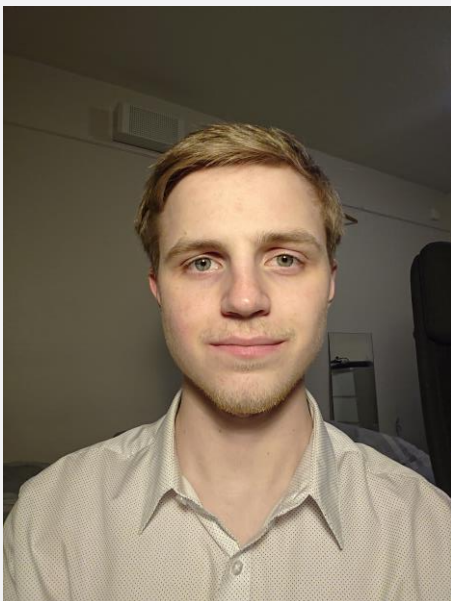


Krysslaminert massivtre som bærende struktur i modulbaserte studentboliger

FEM analyse av modulbaserte studentboliger i krysslaminert massivtre

MARCUS PETERMANN



INTERN VEILEDER: PREBEN AANENSEN

EKSTERN VEILEDER: WALTER GROV

Universitetet i Agder, 2021

Fakultet for Teknologi og realfag

Summary

This is a master's thesis conducted at the University in Agder as the finishing work for the subject BYG508 and the master program in civil and structural engineering.

This report seeks to examine some possibilities that exists with the use of Cross-laminated timber, CLT for modern student accommodation with the use of Finite element method, FEM software. With the increased interest in new building materials, it is important to examine the possibilities that lies within these materials and experiment and analyze to determine their usefulness.

Based on the client's wishes, the research question for this report was determined to be: "how suitable is CLT as load bearing structure for modular based student housing taller than 4 floors"

The report details background in the knowledge and production of CLT, applicable loads, the concept of modular building and how CLT and its connections are modeled and used in analysis programs.

The conclusion of this report is that 100mm CLT panels used as load bearing structure in the form of walls, floor and ceiling in modular student housing is suitable for this purpose from a strength perspective up to an analyzed 7 floors.

Krysslaminert massivtre som bærende struktur i modulbaserte studentboliger

Denne siden holdes blank

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>

5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å

gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering: JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)? JA NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over? JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet? JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av masterprogrammet for Byggkonstruksjon ved Universitet i Agder. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven i emnet BYG508 og ble utarbeidet i det fjerde og siste semesteret av masterprogrammet.

Gjennom arbeidet med masteroppgaven har jeg lært mye om CLT og dets fremadstormende posisjon i byggebransjen. Jeg har fått høre fordeler og ulemper med bruken av materialet fra erfarne entreprenører og fått innsikt i bruken og beregninger med materialet. Ulempene med at det er et forholdsvis nytt materiale på markedet har vist seg flere ganger og fremhever noe av skepsisen rundt dette materialet. I alt har jeg fått opp øynene for mulighetene bruken av CLT for modulkonstruksjoner gir og er spent på å følge utviklingen til bruken av materialet.

Jeg ønsker å takke veilederen min ved Universitet i Agder, Preben Aanensen for god hjelp til oppgaven og for mye faglig innsikt. Jeg ønsker også å takke for gode tips, råd og støtte til selve gjennomføringen av masteroppgaven i tider hvor det ikke føltes som om det var noen fremgang. Denne støtten kan ikke undervurderes for mye det bidrar til å holde motivasjonen oppe og ha fremgang med oppgaven.

Jeg ønsker også å takke Walter Grov for muligheten til å skrive denne oppgaven. Innsikten i utviklingen av nye studentboliger og nye krav og ønsker fra kommuner og private aktører på området har vært verdifull for å bedre forstå økosystemet rundt nye studentboliger.

Jeg vil også rette en stor takk til nære venner og familie for vennskap og støtte gjennom arbeidet med oppgaven under covid-19 pandemien. Dette har vært et vanskelig år å være student på og denne støtten settes stor pris på.

Målet med masteroppgaven er å evaluere hvor godt CLT elementer fungerer til modulbaserte studentboliger ved hjelp av FEM analyse.

Innholdsfortegnelse

Summary	1
Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	ii
Publiseringsavtale.....	iv
Forord	v
Innholdsfortegnelse	vi
Figurliste	ix
1 Innledning.....	1
2 Samfunnsperspektiv	2
3 Teoribakgrunn	4
3.1 Tre og dets verdikjede til bruk.....	4
3.1.1 Tre.....	4
3.1.2 Trevirke.....	4
3.1.3 Trelast.....	6
3.1.4 Konstruksjonsvirke	6
3.2 Massivtre	8
3.2.1 Produksjonsmåte.....	8
3.2.2 Lim	9
3.2.3 Oppførsel til tre under brann	10
3.2.4 Kryp.....	10
3.3 Modulbasert bygging.....	11
3.4 Krav i teknisk forskrift.....	12
3.4.1 Brann (TEK 17)	12

3.4.2	Lydforhold (TEK17)	12
3.5	Standarder og laster	13
3.5.1	Standarder og regelverk	13
3.5.2	Horisontale laster	13
3.5.3	Vertikale laster	14
3.6	Studentboliger	14
3.7	Modellering av CLT	15
4	Forskerspørsmål	16
5	Case/Materialer	17
5.1	Utforming av bygget	17
5.2	Lastforutsetninger	18
6	Metode	21
6.1	Programvare	21
6.1.1	Begrensninger i programvare	21
6.2	Fremgangsmåte	21
6.3	Gjennomgang av modelleringsarbeid i Revit	22
6.4	Overføring til Robot	24
6.5	Modellering i Robot	25
6.5.1	Vegger	25
6.5.2	Gulv og tak	25
6.5.3	Utsparinger	26
6.5.4	CLT Materiale	28
6.5.5	Claddings	29

6.5.6	Laster og lastkombinasjoner	30
6.5.7	Linear releases mellom moduler	35
6.5.8	Uthenting av resultater	36
6.6	Tilleggsberegning med Stora Enso Calculatis	36
7	Resultat.....	37
7.1	Resultat uten linear releases mellom moduler	37
7.2	Resultater med linear releases mellom moduler i X og Y retning	44
7.3	Stora Enso calculatis	51
8	Diskusjon	52
9	Konklusjon	53
10	Anbefalinger til videre arbeid:.....	54
11	Referanser	55
12	Vedlegg	59

Figurliste

Figur 3-1 Prinsipiell oppbygning av en trecelle med varierende fuktighetsinnhold [29]	5
Figur 3-2 Maks krymping i radiell, tangentiell og lengderetning [29]	5
Figur 3-3 Eksempler på noen massivtreelementer og høy limtrebjelke [4]	8
Figur 3-4 Typisk 5 sjikts CLT element - SINTEF Byggforsk [11]	9
Figur 3-5 Moduler under produksjon hos Skanska husfabrikken [32]	11
Figur 3-6 Vindlast på hus [17]	14
Figur 5-1 Lydisolerende tiltak på overside av etasjeskiller [28]	18
Figur 5-2 Grunnverdi for vindkasthastighetstrykk V1 i NS-EN-1991-1-4	19
Figur 5-3 Jordskjelvutsatte områder i Norge [20]	20
Figur 6-1 Modul plantegning [30]	22
Figur 6-2 Enkeltmodul i CLT [30]	22
Figur 6-3 4 Sammensatte moduler med eksponert bæresystem [30]	23
Figur 6-4 4 Sammensatte moduler [30]	23
Figur 6-5 Utsnitt av knutepunkt mellom 4 moduler [30]	23
Figur 6-6 Enkeltmodul i CLT – Robot [31]	25
Figur 6-7 Gulv trukket inn fra vegger [31]	26
Figur 6-8 utsparing til vindu plassert på kortvegg i modul [31]	27
Figur 6-9 Utsparing til dør plassert på kortvegg [31]	27
Figur 6-10 Stivhetsmatrise vindu i robot [31]	27
Figur 6-11 New thickness vindu i robot [31]	27
Figur 6-12 Lokale aksesystemer på paneler og retning på ortotropi [31]	28
Figur 6-13 Lastfordistribusjon på områder med claddings [31]	29

Figur 6-14 Påført last i robot: Nyttelaster på gulv [31]	31
Figur 6-15 Lastkombinasjon COMB 1: vertikale laster [31]	33
Figur 6-16 Lastkombinasjon COMB 3: vertikal + vind Y, utsnitt. [31]	34
Figur 6-17 Linear releases i Robot modell [31]	35
Figur 6-18 Maps funksjonen i robot for uthenting av resultater for paneler [31]	36
Figur 6-19 inputdata for Stora Enso calculatis på 100mm CLT panel	36
Figur 7-1 COMB 1: vertikale laster, uten linear releases [31]	38
Figur 7-2 COMB 1: vertikale laster, uten linear releases [31]	39
Figur 7-3 COMB 2: Vertikal + vind x, uten linear releases [31]	40
Figur 7-4 COMB 2: Vertikal + vind X, uten linear releases [31]	41
Figur 7-5 COMB 3: Vertikal + vind Y, uten linear releases [31]	42
Figur 7-6 COMB 3: Vertikal + vind Y, uten linear releases [31]	43
Figur 7-7 COMB 1: vertikale laster med linear releases [31]	45
Figur 7-8 COMB 1: vertikale laster med linear releases [31]	46
Figur 7-9 COMB 2: Vertikal + vind X med linear releases [31]	47
Figur 7-10 COMB 2: Vertikal + vind X med linear releases [31]	48
Figur 7-11 COMB 3: Vertikal + vind Y med linear releases [31]	49
Figur 7-12 COMB 3: Vertikal + vind Y med linear releases [31]	50
Figur 7-13 Resultater fra Stora Enso calculatis	51
Figur 7-14 Resultater fra Stora Enso Calculatis	51

1 Innledning

Denne oppgaven ser på bruken av krysslaminert massivtre for modulbaserte studentboliger. Dette emnet er interessant fordi det ser på bruken av et relativt nytt materiale for nye konsepter for studentboliger. Bruken av slike nye materialer er nødvendig for å kunne bygge mer miljøvennlige bygg med større grad av fleksibilitet enn som gjøres i dag. Denne utviklingen er nødvendig for å kunne bygge for fremtiden og for å kunne møte behovet som kommuner har for studenter og overfor miljøet.

Bruken av krysslaminert massivtre er ikke utbredt i Norge, så det er nødvendig å gjennomføre beregninger og eksperimenter for å kartlegge bruksområdene til materialet. Å øke kunnskapen om materialet og vise mulighetene det er i stand til vil være svært viktig for å øke bruken av og nyttiggjøre seg av potensialet det har. Denne rapporten søker å undersøke ett mulig bruksområde for materialet.

Opgaven ble valgt som følge av en oppgavebeskrivelse fra en eiendomsutvikler som ble innlevert til Universitetet i Agder i forbindelse med oppstart av masterprosjekt høsten 2020. Walter Grov ved AGS Holding AS, og arkitektfirmaet Helen & Hard er samarbeidspartnere for denne oppgaven og bidrar med faglig kunnskap om markedets behov.

Problemområdet denne rapporten dekker er å utforske en av mulighetene som eksisterer ved bruk av krysslaminert massivtre.

2 Samfunnsperspektiv

All bygging utføres av en grunn, for å møte et behov. Dette behovet varierer fra by til by, og kommune til kommune. Nye bygninger kan komme som følge av for få boliger til befolkningen på grunn av rask befolkningsvekst, for få eller for utdaterte skoleplasser, mangel på sykehjemsplasser og så videre. Det er en utømmelig liste med behov, som for kommuner og byer betyr at de er nødt til å bygge flere bygg.

Byer og kommuner blir lett negativt påvirket av byggearbeider. Et eksempel er bygging i sentrumsnære områder eller bygging ved hovedvei eller annen transportåre hvor det vil være nødvendig å stenge av dette området. Byggeperioder medfører typisk mye støy og støv som kan påvirke helsen til folk i nærheten. Dette vil være tilfeller hvor byggingen vil være en betydelig inngripen i miljøet rundt under byggeperioden.

Mange bygherrer ønsker å kunne benytte moduler for bygging av bygg. Dette er av forskjellige årsaker, men noen vanlige er kortere byggetid, forbedret logistikk på byggeplass, parallellisert byggeprosess og muligheter for gjenbruk av moduler for miljøhensyn. [1] Bygging med moduler kan bidra til bedre arbeidsforhold for arbeidere og høyere kvalitet på utførelsen. Ettersom moduler blir produsert innendørs er arbeidere i større grad skjermet for omgivelsene. Arbeidere kan også bli spart for mer arbeid i høyde og kan ta i bruk stasjonært maskineri for redusert belastningen på arbeiderne i forhold til bæring og løfting. Ved bruk av moduler kan en stor del av arbeidet ferdigstilles på et annet, mer egnet område, og deretter fraktes til byggeplass og heist på plass. Ved god kontroll på byggeplasslogistikken kan mesteparten av bygget settes opp på mye kortere tid enn et plassbygd bygg. Dette medfører også at det kan være redusert riggtid og generelt arbeid på byggeplass, men også at selve arealbehovet til byggeplassen reduseres. Dette kan bidra til at påvirkningen på miljøet rundt blir minimal. [1]

Ved bygging med moduler kan det åpne opp ytterligere for gjenbruk av bygget- eller bygningsdeler. Fordi moduler typisk er avgrensede elementer som det bygges med, er det ofte gode muligheter for å kunne demontere bygg i samme moduler/elementer som det ble satt opp i. Disse modulene kan benyttes i andre prosjekter på et senere tidspunkt, og dermed unngå en meget stor miljøbelastning som ville kommet med å måtte bygge en ny modul- eller bygningsdel. Dette muliggjør i større grad for kommuner og samfunn å flytte og gjenbruke bygninger etter hvert som behovet deres endrer seg.

FNs bærekraftsmål er gode mål for å sikre en felles global retning for land, næringsliv og sivilsamfunn. [2] FN beskriver disse målene selv på følgende måte:

*FNs bærekraftsmål er verdens felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom,
bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030*

Imens alle målene er viktige for fremtiden til verden, er det noen som kan direkte knyttes til byggindustrien. Blant disse er mål 11 «Bærekraftige byer og lokalsamfunn» og 12 «ansvarlig forbruk og produksjon» som begge enkelt og tydelig kan knyttes til bygg. Det er mange delmål som er aktuelle å trekke frem fra disse. 11.1) og 12.5) er spesielt tydelige mål som kan påvirkes av byggindustrien.

11.1) Innen 2030 sikre at alle har tilgang til tilfredsstillende og trygge boliger og grunnleggende tjenester til en overkommelig pris, og bedre forholdene i slumområder

12.5) Innen 2030 redusere avfallsmengden betydelig gjennom forebygging, reduksjon, materialgjenvinning og ombruk

For disse målene kan bygging med moduler bidra. Moduler kan bidra til å produsere gode boliger til rimelig pris, og kan gjenbrukes dersom det opprinnelige behovet ikke lenger er til stedet.

Det er stor mangel på studentboliger i markedet, så alle tiltak som øker tilgangen på studentboliger vil være fordelaktig for å nå målet til Norsk studentorganisasjon om 20% dekningsgrad. Regjeringen er enig i at det behøves flere studentboliger. [3]

For å oppsummere betyr dette at samfunnets behov som rask bygging av studentboliger, liten miljøinngripen og påvirkning og gjenbruk i mange tilfeller kan løses ved bruken av miljøvennlige moduler.

3 Teoribakgrunn

3.1 Tre og dets verdikjede til bruk.

3.1.1 Tre

Et Tre er en plante som består av rot, stamme, greiner, blader eller nåler og blomster. Roten er treet's forankring i bakken og treet's verktøy for å ta opp mineraler og vann. Røtter fungerer også som lagringsplass for stivelse. Stammen er hoveddelen av et tre og ut fra stammen stikker greiner med blader eller nåler og blomster. Bladene eller nålene er stedet hvor treet gjennomfører fotosyntesen, treet's måte å omdanne lys, CO₂ og mineraler til stivelse og andre stoffer. [4]

I hovedsak består trær av lange, rørformede celler. Det er celleveggen til cellene som er selve strukturen i treet. Celleveggen til disse cellene er delt opp i flere sjikt, men det største av disse lagene utgjør omtrent 85% av den totale celleveggen. [4] Hoveddelen av disse celleveggene består av *cellulose*, og *lignin*, som kan sees på som limet i treet, holder cellene sammen. Trær vokser både i høyde og bredde gjennom levetiden, og hvert år dannes det en synlig ring i stammen av treet som følge av varierende størrelse på cellene avhengig av årstiden de vokste på. På våren og tidlig sommer er cellene store (lys ved) og på høsten er cellene mindre (mørkere ved). [5] Gjennom veksten absorberer og lagrer trær store mengder karbondioksid fra atmosfæren og produserer oksygen. I Norge utgjør gran og furu over 75% av all skog, mens det resterende er løvskog hvorav omtrent 2/3 består av bjørk.

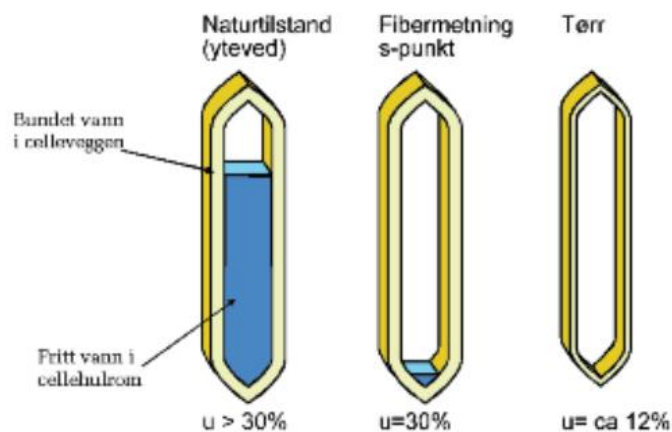
3.1.2 Trevirke

Trevirke er definisjonen på tre som skal benyttes som råstoff for foredling. I nesten alle tilfeller dreier det seg da om *tømmer*, som er hele eller kappede trestammer. I Norge foregår det omfattende *skogbruk* for å produsere trelast. Årlig hugges det mellom 8 og 11 millioner kubikkmeter med tømmer. [6] Treet deles her inn i to grupper, bartrevirke og hardved. Mykved er et annet uttrykk for bartrevirke i noe nyere litteratur, men som muligens bedre kan stilles opp mot den originale engelske ordleggingen *softwood*, enn det bartrevirke gjør. [4]

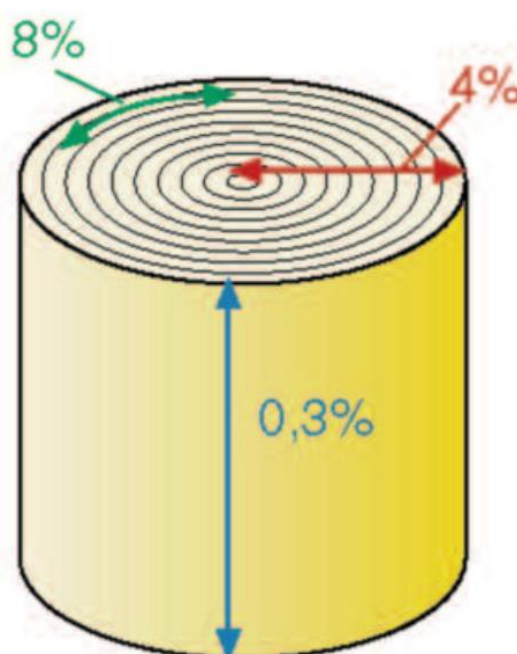
Trevirke er påvirket av mange faktorer, spesielt ettersom det er et naturlig materiale. En av de viktigste faktorene å ta hensyn til er fuktighet i trevirket. Cellene i treet absorberer vann, og opp til omtrent 30% fuktighetsinnhold er alt dette vannet bundet til celleveggene i cellene. Tre kan inneholde mer fuktighet enn dette (Slik det gjør mens det fremdeles er levende) og da er dette vannet oppbevart som fritt vann inne i de lange, rørformede cellene. Et fuktinnhold på ca. 12% ansees som tørt trevirke, men dette vil være avhengig av lokal luftfuktighet. Tykkelsen på celleveggene øker og minsker i forhold til hvor mye fuktighet som er bundet til celleveggen. Celleveggen endrer altså tykkelse når fuktinnholdet er mellom 0% og 30% Denne endringen påvirker direkte styrken til trevirket. [4]

På grunn av måten trevirket er bygd opp med lange celler, vil trevirket endre dimensjon ved endret fuktinnhold, forskjellig avhengig av fiberretningen. Endringen i radiell og tangentiell retning er mye større enn i lengderetning. Kontroll på tørkeforhold for trevirke er derfor meget viktig for å unngå uønskede deformasjoner.

Trevirkes egenskaper er svært tett forbundet med trevirkes densitet. Densiteten til selve celleveggene i trevirket er ca. 1550 kg/m^3 for alle tresorter. Forholdet mellom cellevegger og andre hulrom blir derfor avgjørende for den spesifikke tresortens densitet. Økt densitet betyr at trevirket har mer cellevegger per volum, og fordi det er celleveggene som gir trevirket dets styrke betyr dette at økt densitet typisk betyr høyere styrke. Det blir dermed tydelig at volumendringene som kommer som følge av fuktighetsinnholdet påvirker styrken til treet. Ettersom massen og volumet endrer seg avhengig av fuktinnholdet, og vann har lavere densitet enn selve celleveggene betyr dette at økt fuktinnhold betyr lavere styrke. For regelverket som benyttes, NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2009, også kalt Eurokode 5, er det basert på at trevirket er i en atmosfære på 20C med 65% relativ luftfuktighet. Dette vil for mykved tilsvare et fuktinnhold på 12%. [4]



Figur 3-1 Prinsipiell oppbygning av en trecelle med varierende fuktighetsinnhold [29]



Figur 3-2 Maks krymping i radiell, tangentiell og lengderetning [29]

3.1.3 Trelast

Trelast er trevirke som har blitt foredlet, og er den formen for tre som benyttes for bygging og konstruksjoner. Trelast kan bli påført deformasjoner på grunn av krymping og svelling fra endring i fuktinnhold. Avhengig av hvor i en trestamme trelasten kommer fra kan disse deformasjonene føre til at trelasten vrir seg, buer seg, eller får andre uønskede deformasjoner.

