



# FE-modell av en volymmödel

spännings- och stabilitetsanalys

Förstudie

*Författare:*

Sigurdur Ormarsson, Lnu

Marie Johansson, SP

Datum: 2017-01-09

## Sammanfattning

Trä är ett mycket användbart, prisvärt och förnyelsebart material som rätt utnyttjat har en extremt hög industriell potential inom området byggnadskonstruktion. Det finns ett stort intresse i Sverige att utforska nya sätt att utnyttja trä som huvudlastbärande material i olika typer av flervåningshus. Detta är en stor utmaning för träbyggnadsindustrin, forskare och konstruktörer eftersom det inte finns någon traditionell beräknings- och designprocedur för dessa typer av byggnader.

I denna förstudie har en parametrisk FE-modell framtagits för att studera strukturmekaniska egenskaper (deformationer och styvhet) hos en typisk volymmodul som används för byggande av flerbostadshus i trä. Modellen är uppbyggd av olika typer av strukturelement (fjädrar, balk- och skalelement) för att den skall vara så snabb och flexibel som möjligt. Modellen inkluderar ett stort antal konnektor- och kopplingselement för att på ett optimalt sätt kunna simulera alla spik-, skruv- och bultförband i modulen. Modellen är också ganska flexibel eftersom den är parameterstyrd via ett antal geometriska parametrar. Modellen har använts för att studera globala deformationer och styvhetsegenskaper hos olika vägg- och volymelement när de belastas med olika mekaniska laster. Att få en uppfattning om hur styvhetsegenskaper hos de mekaniska förbanden (svaga delar i konstruktionen) påverkar det globala deformationsbeteendet hos olika vägg- och volymelement har varit en viktig del i denna förstudie.

Modellen visar ett deformationsbeteende hos vägg- och volymelementen verkar rimliga men en experimentell verifiering återstår. Ett exempel på resultat är att väggelement som belastas i planskjuvning har en tydlig tendens att böja ut ur planet eftersom det finns gipsskiva enbart på insidan av regelstommen. Studien visar också att för volymmoduler med en gles skruvförbindning mellan vägg- och bjälklagselementen uppkommer stora gliddeformationer mellan elementen. En av de viktigaste slutsatser från denna förstudie är att det gick att skapa en snabb och effektiv strukturmekanisk tredimensionell FE-modell för den här typen av konstruktion. Beräkningstiden för en volymmodul var endast 5.5 minuter på en vanlig laptop computer. Dessa resultat visar därför att det finns goda förutsättningar för att kunna simulera och analysera hela flerbostadshus inom rimliga beräkningstider.

# Innehåll

1	Introduktion	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Syfte	5
1.3	Mål	5
1.4	Projektdeltagare	5
2	Modellering	6
2.1	Simulering av ett väggelement	6
2.2	Simulering av en väggmodul (4 väggar)	11
2.3	Simulering av en hel volymmodul	12
3	Slutsatser och fortsatta studier	15

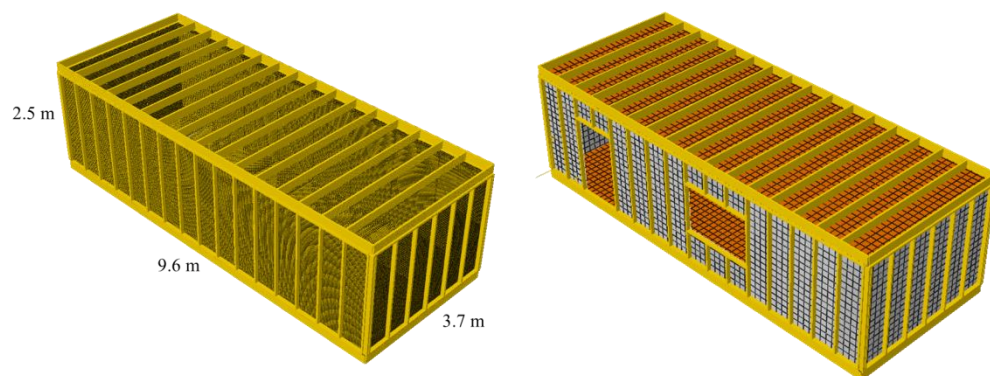
# 1 Introduktion

## 1.1 Bakgrund

Skogen är en av de viktigaste råvaruresurserna i Sverige och skogsbruket har en stor betydelse för vår omställning till en bioekonomi. En stark trämanufakturindustri är en mycket viktig parameter för att kunna bedriva ett lönsamt skogsbruk då så mycket som 75 % av skogsägarens vinst är kopplad till sågade trävaror. I Sverige finns ca 8 000 företag inom sektorn för trärelaterade produkter, de omsätter 98 miljarder kronor och har ca 44 000 anställda. Den genomsnittliga prisbilden för olika typer av trävaror i Sverige är t.ex. 2 000 kr/m<sup>3</sup> för sågat trä, 4 000 kr/m<sup>3</sup> för limträbalkar och ca 15 000 kr/m<sup>3</sup> för trähus [1]. Detta visar på en stor potential för ökning av förädlingsvärdet hos träprodukter. Ett ökat förädlingsvärde behöver i sig inte betyda ökad lönsamhet men det innebär minskad sårbarhet och fler arbetstillfällen i landet.

