållandet mellan hålkantshållfastheter $\beta$	0,62	-
Karakteristiskt flytmoment $M_{y,Rk}$	6266	Nmm

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{(a)} \quad 1411\text{N} \\ \text{(b)} \quad 2192\text{N} \\ \text{(c)} \quad 811\text{N} \\ \text{(d)} \quad 838\text{N} \\ \text{(e)} \quad 1051\text{N} \\ \text{(f)} \quad 1222\text{N} \end{array} \right. = 811\text{N} \quad (4.1)$$

Detta resultat visar att brottmod c är dimensionerande med en karakteristisk tvärkraftsbärförmåga per förbindare på 0,811 kN, vilket vidare används vid beräkning av referensväggens horisontella bärförmåga. Brottmod c innebär att skruven förblir rak utan att någon flytled bildas. Istället uppstår brott i träet till följd av hålkanttryck [6]. Detta kan vara den brottmod som inträffar under provningen, eftersom skruvarna

fortsatt är raka efter belastning. Däremot är brott i träet svårt att observera efter provning.

### Skiva - installationsskikt

Resultat över teoretiskt beräknad tvärkraftsbärförmåga per förbindare i förbandet mellan skiva och regel i installationsskikt beräknas enligt kapitel 3.5.1 och resultatet presenteras i tabell 4.6 och ekvation 4.2.

**Tabell 4.6:** Resultat för beräkning av bärförmåga hos skruvförband skiva mot installationsskikt.

Parameter	Värde	Enhet
Karakteristisk hålkantshållfasthet plywood $f_{h,1,k}$	30,95	MPa
Karakteristisk hålkantshållfasthet C14 $f_{h,2,k}$	15,93	MPa
Förhållandet mellan hålkantshållfastheter $\beta$	0,515	-
Karakteristiskt flytmoment $M_{y,Rk}$	6266	Nmm

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{(a)} \quad 1411\text{N} \\ \text{(b)} \quad 1816\text{N} \\ \text{(c)} \quad 703\text{N} \\ \text{(d)} \quad 795\text{N} \\ \text{(e)} \quad 931\text{N} \\ \text{(f)} \quad 1151\text{N} \end{array} \right. = 703\text{N} \quad (4.2)$$

Resultatet visar att brottmod c är dimensionerande, med en karakteristisk tvärkraftsbärförmåga per förbindare på 0,703 kN. Värdet används vidare vid beräkning av bärförmågan för väggelement med horisontella regler, där förbandets egenskaper påverkas av att skivan fästs i virke med andra materialegenskaper än mot huvudstomme. Inga teoretiska beräkningar för väggar med vertikalt installationsskikt utförs.

### 4.3.2 Sammanställning

Sammanställning av tvärkraftsbärförmåga för de olika anslutningarna redovisas i tabell 4.7. Skruvens tvärkraftsbärförmåga i förband mellan skiva och huvudstomme används vid beräkning av referensväggs horisontella bärförmåga, medan tvärkraftsbärförmågan i förband mellan skiva och installationsskikt används vid beräkning av den horisontella bärförmågan för väggelement med horisontellt orienterade regler. Detta för att möjliggöra jämförelse med vägg 3.

**Tabell 4.7:** Sammanställning av tvärkraftsbärförmåga hos skruvförband.

Anslutning	Parameter	Bärförmåga [kN]
Skiva mot huvudstomme	$F_{v,Rk}$	0,811
Skiva mot installationsskikt	$F_{v,Rk}$	0,703

### 4.3.3 Bärförmåga hos väggelement

Utifrån de beräkningsmetoder som beskrivs i avsnitt 3.5.2 har bärförmågan för ett väggelement med vertikala regler beräknats med två olika modeller. För ett väggelement med horisontella regler bestäms bärförmågan endast genom den elastiska beräkningsmetoden som beskrivs i Carling [2]. Resultat från de teoretiska beräkningarna sammanställs i tabell 4.8.

**Tabell 4.8:** Sammanställning av beräknad bärförmåga för vägg 1 - referensvägg utifrån olika beräkningsmetoder samt bärförmåga för väggelement med horisontella regler.

Beräkningsmodell	Parameter	Bärförmåga (Vertikala regler)	Bärförmåga (Horisontella)
Metod A (enl Eurocode 5, [7])	$F_{v,Rk}$	29,90	–
Elastisk metod (enl Carling [2])	$F_{v,Rk}$	29,21	9,42

Resultatet för bärförmågan hos vägg med vertikala regler i huvudstommen enligt metod A och elastisk metod enligt Carling, är direkt jämförbart med provvägg 1 (referensväggen), eftersom dess utformning överensstämmer med den använda beräkningsmodellen. Resultatet för väggen med horisontella regler är däremot inte direkt applicerbart på provvägg 3 och 4, som är utformade med horisontellt installationsskikt, men används som underlag för analys av reduktionen i bärförmåga i förhållande till referensväggen. Den teoretiska reduktionen kan därmed användas som ett jämförelsevärde vid utvärdering av de experimentella resultaten.

# 5 Analys

I följande avsnitt analyseras resultaten från kapitel 4.

## 5.1 Generella observationer

Resultaten visar att samtliga väggar uppvisar ett linjärt elastiskt beteende under en stor del av belastningsförloppet, vilket innebär att deformationen ökar relativt proportionellt med lasten. Detta framgår av kurvornas nästan linjära form upp till cirka 40 % av brottlasten, se figur 5.1. Inom detta område kan väggarna antas befinna sig huvudsakligen inom det elastiska området, där deformationerna huvudsakligen är elastiska och förbanden ännu inte uppvisar tydligt plastiskt beteende. Efter den initialt linjära fasen börjar kurvorna successivt avvika från det linjära förloppet, vilket indikerar en reducerad styvhet i väggarna. En brantare kurva motsvarar en högre styvhet, medan en flackare kurva indikerar att större deformationer uppstår vid en given lastökning.

I flera av last–deformationsdiagrammen förekommer lokala ojämnheter i form av mindre ‘hack’ eller plötsliga förändringar i kurvans lutning. Sådana variationer kan generellt indikera att lokala brottfenomen uppstår eller att kraftöverföringen i konstruktionen förändras. Exempel på detta kan vara att infästningarna börjar deformeras lokalt eller att mindre rörelser uppstår mellan skiva, installationsskikt och huvudstomme. I denna provning bedöms dock majoriteten av de mindre variationerna i kurvorna främst bero på själva provningsförfarandet snarare än på lokala händelser i konstruktionen. Belastningen appliceras manuellt genom hydraulisk pumpning, vilket även medför små momentana variationer i lasten mellan pumpningarna. Detta ger upphov till mindre ojämnheter och vågformade variationer i last–deformationskurvorna, vilket särskilt kan observeras för vägg 2, 3 och 4, se bilaga N, P och R. Ytterligare en möjlig förklaring till ojämnheter i kurvorna är att deformationsgivarna inte rör sig helt friktionsfritt under hela belastningsförloppet. Mindre imperfektioner eller ojämnheter i metallvinklarna samt på hammarbandet kan ha orsakat tillfälliga fastlåsningar eller små ryckvisa förflyttningar hos givarna, vilket också kan bidra till de lokala variationerna i mätkurvorna.

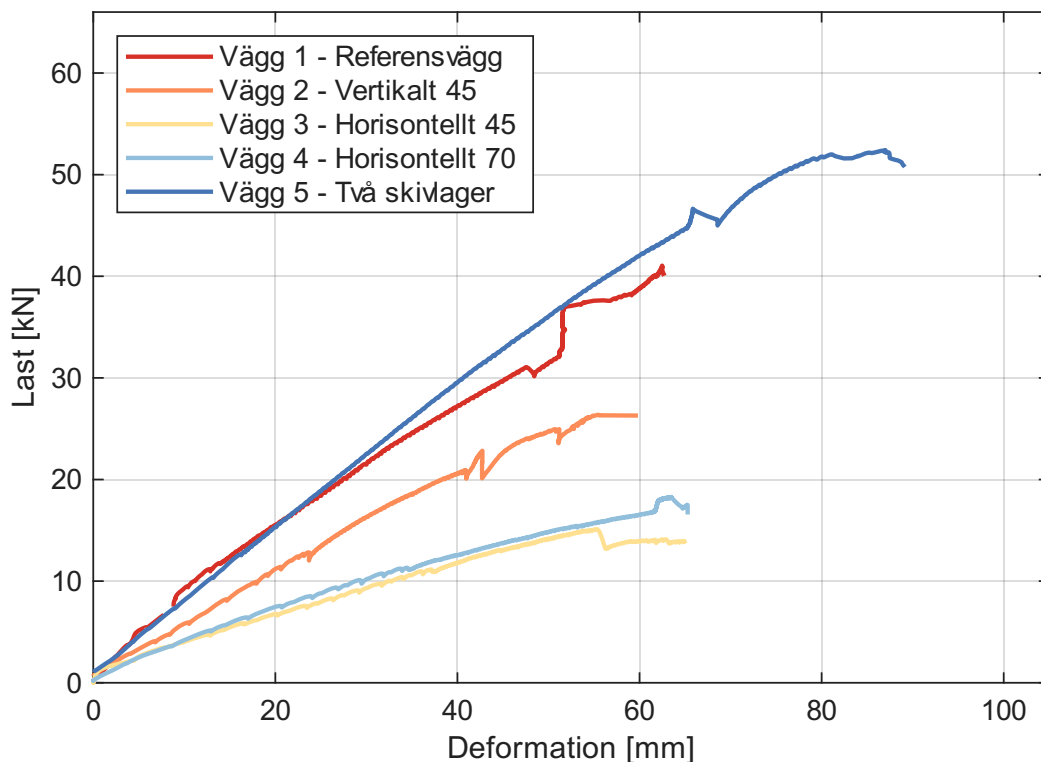
Figur 5.1 visar tydligt att väggar med installationsskikt (vägg 2–4) uppvisar både lägre styvhet och lägre bärförmåga än referensväggen, som är utformad utan installationsskikt. Vägg 5, som består av referensväggen kompletterad med ett installationsskikt med horisontella regler, uppvisar däremot ett beteende som är likvärdigt med, eller något bättre än, referensväggen.

Vid analys av väggtypernas beteende är resultaten från givare 5 mest relevanta, eftersom denna givare mäter deformationen i hammarbandet och därmed ger en representativ bild av stommens rörelse. Referensväggen provas för att utgöra jämförelsegrund för de övriga väggarna med installationsskikt. Under provningen lossnar dock

givare 5 vid en lastnivå strax över 20 kN, se bilaga K. Detta medför att mätdata för referensväggens stomrörelser blir begränsad, vilket även försvårar jämförelsen med motsvarande mätningar för de övriga väggtyperna. Av denna anledning baseras huvuddelen av analysen på resultaten från givare 6.

## 5.2 Vägg 1–5

I detta kapitel ges en kort beskrivning av väggtypernas beteende vid provning, utifrån resultatet som visas i figur 5.1.



Figur 5.1: Last-deformation för givare 6 för samtliga väggar 1-5.

### Vägg 1 – Referensvägg

Referensväggen uppvisar en relativt hög styvhet och en jämn last-deformationskurva fram till brott. Väg 1 klarar den högsta lasten av väggarna med endast ett skivlager, det vill säga samtliga väggar förutom vägg 5. Belastningsförloppet är stabilt utan större plötsliga lastreduktioner. Den streckade delen av kurvan i bilaga L representerar en uppskattning av kurvförloppet mellan två registrerade mätområden. Detta beror på att givare 6 lossnar under denna del av provningen, samtidigt som både lastökning och därmed deformation fortsätter utan registrering under en kort period. Kurvförloppet mellan de registrerade mätpunkterna har därför interpolerats och illustreras med en streckad linje.

## **Vägg 2 – Installationsskikt 45 mm, vertikala reglar**

Jämfört med referensväggen uppvisar vägg 2 både lägre styvhet och lägre brottlast. Last-deformationskurvan är relativt jämn genom större delen av belastningsförloppet och väggen uppvisar inga större plötsliga lastreduktioner före brott. Jämfört med vägg 3 och 4 uppnår vägg 2 högre styvhet och högre brottlast.

## **Vägg 3 – Installationsskikt 45 mm, horisontella reglar**

För vägg 3 observeras ytterligare reducerad styvhet jämfört med vägg 2. Last-deformationskurvan är relativt jämn genom belastningsförloppet men väggen uppvisar både den lägsta brottlasten och den lägsta skjivstyvheten av samtliga väggtyper. Jämfört med övriga väggar deformeras vägg 3 mer vid motsvarande lastnivåer, vilket framgår av kurvans flackare lutning.