For at trelasten skal kunne brukes til bygging og konstruksjoner er det nødvendig å sortere trelasten i forhold til styrke. Da ender man opp med *konstruksjonsvirke*. [7]

3.1.4 Konstruksjonsvirke

Det er 6 fastheter som er av interesse for trevirke som konstruksjonsmateriale. [4]

- $F_{t,0}$ - Strekkfasthet i fiberretningen
- $F_{t,90}$ – strekkfasthet tvers på fiberretningen
- $F_{c,0}$ – trykkfasthet i fiberretningen
- $F_{c,90}$ – trykkfasthet tvers på fiberretningen
- F_m – bøyefasthet
- F_v – skjærfasthet

På grunn av fiberretningen i trevirke er det store forskjeller i styrke avhengig av hvilken retning på fibrene i treet en kraft virker. Et eksempel på dette er trykkfastheten parallelt med- og på tvers av fiberretningen. Parallelt med fiberretningen har en normal sortering av konstruksjonsvirke 21 N/mm², mens samme konstruksjonsvirke kun har 5-6 N/mm² på tvers av fibrene. [4]

Som nevnt tidligere er konstruksjonsvirke laget av et naturlig materiale. Dette medfører forskjeller i egenskapene til materialet innad i samme tresort med samme fuktinnhold. Bruken av konstruksjonsvirke er derfor basert på den laveste 5% fraktil av populasjonen. Dette medfører at en betydelig del av populasjonen har høyere fasthet som ikke kan utnyttes. På grunn av dette sorteres partiet med trelast slik at man kan utnytte de forbedrede kvalitetene. Dette gir tilgang til materialer av høyere kvalitet for ingeniører og mulighet for sagbruk å tilby en vare med høyere kvalitet til høyere pris.

Denne sorteringen blir gjort inn i forskjellige styrkeklasser som er definert i NS-EN 338:2016 (Konstruksjonstrevirke – Fasthetsklasser). 12 Cxx klasser er definert for mykved og 8 Dxx klasser er definert for hardved. I Norge og Norden er bruken av mykved totalt dominerende, så de 8 klassene for hardved vil ikke beskrives nærmere. Tabellen under viser styrkeklasser for de mest vanlige styrkeklassene av konstruksjonsvirke. Verdiene som er oppgitt i tabellen gjelder for trevirke med fuktinnhold som tilsvarer 65% relativ luftfuktighet ved 20C.

Tabell 3-1 Styrkeklasser for konstruksjonsvirke [4]

Mykved	C14	C18	C24	C30	C40
Fasthetsegenskaper i N/mm²					
Bøyning – $f_{m,k}$	14,0	18,0	24,0	30,0	40,0
Strekk parallelt med fibrene – $f_{t,0,k}$	8,0	11,0	14,0	18,0	24,0
Strekk tvers på fibrene – $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Trykk parallelt med fibrene - $f_{c,0,k}$	16,0	18,0	21,0	230	26,0
Trykk tvers på fibrene - $f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
Skjær - $f_{v,k}$	3,0	3,4	4,0	4,0	4,0
Stivhetsegenskaper i N/mm²					
Middelverdi E – $E_{0,mean}$	7000	9000	11000	12000	14000
5% fraktilen av E – $E_{0,05}$	4700	6000	7400	8000	9400
Middelverdi av E – $E_{90,mean}$	230	300	370	400	470
Middelverdi av skjærmodul – G_{mean}	440	560	690	750	880
Densitet i kg/m³					
Karakteristisk verdi p_k	290	320	350	380	420
Middelverdi p_{mean}	350	380	420	460	500

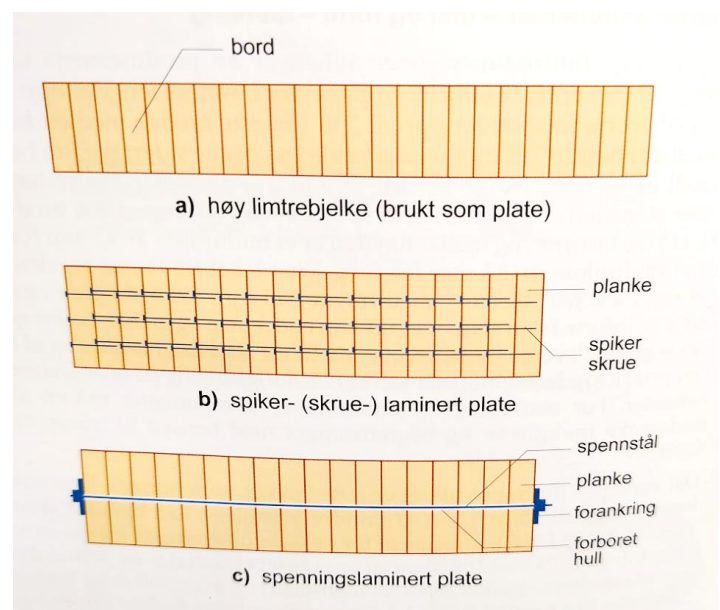
Trevirke blir sortert inn i disse styrkeklassene på to måter. De to måtene er visuelt eller maskinelt. Virkelig fasthet kan kun bestemmes med destruktive metoder, men dette er selvsagt ikke ønskelig for konstruksjonsvirke man ønsker å benytte.

Visuell sortering ser på trevirket og ser etter egenskaper og defekter som kan redusere styrken til trevirket. Dette er slikt som kvister, helning på fibre, sprekker, vridninger, sopp og råte, insektskader og mer. Visuell sortering kan noen ganger supplementeres av håndholdt redskap for å måle slikt som densitet. Fordi det er en menneskelig vurdering som ofte må gjennomføres på kort tid av økonomiske hensyn, er det en betydelig menneskelig faktor som spiller inn. For å forsikre at den visuelle metoden er pålitelig er visuelt gradert trevirke ofte gradert for lavt.

Maskinell styrkesortering kan gjennomføres på flere forskjellige måter. En metode som benyttes er at fordi bøyefastheten til en kvalitet er direkte knyttet til styrken kan man ved hjelp av målinger sortere et parti. Ved å bøye trevirket i en fastsatt grad og måle kraften kan man bestemme E-modul for eksemplaret. Dette resultatet kan deretter benyttes til å sortere partiet. Det kan også benyttes tilleggsutstyr for maskinell sortering som «ser» og oppdager tilsvarende egenskaper og defekter som ville vært oppdaget ved visuell sortering og tar hensyn til dette under styrkesorteringen.

3.2 Massivtre

Massivtre er en fellesbetegnelse for flere forskjellige tre-produkter som alle består av mye tre. Massivtre er et noe uheldig begrep da det er mange underkategorier som har svært forskjellig oppbygning og bruksområde. Det er flere forskjellige varianter. En er spiker (skrue) laminert plate, hvor planker på høykant føyes sammen ved hjelp av spiker eller skruer. En annen type er en spennlaminert plate, hvor mange planker blir gjennomboret og et spennstål blir trukket igjennom. Dette stålet blir så forankret i hver ende og strammes slik at plankene presses sammen. På grunn av friksjonen mellom plankene blir platevirkningen her betydelig større enn den spikerlaminerte platen. [4] I hovedsak er det CLT (Cross-laminated-timber) som er mest aktuelt. Dette produktet er klart dominerende i massivtre-segmentet, og i mange tilfeller benyttes massivtre som synonymt med CLT. På norsk kalles dette for *Krysslimt tre*, *KL-tre*, men det er den engelske betegnelsen som oftest benyttes om materialet. Denne oppgaven vil benytte betegnelsen «CLT». [8]

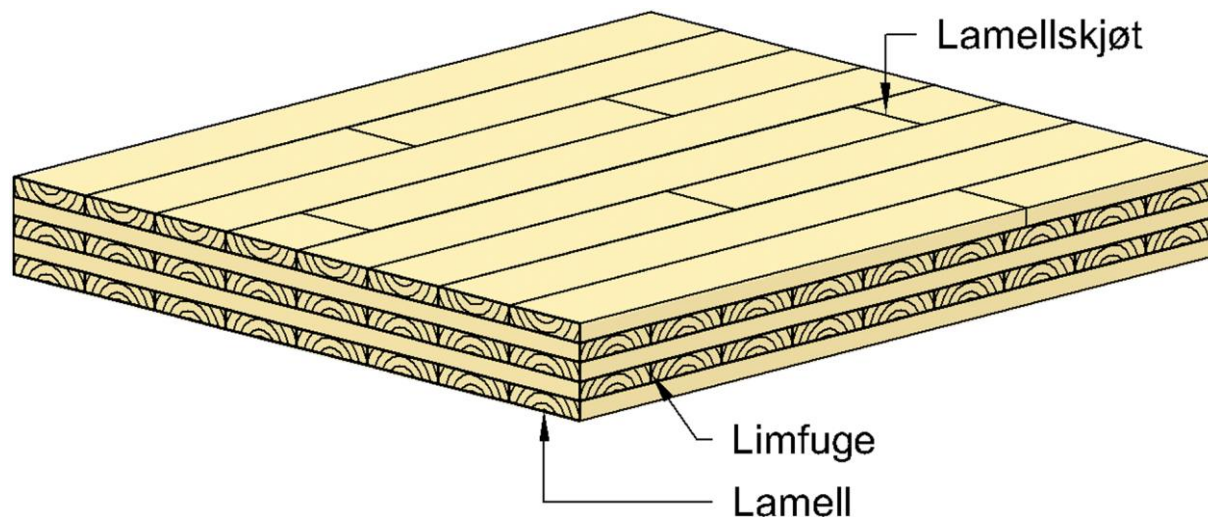


Figur 3-3 Eksempler på noen massivtreelementer og høy limtrebjelke [4]

3.2.1 Produksjonsmåte

CLT er bygd opp av krysslagte lag med lameller (planker). Disse lagene er plassert 90 grader på hverandre og er festet sammen med lim. De fleste CLT elementer er produsert med et oddetall antall lag, slik at fiberretningen i de ytterste lagene i elementet er parallelle. Elementene kan produseres

med forskjellige typer lameller, enten det er konstruksjonsvirke, kryssfiner, OBS plater eller andre typer trebaserte plate- eller plankematerialer. [9] For de aller fleste formål er CLT laget av sagd tømmer i form av planker. CLT elementer lages i en industrialisert produksjon i en innendørs fabrikk. Dimensjonene på CLT elementene er begrenset av størrelsen på produksjonslinjen, og av praktiske hensyn med tanke på transport på lastebil. Elementene varierer normalt i tykkelse fra mellom 60 mm og 300 mm, med mellom 3 og 9 sjikt (lag). Bredden på elementene er normal opptil 3 meter og lengde på opp mot 16 meter, men det finnes flere produsenter (eksempelvis tyske Derix) som produserer elementer opp til 3,5m bredde. [8] [10]



Figur 3-4 Typisk 5 sjikts CLT element - SINTEF Byggforsk [11]

3.2.2 Lim

De fleste massivtreelementer er sammensatt med lim, og på grunn av bruken av CLT og dets egenskaper er det nødvendig å velge korrekt type lim for formålet. På grunn av den krysslagte *ortogonale* (rettvinklede) egenskapen til CLT, kan det være forskjellige dimensjonsendring på lagene når treet krymper og sveller og det kan oppstå stress i skjøtene mellom lameller. Dette er normalt tatt hånd om ved å kontrollere fuktinnholdet i trevirket som benyttes, men limet må også ha tilstrekkelig styrke til å motvirke dette. Bruken av lim sørger for statisk samvirke gjennom alle lamellene.

Limet som benyttes er et konstruksjonslim for bærende trekonstruksjoner. For CLT spesifikt finnes det ingen standarder som stiller krav til limet. Det finnes derimot standarder for limet som benyttes til limtre [4], og grunnet disse bygningselementenes lignende oppbygning er det naturlig å se til dette. Det mest vanlige limet som er benyttet for både CLT og limtre er «MUF» lim. Dette står for melamin-urea-formaldehyd. [12]

Det er flere momenter som må vurderes når valg av lim skal tas. [9]

- Økonomi
- Åpen tid (arbeidstid før limet størkner)
- Herdetid
- Evne til å fylle hulrom

- Farge og andre visuelle aspekter
- Motstandsdyktighet mot brann og luftfuktighetsendringer

Valg av lim for laminering i forbindelse med produksjon av massivtreelementer er meget viktig for brannmotstanden. Typen lim som benyttes har stor innvirkning for hvordan materialet oppfører seg under brannpåvirkning. Ved bruk av polyuretanlim (Plastlim) vil limet miste sin styrke i brann og det er risiko for at hele sjikt i massivtreelementene delaminerer. [13] Dersom dette skjer vil det hurtig redusere tverrsnittet på elementet, og kan eksponere «friskt» trevirke for brann som ikke er beskyttet av det forkullede laget. Ved bruk av lim med formaldehyd kan risikoen for delaminering som følge av brann reduseres. [14]

3.2.3 Oppførsel til tre under brann

Som tidligere omtalt er tre et brennbart materiale, men *måten* tre brenner på er meget godt forsket på, utprøvd og dokumentert. [4] Tre brenner med en konstant hastighet avhengig av typen trevirke. Under et brannforløp vil den delen av en bygningsdel i tre som ikke har brent opprettholder tilnærmet hele sin styrke.

Når tre brenner brenner det fra utsiden og inn. Når det ytre laget av tre brenner blir det dannet et forkullet lag. Dette forkullede laget isolerer resten av bygningsdelen og hindrer at det indre laget med tre brenner fort. Over tid vil brannen sakte, men sikkert forkulle dypere inn i bygningsdelen og påvirke mer av bygningsdelen. Dette kaller forkullingshastigheten. For CLT er denne hastigheten 0,65mm/minutt. Det vil si at et CLT panel vil miste tverrsnitt tilsvarende 0,65mm per minutt per eksponerte side mot brann. Med CLTs generelt store dimensjoner på 60mm og opp vil dette tilsi at det tar en del tid å brenne gjennom CLT paneler.

3.2.4 Kryp

Konstruksjonsvirke blir påvirket av varigheten av last som den påføres. Ved langvarig last vil tre deformere seg over tid og miste fasthet. Dette kalles *kryp*. Det har blitt utarbeidet et uttrykk som forteller hvor mye fasthet som er igjen etter en viss belastning i timer. Utrykket kom opprinnelig fra en graf som kalles *Madison kurven*. Utrykket skal ikke gås nærmere inn på her, men etter ett års belastning vil bøyefastheten reduseres til ca. 70% av den opprinnelige karakteristiske fastheten. I standarden Eurokode 5 er det tatt hensyn til både reduksjonen i fasthet, og den økte deformasjonen som kommer over tid med 2 faktorer som reduserer fastheten man kan regne med. [4] Disse faktorene kalles K_{mod} og K_{def} .

3.3 Modulbasert bygging



Figur 3-5 Moduler under produksjon hos Skanska husfabrikken [32]

Moduler er prefabrikkerte elementer som er satt sammen av vegger, tak og gulv. Moduler kan være bærende eller bli satt inn i et separat bæresystem. Det er flere materialer som kan benyttes for å produsere moduler; stål, betong eller tre. [15]

Modulbygg er laget ved å sette sammen flere moduler til en sammenhengende bygning. Mange modulbygg har elementer av plassbygde løsninger som virker sammen med de modulbaserte delene. Modulbygg blir montert ved at hver enkelt modul blir heist opp med kran og satt på korrekt plass i bygget. Modulene blir deretter festet i hverandre. For store og høye modulbygg er det ønskelig, og i noen tilfeller nødvendig med tårnkran, men de fleste av dagens bygg monteres typisk ved bruk av mobilkran.

Moduler produseres innendørs under kontrollerte forhold i fabrikker. Modulene som produseres er relativt standardisert slik at hurtig fremgang og kvalitet kan opprettholdes. At modulene produseres relativt likt og innendørs muliggjør også utstrakt bruk av automasjon for tids- og kostnadsbesparelser. Det er mange forskjellige fag som inngår under produksjonene av moduler, og koordineringen av disse er viktig for god fremgang. Snekkere, elektrikere og rørleggere er eksempler på fag som inngår i produksjonen. [15]

Moduler kan ha varierende grad av ferdigstilling avhengig av formål og plasstilpassede løsninger. Det er mulig å få levert komplette, ferdige moduler som inkluderer alt fra inventar til fasader, eller moduler som i praksis kun er et skall hvor alt av ytterligere arbeider gjøres på plass. Fordi bruken av moduler i mange tilfeller er grunnet ønske om rask progresjon på byggeplass er de fleste moduler som blir produsert bygget med en høy ferdigstillingsgrad. [15]

Moduler kan bli fraktet fra byggested til byggeplass på mange forskjellige måter. Lastebil eller båt er de mest normale. For moduler som blir fraktet med lastebil, er dette en begrensende faktor for størrelsen på moduler. På norske veier er det en maks breddebegrensning på 4,2m, men for bredder over 4 meter kreves det politieskorte og må gjennomføres på natten, noe som gjør det upraktisk og dyrt i mange tilfeller. Moduler som er over 3,6 meter, men under 4 meter, kan transporteres med følgebil utenfor rushtid. [15]

Maks høyde for transport på norske riksveier er 4,5m. En normal henger for semitrailer er omtrent 90 cm høy, som innebærer at moduler maksimalt kan være 3,60m høye. Det er vanskelig å transportere modullengder over 16 meter, og det må tas hensyn til at lokale forhold på veier kan være begrensende for transport av store moduler.

Det er svært viktig å beskytte moduler etter produksjon. Ettersom de er produsert innendørs kan materialene ha forskjellig fuktinnhold i forhold til hva de ville hatt utendørs. Det er mulig at det vil ta lang tid å montere modulene etter at de har blitt levert til byggeplass. Da vil moduler som ikke er tilstrekkelig beskyttet tiltrekke seg fuktighet som vil være uheldig i forhold til fuktutvidelse og fuktinnhold i bygningen når den skal lukkes. Ved montering av værutsatte moduler vil det være mye større risiko for setninger og ujevnheter i det ferdige modulbygget. [15]

Moduler krever naturlig mye plass, ettersom de er volumelementer med mye hulrom inni. Ideelt sett er det ønskelig at moduler ankommer byggeplass i det de skal monteres. Dette unngår at moduler må lagres på plass og reduserer nødvendig areal. Det minsker også risikoen for at modulene utsettes for uheldige vær- og fuktforhold under tiden de må lagres. Kran og løfteområder vil være viktig å avgjøre tidlig, slik at nødvendig arealer kan settes av.

Det skilles mellom moduler som er for midlertidig og for permanent bruk. Moduler for permanente bygg har konstruksjoner som tilfredsstill alle ytelses krav i TEK, på samme måte som alle andre bygg som omfattes av teknisk forskrift. Midlertidige moduler har derimot ikke det, og har normalt en enklere konstruksjon som gjør at levetiden ikke er like lang. De kan blant annet ha mindre varmeisolasjon enn moduler beregnet for permanent bruk. Annleggsrigger er et typisk eksempel på et midlertidig bygg.

3.4 Krav i teknisk forskrift

3.4.1 Brann (TEK 17)

Sikkerhet ved brann er definert i byggteknisk forskrift TEK17 kapittel 11, fra direktoratet for byggkvalitet. TEK17 sier bygget må gjennomgå brannteknisk prosjektering, og inkluderer noen forutsetninger som må bestemmes. Disse kravene eksisterer for at man skal kunne få tilfredsstillende løsninger for byggene og at de skal være trygge å oppholde seg i. [16] For boliger kan det fattes tiltak som bruk av brannhemmende materialer for å øke motstanden mot brann.

3.4.2 Lydforhold (TEK17)

TEK17 gir også noen krav til lydforhold i bygg. Dette er definert i kapittel 13-6. Det er stilt krav om en viss grad av lydreduksjon mellom boenheter og mellom fellesområder. For studentboliger er disse

verdiene noe lavere fra boenhet inn til rom som ikke er ment for varig opphold slik som ganger. Bygninger i CLT kan være utsatte for lydtransmisjon. Det er mulig å redusere transmisjonen ved hjelp av elastiske opplegg og gode løsninger for sammenføring av bygget.

3.5 Standarder og laster

3.5.1 Standarder og regelverk

NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2009, også kaldt Eurokode 5: prosjektering av trekonstruksjoner er regelverket for dimensjonering av trekonstruksjoner. Denne standarden beskriver prinsipper og krav for trekonstruksjoners sikkerhet, brukbarhet og bestandighet. Det er ikke spesifisert noen krav for CLT i denne standarden, men de andre prinsippene for trebaserte produkter gjelder. Standarden angir materialfaktorer som må tas hensyn til ved dimensjonering av trekonstruksjoner.

NS-EN 1991-1-1 beskriver laster på konstruksjoner. Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger.

NS-EN 1991-1-3 beskriver snølaste for konstruksjoner.

NS-EN 1991-1-4 beskriver vindlaste for konstruksjoner.

For NS-EN 1991-1-3 og NS-EN 1991-1-4 er det nasjonale annekset spesielt viktig. I dette annekset beskrives det verdier for vindlast og snølast som er landsspesifikke og landsspesifikke faktorer som må tas hensyn til når det skal bygges.

3.5.2 Horisontale laster

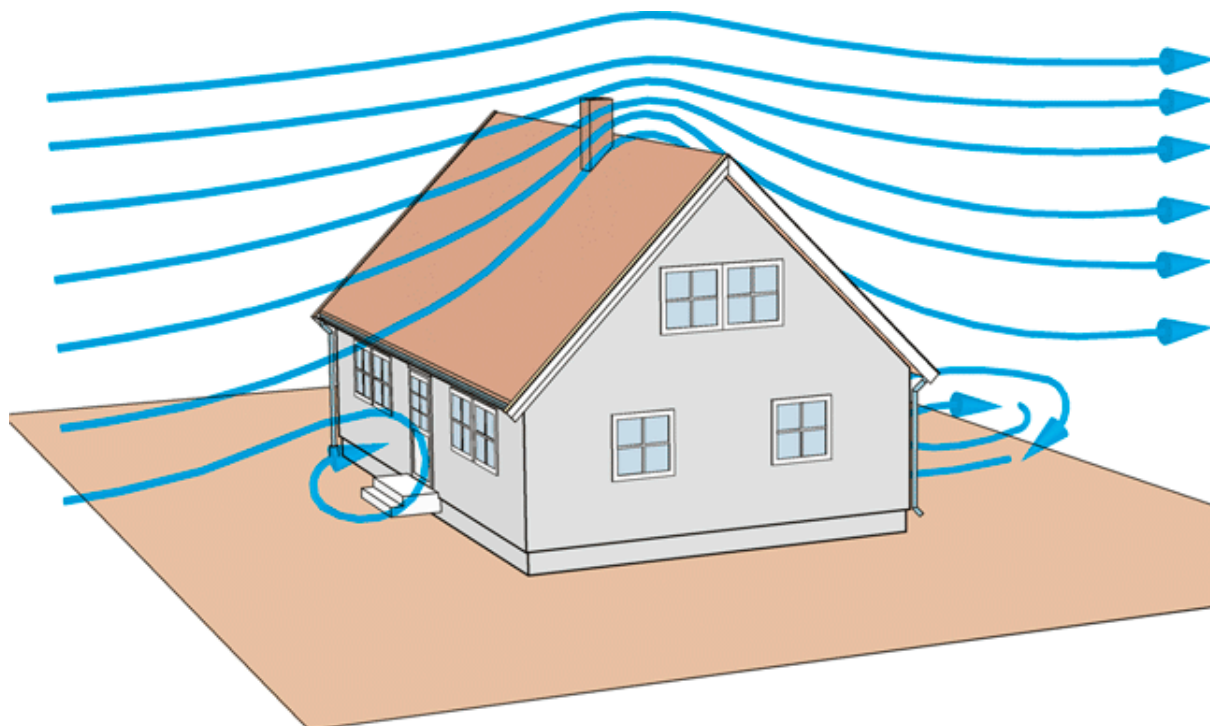
Et bygg er påvirket av forskjellige laster, og en av de mest fremtredende horisontale lastene er vindlast på bygget. Bygninger flest har store overflater imot vind, slik at den samlede påvirkningen fra sterk vind raskt kan utgjøre flere tonn som skyver et bygg på siden. Bygninger har også horisontal påkjenning fra seismisk aktivitet, bedre kjent som jordskjelv. Ved jordskjelv er det hurtige, horisontale svingninger som kan gjøre skade på bygg.

