

Kunnskap for en bedre verden

Bacheloroppgave

IB303312 Bacheloroppgave

**Analyse og dimensjonering av bæresystem i stål
og massivtre for boligblokk**

Kandidat nr. 10005 og 10002

Totalt antall sider inkludert forsiden: 398

Ålesund, 20.05.2019

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Du/dere fyller ut erklæringen ved å klikke i ruten til høyre for den enkelte del 1-6:		
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 <u>betrakte som fusk</u> 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 §§14 og 15.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert i Ephorus, se Retningslinjer for elektronisk innlevering og publisering av studiepoenggivende studentoppgaver	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at høgskolen vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter høgskolens studieforskrift §31	<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

Studiepoeng: 20

Veileder: Kristian Normann

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 HiM med forfatter(ne)s godkjenning. Oppgaver som er unntatt offentlighet eller båndlagt vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved NTNU i Ålesund 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](#))

Dato: 20.05.2019

FORORD

Denne bacheloroppgaven avslutter det 3-årige bachelorprogrammet, bachelor i Byggingeniør. Bacheloroppgaven er gjennomført ved Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet (NTNU), og i samarbeid med Multiconsult. Oppgaven omfatter 20 studiepoeng og er skrevet vårsemesteret 2019.

Oppgaven besto av å analysere og dimensjonere en 14. etasjes boligblokk i massivtre, sammenlignet med Multiconsult sin forprosjektmodell i plasstøpt betong. Bakgrunnen for oppgaven er ønsket om å finne ut hvilke forskjeller, med tanke på kostands- og nytteverdien, det er mellom å bygge denne boligblokken i massivtre kontra betong. Dette er et interessant tema fordi det foreligger lite informasjon om emnet fra før av. Når vi har studert, har vi benyttet eksisterende prosjekter, litteraturstudier og intervjuet fagpersoner innen temaet for å få innblikk i deres erfaringer.

I arbeidet med bacheloroppgaven har vi hatt en hovedveileder ved NTNU Ålesund og en ekstern veileder ved Multiconsult. Vi vil takke hovedveileder Kristian Normann for et godt samarbeid, spesielt med tanke på kontroll av håndberegninger. Videre vil vi takke ekstern veileder Tore Standal for stor hjelp til bacheloroppgaven, spesielt med dataprogrammet FEM-Design, da dette var helt nytt for vår del. Det har vært svært interessant å få innblikk i hvordan de jobber i Multiconsult, og hvor mye kunnskap og informasjon de sitter på. Vi vil også takke Max Ingar Mørk fra NTNU Ålesund, som kom med innspill til strukturen i oppgaven. Tilslutt vil vi takke vår kontaktperson Magnus Andersen i Woodcon, som kom med anbefalinger og svarte på fagspørsmål om massivtre.

Takk for samarbeidet!

Ålesund, 20.05.2019

Martin M. Breivik

Marius O. Bjørkavåg

Martin Mork Breivik

Marius Ove Bjørkavåg

INNHOLDSFOTEGNELSE

SAMMENDRAG	1
TERMINOLOGI	2
BEGREPER	2
FORKORTELSER	2
1 INNLEDNING	3
1.1 BAKGRUNN	3
1.2 KUNNSKAPSGAPET	3
1.3 FORMÅL OG PROBLEMSTILLINGER	4
1.4 AVGRENSNINGER	4
1.5 LESERVEILEDNING	5
2 TEORETISK GRUNNLAG	7
2.1 BÆRESYSTEMER OG AVSTIVNING	7
2.1.1 <i>Plasstøpt betong og stål</i>	7
2.1.2 <i>Massivtre (CLT)</i>	9
2.1.3 <i>Avstivningssystem</i>	10
2.2 REGELVERK	11
2.2.1 <i>Plan- og bygningsloven</i>	11
2.2.2 <i>Teknisk forskrift</i>	11
2.2.3 <i>Standarder</i>	11
2.2.4 <i>Eurokoder</i>	12
2.3 BYGNINGSFYSIKK VED BRUK AV CLT	13
2.3.1 <i>Brann</i>	13
2.3.2 <i>Varmeisolasjon</i>	14
2.3.3 <i>Lufttetthet</i>	14
2.3.4 <i>Lydisolasjon</i>	15
2.3.5 <i>Fukt</i>	16
2.4 MILJØASPEKT	16
2.4.1 <i>Karbondioksid – CO₂</i>	16
2.4.2 <i>Livsløpsfaser</i>	18
2.4.3 <i>Miljøaspekt ved bruk av betong</i>	18
2.4.4 <i>Miljøaspekt ved bruk av stål</i>	18
2.4.5 <i>Miljøaspekt ved bruk av CLT</i>	19
2.5 ØKONOMI OG FREMDRIFT	19
2.5.1 <i>Økonomi</i>	19
2.5.2 <i>Fremdrift</i>	20
2.6 LASTBEREGNING	21
2.6.1 <i>Grensetilstander</i>	22
2.6.2 <i>Permanent- og variabel last</i>	23
2.6.3 <i>Faktorer</i>	24
2.6.4 <i>Klimaklasser</i>	24
2.6.5 <i>Pålitelighetsklasser</i>	25
2.6.6 <i>Snølast</i>	26
2.6.7 <i>Vindlast</i>	26
2.7 PROGRAMVARE	27
2.7.1 <i>FEM-Design</i>	27
2.7.2 <i>Revit Structure</i>	27
2.7.3 <i>Lastberegning</i>	28
2.7.4 <i>BTSNITT</i>	28
2.7.5 <i>Office 365</i>	28
2.7.6 <i>Calculatis</i>	28