## **Vägg 4 – Installationsskikt 70 mm, horisontella reglar**

Last-deformationskurvan för vägg 4 visar en relativt låg styvhet och följer kurvan för vägg 3 väl. Vägg 4 uppnår något högre brottlast än vägg 3, men skillnaden i styvhet mellan väggarna är liten.

Under provningen uppstår ett lokalt brott i plywoodskivans nedre vänstra hörn där skivan knäcks lokalt, se figur 6.4. Denna skada observeras i samband med provningen och påverkar framför allt skivan lokalt.

## **Vägg 5 – Installationsskikt 45 mm horisontella reglar, skiva innanför och utanför installationsskikt**

Vägg 5, där installationsskiktet monteras utanpå en skiva monterad direkt mot huvudstommen, uppvisar den högsta brottlasten av samtliga väggar. Den initiala styvheten är jämförbar med referensväggen och last-deformationskurvan är relativt jämn genom större delen av belastningsförloppet. Vägg 5 uppvisar även högre styvhet och bärförmåga än övriga väggar med installationsskikt.

Under provningen uppvisar vägg 5 de största deformationerna ut ur plan av samtliga väggtyper. Deformationerna blir så omfattande att väggen slutligen kollapsar, se figur 6.1.

## **5.3 Förbindarnas påverkan**

För att få en djupare förståelse för skillnaderna mellan väggtyperna analyseras i detta avsnitt hur förbandens utformning och placering påverkar lastöverföring, skjivstyvhet och bärförmåga.

## Skiv-regelförband

I tabell 4.4 redovisas brottlast och skjuvstyvhets per förbindare med syfte att undersöka hur stor lastöverföring varje förbindare bidrar med mellan de olika väggtyperna. Detta ger en indikation på hur effektivt infästningarna utnyttjas i de olika väggtyperna och ska inte förväxlas med kapaciteten hos en enskild förbindare, eftersom lasten i praktiken inte fördelas jämnt mellan samtliga infästningar.

Resultatet visar att brottlasten per förbindare tenderar att minska när skivan monterar på ett installationsskikt istället för direkt mot huvudstommen. Detta indikerar att förbindarna inte utnyttjas lika effektivt i dessa väggtyper. En möjlig förklaring är att lastöverföringen mellan skiva och huvudstomme blir mindre effektiv när ett installationsskikt introduceras, eftersom kraftöverföringen då sker i flera steg genom konstruktionen. Utöver detta har fästdonens placering en avgörande betydelse, eftersom fästdon som är placerade nära rotationscentrum inte plasticeras i samma utsträckning som de längs kanterna och därmed inte utnyttjas lika mycket. Detta innebär att förbindare nära rotationscentrum bidrar mindre till den totala kapaciteten, medan förbindarna längs kanterna i stället kan ta upp en större del av belastningen.

På samma sätt som för brottlast per förbindare, är skjuvstyvhets per förbindare högst för referensväggen, se tabell 4.4, vilket indikerar att förbanden i denna väggtyp utnyttjas mest effektivt. För samtliga väggar med installationsskikt kan en reduktion i skjuvstyvhets per förbindare observeras, vilket tyder på att lastöverföringen i förbanden påverkas negativt av den förändrade uppbyggnaden. Resultaten visar därmed att förbindarnas beteende inte ensamt kan förklara väggarnas globala styvhet och bärförmåga. Lastöverföringen påverkas även av väggarnas övergripande uppbyggnad och samverkan mellan konstruktionens olika delar, vilket diskuteras vidare i avsnitt 5.5.4.

## Förband mellan installationsskikt och huvudstomme

I väggar med installationsskikt sker lastöverföringen från huvudstommen till skivan via mellanliggande regler i installationsskiktet. Detta innebär att ett extra lastöverföringssteg introduceras i konstruktionen. Infästningen mellan installationsskikt och huvudstomme får därmed en central betydelse för väggens skjuvbärförmåga och styvhet.

Eftersom samma typ av skruvförband används mellan installationsskikt och huvudstomme för vägg 2, 3 och 4 blir den teoretiska tvärkraftsbärförmågan per förbindare densamma för samtliga väggtyper, se tabell 4.7. Skillnaderna i styvhet och brottlast mellan väggarna kan därmed inte förklaras av den enskilda förbindarens kapacitet, utan måste istället bero på hur förbanden samverkar i konstruktionen och hur lasten överförs genom väggsystemet. Skillnaderna mellan väggarna bedöms därför främst bero på regelorientering och infästningarnas placering, vilket diskuteras vidare i avsnitt 5.5.2.

## Jämförelse av reduktion mellan förbindare och hela väggen

I följande avsnitt analyseras skillnader och likheter mellan relativa värden av hela väggelementets brottlast och enskilda förbindares brottlast, vilket redovisas i tabell 5.1 och 5.2.

Den relativa brottlasten per förbindare, baserad på provningsresultaten för provvägg 2, överensstämmer väl med den relativa kapaciteten på vägnivå avseende både brottlast och styvhet. Väg 2 har samma antal förbindare som referensväggen och det kan därmed tyckas vara anledningen till att dessa värden överensstämmer så väl. Men eftersom denna teori inte stämmer på vägg 3 och 4 som också har samma antal förbindare, kan detta vara en tillfällighet. Att de relativa värdena överensstämmer så väl på vägnivå med förbindarnivå, kan däremot bero på hur lastöverföringen sker. Eftersom de vertikala reglarna i installationsskiktet för vägg 2 fästs i linje med huvudstommen, sker en mer direkt kraftöverföring. Väggtypen hade därmed kunnat betraktas som en samverkande konstruktion motsvarande en väggregel med effektiv tjocklek 140 mm (95 mm + 45 mm). Denna goda samverkan kan bidra till mindre rörelser i hela väggen, jämfört med väggarna med horisontella reglar, vilket ger större globala deformationer som inte ses vid analys av enskilda förbindare.

För provvägg 3 och 4 är även den relativa skjuvstyvheten förhållandevis mycket lägre på vägnivå än förbindarnivå. Detta innebär, som tidigare konstaterats, att den relativa styvheten är svår att koppla direkt till förbindarnas beteende. Istället tycks väggens globala styvhet vara mer avgörande, vilket kan bero på det korsande regelsystemet och den förändrade lastöverföringen.

Vid jämförelse av vägg 3 och 4 uppvisas att förbindarnas styvhet hos vägg 4 inte reduceras lika mycket som för vägg 3, trots ökad tjocklek på installationsskiktet, vilket också indikerar att avståndet från skiva till huvudstomme inte spelar så stor roll, utan att det snarare är faktumet att skivan inte sitter direkt mot stommen som ger en reduktion. Kanske är det alltså en komplexare lastöverföring som avgör, snarare än hur lång lastvägen är. Att den relativa styvheten per förbindare är högre för vägg 4 kan bero på mer material i konstruktionen eller mindre fläkning vid större regeldimensioner. För en mer tillförlitlig utvärdering av denna parameter krävs dock fler provningar per vägg för att statistiskt säkerställda slutsatser ska kunna dras.

**Tabell 5.1:** Relativ brottlast och skjuvstyvhet för givare 6 – installationsskikt jämfört med referensvägg (Vägg 1).

Vägg	Relativ brottlast [%]	Relativ styvhet [%]
Vägg 2	64,2	80,4
Vägg 3	36,8	41,7
Vägg 4	44,5	51,9
Vägg 5	127,7	111,5

**Tabell 5.2:** Relativ brottlaster och skjuvstyvheter per förbindare skiva – installationsskikt jämfört med referensvägg (Vägg 1).

Vägg	Relativ brottlaster per förbindare [%]	Relativ styvhet per förbindare [%]
Vägg 2	64,5	80,4
Vägg 3	65,0	73,5
Vägg 4	78,7	91,5
Vägg 5	81,7	71,2

## 5.4 Jämförelse av deformationsgivare 5 och 6

Deformationsgivare 5, placerad på hammarbandet, jämförs i detta avsnitt med deformationsgivare 6, placerad på plywoodskivan. Genom att analysera givarnas rörelser relativt varandra kan väggarnas samverkan och deformationsegenskaper studeras. Eftersom deformationsgivare 5 lossnar vid en lastnivå på cirka 20 kN under provningen av vägg 1 är det svårt att dra några säkra slutsatser för referensväggen, vilket även begränsar möjligheten att fullt ut jämföra stommens beteende hos referensväggen med de övriga väggtyperna.

Generellt kan det observeras att givare 5, placerad på hammarbandet och därmed representativ för huvudstommens rörelse, uppvisar större deformationer än givare 6 vid motsvarande lastnivåer, se figur 4.2 och tabell 4.3. Skillnaden mellan givarnas slutdeformationer är tydligast för vägg 2, 3 och 4, se tabell 4.1, alltså för de väggar där skivan endast monteras på installationsskiktet. Resultatet indikerar att samverkan mellan huvudstomme och skiva försämras när ett installationsskikt placeras sinsemellan. Detta tyder på att skiva och huvudstomme inte verkar som en fullt samverkande enhet i dessa fall, utan att en del av deformationen istället uppstår i installationsskiktet eller i dess anslutningar mot huvudstommen. För vägg 5 sammanfaller däremot kurvorna för givare 5 och 6 i stor utsträckning, vilket innebär att huvudstomme och skiva deformeras relativt lika vid belastning. Detta tyder på en effektiv lastöverföring och en högre grad av samverkan i väggelementet.

Skillnaderna i deformation mellan givare 5 och 6 återspeglas även i de beräknade skjuvstyvheter, se tabell 5.3, där givare 6 generellt uppvisar högre styvhet än givare 5. Detta indikerar att plywoodskivan deformeras mindre än huvudstommen vid belastning. Skillnaden kan förklaras av att deformationer inte endast uppstår i skivan, utan även i regelstommen och skiv-regelförbanden, vilket medför att huvudstommen uppvisar en mer eftergivlig respons.

För vägg 3 uppmättes däremot en något lägre styvhet för givare 6 jämfört med givare 5, vilket avviker från övriga väggar. En möjlig förklaring kan vara mindre mätavvikelse i det initiala skedet av provningen för givare 6. I figur 4.3 framgår att kurvorna i stort sett är parallella, men att deformationen för givare 6 initialt är mycket begränsad. Detta tyder sannolikt på ett mätfel snarare än ett faktiskt annorlunda beteende hos väggen.

**Tabell 5.3:** Jämförelse av skjuvstyvheter mellan givare 5 och 6 för vägg 1-5.

Vägg	Skjuvstyvhet givare 5 [N/mm]	Skjuvstyvhet givare 6 [N/mm]
Vägg 1	536,56	646,23
Vägg 2	416,91	519,50
Vägg 3	293,97	269,37
Vägg 4	269,3	335,55
Vägg 5	675,54	720,80

## 5.5 Global analys av väggarna

I följande avsnitt analyseras väggarnas globala beteende genom jämförelse mellan teoretiskt beräknade och experimentellt uppmätta värden för bärförmåga. Därutöver analyseras skillnader i skjuvstyvhet mellan de olika väggtyperna baserat på experimentellt uppmätta resultat.

De teoretiska beräkningarna av väggarnas bärförmåga, redovisade i tabell 4.8, visar generellt lägre kapaciteter än vad som uppmäts vid provningarna, särskilt för referensväggen. För referensväggen erhålls en teoretisk bärförmåga på cirka 30 kN jämfört med en experimentellt uppmätt brottlast på drygt 40 kN. Vid analys av referensväggens last-deformationskurva i bilaga L kan det dock observeras att kurvan börjar avvika från ett tydligt linjärt beteende vid omkring 30 kN. Detta kan indikera att väggen vid denna lastnivå börjar uppvisa plastiska deformationer, samtidigt som konstruktionen fortfarande har kvarvarande lastkapacitet fram till brott. Den teoretiskt beräknade bärförmågan sammanfaller därmed väl med övergången från huvudsakligen linjärt till mer plastiskt beteende i referensväggen. En ytterligare förklaring till skillnaden mellan teoretiskt beräknad och experimentellt uppmätt bärförmåga är att de teoretiska beräkningarna baseras på karakteristiska hållfasthetsvärden. Dessa motsvarar normalt 5 % - percentilen, vilket innebär att 95 % av observationerna förväntas uppvisa högre värden. De experimentella resultaten representerar däremot snarare medelvärdet av de uppmätta bärförmågorna. Av denna anledning är det förväntat att de uppmätta bärförmågorna generellt överstiger de teoretiskt beräknade värdena.