Vindlast

Vindlast på bygninger beregnes etter et eget regelverk, Eurokode 1-1-4, også kjent som NS-EN 1991-1-4. Det nasjonale annekset til EC1-1-4 gir noen tilleggsverdier som skal benyttes for beregninger for bygninger i Norge.

I korte trekk tar EC1-1-4 utgangspunkt i noen få overliggende parametere, med mange modifierende variabler avhengig av lokale forhold. Disse overliggende parametere er:

- Vindhastighet
- Størrelse på konstruksjonen
- Form på konstruksjonen
- Omkringliggende områder
- Høyde



Figur 3-6 Vindlast på hus [17]

På grunn av den typiske formen til moduler fører det som regel til et rektangel med stor forskjell på lengden på veggene som står parallelt med vinden. Dette fører til at det kan være en retning som er veldig stiv mot vinden, og en retning som ikke har like stor stivhet.

Vindkastkastighetstrykket kan beregnes gjennom den forenklede veiledningen gitt i veiledningen som følger med NS-EN 1991-1-4:2005/NA:2009. Denne veiledningen er ikke en del av NS-EN 1991-1-4 men er et hjelpemiddel for enklere å kunne bestemme vindkasthastighetstrykket på byggestedet.

3.5.3 Vertikale laster

Snølast, nyttelast og egenlast er de vertikale lastene som kan opptre i en konstruksjon.

Egenlast er beregnet ut fra tettheten til materialet og volumet av det. Dette er multiplisert med en faktor for å være på den sikre siden. Denne lasten er fast, og endrer seg typisk ikke over levetiden til konstruksjonen.

Snølast og nyttelast er laster som kan endre seg i løpet av konstruksjonens levetid. Snølast er i mesteparten av landet kun aktuelt i vinterhalvåret, men må allikevel tas hensyn til ved beregning. Spesielt takformen er viktig med tanke på snølast, hvor spisse takformer hvor snø ikke har muligheten til å forbli er mindre påvirket enn flate tak og tak som gir gode muligheter for snø til å hope seg opp.

3.6 Studentboliger

Studentboliger er boliger ment å være bosted for studenter ved universitet, høgskole eller fagskole og som har studiet som hovedbeskjeftigelse. Studentboliger er typisk utformet som hybler på mellom

10 og 20 m² og kan inkludere baderom og kjøkkenutstyr. Det er normalt flere hybler samlet sammen i et kollektiv med felles atkomstvei og fellesarealer. I noen tilfeller er det studentboliger det hybler deler på fasiliteter som baderom og kjøkken. De fleste studentboligene er drever av studentsamskipnader rundt om i landet, men det finnes private selskaper og stiftelser som også driver studentboliger. [14]

3.7 Modellering av CLT

Det er utfordringer i å modellere CLT.

Det er ikke noe regelverk i EC5 for beregninger på CLT. [4] De fleste beregningsmetoder som brukes er derfor basert på virkningen mellom (limte) lameller. For modellering av CLT i dataprogrammer benyttes derfor et generelt ortotropisk materiale som tilpasses med en stivhetsmatrise for et spesifikt tverrsnitt.

Et ortotropisk materiale som CLT er, betyr at det er et materiale som ikke har de samme egenskapene avhengig av retningen på materialet. Dette kan gjøre det spesielt utfordrende å modellere korrekt.

Beregninger for CLT gjøres som regel ved bruk av produsenters spesiallagde dataverktøy. Flere av disse verktøyene er dessverre begrenset i at de ikke kan ta for seg store strukturer med mange krefter som virker samtidig. Dette kan gjøre det nødvendig å kombinere bruken av flere programmer.

Stora Enso har et nettbasert program «calculatis» som er et slikt enkelt program. Det muliggjør å kontrollere krefter på en liten del etter å ha funnet globale kraftoverføringer ved bruk av et annet dataprogram.

4 Forskerspørsmål

Forskerspørsmål:

Hvor godt egnet er bærende bygningsmoduler i krysslaminert massivtre for studentboliger over 4 etasjer?

Underspørsmål:

1. Hvordan påvirkes byggets deformasjoner ved bruk av massivtre?
2. I hvilken grad påvirker valg av innfesting av modulene, byggets stivhet?
3. Hvordan burde knutepunkter utføres for best mulig resultat?

5 Case/Materialer

Casen som er benyttet i denne oppgaven er valgt på bakgrunn av ønske fra oppdragsgiver for prosjektet. Oppdragsgiver hadde gjort undersøkelser på markedet for studentboliger og presenterte følgende tekst som oppgavebeskrivelse.

Modulbaserte studentboliger i tre

Oppdragsgiver: AGS Holding AS/Helen&Hard

Studentbo.no er et nytt boligkonsept for studenter som ønsker å leie bolig.

*Vi har sammen med arkitektkontoret Helen & Hard sett litt på hva som er i markedet i dag, hvor de har utarbeidet en kortfattet rapport om hva som finnes på markedet av leverandører og referanseprosjekter. Vi ønsker nå å ta dette arbeidet videre for å utvikle den mest **hypereffektive, praktiske, høyteknologiske, miljørettet, kostnadseffektive modulbaserte studentboligen i tre.***

Vi ønsker hjelp til å undersøke hva som er på markedet, samt på bakgrunn av dette prosjektere, tegne og utvikle en ny modulbasert prototype studentbolig, basert på dagens og fremtidens byggemetoder. Denne prototypen må også gjerne bygges, hvor målet er å sette denne i masseproduksjon for bygging på et nasjonalt nivå.

Forhold til materialvalg, lyd, brann, tyngde/bærende konstruksjoner i tre, samt logistikk er viktige momenter vi må ta hensyn til.

Dette satte en del rammer for prosjektet, og det ble gjennom dialog med oppdragsgiver bestemt å ta for seg en case som vil være relevant for deres idé. Oppdragsgiver ønsket en fremtidsrettet, miljøvennlig studentbolig og ønsket at studentboligen skulle lages i massivtre. Hensikten er å modellere en hypotetisk modulbasert studentbolig i massivtre.. Denne modellen skal det beregnes krefter på, for å kunne avgjøre deformasjoner og last på bygningsdelene.

5.1 Utforming av bygget

I henhold til oppgavebeskrivelsen ble det tidlig bestemt at det skulle være en modulbasert studentboligbygg. Bruken av moduler i seg selv legger en del føringer på utformingen av bygningen med tanke på hvordan moduler passer sammen, for å oppnå et bygg som er i stand til å stå av seg selv kun ved bruk av moduler. I henhold til oppgavebeskrivelsen skal den modulbaserte studentboligen være kostnadseffektiv. Dette legger videre en del antagelser som vil være rimelige å gjøre.

- Likt design på alle moduler for enklere produksjon
- Fastsatt størrelse på hver modul for å muliggjøre for praktiske hensyn rundt transport og montering.
- Benytte flest mulig hele elementer med minimalt etterarbeid (ikke sammensatte)

Modulbygg kan i utgangspunktet settes sammen på veldig mange måter, men på grunn av oppdragsgivers ønske er det hensiktsmessig å vurdere klassiske konstruksjoner. Det ble derfor tatt utgangspunkt i et rektangulært bygg. Dette er godt kjent å fungere bra for modulbaserte løsninger.

For å forenkle transport ble det bestemt at det skulle tas utgangspunkt i noen spesifikke parameter. Disse parameterne ville bestemme dimensjonene for hver enkelt modul. Hver modul skulle ha en maksimal bredde på 3250mm av transporthensyn.

Bygget skulle tas utgangspunkt i en tomt i Kristiansand som kunne være egnet for bygging av en modulbasert studentbolig i CLT.

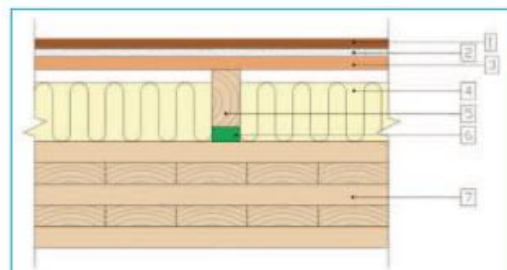
5.2 Lastforutsetninger

Vindkastkastighetstrykket beregnes gjennom den forenklete veiledningen gitt i veiledningen som følger med NS-EN 1991-1-4:2005/NA:2009. Denne veiledningen er ikke en del av NS-EN 1991-1-4 men er et hjelpemiddel for enklere å kunne bestemme vindkasthastighetstrykket på byggestedet.

Dette er en verdi som vil ende opp med å være rimelig nøyaktig, eller på den sikre siden i forhold til å beregne gjennom bruken av NS-EN 1991-1-4.

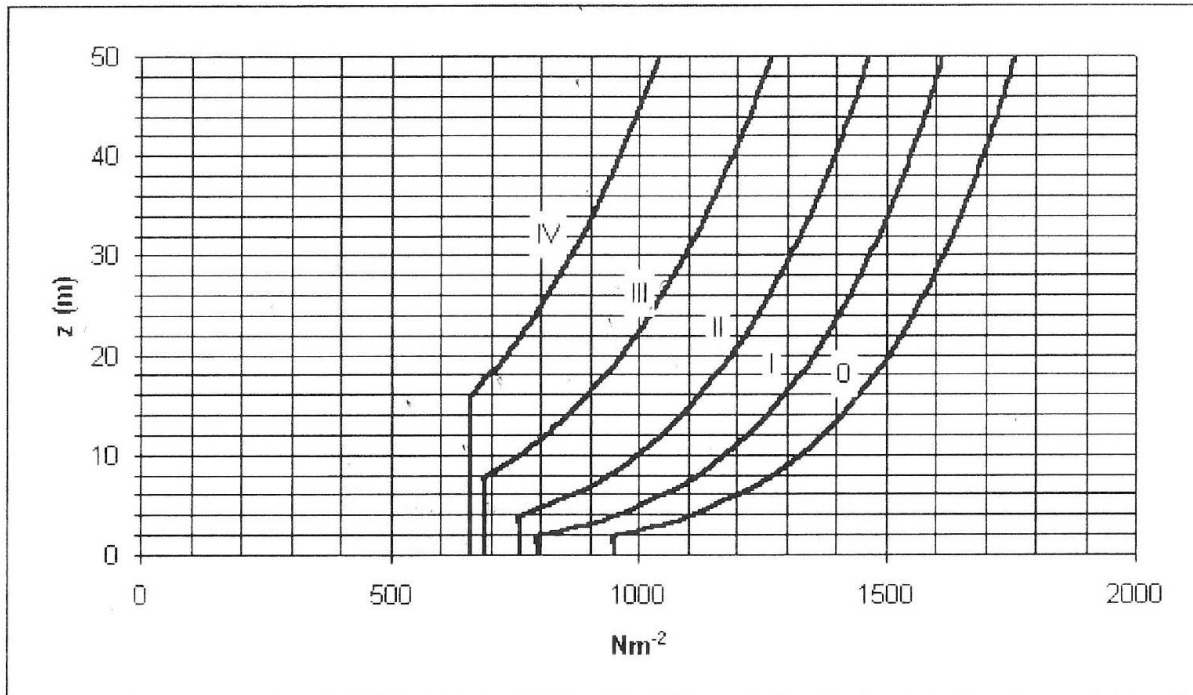
For di bygget skulle settes opp i Kristiansand gir dette en verdi $V_b = 26\text{m/s}$. For området rundt ble det antatt at det er terrengruhetskategori II, da det var mest sannsynlig for denne mulige tomten.

Lydisolerende tiltak på overside av etasjeskiller



Nr.	Oppbygning		Veid, laboratoriemålt luftlydisolasjon (dB)		Veid, laboratoriemålt trinnlydisolasjon (dB)	
			R_w	$C_{50-5000}$	$L_{n,w}$	$C_{1,50-2500}$
1	Parkett på parkettunderlag	14 mm	60	-1	54	+3
2	Gulvgips (14 kg/m ²)	13 mm				
3	Sponplate	22 mm				
4	Isolasjon (Glava 36)	100 mm				
5	Tilfarer	48 x 98 mm				
6	Elastisk underlag; Sylomer grønn. c/c 1200 mm	40 x 25 x 450 mm				

Figur 5-1 Lydisolerende tiltak på overside av etasjeskiller [28]



c) Grunnverdi for hastighetstrykk fra vindkast $q_{p0}(z)$ for $v_{b,0} = 26$ m/s

Figur 5-2 Grunnverdi for vindkasthastighetstrykk V1 i NS-EN-1991-1-4

For gulvet ble det antatt en verdi på 3KN/m² for nyttelast. Det er ikke tatt hensyn til reduksjonsfaktorer for etasjer.

Det ble i tillegg antatt en viss mengde overgulv/lydisolering. Dette består av flere komponenter, men kun delene som har en betydelig masse er tatt med i beregningen for dette.

Parkett: 8kg/m² [18]

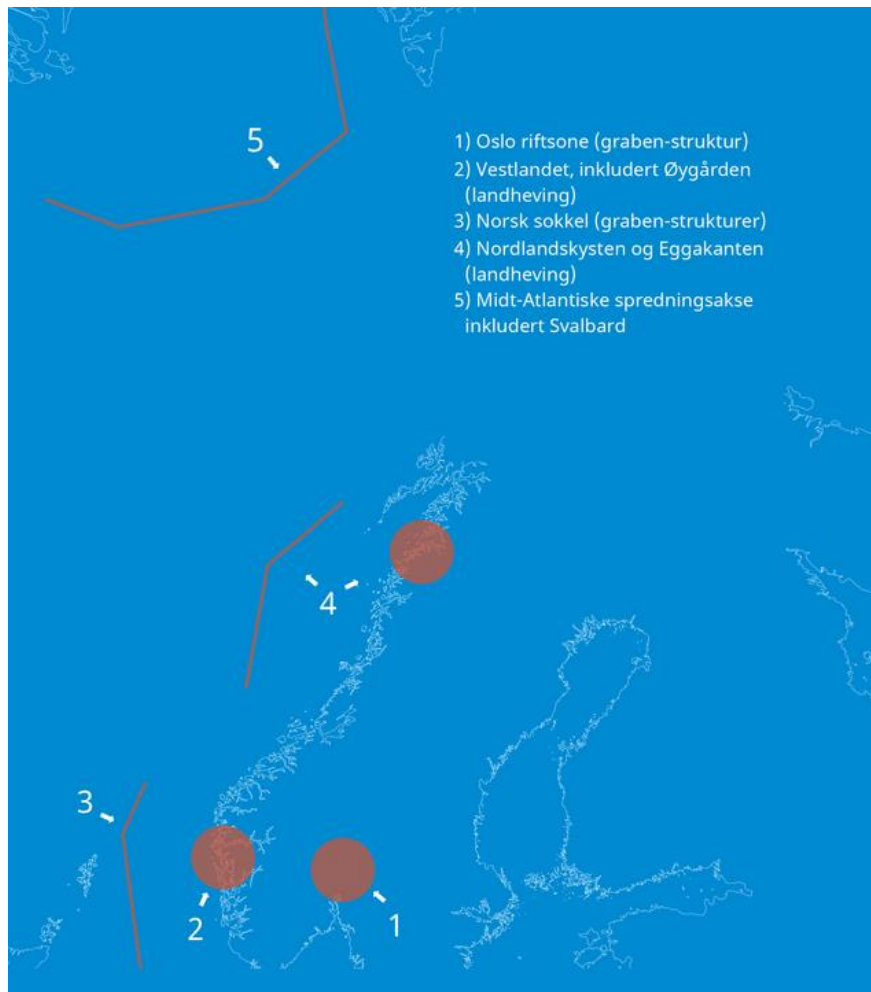
Gipsplate: 14kg/m²

Sponplate: 15kg/m² [19]

sammenlagt: 37kg/m² = 0,37KN/m²

Runder opp til 0,4KN/m² for enkelhet og for å ta hensyn til neglisjerbare komponenter.

Enkelte områder i Norge kan være utsatt for jordskjelv. I disse områdene vil det være nødvendig å vurdere styrke og struktur med tanke på at jordskjelv kan forekomme. For denne oppgaven vil det ta utgangspunkt i at bygget vil plasseres i et område som ikke er jordskjelvutsatt.



Figur 5-3 Jordskjelvutsatte områder i Norge [20]

6 Metode

Metoden som skal benyttes er i korte trekk å lage en digital modell av en enkelt modul for en studentbolig, for deretter å multiplisere denne til en full studentbolig, eller del av studentbolig, og påføre typiske laster som en studentbolig vil bli utsatt for.

6.1 Programvare

En grunnleggende modell vil produseres i Autodesk Revit for den generelle modelleringen og utformingen av modulen.

Revit er et program laget av Autodesk, et amerikansk programvare selskap som lager programmer for arkitektur, ingeniørvitenskap, produksjon og underholdning. Revit er et BIM program, bygnings-informasjons-modellering, som kan benyttes til å lage tredimensjonale modeller av konstruksjoner. Programmet kan brukes til å designe konstruksjoner ned til minste detalj, med bruk av korrekte materialer og dimensjoner, og å planlegge konstruksjonen gjennom tid.

Denne modellen vil deretter overføres til Autodesk Robot for analyse av modellen. Autodesk robot er en FEM programvare, «finite element method» som kan beregne hvordan krefter påvirker konstruksjoner. Når modellen har blitt overført vil den belastes på aktuelle flater med relevante krefter. I hovedsak vil dette være vindlast, egenvekt og nyttelast.

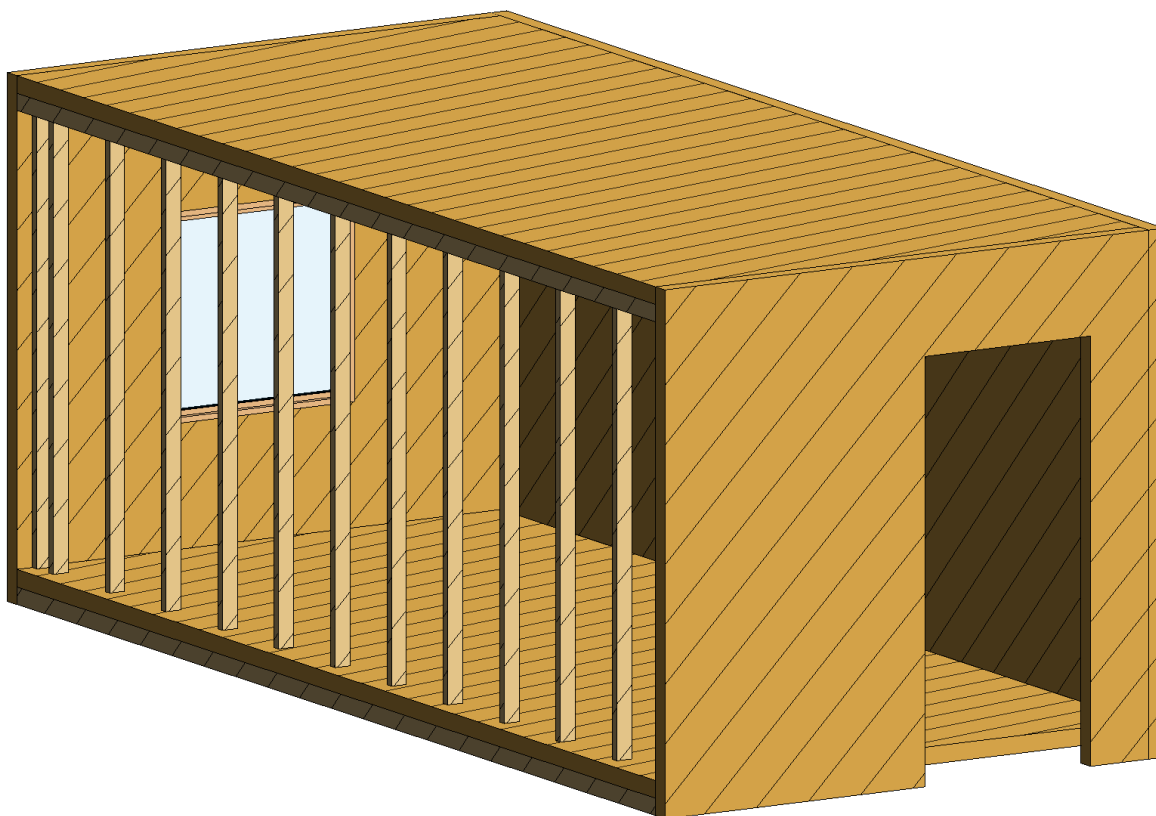
6.1.1 Begrensninger i programvare

Fremgangsmåten som er benyttet i Autodesk Robot og Autodesk Revit vil bruke den engelske betegnelsen på alle funksjoner som er benyttet. Dette er gjort som følge av at programvaren ikke er tilgjengelig i norsk språk. Personlig oversettelse av funksjoner kunne derfor ført til unøyaktighet dersom arbeides skal ettergås eller tilsvarende skal gjennomføres av noen andre. Funksjoner vil i enkelte tilfeller hvor det ikke er åpenbart hva den engelske betegnelsen betyr være forklart med en tilhørende tekst på norsk.