Sverige har för närvarande en stor bostadsbrist och Boverkets senaste prognos säger att fram till 2025 behövs 710 000 lägenheter byggas [2]. Byggandet av prefabricerade volymmoduler i trä för flerbostadshus är en industrigren som nu snabbt ökar sin kapacitet. En stor fördel med den här byggtekniken är att den är högt prefabricerad och monteringen på plats går snabbt jämfört med andra mer traditionella byggmetoder. Detta gör att modulbyggandet utförs under välkontrollerade former i fabrik och själva monteringen i sig påverkas mycket begränsat av regn och fukt. En stor del av det trämaterial som exporteras idag består fortfarande av sågade trävaror med lågt förädlingsvärde. Men på sikt skulle prefabricerade volymmoduler i trä också kunna bli en viktig exportvara till i första hand länder i Europa.

Ett flertal leverantörer som har levererat volymelement till främst enfamiljsbostäder är nu på väg att utöka sin produktion också till flerbostadshus i flera våningar. Ett trävolymhus på 4-6 våningar belastas, både vertikalt och horisontellt, med mycket större laster än ett 2-våningshus. Detta gör att vissa delar av konstruktionen måste göras om och förstärkas, bland annat rörande stabilitet för horisontella laster. Vindlasten är till exempel ca 2 ggr större i toppen av en 6-våningsbyggnad än i toppen på en 2-våningsbyggnad. Eftersom denna typ av konstruktioner är ganska komplexa samtidigt som det också står mycket på spel om de skulle kollapsa är det av ett stort



**Figur 1.** Exempel på två volymelement som har modellerats i denna förstudie

intresse att utveckla numeriska modeller för att bättre kunna förutsäga hur dessa byggnader skulle uppföra sig när de utsätts för olika typer av statiska och dynamiska laster.

I denna förstudie finansierad av Smart Housing Småland och OBOS Sverige AB har en första version av en FE-modell för en volymmodul tagits fram. Figur 1 visar exempel på två volymmoduler som har modellerats i denna studie.

## 1.2 Syfte

Syftet med förstudien var att undersöka om det är möjligt att använda datormodeller för att förutsäga strukturmekaniska beteenden hos typiska volymmoduler som används för byggande av modulbaserade flerbostadshus i trä. Projektet är också ett led i att undersöka möjligheter att utveckla simuleringsmodeller som skulle kunna användas i framtiden för design i digital miljö innan skapande av skarpa prototyper/byggnader.

## 1.3 Mål

Målet med förstudien var att skapa en flexibel och snabb tredimensionell FE-modell av en typisk volymmodul som används för trähusbyggande. För att analysera volymmodulens tredimensionella beteende på bästa sätt så har alla spik- och skruvförband och tillhörande excentriciteter inkluderats (på ett simplificerat sätt) i modellen. Modellen skall kunna användas för att studera hur olika parametrar påverkar volymelementets globala styvhet. Modellen skall också kunna visa en approximativ kraft- och spänningsvariation inom volymelementet. Det kan användas för att studera var de största spänningarna uppkommer i strukturen för att få en uppfattning om elementets bärförmåga när det utsätts för olika belastningskombinationer.

## 1.4 Projektdeltagare

Projektet har genomförts i samverkan mellan trähusproducenten OBOS Sverige AB (Carl-Johan Sigfridsson och Leif Isacson), Linnéuniversitetets institution för byggt teknik (Sigurdur Ormarsson) och SP (Marie Johansson). Ormarsson har skapat simuleringsmodellen i den kommersiella programvaran ABAQUS. Modellen har utvecklats i samverkan med Johansson och med hjälp av ritningsunderlag från OBOS Sverige AB.

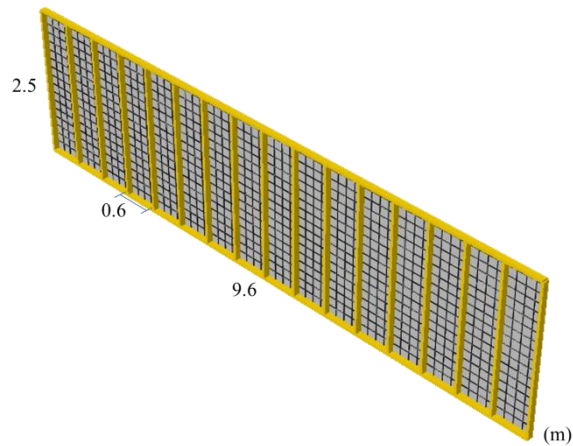
## 2 Modelling

Ett volymentelement i trä är en komplex tredimensionell konstruktion som består av många mindre element (reglar, kortlingar, balkar, skivor, fönster, dörrar osv.) som kopplas ihop på många olika sätt med mekaniska förband såsom spikförband, skruvförband och olika stålbeslagsförband. För att kunna studera det globala strukturmekaniska beteendet hos en volymmodul när den utsätts för olika mekaniska laster har en tredimensionell FE-modell för en typisk (men till viss del förenklad) volymmodul i trä tagits fram i denna förstudie.