Trots skillnader i absoluta värden bedöms de relativa skillnaderna mellan väggtyperna bäst beskriva konstruktionernas inbördes beteende, varför analysen främst baseras på dessa relativa skillnader, vilka redovisas i tabell 5.1. Genom att jämföra väggarnas beteende kan betydelsen av regelorientering, installationsskiktets uppbyggnad och samverkan mellan konstruktionens olika delar studeras.

### 5.5.1 Övergripande jämförelse mellan väggtyperna

Resultaten visar tydligt att väggar där skivmaterialet monteras direkt mot huvudstommen uppvisar högre skjuvstyvhet och högre bärförmåga än väggar där skivan monteras på ett installationsskikt. Detta framgår tydligt i figur 4.7, där referensväggen och vägg 5, vilka är de enda väggarna med skiva direkt monterad mot huvudstommen, upp-

visar de högsta skjuvstyvheterna och brottlasterna. Resultaten tyder därmed på att lastöverföringen blir mer effektiv när skivan ansluts direkt mot den bärande stommen. Detta framgår även i figur 4.9, där de relativa skjuvstyvheterna redovisas i förhållande till referensväggen. Figuren visar tydligt hur installationsskiktet reducerar väggarnas styvhet samt att väggar med horisontella installationsreglar uppvisar störst reduktion.

För att vidare undersöka väggarnas skjuvstyvhet analyseras även en initial styvhet baserad på last-deformationsförhållandet upp till 40 mm deformation, se figur 4.10. Syftet är att studera styvheten innan betydande plastiska deformationer uppstår, då skjuvstyvheten som beräknas utifrån hela last-deformationskurvan påverkas av beteendet nära brottlasten. Resultaten visar dock liknande relativa skillnader mellan väggtyperna som för den tidigare beräknade skjuvstyvheten, varför någon vidare analys inte genomförs.

För väggar med installationsskikt reduceras både skjuvstyvhet och bärförmåga, men reduktionens storlek varierar tydligt beroende på installationsskiktets utformning. Väg 2, med vertikala reglar, uppvisar betydligt högre kapacitet än vägg 3 och 4 med horisontella reglar. Detta visar att regelorienteringen har stor betydelse för väggens globala beteende och lastöverföring.

De flesta väggarna uppvisar stora deformationer ut ur plan under provningen, vilket sannolikt påverkar väggarnas lastupptagande förmåga. Det är möjligt att brott uppstår till följd av dessa deformationer innan förbindarna når sin maximala kapacitet. Vid större deformationer förändras dessutom kraftfördelningen i väggen till följd av exempelvis excentricitet och andra ordningens effekter.

## 5.5.2 Regelorientering och lastöverföring

Enligt den elastiska beräkningsmetoden presenterad av Carling [2], kan förenklade uttryck användas för att uppskatta bärförmågan hos olika väggtyper. För ett standardfall med skivor av dimensionen  $1200 \times 2400$  mm och lika fästonsavstånd längs samtliga kantreglar samt dubbelt avstånd i mellanliggande reglar, anges att en vägg med horisontella reglar uppnår cirka 34 % av bärförmågan hos en motsvarande vägg med vertikala reglar. I denna studie, där fästonsavstånden avviker något från standardfallet, har motsvarande beräkning genomförts med approximativa uttryck för infästningarnas placering. Beräkningen visar att en vägg med horisontellt orienterade reglar och stående skivor, med samma fästonsplacering som den provade väggen med horisontella reglar, uppnår cirka 32,2 % av referensväggens (Vägg 1) bärförmåga. Det teoretiska resultatet visar därmed god överensstämmelse med det teoretiska standardfallet enligt Carling [2].

Detta teoretiska resultat överensstämmer även väl med provningens resultat, där väggar med horisontellt installationsskikt uppvisar en bärförmåga på cirka 36,8 % jämfört med referensväggen. Resultatet bekräftar därmed att horisontella reglar medför en betydande reduktion i väggens bärförmåga. En viktig orsak till detta är att skivorna vid horisontella reglar endast kan fästas längs två kanter, vilket ger färre effektiva infästningspunkter jämfört med väggar med vertikala reglar. Utöver det mindre antalet fästdon vid horisontellt orienterade reglar innebär denna väggutformning även att

ett större antal fästdon är placerade nära rotationscentrum, vilket medför att dessa inte plasticeras och därmed inte utnyttjas i samma utsträckning som fästdonen vid kanterna. Väg 2, med vertikala regler i installationsskiktet, uppvisar därför betydligt högre bärförmåga och skjuvstyvhet än vägg 3 och 4. Den vertikala regelorienteringen möjliggör infästning av skivorna längs samtliga fyra kanter, vilket ger ett större antal infästningspunkter både mellan skiva och installationsskikt samt mellan installationsskikt och huvudstomme. Resultaten tyder därmed på att infästningarnas antal och placering har stor betydelse för väggarnas globala bärförmåga och styvhet.

Den relativt goda överensstämmelsen mellan teoretiska och experimentella resultat för vägg med horisontella regler tyder på att den elastiska beräkningsmetoden enligt Carling [2] kan användas som en rimlig approximation för denna typ av väggutformning. Resultaten indikerar därmed att bärförmågan för väggar med horisontella installationsreglar kan uppskattas till cirka 34 % av bärförmågan hos en motsvarande vägg utan installationsskikt. Det bör dock noteras att värdet utgör en förenkling, och att variationer i exempelvis infästning, materialegenskaper och deformationer kan påverka den faktiska bärförmågan.

För vägg 2 uppmäts en relativ brottlast på 64,2 % och en relativ skjuvstyvhet på 80,4 % i förhållande till referensväggen, medan vägg 3, med horisontella regler, uppvisar betydligt större reduktioner, där den relativa brottlasten uppgår till 36,8 % och relativa skjuvstyvheten till 41,7 %, se tabell 5.1. Resultaten visar därmed att regelorienteringen har stor betydelse för hur lasten överförs genom konstruktionen.

### 5.5.3 Installationsskiktets tjocklek

Resultaten visar att installationsskiktets tjocklek inte verkar ha någon avgörande inverkan på vare sig skjuvstyvhet eller brottlast inom det undersökta intervallet. Väg 4, med 70 mm installationsskikt, uppvisar endast marginellt högre styvhet och brottlast än vägg 3 med 45 mm installationsskikt. Skillnaden i styvhet är liten och lastdeformationskurvorna för väggarna följer varandra väl genom större delen av belastningsförloppet för både givare 5 och 6, se figur 4.6 och figur 4.7.

När installationsskiktets tjocklek ökar från 45 mm till 70 mm finns det anledning att anta att väggen borde försvagas till följd av ökad excentricitet i lastöverföringen och större deformationer i förbanden. Resultaten från provningarna visar dock ingen tydlig reduktion i vare sig styvhet eller brottlast vid den ökade regeldimensionen. Den marginellt högre kapaciteten hos vägg 4 kan möjligen bero på den större materialvolymen i installationsskiktet eller att de grövre reglarna är mindre känsliga för lokala brottfenomen som exempelvis fläkning. Det är dock svårt att dra några säkra slutsatser utifrån endast en provning per väggtyp.

### 5.5.4 Samverkan mellan installationsskikt och huvudstomme

Observationer från provningarna visar att deformationer uppstår i flera led i konstruktionen, både mellan skiva och installationsskikt samt mellan installationsskikt och huvudstomme. Detta tyder på att lastöverföringen sker genom flera steg och att

väggens globala styvhet påverkas av samverkan mellan flera komponenter. Visuella observationer efter provningarna visar dessutom att skivan och installationsskiktets regler i stor utsträckning deformeras tillsammans, medan större relativa förskjutningar uppstår mellan installationsskiktet och huvudstommen. Detta stärker antagandet att förbanden mellan installationsskikt och huvudstomme har stor betydelse för väggarnas lastöverföring och den observerade reduktionen i styvhet, se figur 5.2. Figuren visar även att viss rotation uppstår i installationsskiktetsregeln, vilket kan ha en viss påverkan på både styvhet och bärförmåga.



**Figur 5.2:** Skivans och installationsskiktets deformation relativt huvudstommen efter provning, vägg 3.

Det bör även noteras att de teoretiska beräkningsmodellerna inte fullt ut tar hänsyn till den reducerade samverkan som uppstår när skivan inte monteras direkt mot huvudstommen. Hur stor denna reduktion faktiskt blir är svårt att avgöra utifrån enbart förenklade uttryck, eftersom deformationer i förband och relativa rörelser mellan väggens olika delar påverkar lastöverföringen. För att mer exakt kunna beskriva denna effekt skulle därför en särskild beräkningsmodell för anslutningen mellan installationsskikt och huvudstomme behöva utvecklas.

### 5.5.5 Analys av vägg 5 (två skivlager)

Vägg 5 kan betraktas som en kombination av referensväggen (vägg 1) och vägg 3, eftersom konstruktionen består av en skiva monterad direkt mot huvudstommen i kombination med ett installationsskikt med horisontella regler och en yttre skiva. Provningsresultaten visar att vägg 5 uppnår en brottlast på 52,4 kN, vilket motsvarar en ökning på cirka 28 % jämfört med referensväggen.

Analys av mätdata från givare 6 i figur 4.7 visar att väggens initiala styvhet följer ett beteende liknande referensväggen. Efter en viss lastnivå uppvisar dock vägg 5 en ytterligare ökning i styvhet, vilket tyder på att fler komponenter i konstruktionen

börjar bidra till lastupptagningen. Resultaten tyder på att den inre skivan initialt tar huvuddelen av lasten, medan den yttre skivan aktiveras först vid större deformationer.

Om full samverkan mellan skivorna hade uppnåtts från början hade bärförmågan sannolikt närmat sig summan av referensväggens kapacitet och bidraget från en vägg med motsvarande installationsskikt, det vill säga vägg 3. Resultaten visar istället att vägg 5 i stor utsträckning uppför sig som referensväggen, vilket tyder på att skivan direkt mot huvudstommen är den primärt lastbärande komponenten. Den begränsade samverkan mellan skivorna skulle kunna bero på stora deformationer ut ur plan, vilket minskar möjligheten för den yttre skivan att effektivt bidra till lastöverföringen.

Viss samverkan mellan skivorna kan dock observeras i figur 4.5, där mätvärdena från givare 5 och 6 ligger relativt nära varandra jämfört med övriga väggtyper. Detta tyder på att deformationerna i skiva och stomme i detta fall är mer samordnade än i de övriga försöken.

För att uppskatta bidraget från skivan i installationsskiktet kan ett förenklat samband användas, där referensväggens kapacitet antas vara fullt utnyttjad:

$$F_5 = F_1 + x \cdot F_3 \rightarrow x = 75,2\% \approx 75\% \quad (5.1)$$

Detta indikerar att skivan på installationsskiktet bidrar till skjuvstyvheten och bärförmågan, men endast i begränsad omfattning. Slutsatsen är därmed att en partiell samverkan förekommer mellan skivorna, där cirka 75 % av den yttre skivans kapacitet utnyttjas i denna konstruktion.

Detta resonemang kan jämföras med Eurocode 5 [1], där det anges att skjuvbärförmågan för delement med skivor på båda sidor får sättas till summan av båda sidornas bärförmåga när skivor och förbindare är av samma typ och dimension. För konstruktioner med olika skivtyper eller varierande förbindare rekommenderas istället att endast 75 % av den svagare sidans bärförmåga tillgodoräknas vid förbindare med liknande förskjutningsmodul.

Eurokodens regler avser konstruktioner med en gemensam regelstomme, medan väggen i den aktuella provningen är uppbyggd av två separata regelstommar. Samverkan mellan provväggens delement skiljer sig därför från standardfallet, eftersom kraftöverföringen mellan skivorna inte sker genom samma stomme. Det uppmätta beteendet för vägg 5 visar en liknande tendens, där den yttre skivan bidrar till väggens bärförmåga men där endast en del av dess potentiella kapacitet kan tillgodoräknas konstruktionen.

# 6 Diskussion

Detta avsnitt behandlar en övergripande diskussion av studiens resultat, osäkerheter och begränsningar samt en utvärdering av hur väl studiens syfte har uppnåtts och vilka möjligheter till vidareutveckling som identifierats.

## 6.1 Resultatdiskussion

Resultaten visar tydligt att installationsskikt har stor påverkan på träregelväggars skjuvstyvhet och bärförmåga när skivmaterialet inte monteras direkt mot huvudstommen. Samtidigt visar studien att reduktionen inte enbart beror på förekomsten av ett installationsskikt, utan i hög grad på hur installationsskiktet är utformat. Särskilt regelorienteringen verkar ha stor betydelse för väggarnas globala beteende och lastöverföring.