6.2 Fremgangsmåte

Det ble bestemt å ta for seg hoveddelen av en studentbolig. Hoveddelen til studentboligene ble bestemt til å være selve boenhetene. Selve boenhetene vil utgjøre klart størsteparten av studentboliger, og er noe som vil være konstant over alle forskjellige studentboliger som bygges for at det i det hele tatt skal kunne kalles studentboliger. Det ble derfor valgt å fokusere på denne delen av en studentbolig, og la resten være videre arbeid. En full studentbolig vil trenge ytterligere ting som tilkomstvei til boenhetene og andre fasiliteter som fellesrom, lagring og mer. Dette kan også være prefabrikkerte elementer i CLT eller det kan være plassbygde løsninger.

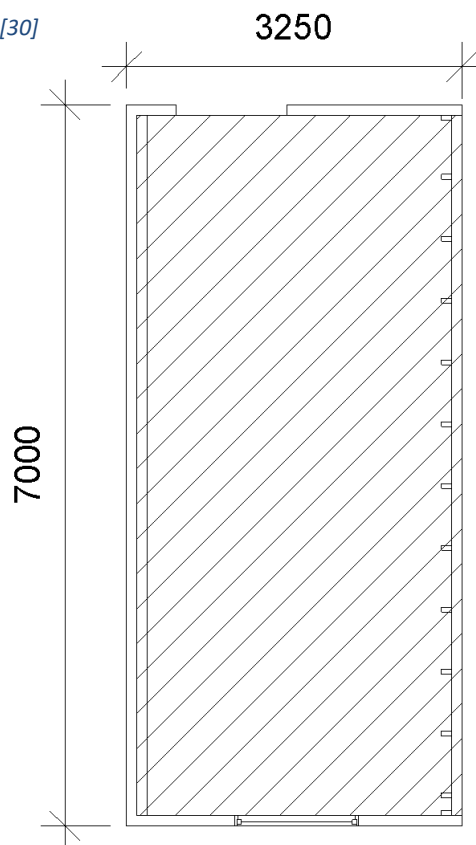
6.3 Gjennomgang av modelleringsarbeid i Revit



Figur 6-2 Enkeltmodul i CLT [30]

En grunnleggende modell av en modul ble startet på i Revit. Denne modellen ble laget for å brukes som utgangspunkt til modellen som skulle produseres i Robot. Denne modellen hjalp også med å synliggjøre utfordringer med modulbygging som måtte bli tatt hensyn til. Dette var ting som rekkefølge og monteringsmuligheter slik at det faktisk ville være mulig å montere flere moduler sammen til et modulbygg. Dersom moduler hadde blitt sett på individuelt kunne det ha kommet frem situasjoner der det ville vært umulig å få tilgang til nødvendige bygningsdeler under montering.

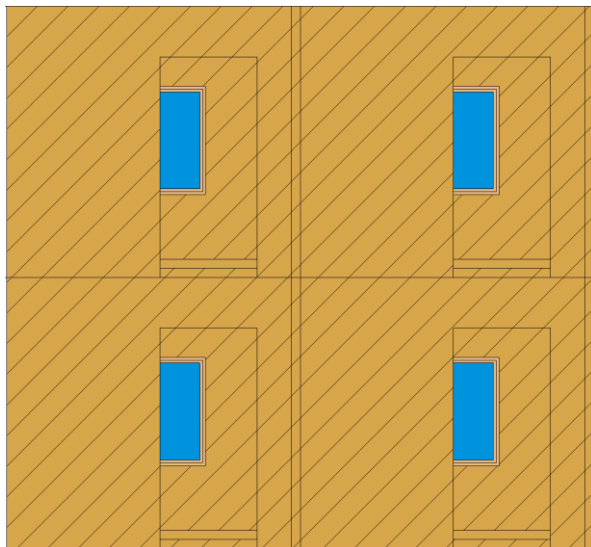
På dette stadiet ble det tatt beslutninger på bakgrunn av casen for utformingen til hver enkelt modul. Det ble bestemt at modulen skulle være av en bestemt størrelse på 3250mm x 7000mm x 3000mm (BxLxH) av transporthensyn, og som nevnt i case- kapittelet for å være en god løsning for en studentbolig. Ett vindu og en dør ble også grovt plassert for å planlegge for videre beslutninger. For å legge til rette for lydisolering mellom boliger, og forenkle tekniske føringer, ble det besluttet å ha mellomrom til foregående



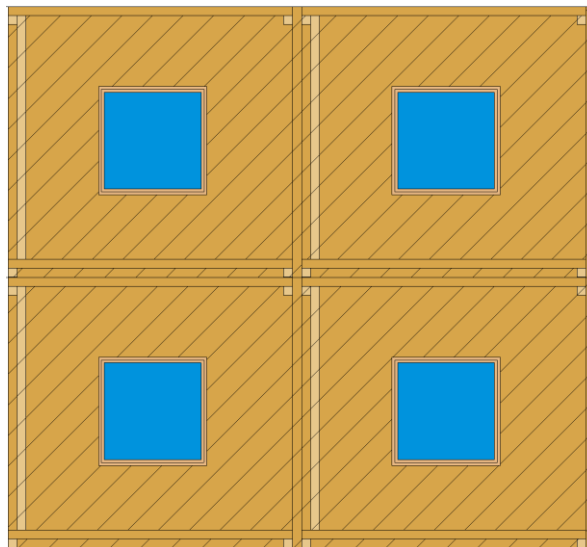
Figur 6-1 Modul plantegning [30]

moduls langvegg. Dette mellomrommet ble laget ved å plassere en ikke bærende stendervegg på gulvet til modulen. Alle CLT paneler var modellert som massive trepaneler i revit, da det ikke var noen enkel måte å benytte CLT paneler på.

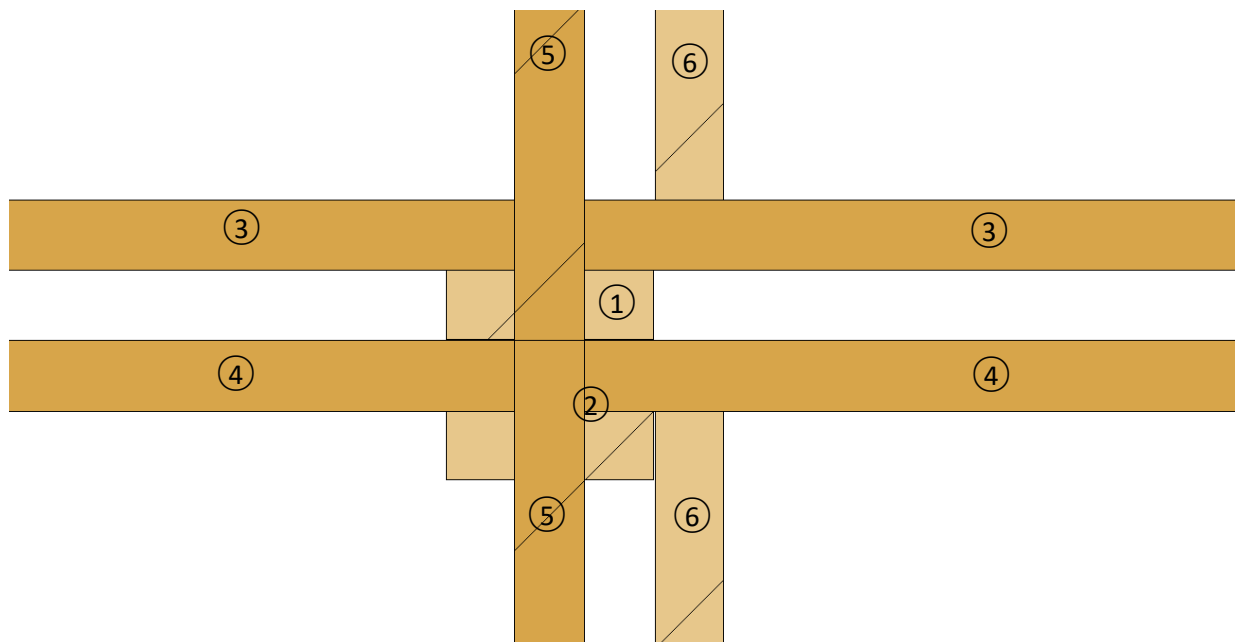
På dette tidspunktet ble valg av lastoverføring tatt. Det ble besluttet å hvile CLT gulv og CLT tak på dragere som er festet i veggene til egen modul og til modulen som vil være plassert ved siden av. På denne måten kunne det unngås å passere vertikale krefter gjennom gulv- og tak elementer og man kan få en *kontinuerlig* vertikal bæring. Denne løsningen ble også valgt fordi det er en enkel løsning som er vanlig i Europa. [9]



Figur 6-4 4 Sammensatte moduler [30]



Figur 6-3 4 Sammensatte moduler med eksponert bæresystem [30]



Figur 6-5 Utsnitt av knutepunkt mellom 4 moduler [30]

1. Dragere festet horisontalt til CLT vegg. Dragere hviler *ikke* på CLT tak under.

2. Elastisk opplegg mellom CLT gulv og tak, og drager og vegg av lyd- og vibrasjonshensyn.
3. CLT gulv.
4. CLT tak.
5. CLT vegg.
6. Lettvegg av stendere (plassert på CLT gulv).

Enkeltmodulen som ble produsert ble deretter multiplisert opp i høyde og bredde. Antall etasjer var bestemt av casen som kom som følge av ønske fra oppdragsgiveren. Antall etasjer ble derfor bestemt til å være 7. Bredde på bygget, i form av antall moduler plassert ved siden av hverandre, ble satt til 5. Denne verdien ble valgt som følge av indikasjoner fra oppdragsgiver på størrelse de ville ønske seg på bygget. Oppdragsgiver kunne tenke seg et minste antall moduler som de ville benytte i bredden og verdien som ble valgt ble satt ut fra dette.

Grunnen til at minste antall moduler som oppdragsgiver kunne tenke seg ble valgt, var av hensyn til vindpåvirkning. Et tenkt eksempel på et bygg med en modul i bredden og stablet 7 etasjer opp vil ha lite «støtte» mot vinden som treffer langveggen. Men dersom det er flere moduler satt inntil hverandre, vil ikke overflaten mot vinden i denne retningen øke, men byggets masse og støtte mot vinden vil øke.

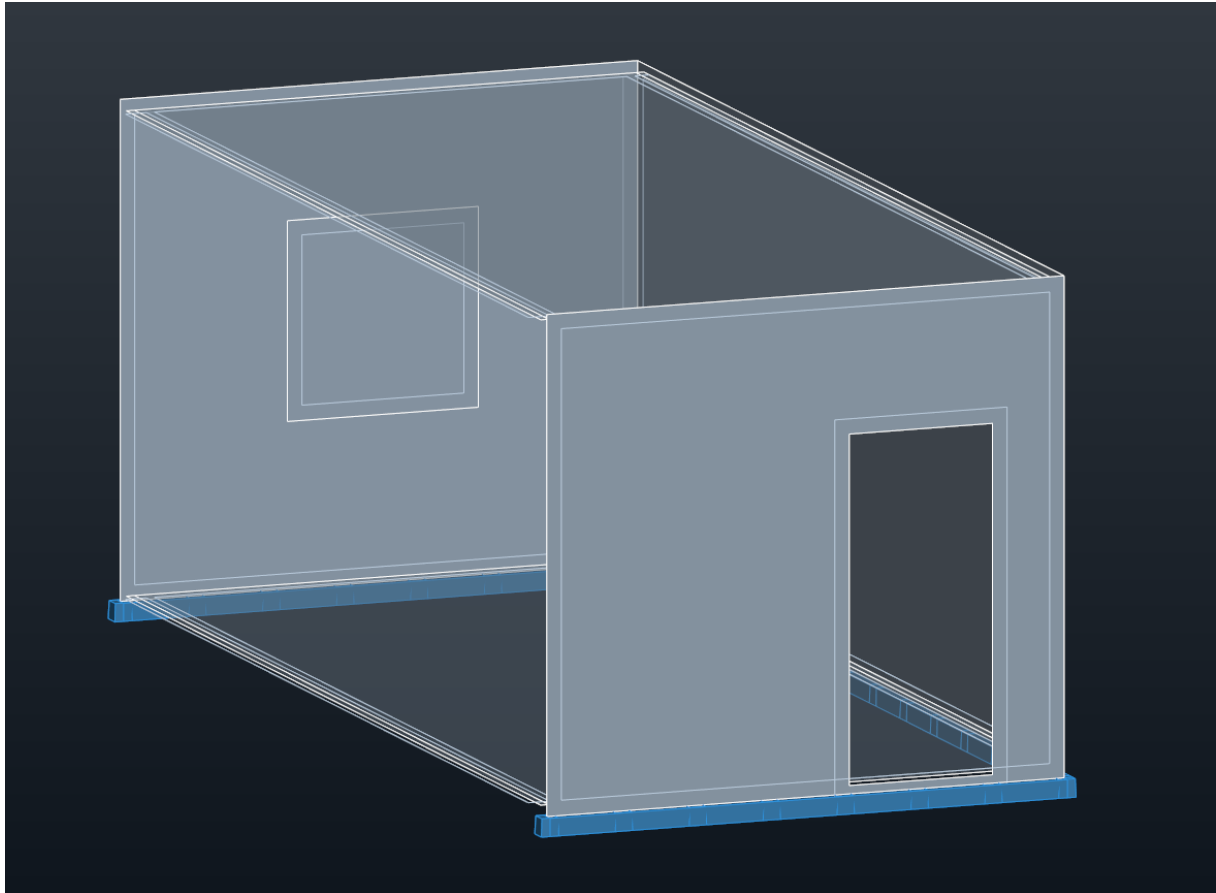
6.4 Overføring til Robot

Denne modellen som ble produsert i Revit ble overført til Robot ved hjelp av en innebygd funksjon. Denne funksjonen heter «Robot Structural Analysis Link» og overfører materialer og posisjoner til Robot for analyse av strukturen. Det er ikke muligheter for å gjøre analyser av lastpåvirkninger i Revit.

I robot ble det tatt utgangspunkt i modellen som ble overført fra Revit. I robot var denne modellen lik som modellen fra Revit rent visuelt, men robot har andre krav til sammenføring som Revit ikke har. I Revit er det i nesten alle tilfeller tilstrekkelig at objekter og bygningsdeler visuelt henger sammen, mens i robot er det nødvendig med nøyaktige koordinater og koblinger for at krefter skal overføres korrekt. Dette går på programmenes forskjellige funksjon og bruksområde, som jeg ikke skal komme inn på her, men som det er viktig å huske på.

Overføringen til robot gav korrekte etasjebestemmelser basert på «elevations» i Revit. Dette endte opp med å bli en stor fordel med korrekte etasjebestemmelser når modelldeler skulle multipliseres i robot.

6.5 Modellering i Robot



Figur 6-6 Enkeltmodul i CLT – Robot [31]

Robot modellen tok utgangspunkt i modellen som ble overført fra revit, men de eneste punktene som til slutt endte opp med å bli benyttet var plasseringen av hjørnene til hver enkelt modul.

6.5.1 Vegger

De 3 veggene ble satt opp med bruk av «walls» funksjonen. Her ble veggens plassering og størrelse definert ved plassering av de 4 hjørnene på hver vegg. På dette tidspunktet var veggene laget av et vilkårlig veggmateriale. I dette steget var hovedmålet kun å få plassert vegger med korrekt størrelse på korrekt sted. Materialet, og retningen på materialet, som veggene var laget av ble justert på et senere tidspunkt. Robot tar ikke hensyn til tykkelsen på bygningsdeler under selve modelleringen av en struktur, slik at alle bygningsdelene som settes opp fremstår som uten tykkelse.

6.5.2 Gulv og tak

I neste steg ble gulvet og taket i hver enkelt modul modellert. Begge ved bruk av «floors» funksjonen, og på samme vis som veggene med et vilkårlig, midlertidig materiale. «Floors» brukes ikke kun som gulv, men også som tak fordi det benyttes samme materiale som i gulvet, med tilsvarende funksjon. «Floors» benyttes også fordi det ikke finnes en funksjon navngitt «ceiling» eller lignende. Gulvets størrelse var i utgangspunktet modellert som å være like stort som området som omkranses av de 4 hjørnene til veggene, men ble så trukket 5 cm tilbake på sidene mot langvegg og 10 cm tilbake på

sidene mot kortvegg. Gulvet ble trukket 10 cm tilbake fra kortveggene fordi det ikke var ønsket at det skulle overføres noe last fra gulvet direkte til kortveggene. På langveggen ble gulvet trukket 5cm inn for å legge til rette for å modellere drageren som gulvet skal hvile på. Taket ble modellert på nøyaktig samme måte som gulvet. Gulvet ble deretter hevet med 5cm for å forsikre at kraften som vil overføres til langveggene ikke vil bli overført inn i skjøten mellom veggelementene. Taket ble på samme måte senket med 5cm for samme årsak.

For å simulere opplageret til gulvet (drageren festet horisontalt til langvegg) ble det laget et lite stykke gulv mellom kanten på gulvet og veggen. Dette ble gjort så kraften ville opptre noe eksentrisk og så gulvet ikke var direkte koblet inn i veggen. Det lille stykket med gulv ble fast innspenst i veggen ved bruk av funksjonen «linear releases». Denne funksjonen vil bli beskrevet i et senere kapittel På siden av den lille gulvbitten som er i kontakt med selve gulvet er koblingen leddet. Dette er en tilnærming som ble gjort da det ikke var mulig å lage en horisontalt festet bjelke som gulvet kunne hvile på. Dette sørger for at gulvet ikke er fast innspenst i endene, men at skivevirkningen fremdeles er ivaretatt og at lasten fra gulvet blir jevnt fordelt på langveggen. Taket ble behandlet på samme måte av samme årsak.

6.5.3 Utsparinger

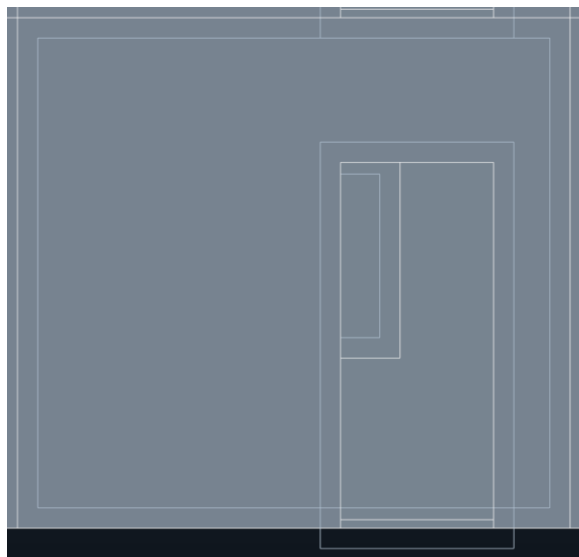
Neste steg var å fjerne materiale i vegger der det ville komme garanterte store utsparinger. Dette ble gjort via funksjonen «openings» som fjerner materiale innenfor et valgrområde på et panel. Disse utsparingene er ett vindu og en dør i hver enkelt modul. For modelleringens del ble dør og vindu plassert på nøyaktig samme posisjon i hver modul. Disse store utsparingene vil klart påvirke bæreevnen til veggene og må derfor tas hensyn til. Vinduet ble valgt til å være en relativt standard størrelse på 1200x1200mm. (Vinduet i seg selv er noe mindre, men utsparingen som kreves er 1200x1200mm) Utsparingen til vinduet ble plassert tilnærmet sentrisk på kortveggen med avstand 1m til den ene siden og 1,05 meter til den andre siden. Underkant av utsparingen ble plassert 1m over nedre kant av panelet. Dette er noe høyere enn sentrisk plassert på panelet, og ble gjort som følge av at gulv og eventuelle overgulv vil bygge opp i høyden.

Det ble laget utsparing til dør på samme måte. Utsparingen ble satt til å være 1100mm bred og 2150mm høy. Disse målene ble valgt for å legge til rette for flere valg av dører. Utsparingen for døren

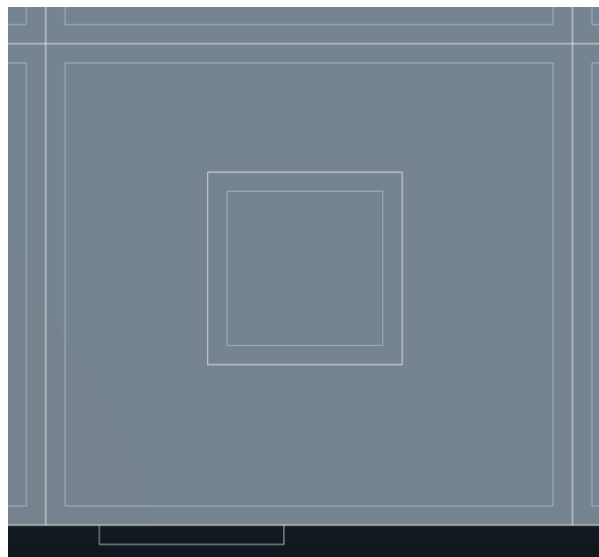


Figur 6-7 Gulv trukket inn fra vegger [31]

ble plassert på motsatt side av vinduet og forskjøvet mot den ene sidekanten. Utsparingen til døren starter fra bunnen på panelet og det er ikke noe panel under utsparingen til døren.