Eftersom FE-modellen är en ganska komplex så presenteras den i tre delar. I första delkapitlet presenteras modellering av ett fristående väggelement. Där beskrivs de mest väsentliga modelleringsdelarna (parter, olika element typer, konnektors- och kopplingselement, parametrisk modellering osv.) som ingår i själva FE-modellen. I del två presenteras modell av fyra sammankopplade väggelement som representera en väggmodul gjord av volymmodulens ytterväggar. Avslutningsvis presenteras den fullständiga volymmodellen där både golv- och takbjälklagsselement har kopplats ihop med ytterväggarna.

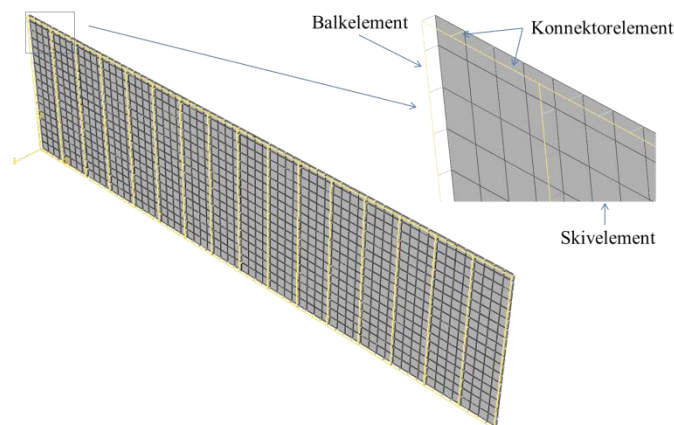
### 2.1 Simulering av ett väggelement

Den bärande delen i ett väggelement består av en regelstomme (syll, hammarband, och regler) som stabiliseras för skivverkan i planet med hjälp av påskruvade gipsskivor på insidan av regelstommen. Eftersom gipsskivorna enbart sitter på insidan på regelstommen så fungerar väggelementet som en osymmetrisk konstruktion när den belastas i planet. I de modelleringsexempel som visas i rapporten har lasterna antagits angripa i tyngdpunktsplanet för själva regelstommen. Figur 2 visar en 3D-vy av väggelementet inklusive dess längd- och höjdmått samt c-c avståndet mellan reglarna. Regelstommens tvärsnittsdimensioner har satts till 45x95 mm och gipsskivornas tjockleksdimension till 13 mm. Eftersom väggmodellen är fullt parametriserad så kan väggens materialegenskaper och dimensioner (längd, höjd, tjocklek, tvärsnitt och c-c avstånd) enkelt styras via fåtal inputparametrar. De styvhetsparametrar som används för regelstommen motsvarar virke av hållfasthetsklass C24 och gipsskivornas styvhetsvärde är baserade på data från Gyprocs handbok [3].



**Figur 2.** Väggelementets 3D-vy inklusive väggens dimensioner

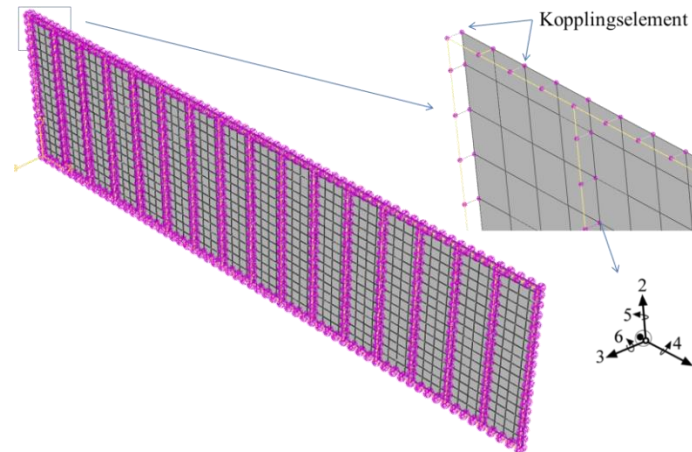
Den tredimensionella väggmodellen som visas i figuren ovan är enbart för att visualisera väggelementet på ett bra sätt. Själva FE-modellen består enbart av strukturelement i form av raka linjer (balkelement för simulering av regler, syll, hammarband och mekaniska förbindare) och plana ytor (skivelement för simulering av gipsskivan). Det är nödvändigt att använda dessa typer av element för att modellen inte skall bli för stor och beräkningstung. Figur 3 visar modellen i form av balk- och skivelement. De element som kallas konnektorelement i figuren är korta balkelement för simulering av skruvförbanden mellan gipsskivan och regelstommen. Både gipsskivan och regelstommen har partitionerats efter skruvarnas placering eftersom konnektorelementen måste kopplas ihop med strukturelementen i elementens knutpunkter.