Vägg 2 med vertikala installationsskiktsreglar uppvisar betydligt högre skjuvstyvhet och bärförmåga än väggarna med horisontella installationsskiktsreglar. Resultaten tyder på att detta främst beror på att de vertikala reglarna möjliggör fler effektiva infästningspunkter och en mer direkt lastöverföring mellan skiva och huvudstomme. Väggarna med horisontella installationsskiktsreglar får däremot färre effektiva infästningspunkter och en mer komplex lastväg då lasten behöver föras genom flera förband och komponenter innan den når skivan. Detta verkar leda till större relativa deformationer och därmed en lägre global styvhet och bärförmåga.

Reduktionen varierar tydligt beroende på installationsskiktets utformning. Som framgår av tabell 4.1 uppmättes bärförmågan för väggen med vertikala installationsreglar till cirka 64 % av bärförmågan hos referensväggen utan installationsskikt, vilket innebär att denna typ av väggutformning kan hanteras genom att reducera bärförmågan för beräkningsfallet med skiva monterad direkt mot huvudstomme (referensvägg) med faktorn 0,642. Väggarna med horisontella installationsreglar uppvisade en betydligt större reduktion, där bärförmågan enligt tabell 4.1 motsvarade cirka 37 % av referensväggens kapacitet. Denna väggutformning bedöms även vara applicerbar för den elastiska beräkningsmetoden för väggar med horisontella reglar i huvudstommen enligt Carling [2], eftersom det teoretiskt beräknade resultatet överensstämmer väl med provningsresultatet. Resultaten visar därmed att både antalet effektiva infästningspunkter och lastvägens utformning mellan skiva, installationsskikt och huvudstomme har stor betydelse för väggarnas horisontella bärförmåga.

Resultaten tyder samtidigt på att det är svårt att entydigt avgöra väggarnas brottmekanismer, då flera av väggarna uppvisar stora deformationer ut ur planet under provningarna. Dessa deformationer påverkar väggarnas globala stabilitet och förändrar sannolikt kraftfördelningen i konstruktionen. Det är därför möjligt att vissa väggar når ett instabilitetstillstånd innan förbindarna hinner utnyttjas fullt ut.

Observationer från provningarna visar även att anslutningarna mellan installations-skikt och huvudstomme har stor betydelse för väggarnas beteende. Deformationer observeras inte enbart i förbanden mellan skiva och regel, utan även mellan installationsskikt och huvudstomme. Resultaten antyder därmed att väggarnas skjuvkapacitet inte enbart bestäms av skivans och förbindarnas individuella kapacitet, utan även av samspelet mellan konstruktionens olika delar. Detta blir särskilt tydligt i väggarna med installationsskikt, där relativa förskjutningar mellan olika konstruktionsdelar påverkar både styvhet och lastfördelning.

Studien visar samtidigt att installationsskiktets tjocklek, för de undersökta dimensionerna, inte har någon märkbar inverkan på väggarnas skjuvstyvhet eller brottlast. Trots att ett tjockare installationsskikt innebär ett ökat avstånd mellan skiva och huvudstomme observeras ingen tydlig skillnad mellan väggarna med 45 mm respektive 70 mm installationsskikt. Resultaten tyder istället på att det främst är själva förekomsten av ett installationsskikt mellan skiva och huvudstomme som påverkar väggarnas kapacitet, snarare än det ökade avståndet till huvudstommen i sig. Detta kan indikera att avbrottet i den direkta lastvägen mellan skiva och huvudstomme har större betydelse än den ökade excentriciteten inom de undersökta dimensionerna. Inte heller någon tydlig skillnad i regelrotation kunde observeras mellan väggarna med 45 mm respektive 70 mm installationsskikt, vilket stödjer antagandet att installationsskiktets tjocklek har begränsad betydelse inom det undersökta intervallet.

Resultaten från vägg 5 tyder på att en skiva monterad direkt mot huvudstommen bidrar till en effektivare lastöverföring och ökad samverkan i väggelementet. Den yttre skivan verkar därmed fortfarande kunna bidra till väggens horisontalstabilisering trots förekomsten av installationsskikt, även om hela dess potentiella kapacitet sannolikt inte kan tillgodoräknas.

Studien visar samtidigt att lastöverföringen i väggar med installationsskikt är mer komplex än i traditionella träregelväggar där skivorna monteras direkt mot huvudstommen. Väggarnas globala beteende påverkas av flera samverkande faktorer, såsom förbandens styvhet, regelorienteringen och samspelet mellan installationsskikt och huvudstomme. Resultaten visar därmed att dagens förenklade beräkningsmodeller inte fullt ut beskriver beteendet hos väggar med installationsskikt. Samtidigt visar studien att en betydande del av skjuvkapaciteten fortfarande kan bibehållas beroende på installationsskiktets utformning.

## 6.2 Osäkerheter och felkällor

### Stor deformation ut ur plan

Under provningen används rullande stöd vid väggarnas övre del för att begränsa deformationer ut ur planet utan att påverka den horisontella deformationen. De stålstänger som används som mothåll visar sig dock i flera fall ha otillräcklig styvhet för att motstå de högsta lasterna, vilket medför att väggarna deformeras ut ur planet i varierande omfattning, se figur 6.1.

Dessa deformationer utgör en osäkerhetsfaktor eftersom de kan påverka lastfördelningen och därmed även väggarnas uppmätta styvhet och bärförmåga. Det är samtidigt oklart i vilken utsträckning motsvarande deformationer skulle uppstå i en fullskalig konstruktion, där omkringliggande stomdelar sannolikt bidrar med större stabilisering och begränsar rörelser ut ur planet.

Provningarna genomförs utan vertikal last på väggarna, vilket utgör en avvikelse från standardens provningsmetod. Vertikala laster kan bidra till att stabilisera konstruktionen och därmed begränsa deformationer ut ur planet. Om vertikallast hade applicerats under provningarna är det därför möjligt att de observerade deformationerna ut ur planet hade reducerats, vilket i sin tur hade kunnat påverka väggarnas uppmätta styvhet och bärförmåga.

För framtida provningar bör styvare mothåll användas för att bättre begränsa deformationer ut ur planet. Det bör även införas mätutrustning för registrering av dessa deformationer, vilket skulle möjliggöra en mer objektiv bedömning av när deformationerna blir så stora att provningen bör avbrytas eller brott anses ha inträffat. I den aktuella studien görs denna bedömning okulärt, vilket medför ytterligare osäkerhet i resultaten.

Trots denna begränsning genomförs samtliga provningar med samma försöksuppställning och under likvärdiga förutsättningar. Resultaten bedöms därför fortfarande vara relevanta för jämförelse mellan väggtyperna, då studiens huvudsakliga fokus ligger på relativa skillnader i styvhet och bärförmåga snarare än på absoluta värden.



(a) Vägg 1



(b) Vägg 5

**Figur 6.1:** Deformation ut ur plan.

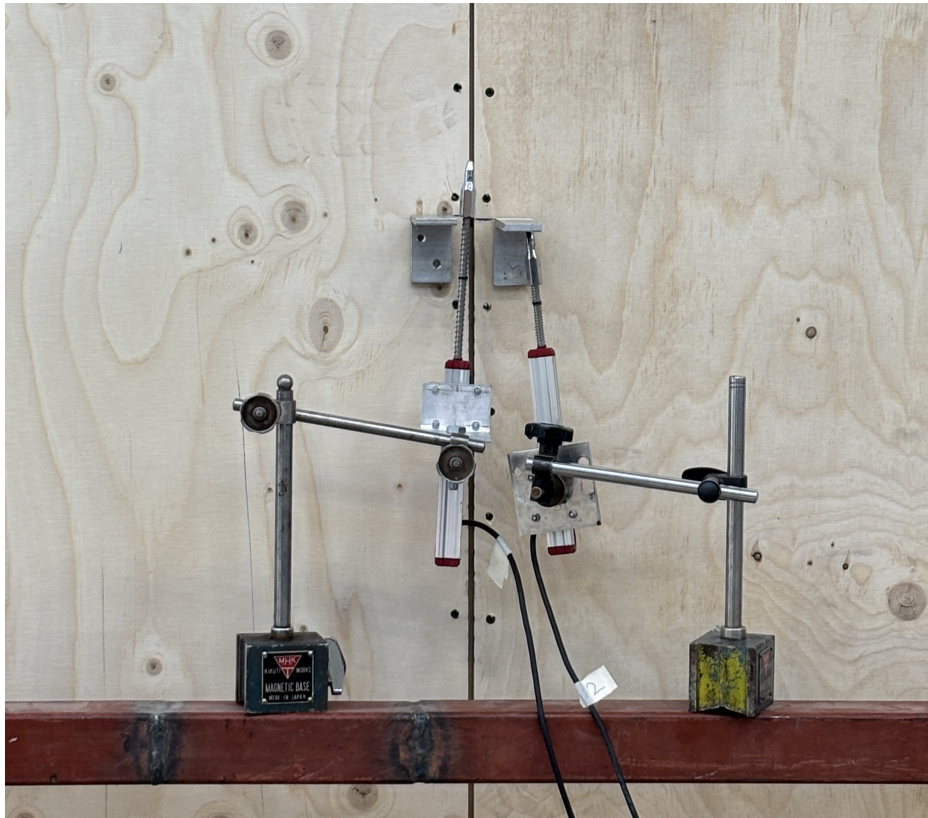
### Små metallvinklar

En ytterligare osäkerhetsfaktor i provningarna är att de metallvinklar som limmas på väggarna för avläsning av deformationsgivarna är för små, se figur 6.2. Vid större deformationer glider givarna därför utanför metallvinklarnas yta, vilket medför att deformationerna inte längre kan registreras korrekt.

Detta leder till att mätningarna periodvis behöver avbrytas för justering och återmontering av givarna. Följden blir att last-deformationskurvorna innehåller avbrott och att mätdata behöver korrigeras vid efterbearbetningen. Problemet påverkar främst givare 1–4, vilka i flera fall förlorar kontakten med metallvinklarna vid stora deformationer. Dessa mätserier bedöms därför ha begränsad tillförlitlighet och används inte vidare i den fördjupade analysen av skivornas relativa rörelser och deformationer.

I stället prioriteras data från givare 5 och 6, placerade vid hammarbandet respektive skivan i väggens övre vänstra hörn, då dessa bedöms ge mest relevant information om väggarnas globala styvhet och bärförmåga.

Återkommande återmontering av givarna introducerar samtidigt ytterligare osäkerheter i mätresultaten. När givarna lossnar uppstår avbrott i mätserierna som behöver sammanfogas i efterhand, vilket kan medföra mindre fel beroende på hur övergången mellan mätserierna hanteras. För givare 5 och 6, vars data används i den fortsatta analysen, kan detta påverka precisionen i de registrerade deformationerna och därmed även beräkningen av väggarnas styvhet.



**Figur 6.2:** Metallvinklar för deformationsmätning med givare som glidit av.

### Begränsat antal provningar per väggtyp

I denna studie genomförs endast en provning för respektive väggtyp, vilket utgör en begränsning vid tolkning och generalisering av resultaten. Resultaten för de enskilda provkropparna kan därför påverkas av slumpmässiga variationer i exempelvis materialegenskaper, monteringsutförande och lokala defekter i konstruktionen.

Eftersom endast ett försök utförs per väggtyp kan spridningen mellan olika provkroppar inte fastställas, och det är därmed svårt att avgöra i vilken utsträckning observerade skillnader beror på väggarnas utformning respektive naturliga variationer mellan enskilda prover.

För att erhålla mer tillförlitliga och statistiskt säkra resultat bör framtida studier omfatta flera provningar för varje väggtyp. Minst tre provningar per väggtyp bedöms vara nödvändiga för att möjliggöra en bättre bedömning av resultatens variation och tillförlitlighet.

## Fläkning i regler

Vid montering av väggarna uppstår fläkning i vissa av huvudstommens regler till följd av skruvinfästningarna. Skadorna uppkommer innan provningarna påbörjas och bedöms i vissa fall bidra till lokal instabilitet i konstruktionen, vilket kan påverka resultaten.

Under belastning av vägg 3 och vägg 4 observeras ytterligare fläkning i regeländarna, framför allt i vägg 3 där majoriteten av reglarna uppvisar omfattande sprickbildning, se figur 6.3. Detta kan vara en bidragande orsak till att vägg 4, med 70 mm installationsskikt, uppvisar något högre styvhet och brottlast än vägg 3 med 45 mm installationsskikt. Samtidigt bör risken för fläkning teoretiskt sett vara likvärdig för båda infästningsutförandena, eftersom fläkningen främst styrs av ändavståndet mellan skruv och regelände snarare än av regelns tjocklek. De observerade skillnaderna mellan väggarna kan därför bero på naturlig variation i materialet eller skillnad i materialvolymen.