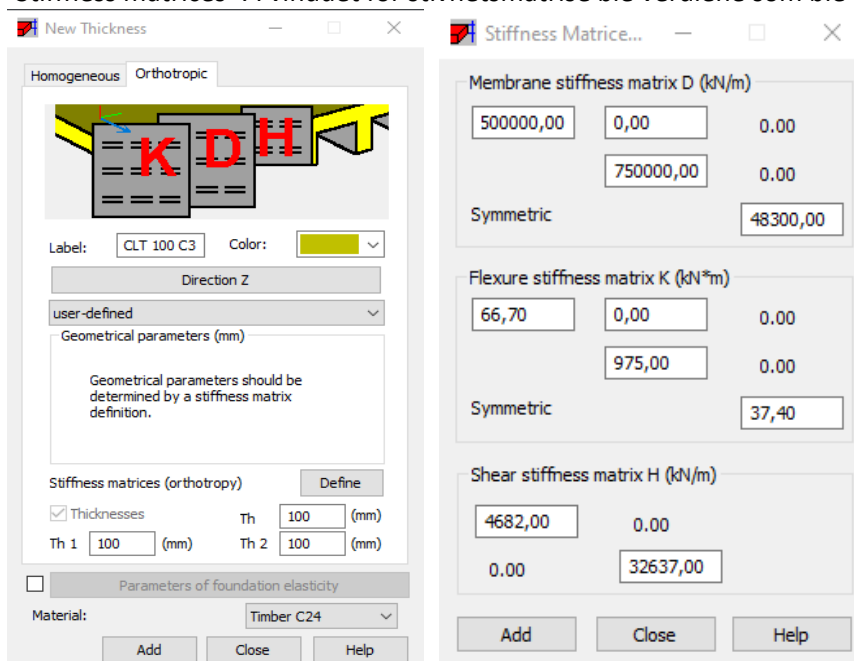
Figur 6-9 Utsparing til dør plassert på kortvegg [31]



Figur 6-8 utsparing til vindu plassert på kortvegg i modul [31]

Etter å ha laget den generelle formen på hver enkelt modul måtte materialene defineres korrekt. I robot ligger det innebygd mange forskjellige materialer som kan benyttes. CLT er dessverre ikke et materiale som allerede ligger inne. For å simulere CLT er var det derfor nødvendig å lage et egen ortotrop material i Robot. Dette materialet ble laget ved hjelp av å definere stivhetsmatriser for et spesifikt element. Informasjon for dette ble hentet fra et datablad fra Stora Enso, for et 100mm tre-lags CLT element. [21]

For å lage selve materialet ble «thickness» funksjonen benyttet. Under «new thickness» velges «orthotropic» og deretter «user-defined» i rullemenyen. Dette muliggjør å sette inn egne verdier for stivhetsmatrisen under «Stiffness matrices». I vinduet for stivhetsmatrise ble verdiene som ble hentet ut fra databladet til Stora Enso puttet inn. Verdiene som ble valgt for CLT panelene var «CLT 100 C3s» for veggpaneler og «CLT 100 L3s» for gulv og takpaneler. Tykkelsen på panelene som skulle benyttes ble ført inn under «Th» for thickness.



Figur 6-11 New thickness vindu i robot [31] Figur 6-10 Stivhetsmatrise vindu i robot [31]

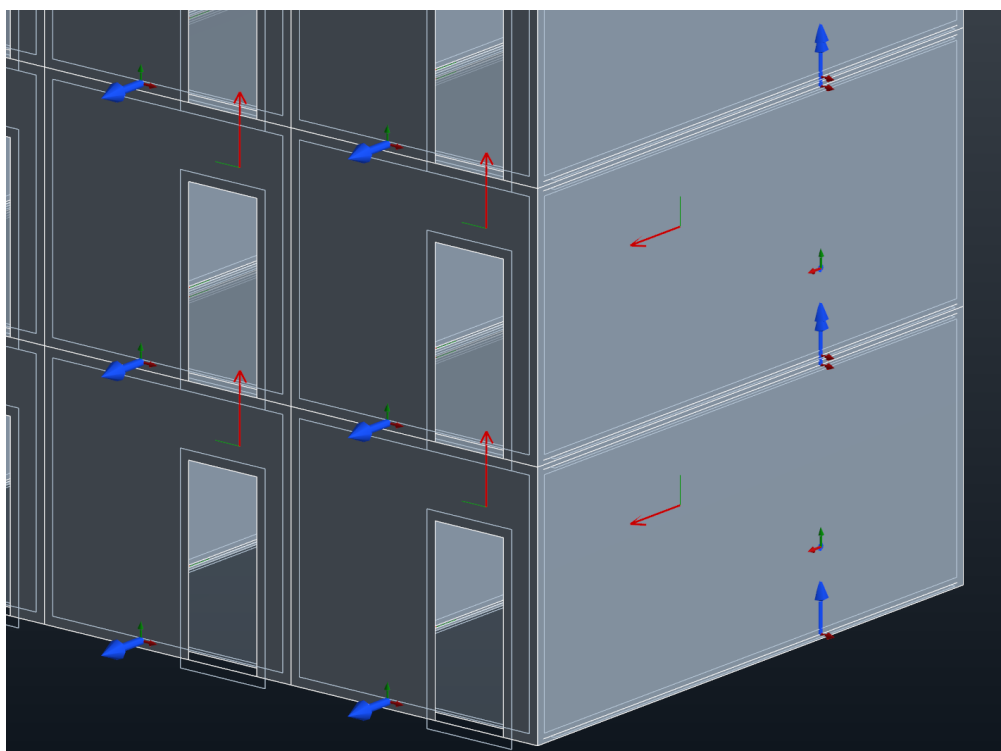
6.5.4 CLT Materiale

Fordi CLT er et ortotropisk materiale har det forskjellige egenskaper avhengig av retningen på panelet i forhold til påført last. I robot var det derfor nødvendig å kontrollere og bestemme retningen på ortotropien. Dette ble gjort i «new thickness» vinduet. Korrekt retning på panelene ble bestemt via eksperimentering. Det ble laget to vegger med CLT som materiale og plassert en stiv plate som hvilte på panelene. Denne platen ble så belastet med en stor fast last som ville bli fraktet til grunn gjennom CLT panelene. Deformasjonene som oppsto i panelene ble deretter lest av og retningen som hadde den laveste deformasjonen ble valgt som korrekt retning. Det var tre mulige retninger som panelene kunne være orientert etter, X, Y og Z. Ortotropi retningen på panelene er i forhold til panelenes lokale aksesystem. Dette gjorde at panelene ikke nødvendigvis ville få samme retning på ortotropien selv om det var tilsvarende panel, avhengig av i hvilken retning de var plassert i modellen (slikt som kortvegg og langvegg på bygget). En retning på ortotropien gav alltid «instability» i modellen ved beregning og lot seg ikke gjennomføre. De to andre retningene ble vurdert i forhold til lavest deformasjon.

Gulv- og takpanel: Z-retning gav «instability», Y-retning viste 25mm deformasjon, X-retning viste 3mm deformasjon. X-retning ble valgt.

Langvegg: Z-retning viste 32mm deformasjon, Y-retning viste 16mm deformasjon, X-retning gav «instability». Y-retning ble valgt.

Kortvegg: Z-retning viste 20mm deformasjon, Y-retning gav «instability», X-retning viste 25mm deformasjon. Z-retning ble valgt.

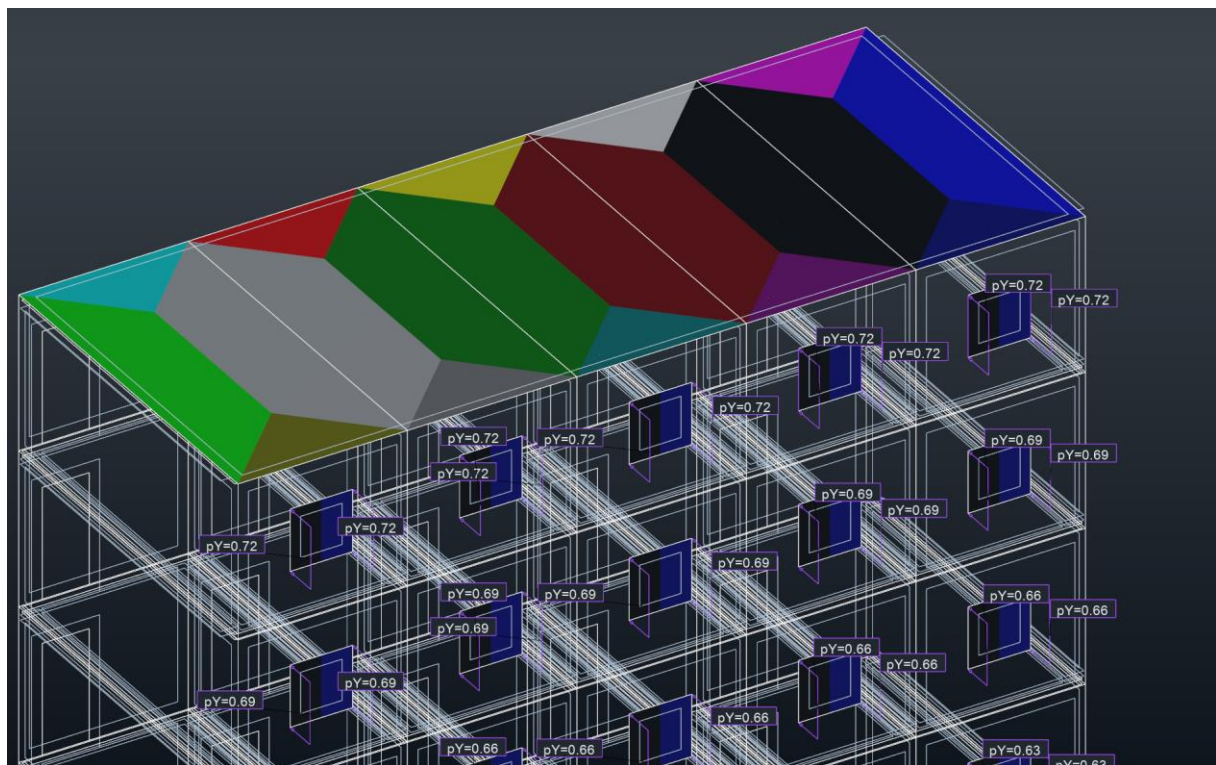


Figur 6-12 Lokale aksesystemer på paneler og retning på ortotropi [31]

6.5.5 Claddings

Utsparingene til vinduene er panel som har blitt fjernet, så ved påføring av last vil ikke utsparingene registrere som overflate. Dette vil skape problemer ved påføring av vindlast da vinduer selvsagt er overflate som er påvirket av vind, selv om de ikke har noen bærende evne.

«Claddings» ble benyttet for å ta hensyn til vinduene. Claddings er en plate som plasseres over et område som viderefører krefter til nærmeste bærende eller støttende del. Denne platen har ingen strukturelle egenskaper annet enn å overføre kreftene på et område. En slik «cladding» ble plassert over alle utsparingene hvor det er vinduer. En cladding ble også plassert på taket, og dekker alle modulene for å ta hensyn til snølast.



Figur 6-13 Lastfordistribusjon på områder med claddings [31]

6.5.6 Laster og lastkombinasjoner

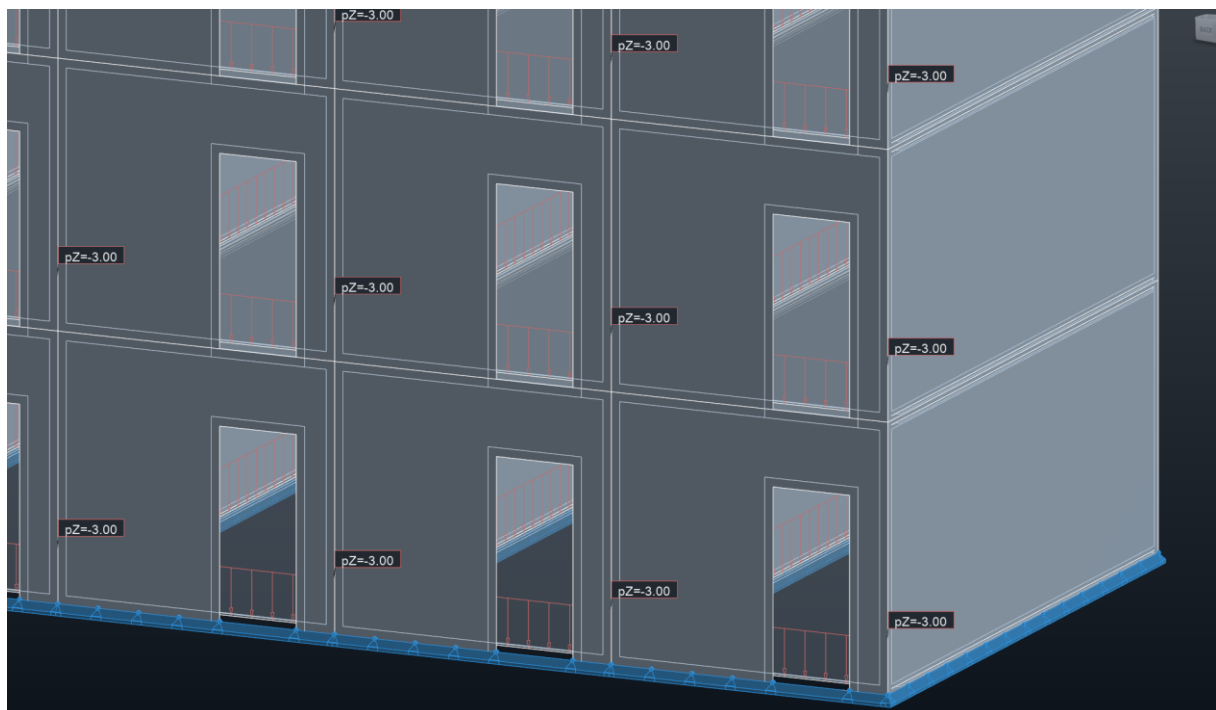
Robot beregner selv egenlaster for alle bygningselementer avhengig av tykkelse og materiale. Alle materialene er oppført som laget av «Timber C24». Dette har beregnet egenlast 420 kg/m³ i robot. Flere produsenter av CLT laget av «Spruce C24» oppfører egenvekten som noe høyere enn dette. Disse verdiene varierer, men ligger på omtrent 450 kg/m³ [22] Denne forskjellen vil anses som neglisjerbar, da 3kg økt egenvekt per m² ved bruk av 100mm CLT paneler er svært lite i forhold til de andre lastene. Den faste belastningen fra bindingsverk lettveggen vil også ansees som neglisjerbar. Alle andre laster er påført som jevnt fordelte laster i bygget. Som tidligere beskrevet for casen er det påført laster av en gitt størrelse. Følgende laster ble påført bygningen. Alle verdier er i KN/m².

Vertikale laster	
Nyttelast	3
Faste laster (overgulv/lydgulv)	0,4
Snølast	4

Horisontale laster. Vindlasten øker i forhold til høyden over terreng etter V1 i Eurokode 1-1-4.	
7. etg	1,20
6. etg	1,15
5. etg	1,10
4. etg	1,05
3. etg	0,95
2. etg	0,85
1. etg	0,77

Lasttilfeller ble opprettet for å kunne organisere lastene som ble påført. Robot har noen lasttilfeller automatisk definert, disse ble benyttet der det var passende og det ble lagt til lasttilfeller det det ikke var det. Dette brukte funksjonen «load types» i robot.

Lasttilfelle	Funksjon
DL1	Egenlast
WIND 1	Vindlast i global Y-retning
WIND 2	Vindlast i global X-retning
SNOW 1	Snølast på tak
Nyttelaster på gulv	Nyttelast på gulv
Faste laster på gulv (lydgulv)	Last fra fast overgulv som lydgulv

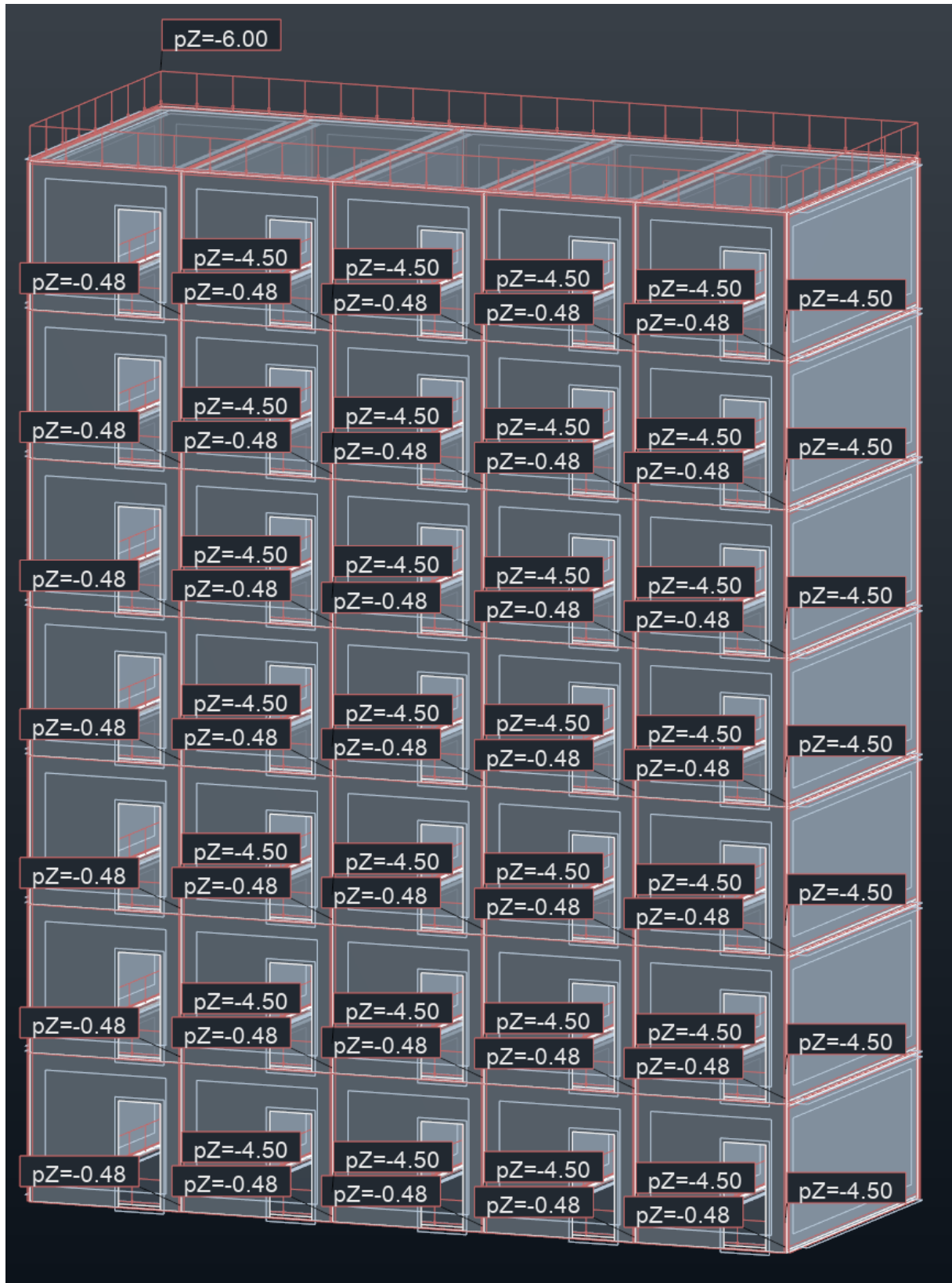


Figur 6-14 Påført last i robot: Nyttelaster på gulv [31]

Lastkombinasjoner ble deretter opprettet ved hjelp av «manual load combinations». Dette er en funksjon for å kombinere kreftene som kan opptre samtidig. Ved bruk av «load combinations» kan

det også legges inn en faktor på hver enkelt last. Det ble opprettet følgende lastkombinasjoner med følgende faktorer:

Lastkombinasjon	Inkluderte laster	Lastfaktor
COMB 1: vertikale laster	DL1	1,20
	SNOW 1	1,50
	Nyttelaster på gulv	1,50
	Faste laster på gulv (Lydgulv)	1,20
COMB 2: vertikal + vind X	DL1	1,20
	SNOW 1	1,50
	Nyttelaster på gulv	1,50
	Faste laster på gulv (Lydgulv)	1,20
	WIND 2	1,50
COMB 3: vertikal + vind Y	DL1	1,20
	SNOW 1	1,50
	Nyttelaster på gulv	1,50
	Faste laster på gulv (Lydgulv)	1,20
	WIND 1	1,50



Figur 6-15 Lastkombinasjon COMB 1: vertikale laster [31]



Figur 6-16 Lastkombinasjon COMB 3: vertikal + vind Y, utsnitt. [31]

6.5.7 Linear releases mellom moduler

Robot betrakter alle koblinger mellom paneler, bjelker og så videre som at det ikke er noen glidning i forbindelsene. For et materiale som tre vil dette være en unøyaktig tilnærming. Det ble derfor benyttet en funksjon kaldt «linear releases» for å åpne for noe glidning i skjøtene mellom moduler. Denne funksjonen kan brukes for å åpne for fri glidning, eller elastisk glidning. I dette tilfellet blir det brukt elastisk glidning. Fordi det er antatt at forbindelsen benytter skruer er denne glidningen bestemt gjennom bruk av EC5 tabell 7.1 K_{ser} .

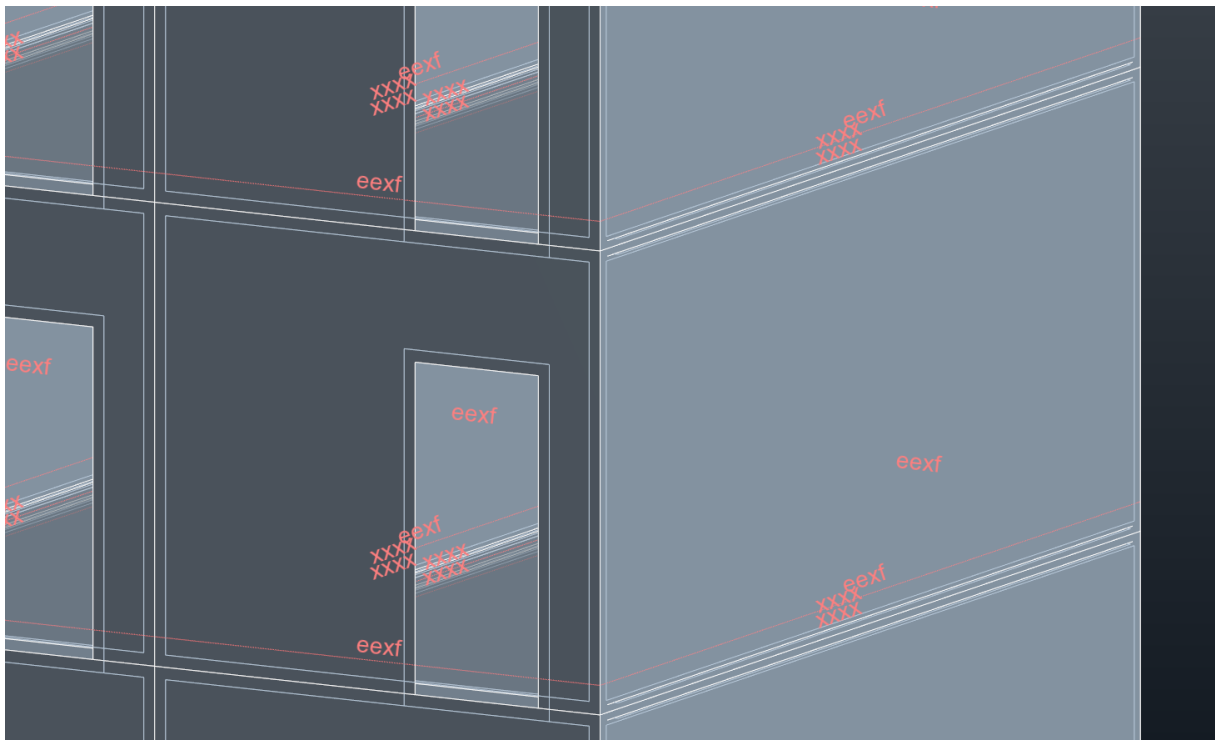
$$P_m^{1,5} d/23$$

Gjengene på de fleste skruer som benyttes til sammenføring av tre i strukturelle formål er større enn diameteren på den glatte delen av skaftet, slik at utregning ved bruk av diameter til skruen bruker d_{ef} . $d_{ef} = d \times 1,1$. Dette er gitt i EC5 8.7.1.