**Figur 3.** Illustration av olika elementtyper som används i väggmodellen

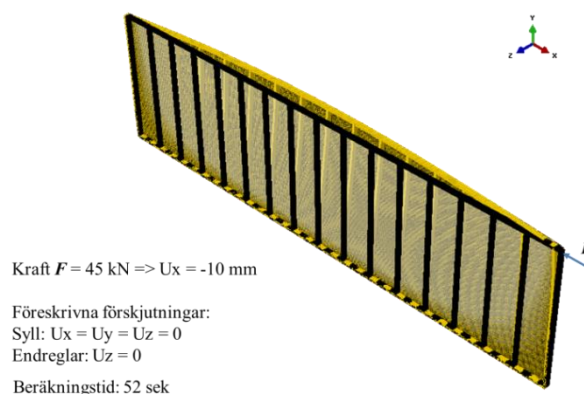
Sammanfallande knutpunkter hos olika element (lila färgade punkter i Figur 4) (t.ex. konnektorelement-regelstomme, konnektorelement-gipsskiva, regler-syll och regler-hammarband) kopplas ihop med hjälp av sex stycken fjäderelement. Figur 4 visar hur fjäderelementen representerar tre stycken translationsfrihetsgrader och tre

stycken rotationsfrihetsgrader mellan två sammanfallande knutpunkter. För att simulera styvheten hos olika spik och skruvförband kan man fritt variera de olika fjäderstyvheter samt normal- och böjstyvheter hos konnektorelementen.



**Figur 4.** Illustration av koppling mellan elementknutpunkter via sex stycken frihetsgrader (1,2,3 representera translationsfrihetsgrader och 4,5,6 är rotationsfrihetsgrader)

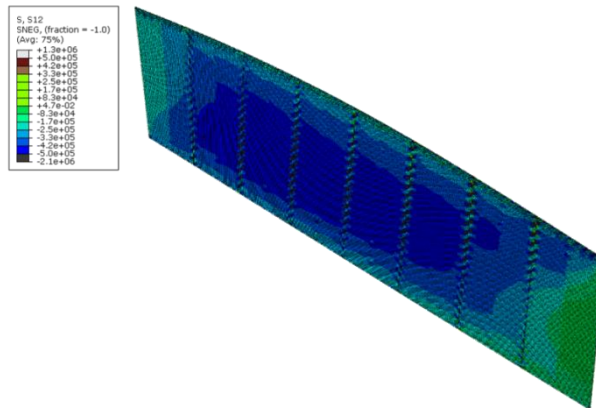
För att undersöka väggelementets globala styvhetsgenskaper har elementets översta hörn belastas med en horisontal last på 45 kN. Kraften riktas parallellt med hammarbandets riktning för att åstadskomma skjuvning i elementets plan. Syllens alla translationsfrihetsgrader samt ändreglarnas translationsfrihetsgrader ut ur planet är föreskrivna till noll. Figur 5 visar hur väggelementet deformeras på grund av den horisontella kraften. Det bör noteras att alla deformationer är uppförstorade för att tydligare kunna ses. Figuren visar tydlig hur väggelementet böjer ut ur planet på grund av att kraften angriper i hammarbandets tyngpunkt som inte är väggelementets normalkraftscentrum. Med de uppskattade styvheter som används för konnektor- och kopplingselement blir den horisontala förskjutningen i kraftangreppspunkten cirka 10 mm. Det bör också nämnas att en experimentell styvhetskalibrering för konnektors- och kopplingselementen inte har ingått i denna förstudie.



**Figur 5.** Väggelementets deformationer (överdrivna med faktor 10) på grund av en horisontell kraft som angriper i hammarbandets ena ände



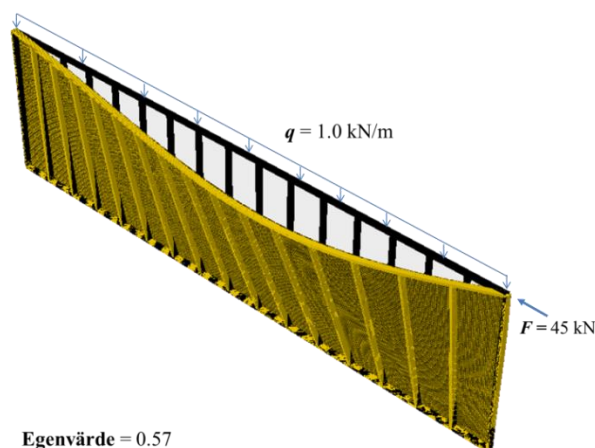
Ett av huvudsyftena med denna förstudie har varit att utveckla en effektiv simuleringsmodell för att i senare skede kunna analysera globala strukturmekaniska egenskaper hos olika designade volymelementbaserade flerbostadshus i trä. FE-modellen för väggsmodellen i Figur 5 visar att på en vanlig laptop är beräkningstiden för att lösa ekvationssystemet enbart 52 sekunder. Modellen kan också illustrera hur krafter och spänningar fördelas inom själva väggelementet. Figur 6 visar väggens