Fläkningen bedöms sannolikt vara kopplad till relationen mellan skruvdimension och regeltjocklek. Dimensioneringen av skruvförbandens diameter utgår från Eurokods krav på minsta kant- och ändavstånd. I den aktuella studien valdes en relativt stor skruvdimension för att säkerställa tillräcklig kraftöverföring mellan komponenterna samt för att möjliggöra användning av samma skruvtyp som i huvudstommen. Detta innebär dock att skruven kan betraktas som något överdimensionerad i förhållande till båda regelutförandena, vilket sannolikt har bidragit till en ökad risk för fläkning i regeländarna, oavsett om installationsskiktet varit 45 eller 70 mm.

Motsvarande omfattande fläkning observerades inte i de övriga väggarna. Detta tyder på att fläkningen inte enbart kan förklaras av skillnader i infästningsutförande, utan att även variationer i materialegenskaper, träets naturliga sprickbildning eller lokala skillnader i belastningsfördelning kan ha påverkat sprickutvecklingen.



(a) Översta regeln



(b) Mittenregeln

**Figur 6.3:** Fläkning av regler i installationsskikt, Väg 3.

### Distanskloss ej använd

Precis som beskrivs i avsnitt 3.3.4 används ingen distanskloss mellan väggens syll och provriggens bas. Distansklossen är enligt standarden avsedd att möjliggöra fri rörelse hos skivbeklädnaden under skjuvning. Avsaknaden av distanskloss kan därför ha begränsat skivornas naturliga rörelse och därmed påverkat deras deformationsbeteende.

Under provningarna observeras dock inga tydliga effekter av detta för majoriteten av väggarna. För vägg 4 noteras däremot att skivan knäcks lokalt i den nedre delen, sannolikt till följd av att dess vertikala förflyttning begränsas av provriggens bas, se figur 6.4. Detta kan ha begränsat skivans möjlighet att deformeras fritt vid stora skjuvdeformationer, och användning av distanskloss bör därför rekommenderas vid framtida provningar.

Resultatet för vägg 4 bedöms trots detta inte ha påverkats i någon större omfattning, eftersom den lokala knäckningen uppstår sent i provningen, efter att väggen redan genomgått stora deformationer. Det lokala brottet kan dock ha reducerat skivans lokala styvhet i slutskedet av belastningen. För övriga väggtyper bedöms den uteblivna distansklossen inte ha haft någon betydande påverkan på resultaten.



**Figur 6.4:** Deformation av plywoodskiva, Vagg 4.

### **Två materialbeställningar**

En ytterligare osäkerhetsfaktor i studien är att materialet beställdes i två separata omgångar. Variationer i lagringstid och lagringsmiljö mellan leveranserna kan ha påverkat materialens fuktkvot och därmed även deras mekaniska egenskaper. Eftersom trä är ett hygroskopiskt material varierar styvhet och hållfasthet med fuktkvoten, där lägre fuktkvot generellt medför högre styvhet och hållfasthet [32].

Då fuktkvoten inte mättes före provningarna kan eventuella variationer mellan materialleveranserna inte kvantifieras eller beaktas i analysen. Detta medför en viss osäkerhet vid jämförelse mellan provkropparna. Samtidigt bedöms eventuella skillnader i fukt-tillstånd ha varit begränsade och därmed sannolikt haft liten eller ingen påverkan på de uppmätta resultaten.

## 6.3 Reflektion kring provningsmetodik

Provningsmetodiken bedöms övergripande vara lämplig för att undersöka hur olika utformningar av installationsskikt påverkar träregelväggars skjuvstyvhet och bärförmåga. Genom att samtliga provkroppar utformas med samma huvudstomme och att endast installationsskiktets utformning varieras, möjliggörs en relativt tydlig jämförelse mellan de olika väggtyperna.

Studien visar samtidigt att väggarnas beteende är mer komplext än vad som initialt antogs. Flera deformationstyper uppstår parallellt i konstruktionen, både i skiv-regelförbanden och i anslutningarna mellan installationsskikt och huvudstomme. Detta innebär att väggarnas globala beteende påverkas av samverkan mellan flera konstruktionsdelar, vilket försvårar isoleringen av enskilda parametrars påverkan.

Provningsuppställningen medför även vissa begränsningar. De stora deformationerna ut ur plan, fallande deformationsgivare och avsaknaden av upprepade provningar per väggtyp medför osäkerheter i resultaten. Trots detta bedöms metodiken vara tillräcklig för studiens huvudsakliga syfte, då resultaten konsekvent visar tydliga skillnader mellan väggtyperna. Studien bedöms därför ge en relevant och jämförande bild av hur installationsskikt påverkar väggarnas horisontella bärförmåga och styvhet.

## 6.4 Implikationer

Resultaten från denna studie visar på flera praktiska och teoretiska implikationer för dimensionering och utformning av träregelväggar med installationsskikt.

Studien visar att skivmaterial monterat på installationsskikt fortfarande bidrar till väggarnas skjuvstyvhet och bärförmåga, trots att skivan inte är direkt infäst i huvudstommen. Denna kapacitet är lägre än för referensväggen med skiva monterad direkt mot stommen, men resultaten visar att en betydande del av skjuvkapaciteten fortfarande kan tillgodoräknas i väggens horisontalstabiliserande funktion. Detta tyder på att dagens dimensioneringspraxis, där skivor monterade på installationsskikt ofta försummas helt, i vissa fall kan vara konservativ.

Om kapaciteten hos skivmaterial monterat på installationsskikt kan beaktas vid dimensionering av horisontalstabiliserande väggar, kan det skapa förutsättningar för en mer materialeffektiv väggutformning. I vissa fall skulle behovet av dubbla skivlager eller andra lokala förstärkningsåtgärder kunna minska, eftersom skivan på installations-skiktet bidrar med en inte obetydlig andel av väggens totala skjuvkapacitet. Genom att tillgodoräkna denna kapacitet vid dimensionering kan den erforderliga mängden skivmaterial i väggen potentiellt reduceras, vilket bidrar till en mer resurseffektiv konstruktion.

För byggnadens stabiliseringssystem kan ett bättre utnyttjande av väggarnas faktiska skjuvkapacitet innebära att behovet av kompletterande stabiliserande system minskar. Om en större andel av horisontallasterna kan tas upp av de stabiliserande väggarna

genom skivverkan, kan behovet av kompletterande stabiliserande system, såsom vindkryss eller dragstag i stål, minska. Detta kan leda till både lägre materialkostnader och minskad klimatpåverkan genom reducerad materialanvändning och lägre andel stål i konstruktionen, vilket ligger i linje med byggbranschens ökade fokus på resurseffektiva konstruktioner och minskat klimatavtryck.

Den tydliga skillnaden i skjuvkapacitet mellan väggar med vertikala respektive horisontella installationsreglar visar att installationsskiktets utformning har stor betydelse för väggarnas beteende. Resultaten indikerar därmed att regelorienteringen är en viktig parameter vid projektering av stabiliserande träregelväggar. För konstruktioner med höga krav på horisontalstabilitet kan vertikala installationsreglar med syll och hammarband därför vara en fördelaktig lösning, eftersom de möjliggör en effektivare lastöverföring och bättre infästningsförutsättningar för skivmaterialet.

De framtagna resultaten för relativ bärförmåga i avsnitt 7 kan utgöra underlag för vidare utveckling av beräkningsmodeller och framtida dimensioneringsprinciper för väggar med installationsskikt. Resultaten kan även bidra till att minska användningen av konservativa antaganden vid projektering och därmed möjliggöra en mer effektiv dimensionering av horisontalstabilitet i träregelväggar.

## 6.5 Förslag till vidare studier

- För att minska osäkerheter i framtida provningar bör styvare mothåll användas för att begränsa deformationer ut ur planet. Dessa deformationer bör även mätas kontinuerligt med särskilda givare för att möjliggöra kontroll av när deformationerna börjar påverka provningsresultaten. Provningsen kan vid behov avbrytas om en fördefinierad gräns överskrids.
- Flera provningar bör genomföras för varje väggtyp för att minska påverkan av slumpmässiga variationer i material och utförande samt möjliggöra en bättre bedömning av resultatens variation och tillförlitlighet.
- Vidare studier bör undersöka hur variationer i centrumavstånd mellan fästdon påverkar väggarnas skjuvstyvhet och bärförmåga för olika typer av installations-skikt.
- Framtida studier bör även undersöka andra typer av skivmaterial, exempelvis gipsskivor eller OSB-skivor, för att analysera hur materialets styvhet och hållfasthet påverkar väggarnas beteende.
- Effekten av vertikal last bör studeras vidare, eftersom provningarna i denna studie genomförs utan samtidig vertikal belastning. Detta kan ha betydelse för lastöverföring, förbandens beteende och väggarnas globala stabilitet.
- Numeriska modeller och finita elementanalyser bör utvecklas och jämföras mot experimentella resultat för att möjliggöra vidare utveckling av dimensioneringsmodeller för väggar med installationsskikt.

- Vidare forskning bör även undersöka hur resultaten påverkas i fullskaliga byggnadssystem där omkringliggande stomdelar och bjälklag kan bidra till att begränsa deformationer och förändra lastfördelningen i väggarna.

## 7 Slutsatser

- Väggar med installationsskikt uppvisar en reducerad skjuvstyvhets och bärförmåga jämfört med väggar där skivmaterialet monteras direkt mot huvudstommen.
- Den reducerade bärförmågan och skjuvstyvhets hos väggar med installationsskikt bedöms främst vara kopplad till förändrade lastvägar och infästningsförhållanden, både i skivans infästning och i förbanden mellan installationsskikt och huvudstomme.
- För de undersökta väggarna med horisontella installationsreglar visar en ökad regeldimension ingen tydlig påverkan på vare sig skjuvstyvhets eller bärförmåga.
- Installationsskiktets utformning har stor betydelse för väggarnas beteende. Väggar med vertikala installationsskiktsreglar, med syll och hammarband, uppvisar betydligt högre skjuvstyvhets och bärförmåga än väggar med horisontella installationsreglar.
- Väggar med vertikala installationsskiktsreglar uppvisar en relativ bärförmåga på 64 % och en relativ skjuvstyvhets på 80 % jämfört med referensväggen utan installationsskikt.
- Väggar med horisontella installationsreglar uppvisar en relativ bärförmåga på 37 % och en relativ skjuvstyvhets på 42 % jämfört med referensväggen utan installationsskikt.
- Resultaten tyder på att den elastiska beräkningsmetoden enligt Carling [2] för skivor monterade på horisontella reglar kan vara tillämpbar vid bestämning av bärförmågan hos väggar med horisontella installationsreglar.
- Resultaten för vägg 5 indikerar en partiell samverkan mellan skivorna, där skivan direkt mot huvudstommen är primärt lastbärande och cirka 75 % av den yttre skivans kapacitet kan tillgodoräknas konstruktionen vid horisontella installationsreglar.
- Studien visar att dagens dimensioneringspraxis, där skivmaterial monterat på installationsskikt ofta försummas helt vid dimensionering av horisontalstabilitet, i vissa fall kan vara konservativ.

# Litteratur

- [1] *Träkonstruktioner - Styrka och styvhet hos skivbeklädda träregelement - Proving*, SS-EN 594:2011, Svenska institutet för standarder, Stockholm, Sverige, 2011. Tillgänglig: <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsdelar/vaggar-mellanvaggar-fasader/ssen5942011/>.
- [2] O. Carling, *Dimensionering av träkonstruktioner*, Stockholm, Sverige: AB Svensk Byggtjänst, 1992.
- [3] Svenskt Trä, 'Ny undersökning visar hur Sverige bygger,' 2026. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/om-oss/pressmeddelande/ny-undersokning-visar-hur-sverige-bygger/> (hämtad: 2026-05-21).
- [4] K. Sandin, *Praktisk byggnadsfysik*, Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2010.
- [5] Svenskt Trä, 'Stabiliseringssystem för flervåningshus,' 2018. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/publikationer-start/tidningen-tra/2018-3/stabiliseringssystem-for-flervaningshus/> (hämtad: 2026-05-18).
- [6] Svenskt Trä, *Dimensionering av träkonstruktioner – Del 1: Projektering av träkonstruktioner*, 3. uppl. Stockholm, Sverige: Föreningen Sveriges Skogsindustrier / Svenskt Trä, 2019.
- [7] *Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-1: Allmänt - Gemensamma regler och regler för byggnader*, SS-EN 1995-1-1:2004, Svenska institutet för standarder, Stockholm, Sverige, 2004. Tillgänglig: <https://www.sis.se/produkter/construction-materials-and-building/construction-industry/technical-aspects/ssen1995112004/>.
- [8] TräGuiden, 'Val av stomsystem, produktionsmetod och installationer,' 2015. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/projektering-av-trahus---generellt/projektering-av-trahus---generellt/val-stomsystem-produktionsmetod/> (hämtad: 2026-03-13).
- [9] Svenskt Trä, 'Byggsystem,' u.å. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/byggsystem/> (hämtad: 2026-05-12).
- [10] H. Lidelöw, 'Träbyggnadssystem för bostäder,' i *Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1*, 3. uppl. Stockholm, Sverige: Svenskt Trä, 2019, kap. Kap. 8.
- [11] B. Strandberg och F. Lavén, *Bygga hus: illustrerad bygglära*, 5. uppl. Stockholm, Sverige: Svensk Byggtjänst, 2021.
- [12] Svenskt Trä, 'Småhus och flervåningshus,' u.å. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/olika-trakonstruktioner/smahus-och-flervaningshus/> (hämtad: 2026-02-20).
- [13] TräGuiden, 'Generell beskrivning av lättbyggnadsteknik,' 2015. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/planering/planera-ett-trabygge/byggsystem/lattbyggnadsteknik/generell-beskrivning-av-lattbyggnadsteknik/> (hämtad: 2026-05-12).