Ved bruk av Rothoblaas HBS skruer hentes det ut verdier for bruk i utregningen. Antar HBS 10 som har en diameter på den glatte delen av skaftet på 7mm. [23] Dette gir da utregningen:

$$450^{1,5} \cdot 7 \cdot 1,1 / 23 = 3195 \text{ N/mm. Dette blir rundet av til } 3200 \text{ N/mm.}$$

Robot krever dette tallet i KN/m/m. Det blir antatt at det blir satt inn 5 skruer per meter mellom modulene. Dette gir verdien 16000KN/m/m. Denne verdien blir brukt for glidning i både X og Y retning. Modelleringen av disse innfestingene er meget utfordrende og har stor påvirkning på hvordan modellen reagerer under en analyse.



Figur 6-17 Linear releases i Robot modell [31]

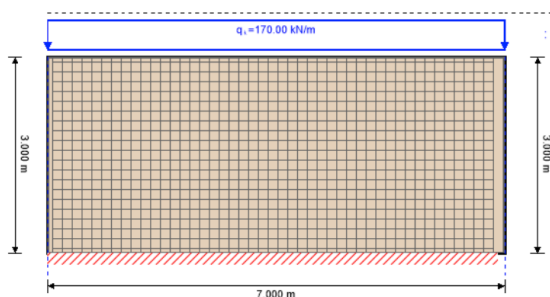
6.5.8 Uthenting av resultater

Resultatene ble hentet ut ved hjelp av «Maps» funksjonen i robot. Denne funksjonen viser grafisk ved hjelp av farger hvor store laster en bygningsdel er utsatt for. For at robot korrekt skal vise normalkrefter i veggene settes referanseaksen til Z, og normalkreftene vil da vises på «Membrane forces – N xx». Disse kreftene vises i kN/m. CLT panelet er 100mm bredt, så på én meter er det et 100'000 mm² areal. Dette tallet kan også leses direkte ved bruk av «stresses -s xx».

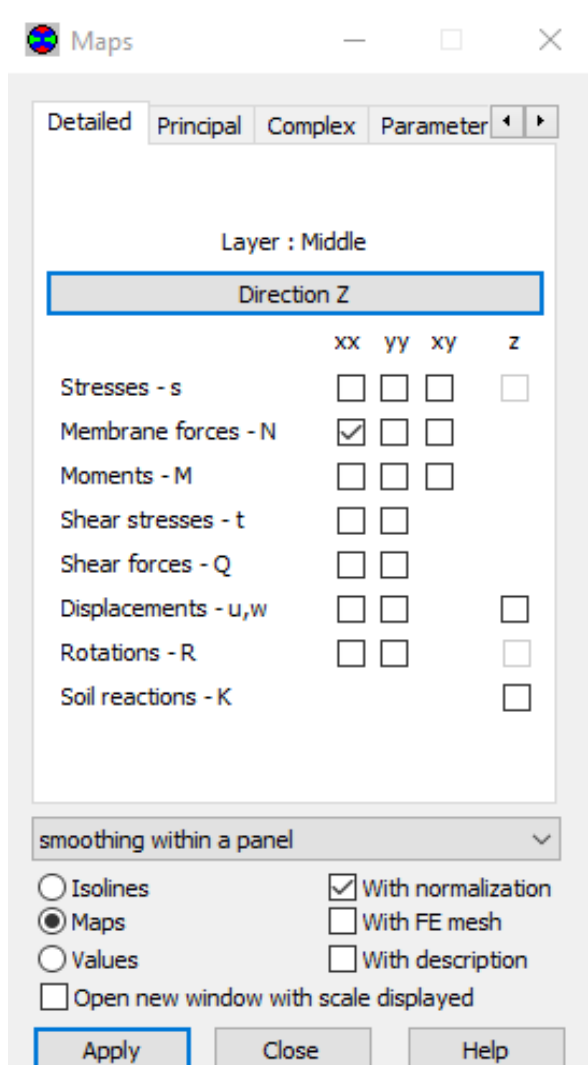
Forskyvinger hentes ut ved å velge «displacements» Det er viktig å ta hensyn til at «displacements» kun forteller om hvor mye en bygningsdel har flyttet seg fra utgangsposisjonen, ikke hvor mye bygningsdelen i seg selv deformerer.

6.6 Tilleggsberegning med Stora Enso Calculatis

Verdiene som ble lest ut av robot ble puttet inn i et program spesifikt designet for beregninger på CLT. Her ble det tatt for seg et tilsvarende panel som har blitt benyttet gjennom oppgaven og påført den endelige største kraften som har oppstått fra i midtre vegg i bygget. Calculatis tar hensyn til Kryp over tid som følge av belastningen på bygget.



Figur 6-19 inputdata for Stora Enso calculatis på 100mm CLT panel



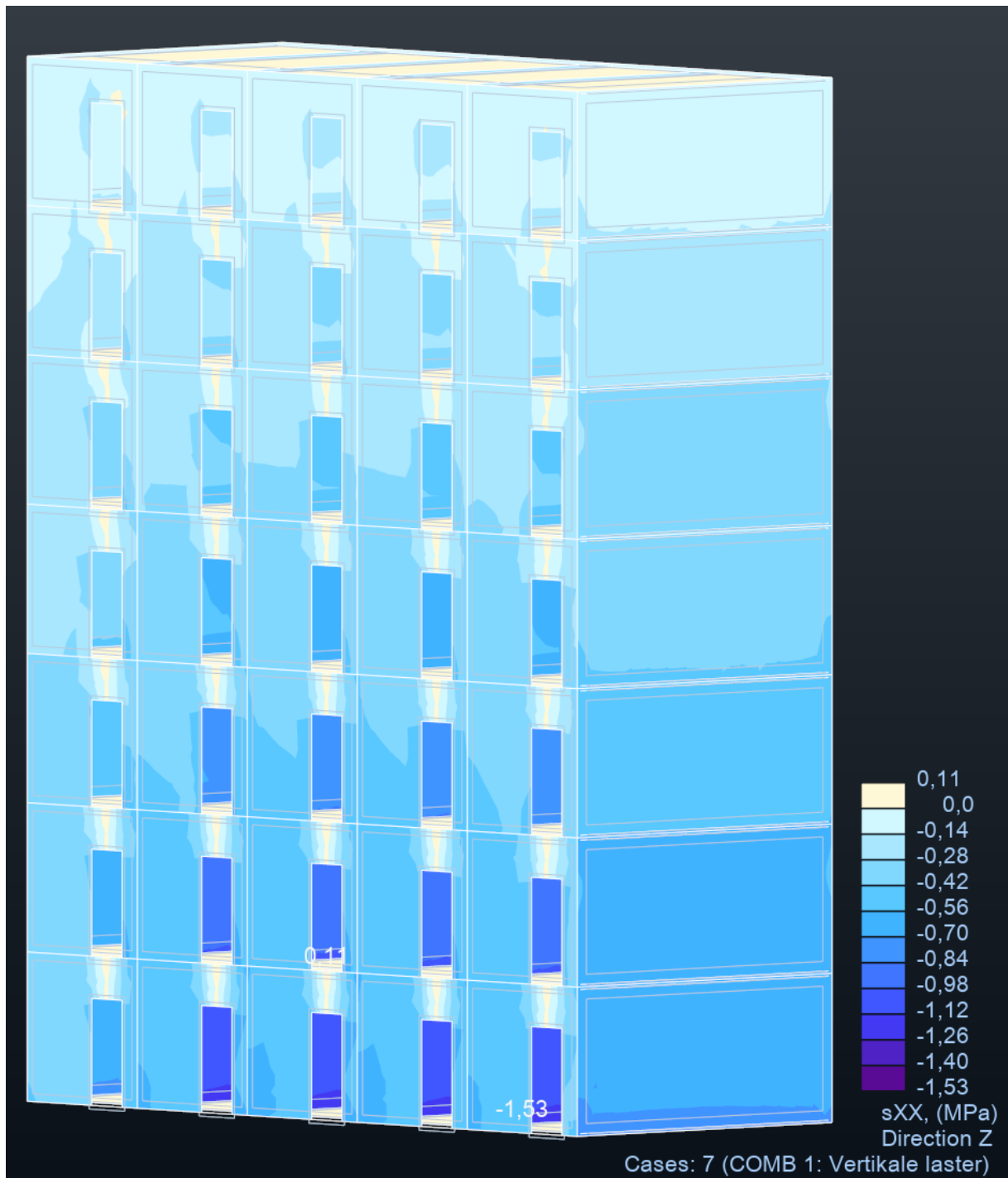
Figur 6-18 Maps funksjonen i robot for uthenting av resultater for paneler [31]

7 Resultat

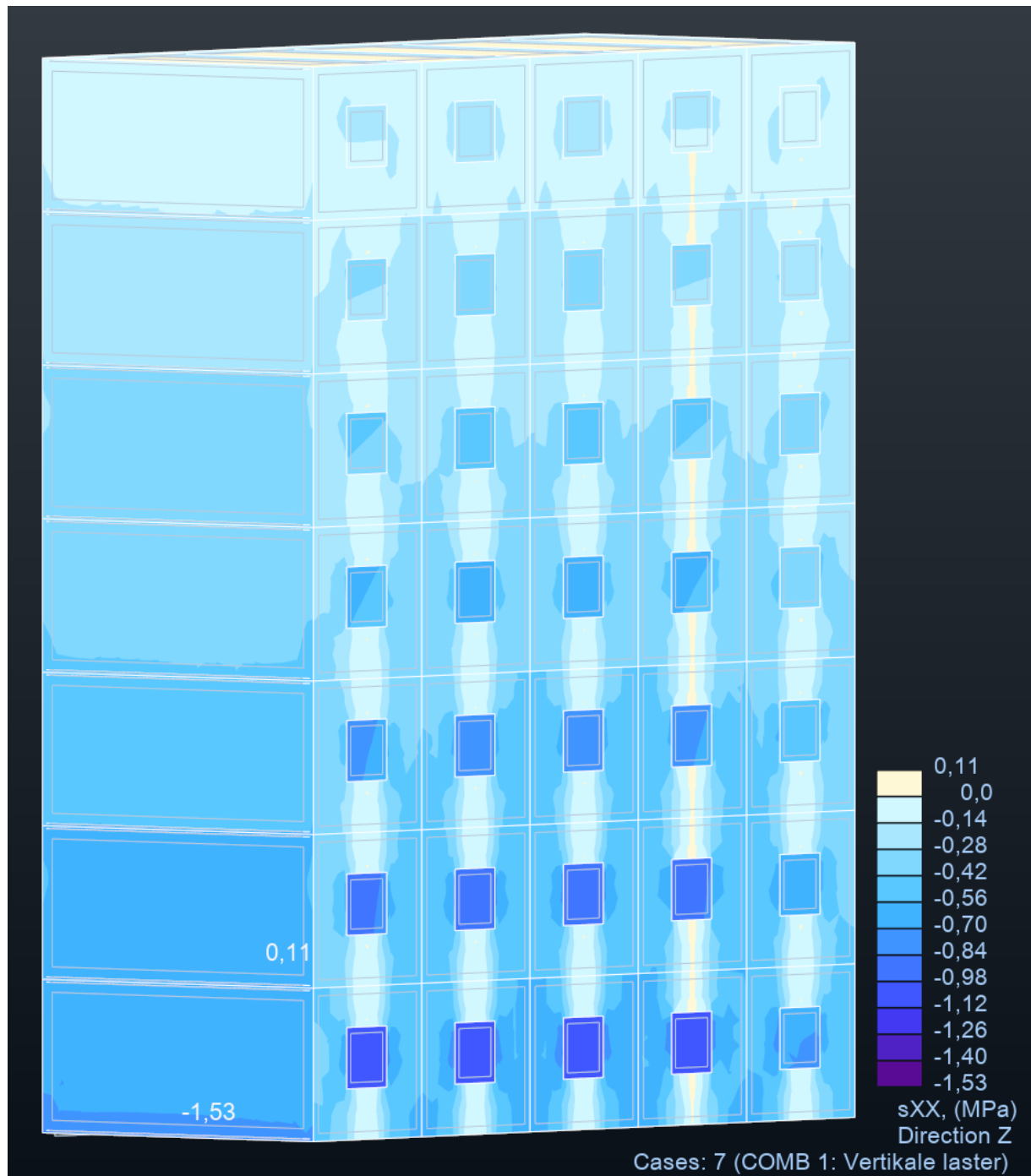
Resultater er i N/mm² for krefter og i mm for deformasjoner. For figurene er dypere farge = større last. Fargen er relativt for hvert bilde.

7.1 Resultat uten linear releases mellom moduler

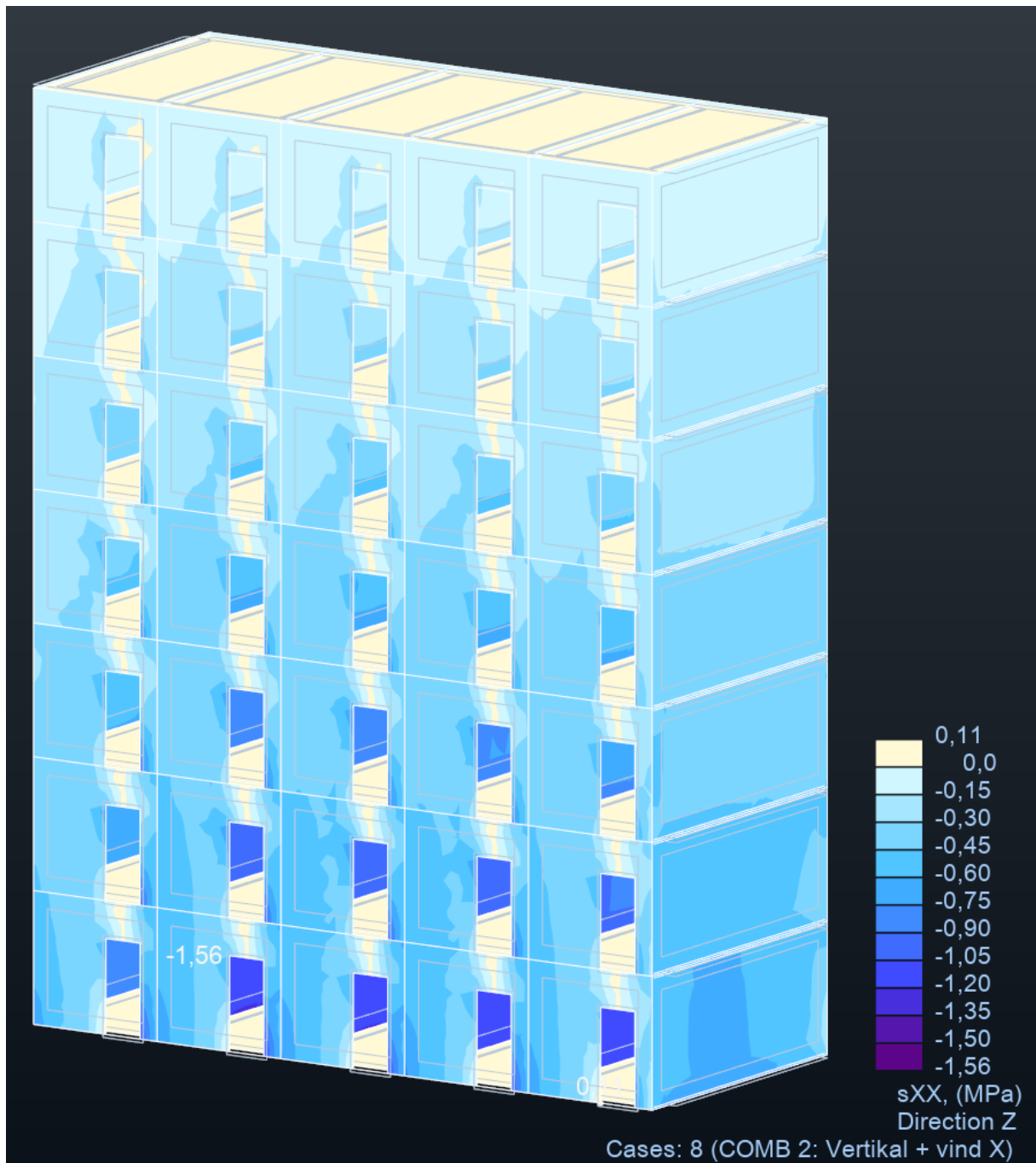
Lastkombinasjon	COMB 1: Vertikale laster	COMB 2: vertikal + vind X	COMB 3: vertikal + vind Y
Nederst på midtre vegger i bygg	1,53	1,26	1,65 – 0,60
Rundt vinduer	0,80	1,02	0,34
Rundt dører	0,52	0,8	0,95
Høyeste verdi	1,53	1,56	2,18
	På midten på nederste vegg i midten av bygget	Hjørne i motsatt side av siden vindkraften virker på	Hjørne på motsatt side av vindpåvirkning
Største forskyving	3mm	4mm	8mm
	På midten av CLT gulv	Forskyvning i x retning	Forskyvning i y retning, øverste etasje.



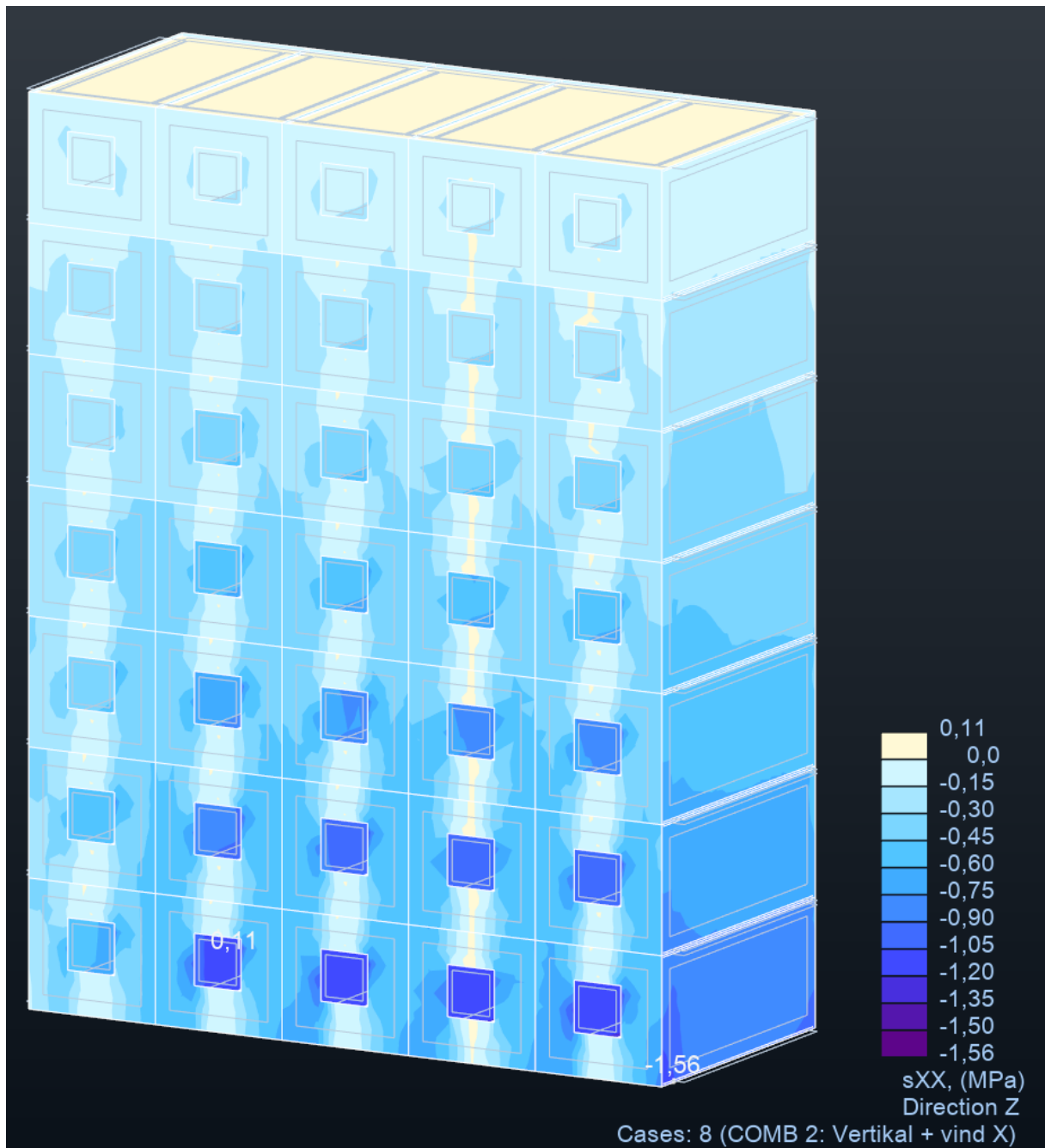
Figur 7-1 COMB 1: vertikale laster, uten linear releases [31]