**Figur 6.** Skjuvspänningsfördelning i gipsskivorna på grund av den horisontala lasten som angriper i hammarbandets ena ände

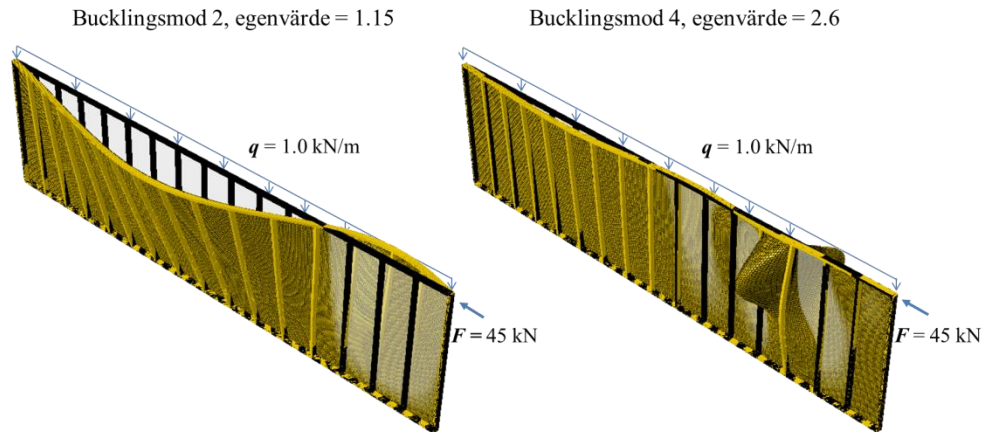
skjuvspänningsfördelning i form av en färgbild där svart och mörkblått visar största negativa skjuvspänningarna. De absolut största skjuvspänningarna (svart färg) uppkommer lokalt där skruvförbanden finns.

Modellen kan också användas för att beräkna elementets brottlast och motsvarande bucklingsform ifall ett stabilitetsbrott skulle inträffa. Detta görs genom att utföra en linjär bucklingsanalys för en bestämd lastkombination. Figur 7 visar väggelementets bucklingsform och motsvarande egenvärde när elementet belastas med en horisontell kraft på hörnet  $F = 45$  kN och en vertikal linjelast längs hammarbandet  $q = 1.0$  kN/m.



**Figur 7.** Väggelementets första bucklingsmod när den utsätts för kombinerat tryck och skjuvbelastning

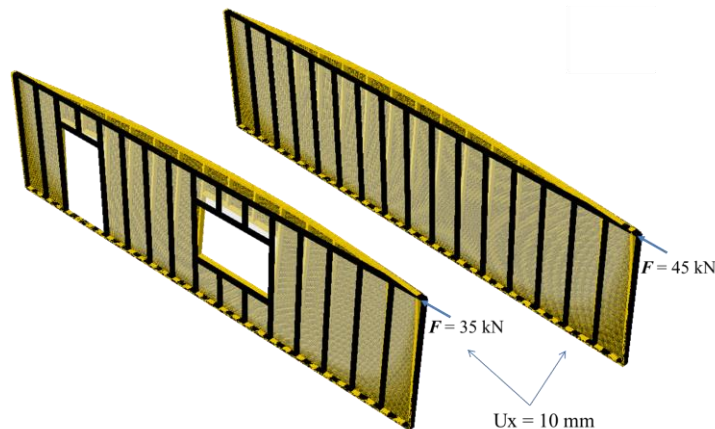
Figur 7 visar att väggelementet bucklar ut ur planet på ovansidan och att den pålagda lasten är enbart 57 % av brottlasten. Man kan också titta på högre bucklingsmoder för att se hur långt denna bucklingsmod ligger ifrån en lokal bucklingsmod. Figur 8 visar väggelementets andra och fjärde bucklingsmod.



**Figur 8.** Andra och fjärde bucklingsmoden för väggelementet

Resultaten i Figur 8 visar att det inte är någon risk för lokal buckling i gipsskivan eftersom egenvärdet för bucklingsmod 4 är mycket större än för bucklingsmod 1.

För att studera hur fönster och dörröppningar inverkar på väggelementets globala styvhetsegenskaper så har en väggmodell med en dörröppning och en fönsteröppning tagits fram.