- [14] Gyproc, ‘Gyproc handbok 10, STATIK-SKIVVERKAN ELASTISK METOD,’ 2023. Online. Tillgänglig: <https://www.gyproc.se/documents/handbok/hb10-statik-skivverkan.pdf> (hämtad: 2026-01-29).
- [15] TräGuiden, ‘Stabiliserande system,’ 2020. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/stomme/stomme/stabiliserande-system/> (hämtad: 2026-02-10).
- [16] R. Crocetti, ‘Horisontalstabilisering,’ i *Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1*, 3. uppl. Stockholm, Sverige: Svenskt Trä, 2019, kap. Kap. 6.
- [17] TräGuiden, ‘Ytterväggar,’ 2021. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/stomme/vaggar/yttervaggar/> (hämtad: 2025-05-21).
- [18] B. Källsner och U. A. Girhammar, *Horisontalstabilisering av träregelstommar: Plastisk dimensionering av väggar med träbaserade skivor*, Stockholm, Sverige: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2008.
- [19] BYGG.se, ‘Ytterväggen – inifrån och ut,’ u.å. Online. Tillgänglig: <https://bygg.se/yttervaggen-inifran-och-ut/> (hämtad: 2026-01-29).
- [20] Svenskt Trä, ‘Träbyggsystemen i byggprocessen,’ u.å. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/bygga-i-tra/trabyggsystemen-i-byggprocessen/> (hämtad: 2026-02-15).
- [21] P. Brzyski, P. Kosiński och M. Nadratowska, ‘Thermal bridge occurrence in straw-bale timber frame walls’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, årg. 710, nr 1, s. 012 029, 2019-12. DOI: 10.1088/1757-899X/710/1/012029.
- [22] TräGuiden, ‘Plywood,’ 2021. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/om-tra/material-et-tra/trabaserade-produkter/skivmaterial1/plywood/> (hämtad: 2026-01-27).
- [23] Svenskt Trä, ‘Träbaserade skivmaterial,’ u.å. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/bygg-med-tra/byggande/tra-och-trabaserade-produkter/trabaserade-skivmaterial/> (hämtad: 2026-01-27).
- [24] CEOS Fritzo AB, ‘Plywood – kunskap,’ u.å. Online. Tillgänglig: <https://ceos.se/plywood-kunskap> (hämtad: 2026-01-28).
- [25] WISA Plywood, ‘Så här väljer du rätt plywoodprodukt,’ 2023. Online. Tillgänglig: <https://www.wisaplywood.com/sv/nyheter-och-artiklar/stories/2023/sa-har-valjer-du-ratt-plywoodprodukt/> (hämtad: 2026-03-16).
- [26] Svenskt Trä, ‘Träets fuktrörelser,’ u.å. Online. Tillgänglig: <https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/tra-och-fukt/traets-fuktrorelser/> (hämtad: 2026-04-10).
- [27] Svenskt Trä, ‘Bra att veta om träskivor,’ 2021. Online. Tillgänglig: <https://www.byggbeskrivningar.se/allmant/bra-att-veta-om-traskivor/?Cid=107> (hämtad: 2026-04-10).
- [28] *MATLAB*, version R2025a, [Mjukvara], Natick, Massachusetts, USA: MathWorks, 2025. Online. Tillgänglig: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (hämtad: 2026-05-15).

- [29] TräGuiden, 'Plywood,' 2019. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/konstruktion/dimensionering/hallfasthet-och-barformaga/karakteristisk-hallfasthet/plywood/> (hämtad: 2026-05-04).
- [30] Svenskt Trä, *Dimensionering av träkonstruktioner: Del 2 – Regler och formler enligt Eurokod 5*, 3. uppl. Stockholm, Sverige: Föreningen Sveriges Skogsindustrier / Svenskt Trä, 2019.
- [31] *Produktdatablad för träskruv*, Malmö, Sverige: Grabber, u.å. Online. Tillgänglig: <https://media-prod.beijerflow.com/media/medias/docus/23/13404713.pdf> (hämtad: 2026-05-11).
- [32] TräGuiden, 'Fukt och lastvaraktighet,' 2021. Online. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/konstruktion/takstolshandboken/tra-och-miljo/2.1-tra-och-virkeskvaliteter/2.1.5-fukt-och-lastvaraktighet/> (hämtad: 2026-04-20).