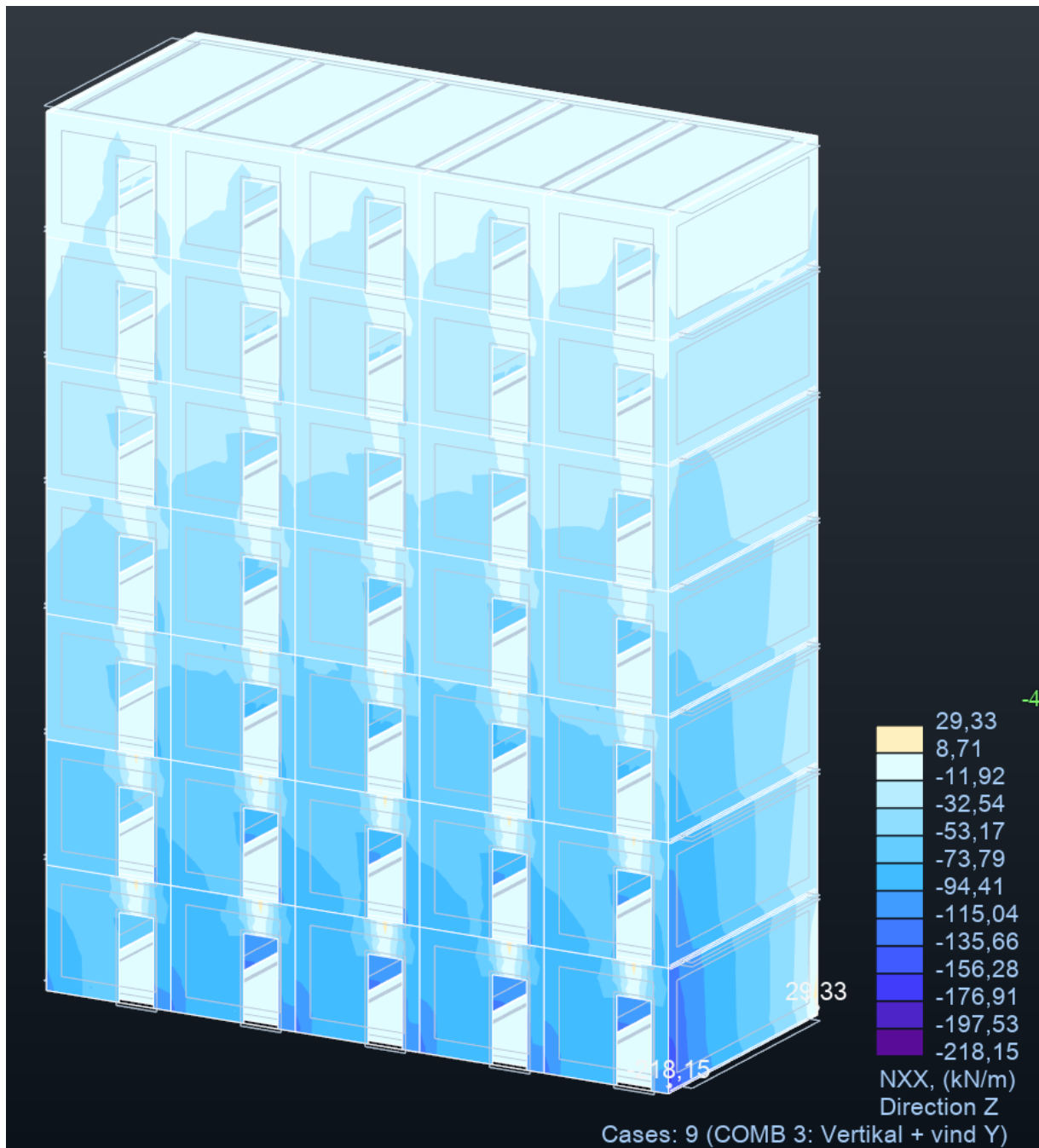
Figur 7-2 COMB 1: vertikale laster, uten linear releases [31]



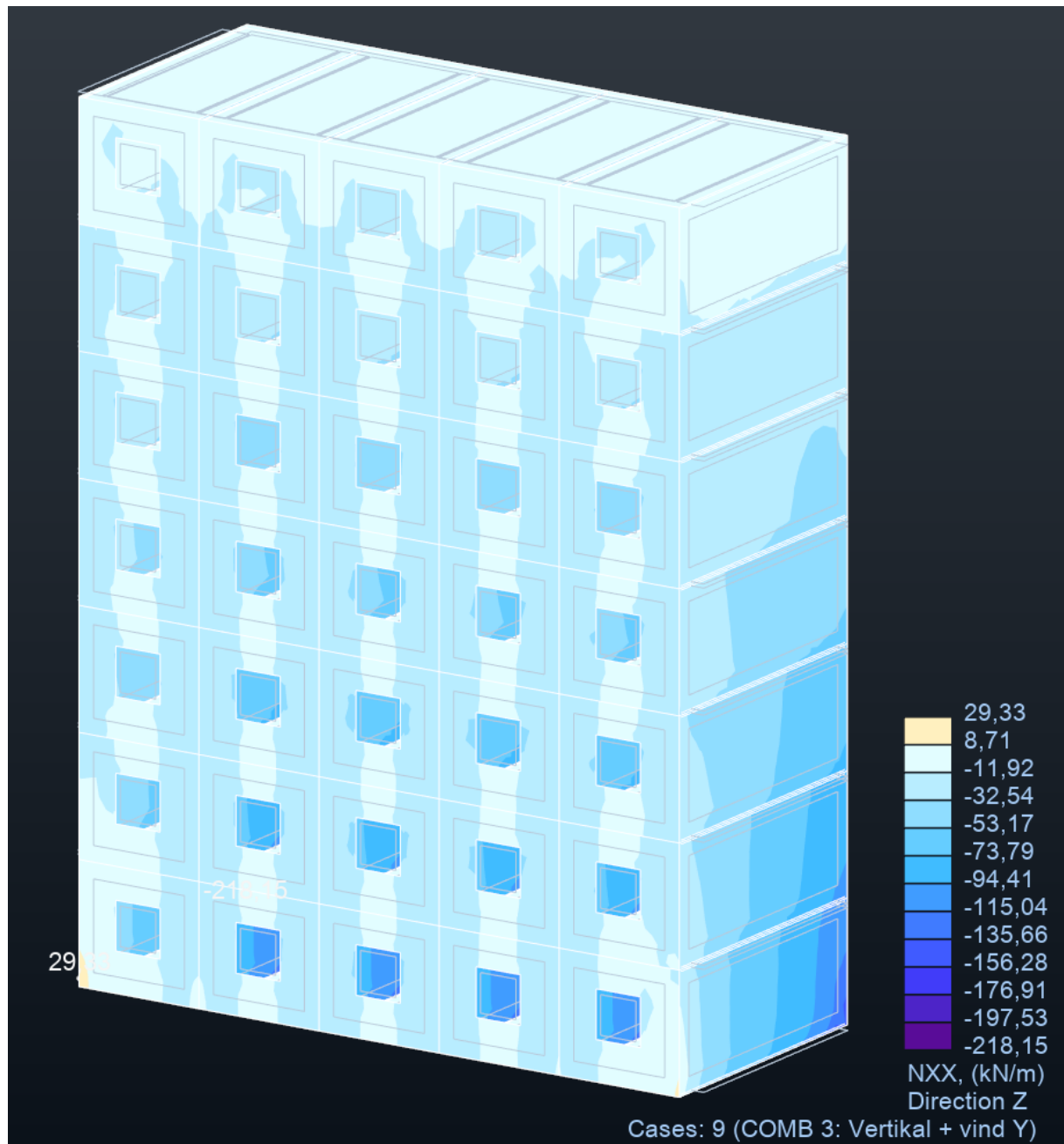
Figur 7-3 COMB 2: Vertikal + vind x, uten linear releases [31]



Figur 7-4 COMB 2: Vertikal + vind X, uten linear releases [31]



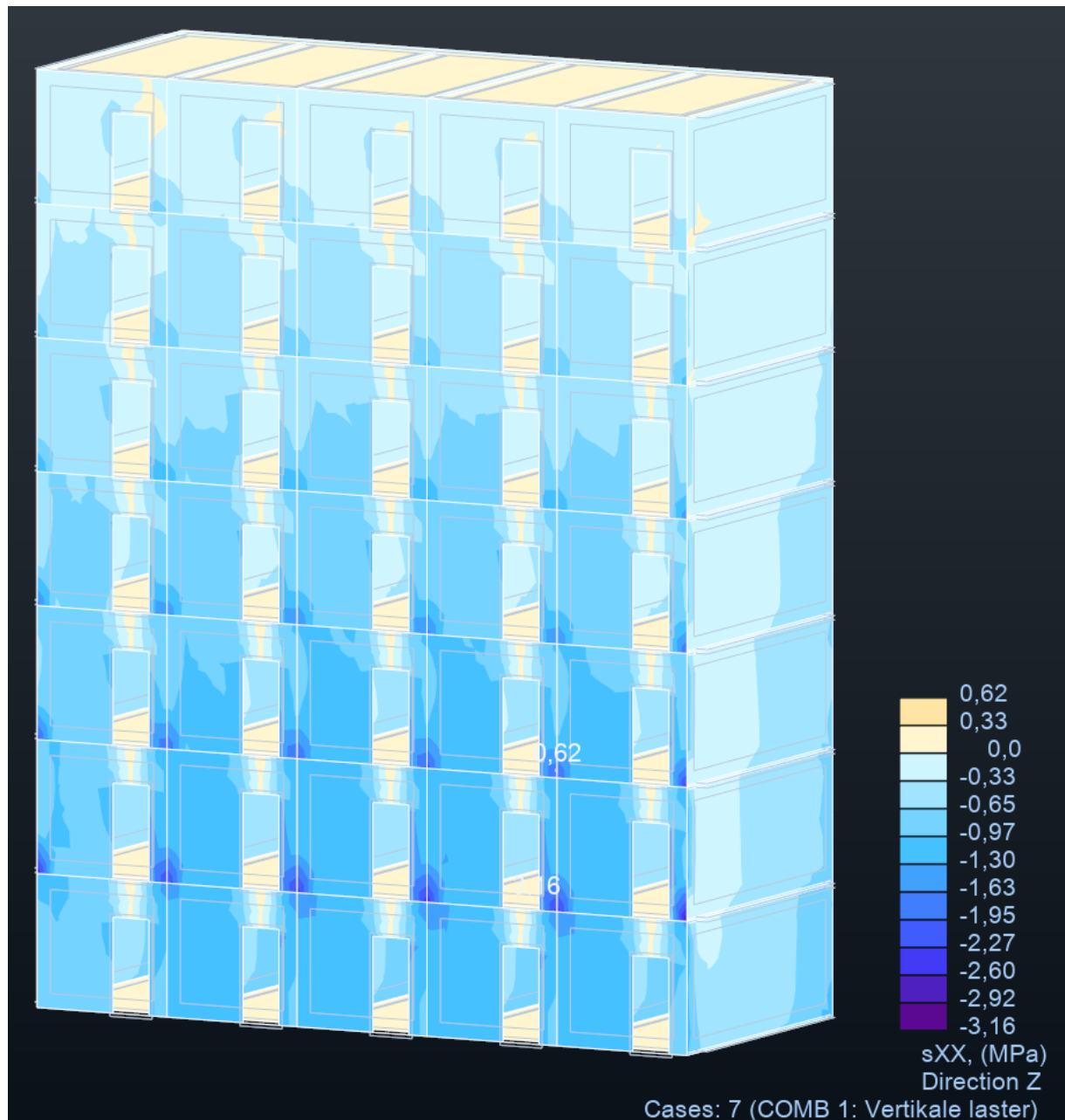
Figur 7-5 COMB 3: Vertikal + vind Y, uten linear releases [31]



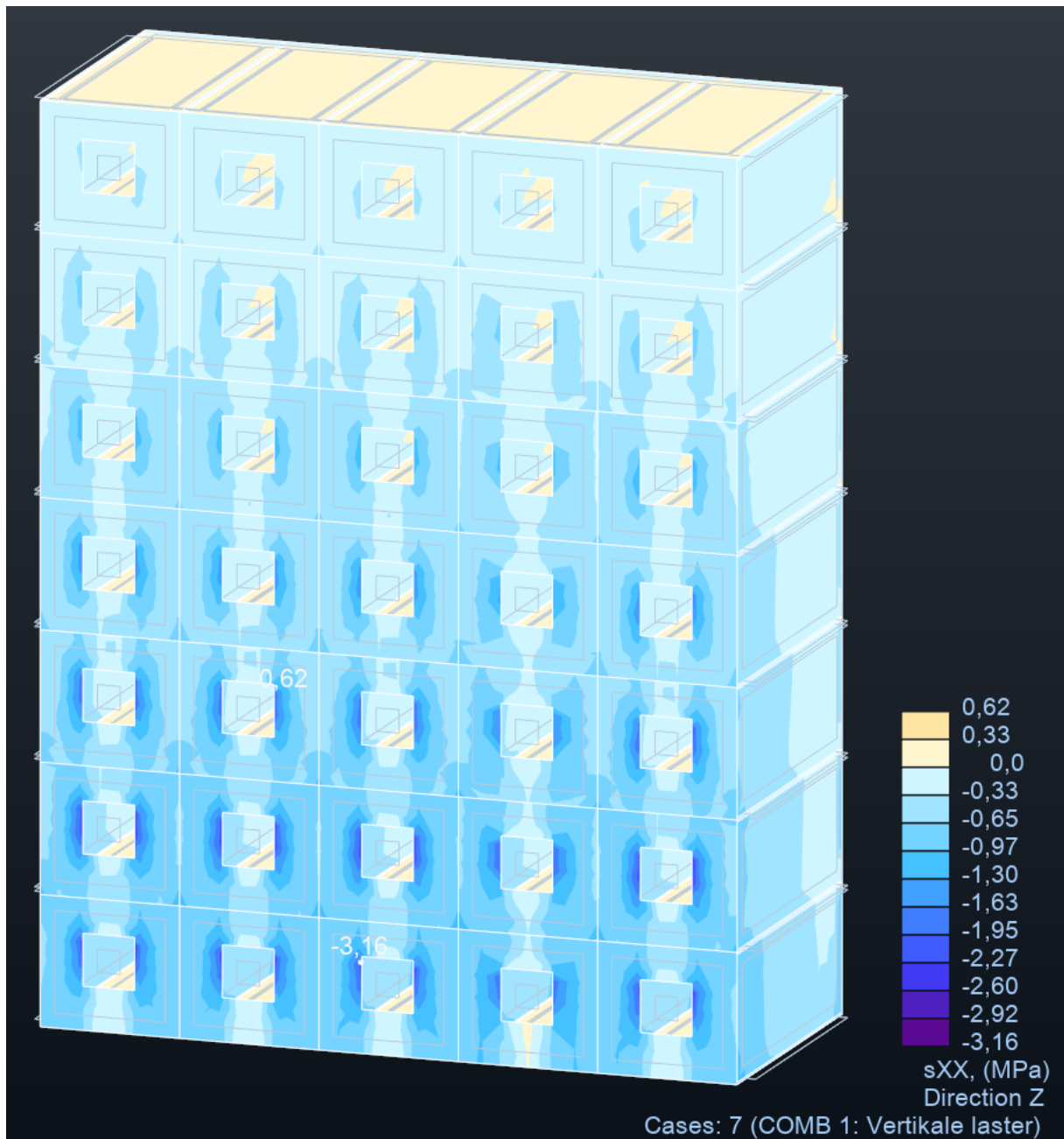
Figur 7-6 COMB 3: Vertikal + vind Y, uten linear releases [31]

7.2 Resultater med linear releases mellom moduler i X og Y retning

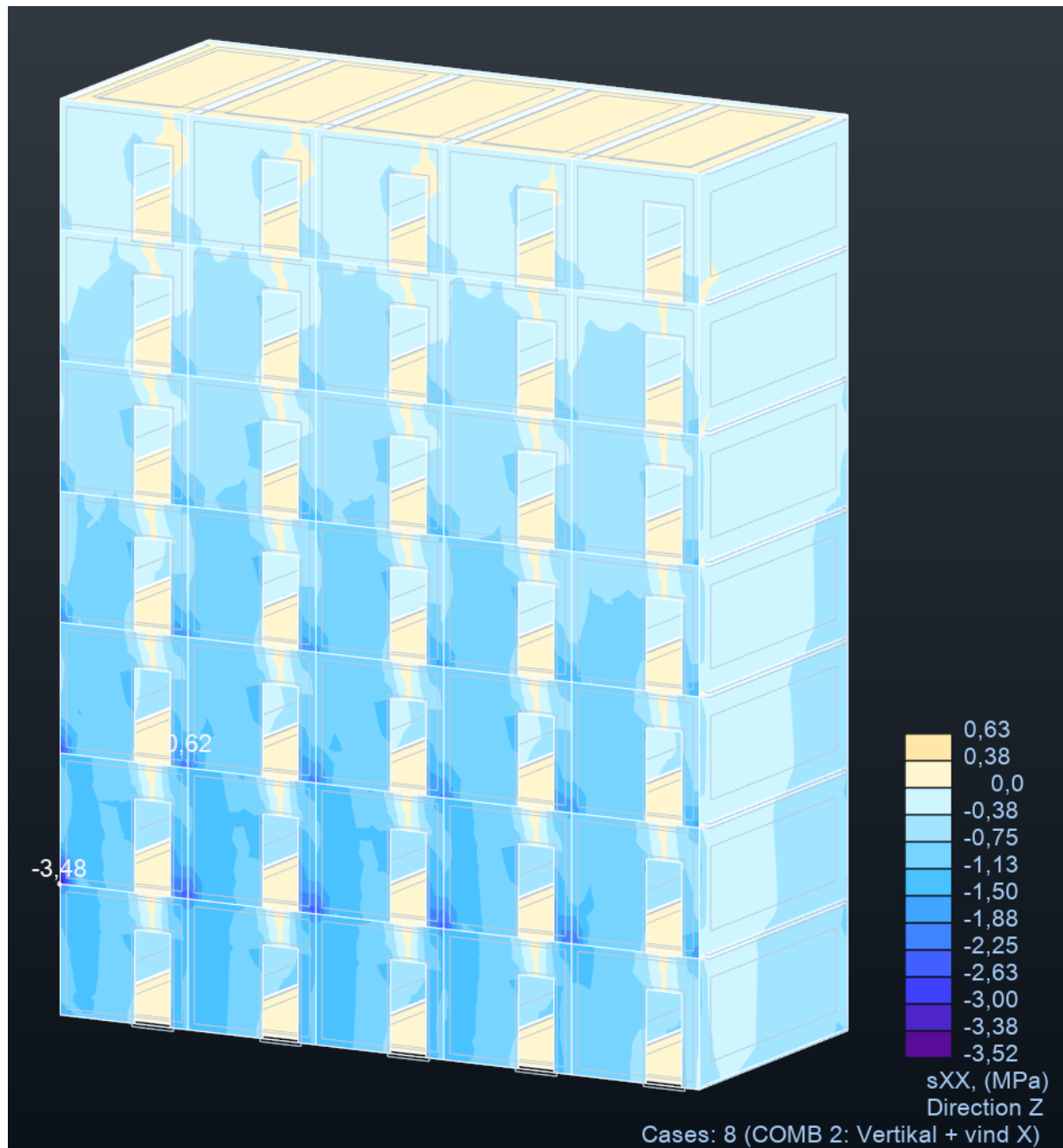
Lastkombinasjon	COMB 1: Vertikale laster	COMB 2: vertikal + vind X	COMB 3: vertikal + vind Y
Nederst på midtre vegger i bygg	0,9	0,50 - 1,00	0,70 – 1,70
Rundt vinduer	2,3	2,4	1,7
Rundt dører	1,8	1,8	2,3
Høyeste verdi	3,16	3,48	4,85
	Rundt vindu nederst midt i bygget	Hjørne i motsatt side av siden vindkraften virker på	Hjørne i motsatt side av siden vindkraften virker på
Største forskyving	33mm	33mm	20mm
	Øverste etasje krummer utover	Hjørne lengst unna der vindkraften påvirker	Øverste etasje krummer mot vinden



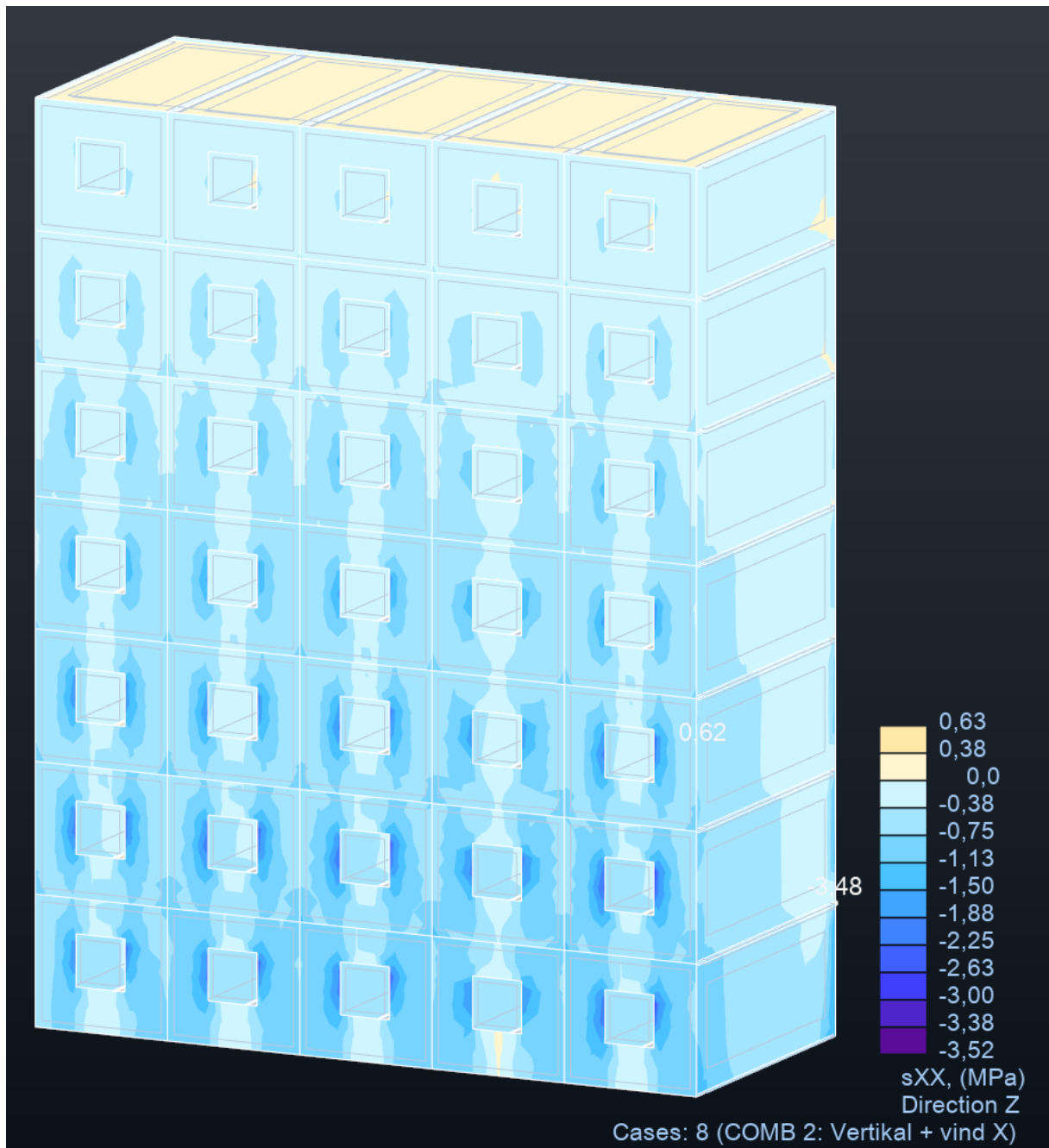
Figur 7-7 COMB 1: vertikale laster med linear releases [31]