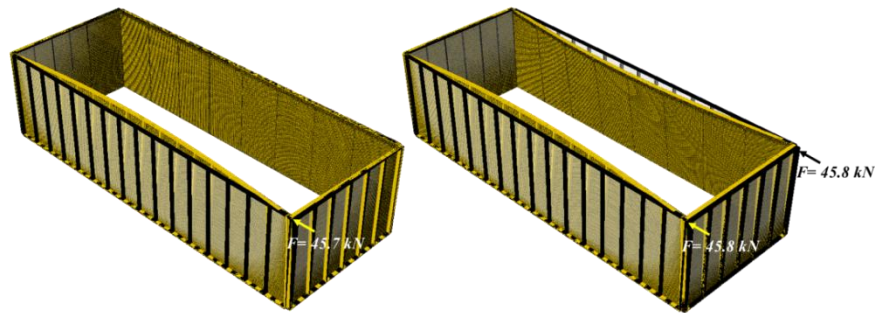


**Figur 9.** Väggelementets deformationer (överdrivna med faktor 10) samt de horisontella krafter som motsvara 10 mm förskjutning i kraftangreppspunkterna

Figur 9 visar att väggelementet med dörr- och fönsteröppningarna har enbart 78 % av styvheten som elementet utan öppningar har. Placering och storlek på öppningar har säkert betydande inverkan på väggelementets globala styvhet. Modellen skulle kunna användas för att studera hur dessa parametrar påverkar elementets globala styvhet men det arbetet ligger utanför ramarna för denna förstudie.

## 2.2 Simulering av en väggmodul (4 väggar)

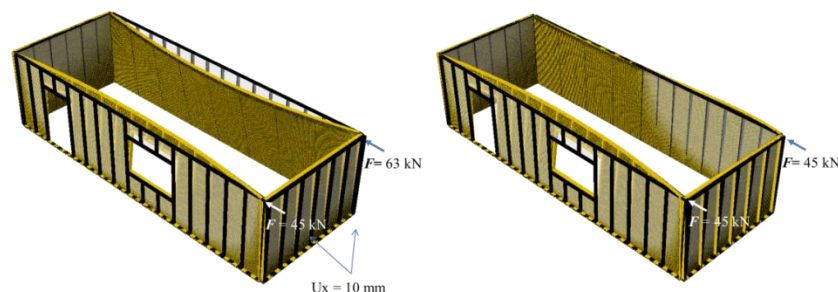
Den enkla väggmodellen som presenterades i det föregående avsnittet har vidareutvecklats här till en väggmodul som består av fyra väggelement. Elementen kopplas ihop på hörnen för att skapa en fyrkantig väggmodul som skall representera ytterväggarna hos en volymmodul. Beräkningstiden för denna simulering är 2.3 min



**Figur 10.** Väggmodulens deformationer (överdrivna med faktor 10) samt de horisontella krafter som behövs för att åstadkomma 10 mm förskjutning i kraftangreppspunkten

jämfört med 52 sekunder för det enskilda väggelementet. Figur 10 visar hur väggmodulen deformeras (osymmetriskt och symmetriskt) när den belastats med en respektive två horisontella krafter överst på modulens hörn. Krafterna för att åstadkomma 10 millimeters horisontell förskjutning i kraftangreppspunkterna är lite större jämfört med kraften för det enskilda väggelementet. Detta beror på att vägghörnen har en viss rotationsstyvhet mot böjning ut ur planet. I denna simulering har denna rotationsstyvhet varit relativt låg. Vissa modulleverantörer skruvlimmar väggelementen i hörnen för att öka deras rotationsstyvhet. I fortsatta studier skulle modellen kunna användas för att undersöka hur hörnförbandens rotationsstyvhet påverkar väggmodulens globala styvhetsegenskaper.

De flesta volymmoduler är osymmetriska konstruktioner på grund av deras olika öppningar och placering av innerväggar. För att undersöka strukturmekaniska egenskaper hos en osymmetrisk väggmodul så har en modul med fönster- och dörröppning skapats. Figur 11 visar deformationer hos två väggmoduler som belastas med olika stora horisontella krafter som motsvara 10 mm förskjutning i krafternas angreppspunkter.