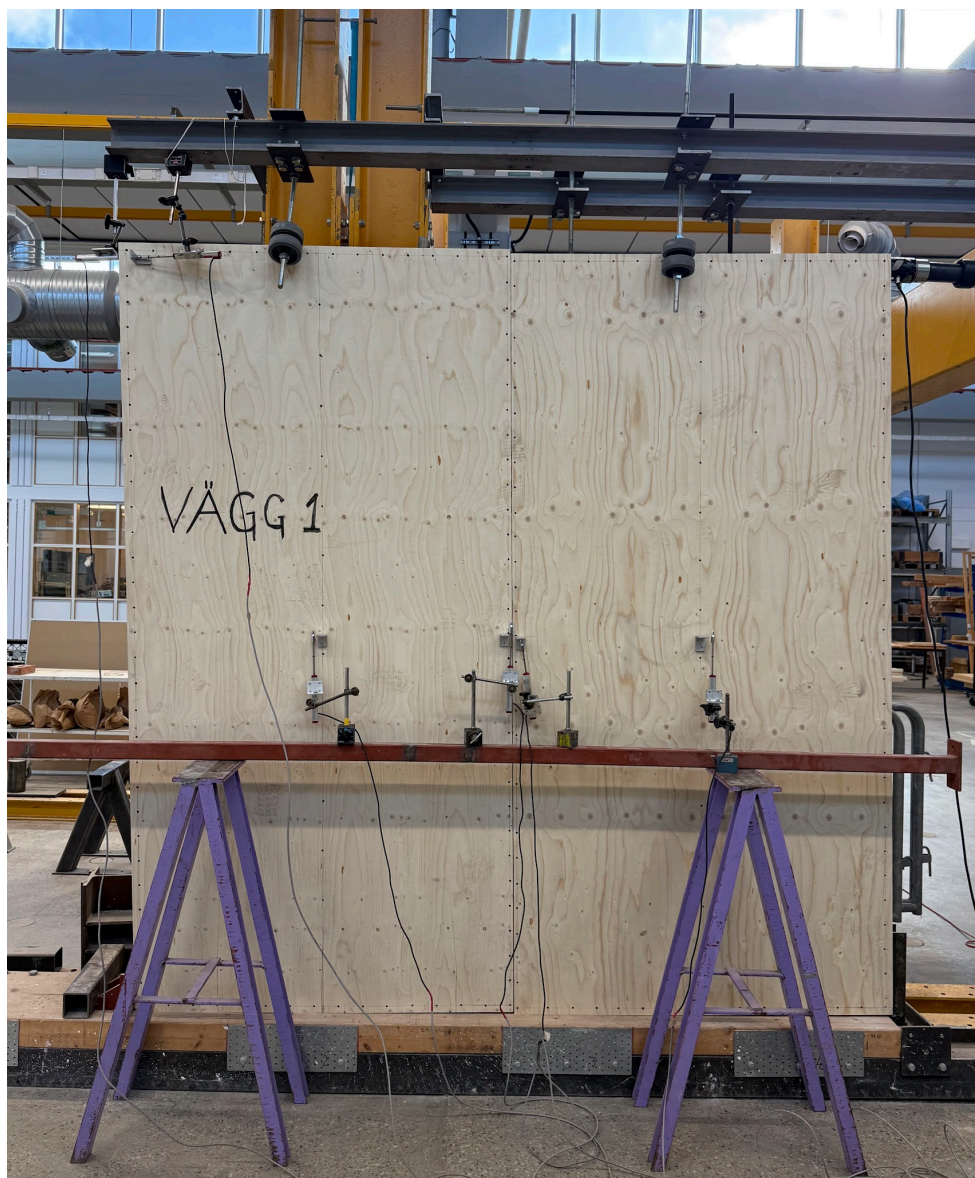


# Bilagor

## Bilaga A – Vagg 1 före provning



## Bilaga B – V ägg 1 efter provning



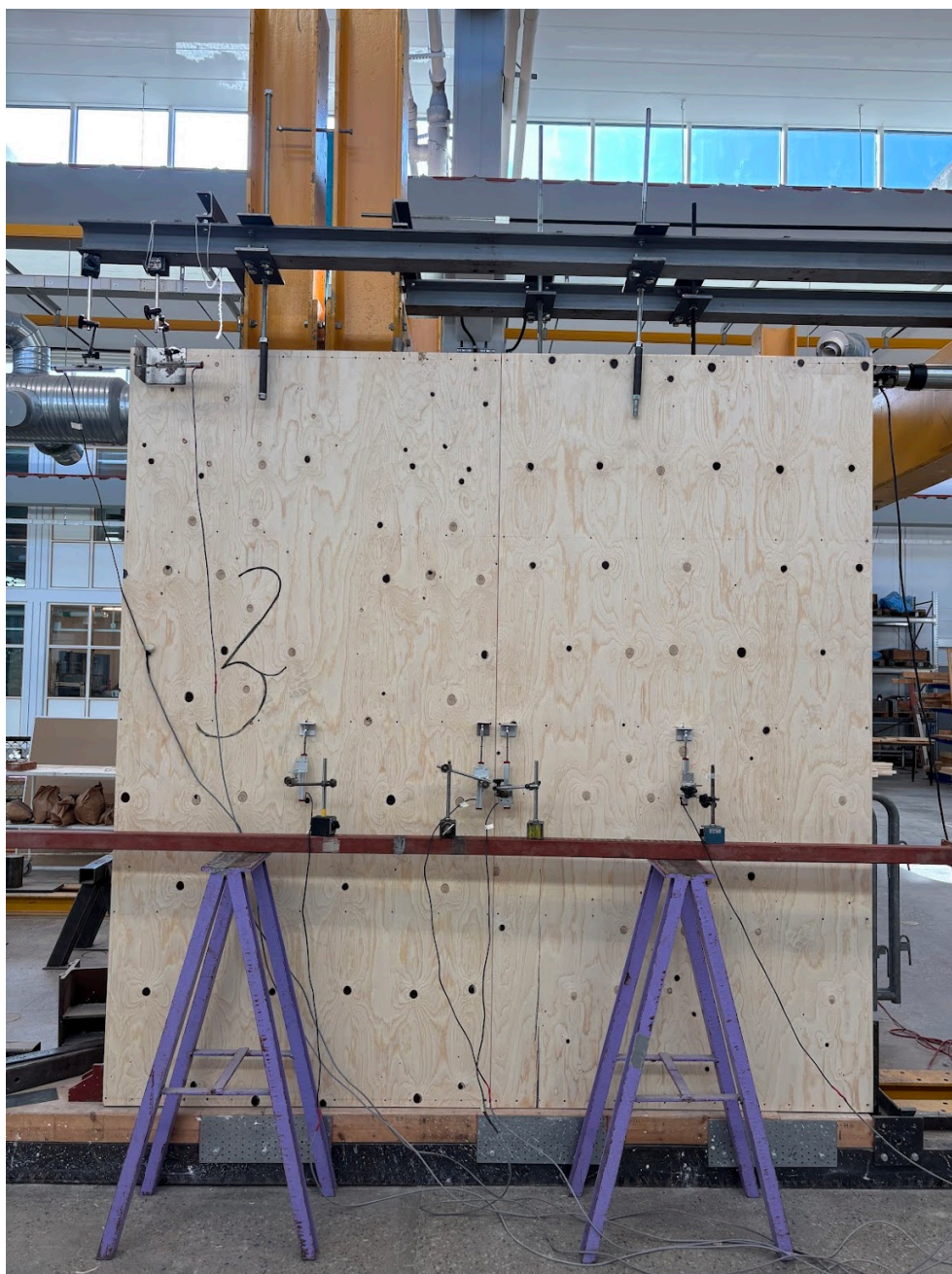
## Bilaga C – Vagg 2 före provning



## Bilaga D – Väg 2 efter provning



## Bilaga E – Vegg 3 före provning



## Bilaga F – Väg 3 efter provning



## Bilaga G – Vagg 4 före provning



## Bilaga H – Väg 4 efter provning



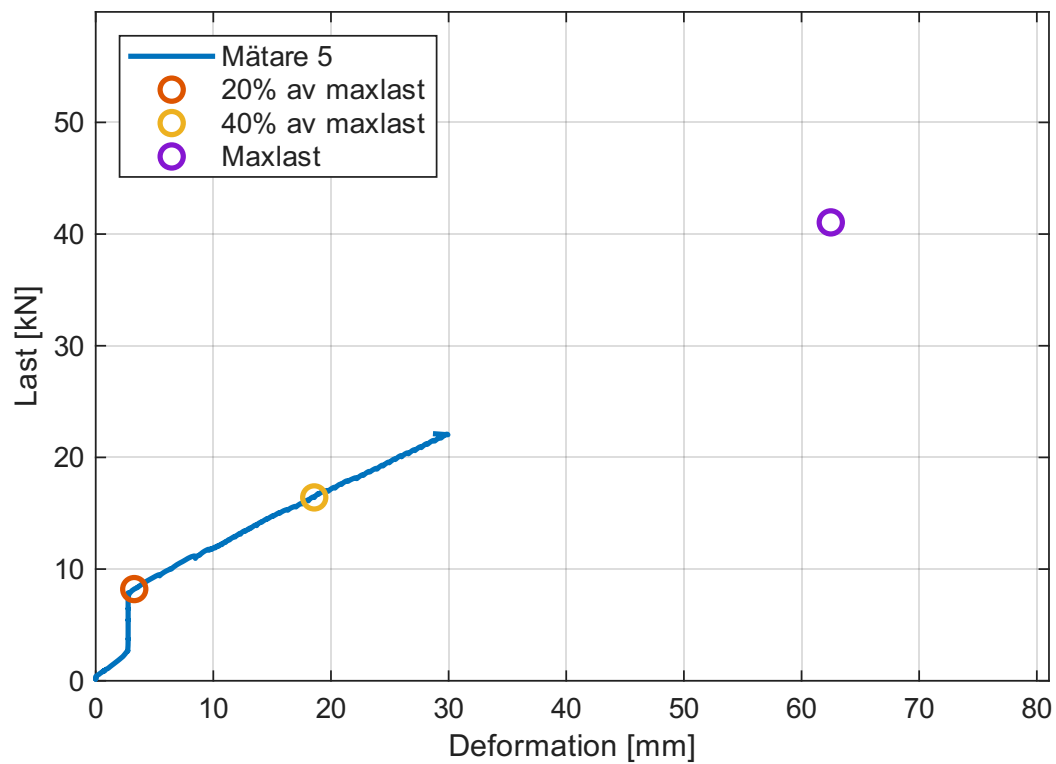
## Bilaga I – Vagg 5 före provning



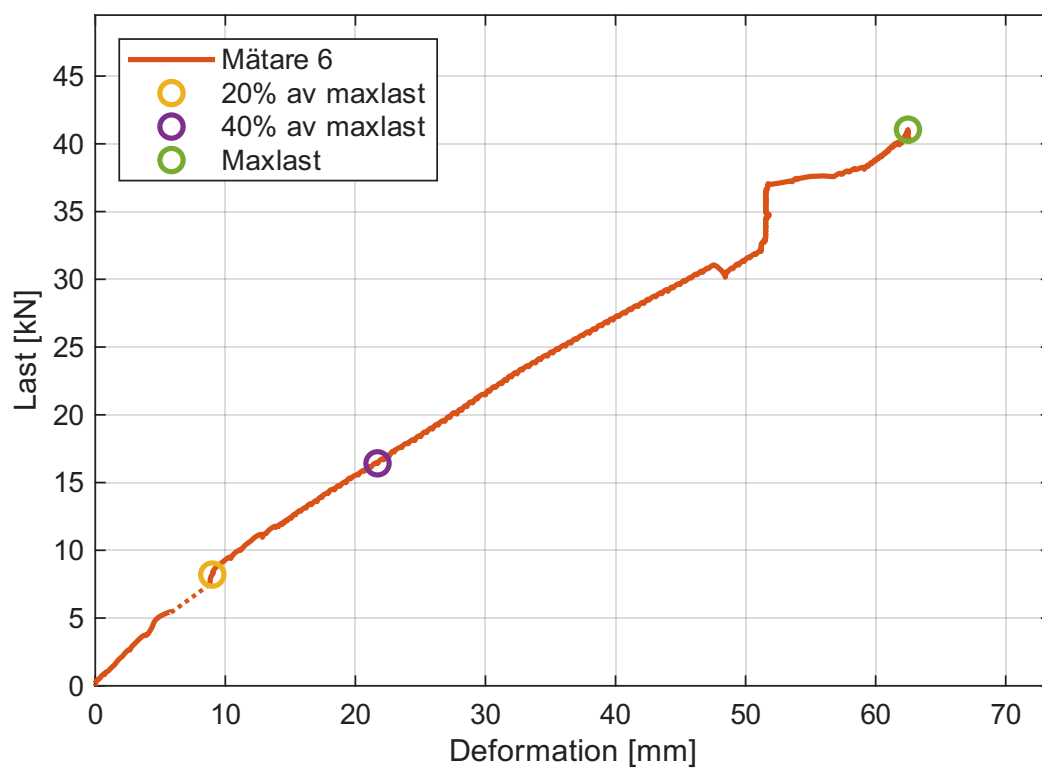
## Bilaga J – Väg 5 efter provning



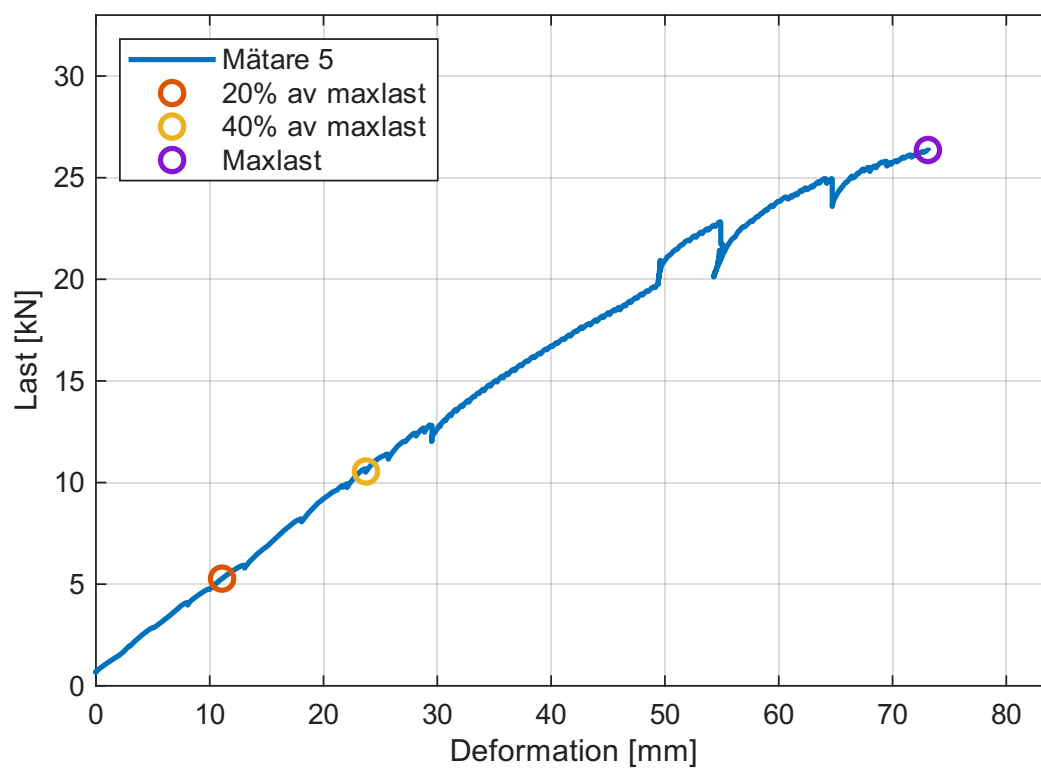
## Bilaga K – Last-deformation för Vagg 1 - givare 5.



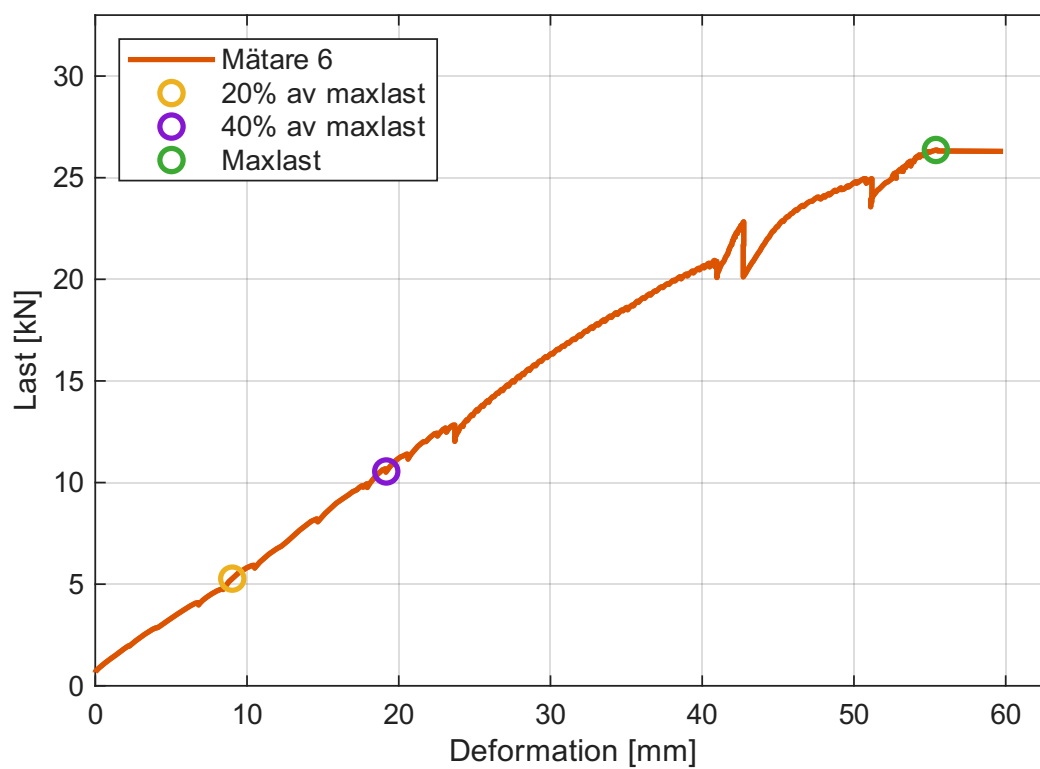
## Bilaga L – Last-deformation för Väg 1 - givare 6.