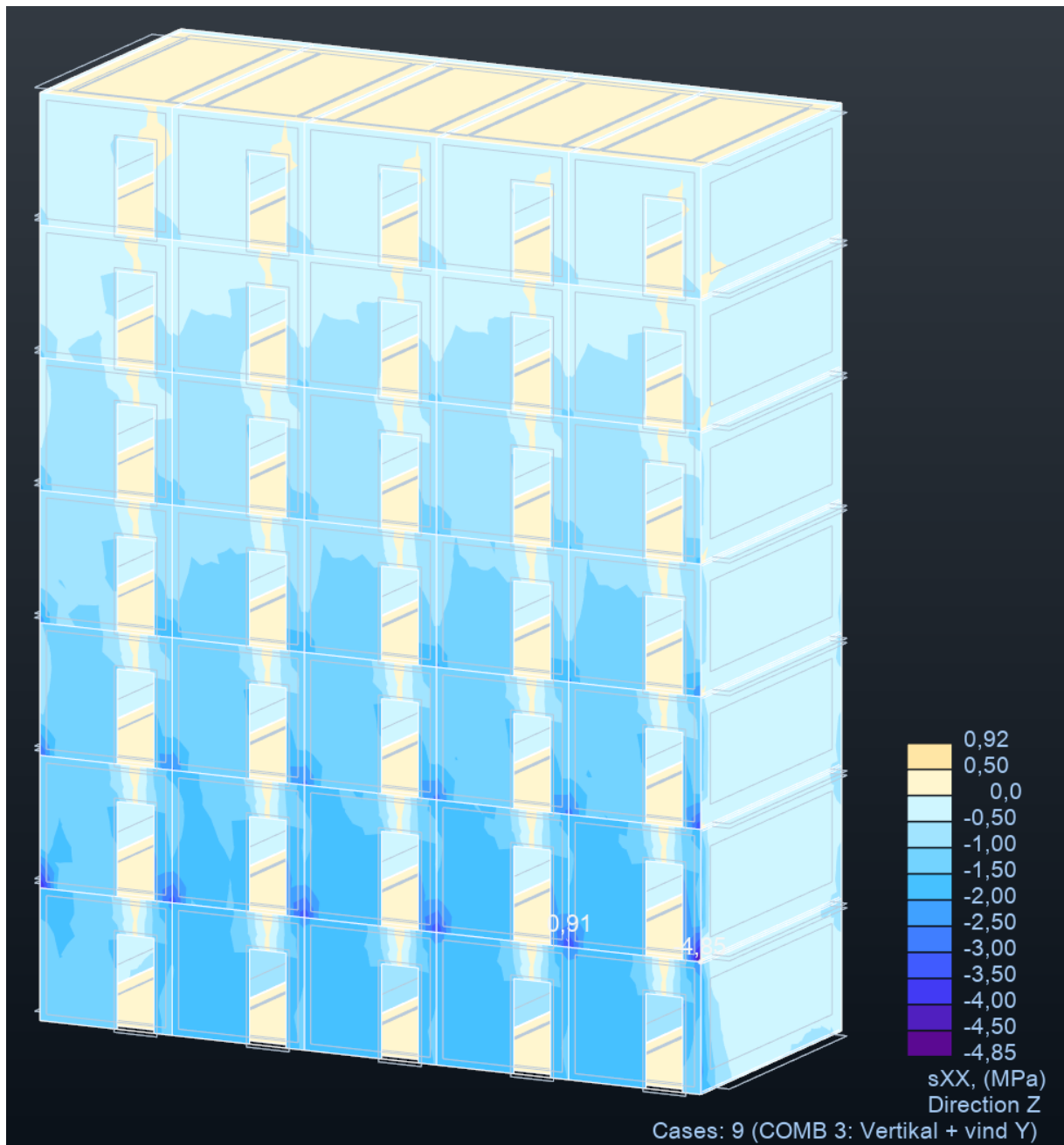
Figur 7-8 COMB 1: vertikale laster med linear releases [31]



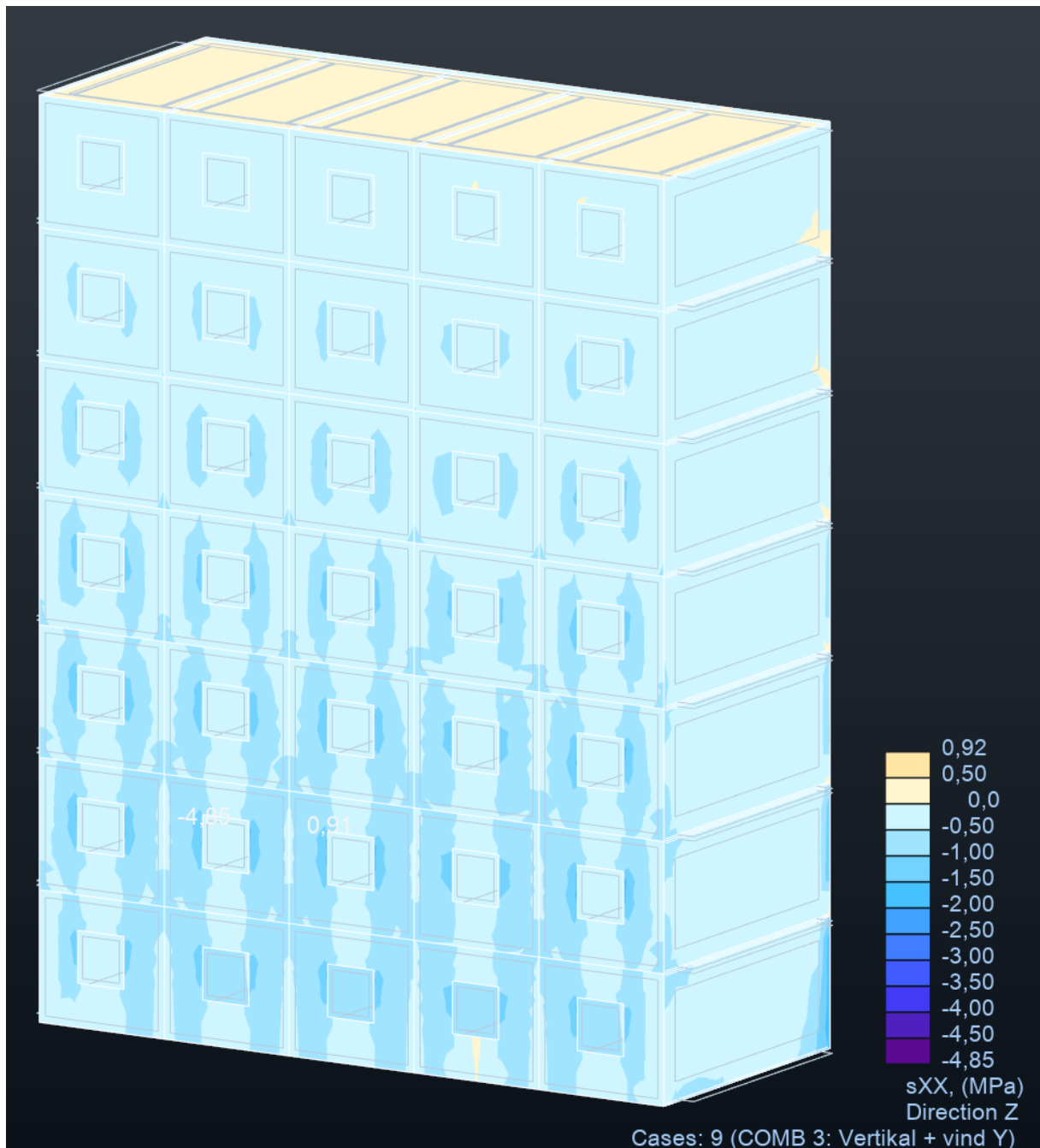
Figur 7-9 COMB 2: Vertikal + vind X med linear releases [31]



Figur 7-10 COMB 2: Vertikal + vind X med linear releases [31]



Figur 7-11 COMB 3: Vertikal + vind Y med linear releases [31]



Figur 7-12 COMB 3: Vertikal + vind Y med linear releases [31]

7.3 Stora Enso calculatis

global utilization ratio					59 %
ULS	59 %	ULS fire	!	SLS	0 %

section: CLT 100 C3s				
	layer	thickness	orientation	material
	1	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
	2	40.0 mm	0°	C24 spruce ETA (2019)
	3	30.0 mm	90°	C24 spruce ETA (2019)
t_{CLT}	100.0 mm			

material values										
material	$f_{m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{r,k \min}$	$E_{0,mean}$	G_{mean}	$G_{r,mean}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
C24 spruce ETA (2019)	24.00	14.00	0.12	21.00	2.50	4.00	1.25	12,000.00	690.00	50.00

Figur 7-13 Resultater fra Stora Enso calculatis

utilization rate of axial force vertical																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">LCO1</th> </tr> <tr> <th>Id</th> <th>X</th> <th>Z</th> <th>k_{mod}</th> <th>$f_{c,0,d}$</th> <th>$N_{v,max}$</th> <th>$\sigma_{v,max}$</th> <th>ratio</th> </tr> <tr> <td>[-]</td> <td>[m]</td> <td>[m]</td> <td>[-]</td> <td>[N/mm²]</td> <td>[kN]</td> <td>[N/mm²]</td> <td>[%]</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.075</td> <td>0</td> <td>0.8</td> <td>13.44</td> <td>-32.21</td> <td>-3.58</td> <td>7 %</td> </tr> </tbody> </table>	LCO1								Id	X	Z	k_{mod}	$f_{c,0,d}$	$N_{v,max}$	$\sigma_{v,max}$	ratio	[-]	[m]	[m]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[%]	1	0.075	0	0.8	13.44	-32.21	-3.58	7 %																							
LCO1																																																								
Id	X	Z	k_{mod}	$f_{c,0,d}$	$N_{v,max}$	$\sigma_{v,max}$	ratio																																																	
[-]	[m]	[m]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[%]																																																	
1	0.075	0	0.8	13.44	-32.21	-3.58	7 %																																																	
utilization rate for buckling																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="11">LCO1</th> </tr> <tr> <th>Id</th> <th>X</th> <th>Z</th> <th>k</th> <th>λ_y</th> <th>β_c</th> <th>$k_{c,y}$</th> <th>$f_{c,0,d}$</th> <th>$\sigma_{c,0,d}$</th> <th>$\sigma_{m,y,d}$</th> <th>ratio</th> </tr> <tr> <td>[-]</td> <td>[m]</td> <td>[m]</td> <td>[m]</td> <td>[-]</td> <td>[-]</td> <td>[-]</td> <td>[N/mm²]</td> <td>[N/mm²]</td> <td>[N/mm²]</td> <td>[%]</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.075</td> <td>0</td> <td>3.0</td> <td>83</td> <td>0.2</td> <td>0.451</td> <td>13.44</td> <td>-</td> <td>0.00</td> <td>59 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3.58</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	LCO1											Id	X	Z	k	λ_y	β_c	$k_{c,y}$	$f_{c,0,d}$	$\sigma_{c,0,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	ratio	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	1	0.075	0	3.0	83	0.2	0.451	13.44	-	0.00	59 %									3.58		
LCO1																																																								
Id	X	Z	k	λ_y	β_c	$k_{c,y}$	$f_{c,0,d}$	$\sigma_{c,0,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	ratio																																														
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]																																														
1	0.075	0	3.0	83	0.2	0.451	13.44	-	0.00	59 %																																														
								3.58																																																

Figur 7-14 Resultater fra Stora Enso Calculatis

8 Diskusjon

Resultatene viser verdier som blir beregnet ved påføringer av laster på det modellerte bygget. På grunn av vanskelighetene med å korrekt modellere innfestinger er det inkludert 2 varianter av resultatene, en med mulighet for glidning mellom moduler og en uten. Dette gjør det også mulig å direkte sammenligne for å fremheve viktigheten av korrekt modellering.

Verdiene for trykk i CLT panelene på 4,85 MPa i det minst gunstige tilfellet, er under den karakteristiske verdien til C24 som elementene er produsert av. Dette oppstår kun i noen punkter i skjøter mellom panelene. Dette tyder på at det er svakheter i modelleringen av knutepunktene.

Modelleringen av CLT for analyse i et FEM program slik som Autodesk robot er utfordrende. Mangelen på krav til materialet i standarder og at materialet er relativt nytt i utbredelse gjør at det ikke finnes mye kunnskap om modellering for analyse, i alle fall i Norge. Når CLT modelleres er det meget viktig å holde kontroll på retningen til materialet for å få korrekt kraftoverføring. Muligheten for glidning mellom moduler påvirker lastfordelingen mye og kan ikke undervurderes.

Verdiene fra robot gir et brukbart utgangspunkt for å bruke som input til spesialiserte CLT beregningsprogrammer som from Stora Enso. Den jevnt fordelte lasten over et tverrsnitt som tilsvarer en vegg i den nederste etasjen i midten av bygget gir en god indikasjon på egnetheten til CLT for dette formålet. Det er tydelig at det er mye trykk kapasitet å gå på med tanke på kun belastningen, men at ved høyere belastning kan det være en fare for knekking.

Verdiene som er benyttet her er verdier i bruddgrensetilstand. Det er svært lite sannsynlig at alle disse lastene opptrer samtidig i denne størrelsen og da vil også deformasjonene og påvirkningen av kryp over tid bli mindre.

9 Konklusjon

Forskerspørsmålet var:

Hvor godt egnet er bærende bygningsmoduler i krysslaminert massivtre for studentboliger over 4 etasjer?

Underspørsmål:

1. Hvordan påvirkes byggets deformasjoner ved bruk av massivtre?
2. I hvilken grad påvirker valg av innfesting av modulene, byggets stivhet?
3. Hvordan burde knutepunkter utføres for best mulig resultat?

Rapporten viser at:

- Massivtre som materiale har gode nok egenskaper i bruddgrensetilstand i form av 100mm paneler til å benyttes som bærende struktur i modulbaserte studentboliger opp til 7 etasjer.
- Deformasjonene ved bruk av massivtre er lave i forhold til deformasjonene som oppstår som følge av innfestingsmetode og mulighet for glid.
- En stiv innfesting av CLT modulene vil være nødvendig for å unngå større deformasjoner i bygget.
- Knutepunkter burde utformes med tanke på å sikre mest mulig kontinuerlig vertikal bæring så last unngår å passeres gjennom liggende fiber. Eksempelvis ved bruk av konsoller for bæring av gulv.

10 Anbefalinger til videre arbeid:

Akustisk undersøkelse av dobbeltkonstruksjoner i modulbaserte studentboliger i krysslaminert massivtre.

Undersøkelser i den dynamiske oppførselen til bygget må gjennomføres. Dette er slikt som svingninger fra vind og jordskjelv.

Brannberegning av strukturen må gjennomføres før det kan bygges høyere enn 4 etasjer.

Innhenting av data og metode for modellering av andre allerede monterte bygg i CLT for å verifisere modelleringsmetoder videre.

Tilgjengelighetsvurderinger for bygget må gjøres. Hvilken grad av tilgjengelighet er det som er nødvendige for en studentbolig.

Økonomisk egnethet må vurderes før bruken av CLT. Når denne oppgaven ferdigstilles i slutten av mai 2021 er det varslet en stor oppgang i prisen på trelast. Fordi dette er råmaterialene til CLT må det økonomiske hensynet vurderes nøye. [24]

11 Referanser

- [1 SINTEF, «Modulbygg bedre enn sitt rykte,» 9 2 2016. [Internett]. Available:
] <https://www.sintef.no/siste-nytt/2016/modulbygg-bedre-enn-sitt-rykte/>. [Funnet 5 21 2021].
- [2 FN, «FNs bærekraftsmål,» 19 4 2021. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>. [Funnet 21 5 2021].
- [3 VG - Eivind haugen, «NSO-undersøkelse: 85 prosent av studenter har ikke tilgang til studentbolig,» 27 7 2020. [Internett]. Available:
] <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/8mrG32/nso-undersokelse-85-prosent-av-studenter-har-ikke-tilgang-til-studentbolig>. [Funnet 28 5 2021].
- [4 K. Bell, «Dimensjonering av Trekonstruksjoner,» Fagboksforlaget, 2017.
]
- [5 E. Bøhmer og H. Aarnes, «SNL - tre - plante,» 1 12 2016. [Internett]. Available:
] https://snl.no/tre_-_plante. [Funnet 3 3 2021].
- [6 H. F. Hoen, A. Svendsrud og B. Bækkelund, «SNL - skogbruk i Norge,» 29 5 2019. [Internett].
] Available: https://snl.no/skogbruk_i_Norge. [Funnet 3 3 2021].
- [7 Treteknisk, «FOKUS på tre nr 43. Konstruksjonsvirke,» 10 2012. [Internett]. Available:
] <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/43-Konstruksjonsvirke.pdf>. [Funnet 23 5 2021].
- [8 Treteknisk, «FOKUS på tre- nr. 20,» 1 2008. [Internett]. Available:
] <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-20.pdf>. [Funnet 4 3 2021].
- [9 E. Karacabeyli og S. Gagnon, «Canadian CLT Handbook, 2019 Edition,» FPInnovations, Montreal,
] 2019.

- [1 Trefokus, «Trefokus . Massivtre,» [Internett]. Available:
0] <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/byggesystemer/massivtre>. [Funnet 4 3 2021].
- [1 SINTEF Byggforsk, «SINTEF - Unngå skadekonstruksjoner i massivtre,» 7 6 2017. [Internett].
1] Available: <https://www.sintef.no/community/fagblogg/poster/unnga-skadekonstruksjoner-i-massivtre/>. [Funnet 4 3 2021].
- [1 Splitkon, «Krysslimt tre,» [Internett]. Available: <https://splitkon.no/wp-content/uploads/2021/05/splitkon-krysslimt-tre.pdf>. [Funnet 27 5 2021].
- [1 Direktoratet for byggkvalitet - Espen Daaland Wormdal, «Brannsikkerhet i bygg med massivtre - 3] Litteraturstudium,» 21 10 2016. [Internett]. Available: https://dibk.no/globalassets/2.-verktoy-og-veivisere/brannsikkerhet/fagdag-brann-2016/brannsikkerhet-i-bygg-med-massivtre---litteraturstudium_fagdag-dibk-21-oktober-2016.pdf. [Funnet 17 3 2021].
- [1 M. Petermann, «Studentboliger i massivtre – erfaringer fra studentsamskipnader og utbyggere,»
4] Universitetet i Agder, 2020.
- [1 SINTEF Byggforsk, «Byggforsk 520.110 - Modulbygninger av tre. Vurdering av egnethet,» SINTEF,
5] 2020.
- [1 Direktoratet for Byggkvalitet, «Byggteknisk forskrift TEK17 - kapittel 11,» [Internett]. Available:
6] <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/i/innledning/>. [Funnet 10 3 2021].
- [1 SINTEF, «SINTEF byggforsk 471.044,» 1 2011. [Internett]. Available:
7] https://www.byggforsk.no/dokument/4009/vindlaster_paa_bygninger_forenklet_beregning_av_vindkasthastighetstrykk. [Funnet 15 4 2021].
- [1 bygghejemme.no, «bygghejemme.no - tregulv tarkettq,» [Internett]. Available:
8] <https://www.bygghejemme.no/gulv-och-vegg/gulv-og-gulvbelegg/tregulv/parkett/tregulv-tarkett-vintage-eik-salamanca-1-stav/p-733016>. [Funnet 28 5 2021].
- [1 Byggmax, «Gulvsponplate,» [Internett]. Available: <https://www.byggmax.no/gulvsponplate-p1020>. [Funnet 28 5 2021].

[2 NORSAR, «Jordskjelv.no,» NORSAR, 2017. [Internett]. Available: <https://www.jordskjelv.no/om-0/jordskjelv/jordskjelv-i-norge/>. [Funnet 6 4 2021].

[2 Stora Enso, «Stiffness matrix for Stora Enso CLT,» 20 2 2015. [Internett]. Available:

1] https://forums.autodesk.com/autodesk/attachments/autodesk/2053/1646/1/15.02.20_Stiffness_Matrix.pdf?_ga=2.64141293.335942323.1621097179-1343458381.1618862594. [Funnet 16 5 2021].

[2 W. u. J. Derix GmbH & Co., «X-LAM Cross-laminated timber,» [Internett]. Available:

2] https://www.derix.de/data/XLAM_Derix_EN.pdf. [Funnet 27 5 2021].

[2 Rothoblaas, «Rothoblaas HBS Countersunk screw,» [Internett]. Available:

3] <https://www.rothoblaas.com/products/fastening/screws/screws-carpentry/hbs>. [Funnet 28 5 2021].

[2 T. Tunmo, «Byggindustrien bygg.no,» 3 3 2021. [Internett]. Available:

4] <https://www.bygg.no/frykter-skyhoy-prisstigning-pa-trelost/1460400/>. [Funnet 28 5 2021].

[2 Treteknisk, «Treteknisk - FOKUS på tre 37, Tre og brann,» [Internett]. Available:

5] <http://www.treteknisk.no/publikasjoner/fokus-pa-tre/fokus-37--tre-og-brann>. [Funnet 17 3 2021].

[2 N. Johan F Aarnes, «SNL ortogonal,» Store Norske Leksikon, 24 10 2017. [Internett]. Available:

6] <https://snl.no/ortogonal>. [Funnet 24 3 2021].

[2 Comité Européen de Normalisation, «Eurokode 1 (NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009,» 2009.

7]

[2 Treteknisk, «Treteknisk, Håndbok - bygge med massivtreelementer, hefte 5 lyd,» 10 2016.

8] [Internett]. Available: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-5-Lyd.pdf>. [Funnet 13 5 2021].

[2 Treteknisk, «FOKUS på tre nr. 33. Rett trelast,» 9 2008. [Internett]. Available:

9] <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/33-Rett-trelast.pdf>. [Funnet 23 5 2021].

[3 M. Petermann, *Autodesk revit: CLT modul 3250 x 7000*, Oslo, 2021.
0]

[3 M. Petermann, *Autodesk Robot: 5 x 7 moduler CLT testing*, Oslo, 2021.
1]

[3 Rørtek AS, «Storkontrakt med Skanska,» [Internett]. Available:
2] <https://rortekas.no/2016/04/storkontrakt-med-skanska/>. [Funnet 27 5 2021].

12 Vedlegg

Modell i Autodesk Revit: CLT modul 3250 x 7000

Modell i Autodesk Robot: 5 x 7 moduler CLT testing

Resultatrapport fra Stora Enso calculatis