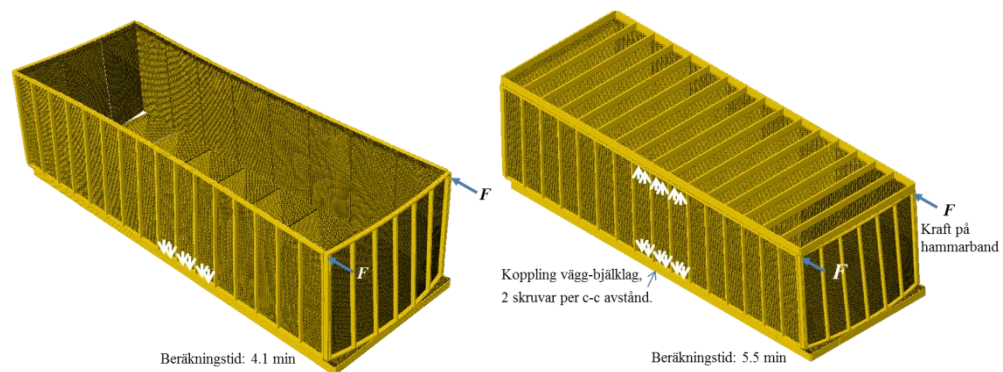


**Figur 11.** Väggmodulens deformationer (överdrivna med faktor 10) på grund av olika stora horisontella krafter

Figuren ovan visar att väggmodulen till höger deformeras ganska osymmetriskt på grund av ett symmetriskt lastfall. På motsvarande sätt visar bilden till vänster att man behöver belasta ganska osymmetriskt för att åstadkomma 10 mm förskjutning i båda kraftangreppspunkterna. Här bör det nämnas att i vägghörnens rotationsstyvhet är satt till betydligt större värde här än i det föregående exemplet.

### 2.3 Simulering av en hel volymmodul

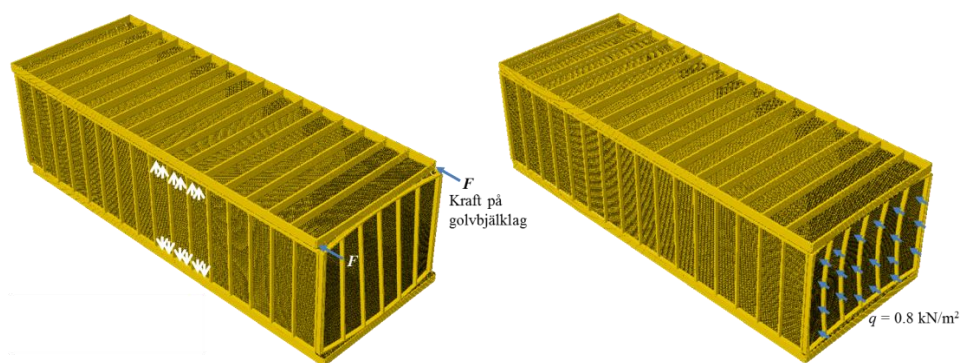
För att simulera strukturmekaniska egenskaper hos en hel volymmodul har väggmodulen kopplats ihop med både golv- och takbjälklagselement som består av ett antal träbjälkar med påskruvade spånskivor på ovansidan på golvbjälklaget och på undersidan av takbjälklaget. Kopplingarna mellan väggar och bjälklag har utförts på samma sätt som tidigare med många konnektors- och kopplingselement för att representera skruvförbanden mellan dessa element. Figur 12 visar hur en väggmodullåda utan takbjälklag och en fullständig volymmodul deformeras (kraftigt överdrivna deformationer) på grund av horisontella krafter som belastar hammarbanden.



**Figur 12.** Deformationer (överdrivna) hos två volymmoduler med och utan takbjälklag på grund av horisontell kraftbelastning på själva hammarbanden.

Resultaten i Figur 12 visar tydligt att de mekaniska kopplingarna mellan syll och golvbjälklagen är för svaga eftersom det uppkommer stora gliddeformationer mellan väggelementen och golvbjälklaget. Kopplingarna som används i detta exempel skall motsvara att man har två 6 mm skruvar mellan alla regler (vita pilar i figuren). För att öka denna styvhet så limmar vissa leverantörer syllarna och hammarbanden mot bjälklagen. På väggmodullådan (utan takbjälklag) kan man också se hur långsidornas ovansida deformeras i böjning ut ur planet medan för den fullständiga volymmodulen så stabiliseras denna deformation av takbjälklaget. Beräkningstiden för dessa simuleringar är fortfarande ganska kort. För den fullständiga volymmodulen som består av många mekaniska parter samt ett mycket stort antal konnektor- och kopplingselement blev beräkningstiden enbart 5.5 min.

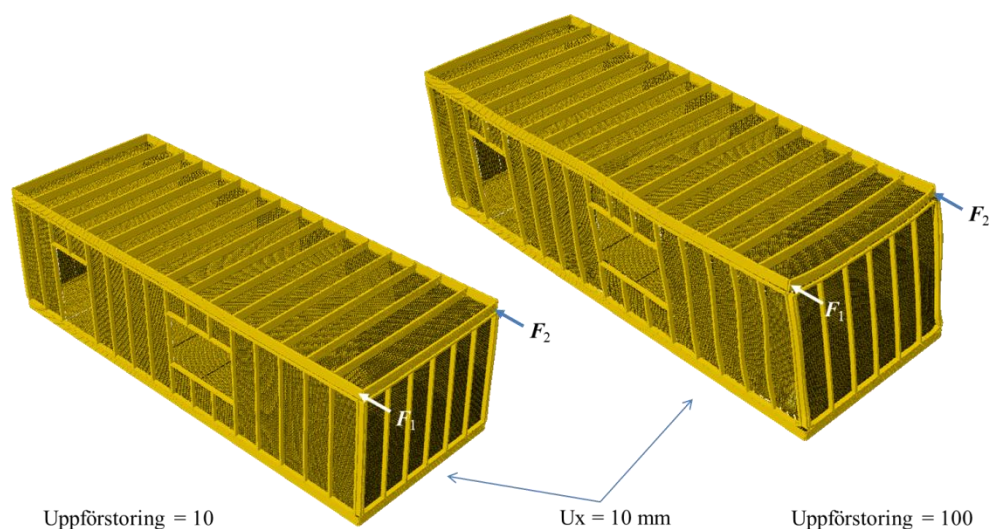
Som tidigare nämnts så kan modellen användas för att studera hur volymmodulen deformeras på grund av olika belastningar. Figur 13 visar deformationer hos volymmodulen när den belastas med två horisontella krafter på takbjälklaget samt när den utsätts för vindbelastning på ena gavelväggen.