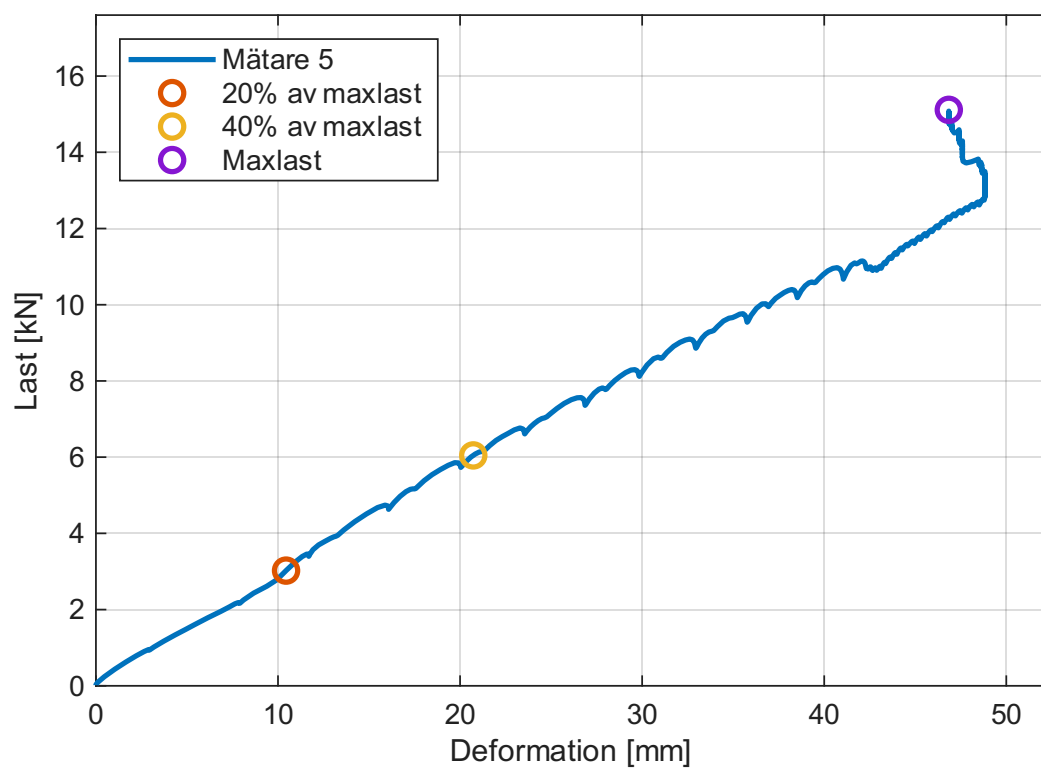
## Bilaga M – Last-deformation för Vagg 2 - givare 5.



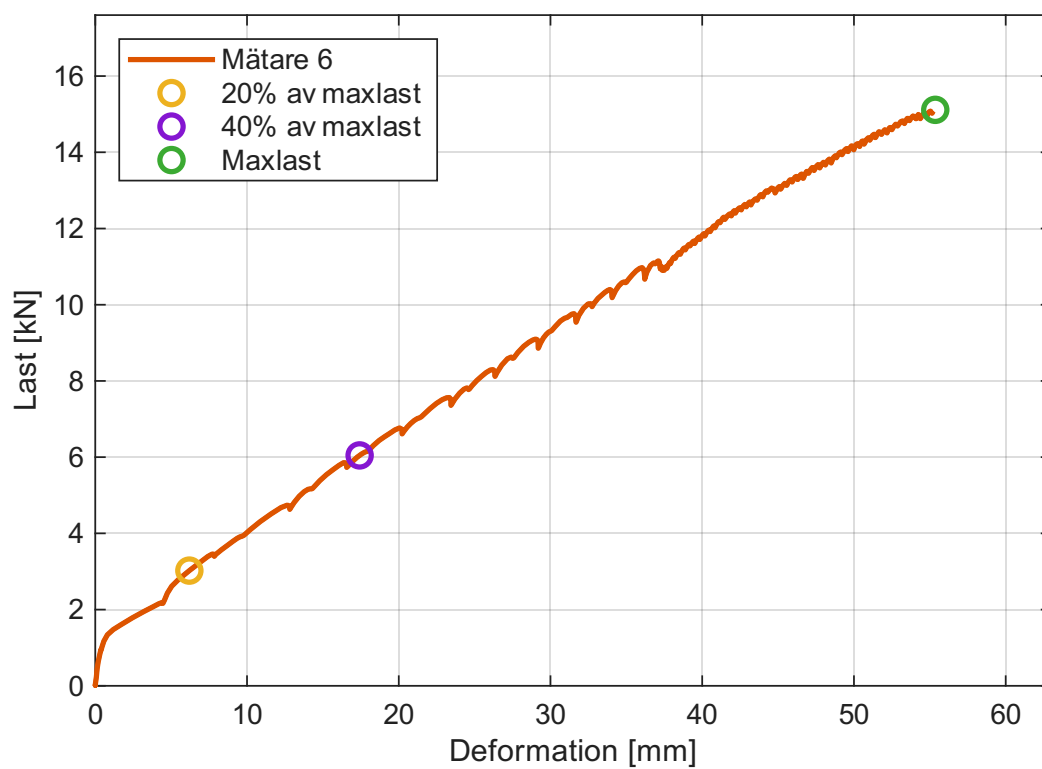
## Bilaga N – Last-deformation för Väg 2 - Givare 6.



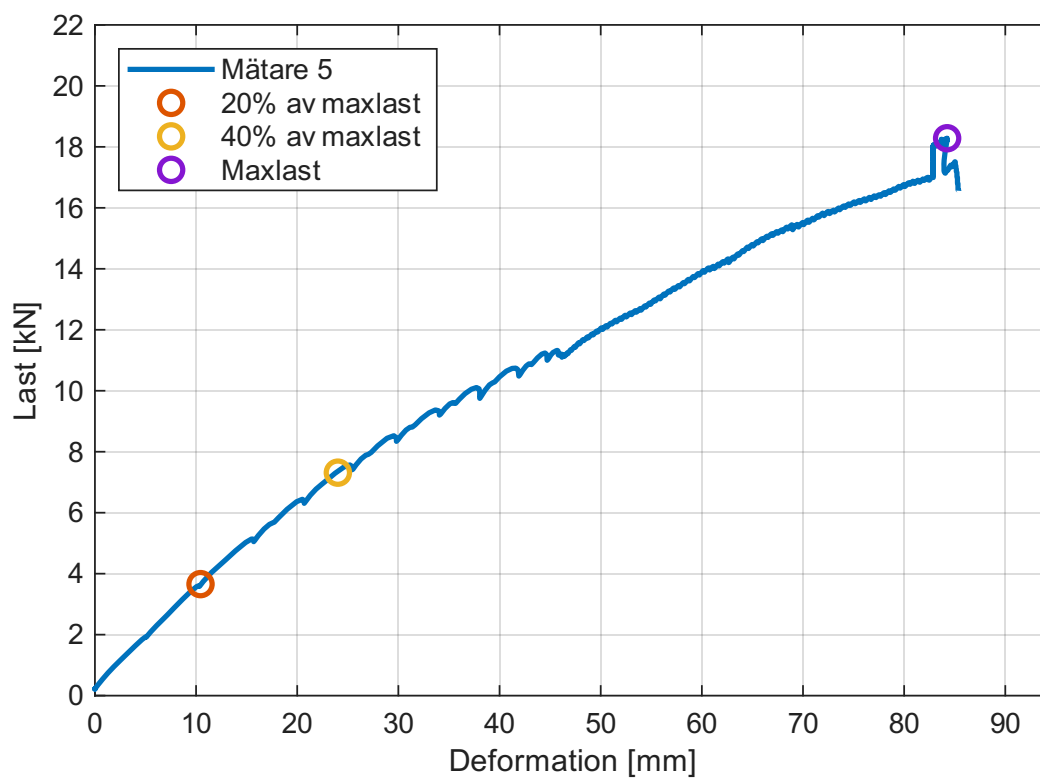
## Bilaga O – Last-deformation för Väg 3 - givare 5.



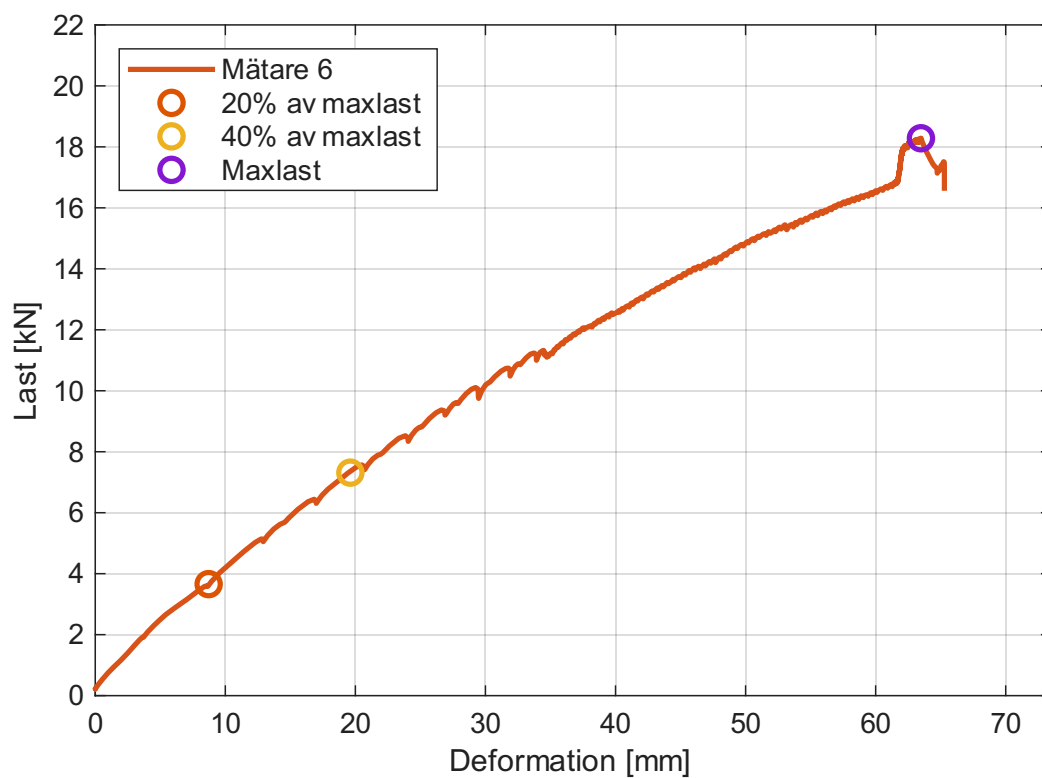
## Bilaga P – Last-deformation för Väg 3 - givare 6.



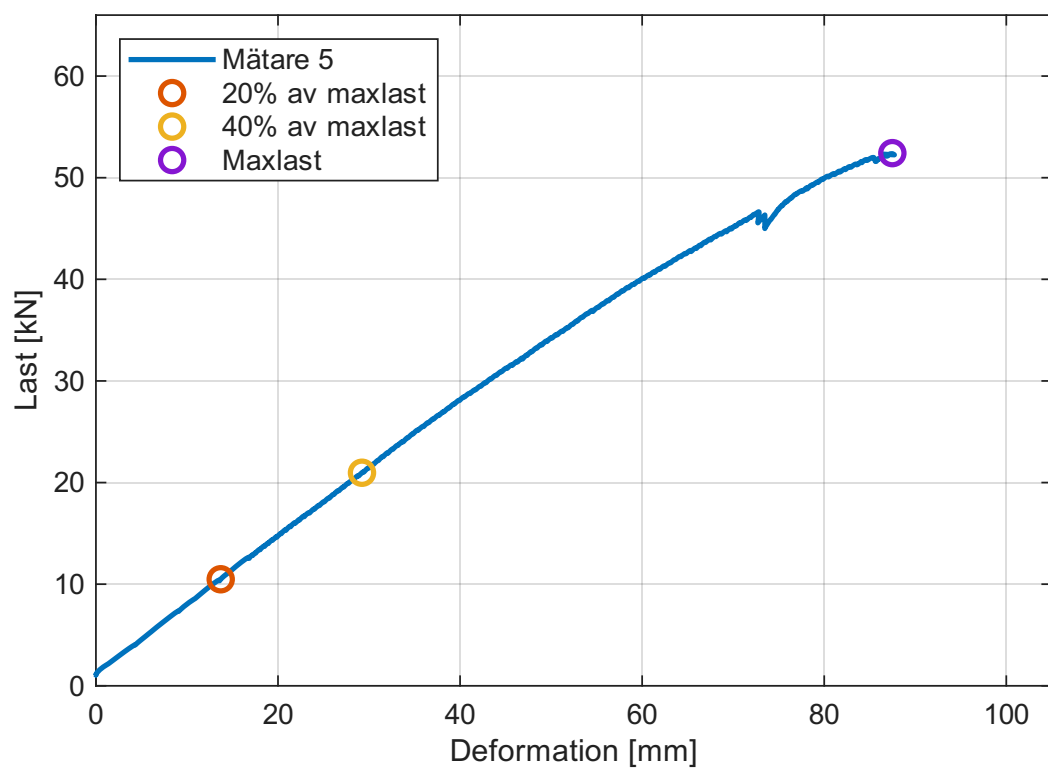
## Bilaga Q – Last-deformation för Vagg 4 - givare 5.



## Bilaga R – Last-deformation för Väg 4 - givare 6.



## Bilaga S – Last-deformation för Väg 5 - givare 5.



## Bilaga T – Last-deformation för Vagg 5 - givare 6.