**Figur 13.** Deformationer (överdrivna) hos två volymmoduler som belastas med horisontella krafter på takbjälklaget samt jämnfördelad vindbelastning på ena gavelväggen

Deformationerna i Figur 13 visa att kopplingen mellan väggelementen och båda bjälklagen är fortfarande för svag. På bilden till höger kan man också se hur gavelväggen deformeras i böjning samtidigt som en viss gliddeformation sker i förbanden mellan bjälklag och gavelelementet.

Avslutningsvis har en volymmodul med fönster och dörröppning på ena långsidan skapats. Denna modell är inte fullt parametrisk eftersom det är ett stort arbete som inte ryms inom denna förstudie. Som exempel så finns cirka 2700 mekaniska parter och 29520 kopplingselement i denna modell. Figur 14 visar deformationer (10 respektive 100 gånger överdrivna) på grund av en föreskriven horisontell förskjutning på takbjälklagets två hörn där motsvarande reaktionskrafter  $F_1$  and  $F_2$  visas i figuren. I detta exempel har en stark koppling skapats mellan vägg- och bjälklagselementen.



**Figur 14.** Deformationer (överdrivna med faktor 10 och 100) hos volymmodul med fönster och dörröppningar som belastas av horisontella krafter på takbjälklagets hörn som motsvarar 10 mm horisontal förskjutning i kraftangreppspunkterna

Eftersom kopplingsstyvheten mellan bjälklagen och vägelementen har ökat kraftigt i detta exempel så visar Figur 14 att gliddeformationerna mellan dessa element är små. I bilden till höger (där deformationerna är uppförstorade med faktor 100) kan man tydligt se hur hela modulen skjivas åt vänster och att reglar och takbjälkar har en vågformad böjningsform.

### 3 Slutsatser och fortsatta studier

De viktigaste slutsatserna från denna studie är följande:

- I projektet har en parametrisk finita element modell framtagits för att analysera en volymmodul som typiskt används för byggande av flerbostadshus i trä.
- Modellen består av balk- och skalelement som medför att den är beräknings snabb och flexibel fast den inkluderar ett stort antal kopplings- och konnektorelement för att kunna simulera spik-, skruv- och bultförband på ett optimalt och simpelt sätt.
- Eftersom modellen är parameterstyrd så kan den relativt enkelt vidareutvecklas för att analysera andra modulgeometrier med t.ex. olika dörr- och fönsteröppningar.
- Modellen har används för att analysera det globala deformationsbeteendet hos olika vägg- och volymelement när de utsätts för olika mekaniska laster. Man kan t.ex. studera hur olika styvhetsgenskaper hos själva träelementen samt de mekaniska förbanden påverkar modulens globala deformationsbeteende.
- Modellen visar ett deformationsbeteende hos vägg- och volymelementen verkar vara rimliga men en experimentell verifiering av modellen återstår.
- Huvudslutsatsen är att modellen är tillräckligt snabb för att kunna vidareutvecklas för att analysera hela flerbostadshus i trä som består av många olika volymelementer.
- För att kalibrera och validera modellen måste en omfattande experimentell studie utföras (både på komponent- och fullskalanivå) i samarbete med industrin.
- För att modellen skall kunna utvecklas för flerbostadshus krävs ett betydligt större forskningsprojekt.

## Referenser

- [1]. Lundmark T. 2013: Agenda för träförädling: den elektroniska motorvägen – från bygge till hygge. ([http://www.ltu.se/cms\\_fs/1.103817!/file/Strategisk%20FoI-agenda%20DEM%20LOW%20res.pdf](http://www.ltu.se/cms_fs/1.103817!/file/Strategisk%20FoI-agenda%20DEM%20LOW%20res.pdf))
- [2]. Anon 2016: Reviderad prognos över behovet av nya bostäder till 2025. Boverket rapport 2016:18.
- [3]. Anon 2010. Gyproc handbok – system för lättbyggnadsteknik. (<http://ehandbok.gyproc.se/Gyproc/GyprocHandbok/>)