3	METODE	29
3.1	VALG AV DATAPROGRAM	29
3.2	LASTBEREGNING	30
3.2.1	Nyttelast	30
3.2.2	Egenlast og påført egenlast	30
3.2.3	Vindlast	31
3.2.4	Snølast	32
3.3	PROGRAMVARE	32
3.3.1	Oppbygging av Revit strukturmodell	32
3.3.2	Oppbygging av FEM-Design modell	37
3.3.3	Snølast og vindlast i Lastberegning	40
3.3.4	Fundamentbelastning i BTSNITT	43
3.3.5	Dimensjonering i Calculatis	45
3.4	PRISSAMMENLIKNING	47
3.5	BEREGNING FOR UTSLIPP AV CO ₂	48
4	RESULTAT	49
4.1	DIMENSJONERING I FEM-DESIGN	49
4.1.1	Bruddgrensetilstand	49
4.1.2	Bruksgrensetilstand	52
4.1.3	Stabilitet for horisontale krefter	53
4.2	DIMENSJONERING I CALCULATIS	54
4.2.1	Dimensjonering av vegger	54
4.2.2	Dimensjonering av dekker	57
4.3	BTSNITT AV OVE SLETTEN	60
4.3.1	Trykk i fundament	60
4.4	HÅNDBEREGNINGSKONTROLL	62
4.4.1	Håndberegning av søyle	62
4.4.2	Håndberegning av bjelke	63
4.4.3	Håndberegning av vindlast	64
4.5	FORBINDELSER OG OPPLEGG	65
4.5.1	Etasjeskiller	65
4.5.2	Dekkeforbindelser og skivevirkning	66
4.6	PRISSAMMENLIGNING AV CLT OG BETONG	67
4.6.1	CLT	67
4.6.2	Betong	68
4.6.3	Prisdifferanse	68
4.7	BESPARELSE PÅ MILJØ	69
4.7.1	Differanse (produktstadiet)	70
4.7.2	Differanse (produktstadiet og livsløpets sluttstadium)	70
4.8	KONSTRUKSJONSSYSTEM	70
5	DISKUSJON	72
5.1	DIMENSJONERING	72
5.1.1	Dimensjonering av vegger og dekker	72
5.1.2	Dimensjonering av søyler og bjelker	75
5.2	FUNDAMENT- OG GRUNNTRYKK	77
5.3	FORBINDELSER OG OPPLEGG	77
5.3.1	Etasjeskiller	77
5.3.2	Dekkeforbindelser og skivevirkning	79
5.4	PRISSAMMENLIGNING AV CLT OG BETONG	79
5.5	BESPARELSE PÅ MILJØET	81
5.6	ERFARINGER	83
6	KONKLUSJON	84
7	REFERANSER	86

FIGURLISTE

Figur 2.1-1: Spenning- og tøyingsdiagram for stål	8
Figur 2.1-2: a) Kantstilte element, b) Krysslagte element (CLT), c) Hulromselement	10
Figur 2.1-3: Leppeskjøter for kobling mellom CLT-elementer	11
Figur 2.3-1: Luft- og vindtetthet i bygg	15
Figur 2.4-1: Norges utslipp av karbondioksid	17
Figur 3.3-1: Forprosjekt Multiconsult.....	33
Figur 3.3-2: Oppbygging av grid-system i Revit Structure.....	33
Figur 3.3-3: Oppbygging av levels i Revit Structure	34
Figur 3.3-4: Digitalt bibliotek i ProdLib for CLT-elementer.....	35
Figur 3.3-5: Oppbygging strukturmodell.....	35
Figur 3.3-6: Bruk av paste-funksjon til oppbygging.....	36
Figur 3.3-7: Komplet Revit strukturmodell	36
Figur 3.3-8: FEM-Design modell av 1. etasje med levels og påførte krefter i fundament.....	37
Figur 3.3-9: Generert elementnett for 3. etasjen	38
Figur 3.3-10: Komplet FEM-Design modell	39
Figur 3.3-11: Input for load cases	39
Figur 3.3-12: Input for load combinations	40
Figur 3.3-13: Input data for snølast.....	41
Figur 3.3-14: Input data for vindlast	42
Figur 3.3-15: Input data for beregning av vindhastighet.....	43
Figur 3.3-16: Input data for fundamentbelastninger	44
Figur 3.3-17: Beregningsdata for søylefundament	45
Figur 3.3-18: Figur av input data i Calculatis	46
Figur 4.1-1: Utnyttelse for mest belastet bjelke	49
Figur 4.1-2: Aksialkraft for mest belastede søyle	50
Figur 4.1-3: Utnyttelse mest belastede CLT-dekke	51
Figur 4.1-4: Utnyttelse mest belastede CLT-vegg	51
Figur 4.1-5: Trykkraft i fundament.....	52
Figur 4.1-6: Nedbøyning mest belastet bjelke	53
Figur 4.1-7: Forskyvninger i takplan	53
Figur 4.2-1: Plassering av beregnet CLT-vegg.....	54
Figur 4.2-2: Laster på CLT-vegg, hentet fra rapport i Calculatis	55
Figur 4.2-3: Utdrag fra beregningsrapport i Calculatis.....	56
Figur 4.2-4: Belastningsareal fra punktlast, hentet fra rapport i Calculatis	57
Figur 4.2-5: Plassering av beregnet CLT-dekke	58
Figur 4.2-6: Jevnt fordelte laster på CLT-dekke, hentet fra rapport i Calculatis	58
Figur 4.2-7: Utdrag fra rapport - Moment- og skjærkraftdiagram for påførte laster fra Calculatis	59
Figur 4.2-8: Utdrag fra rapport - Nedbøyning for dekke-elementet fra Calculatis	60
Figur 4.3-1: Fundament fra mest belastet søyle, utdrag av BTSNITT rapporten.....	60

Figur 4.3-2: Fundament fra mest belastet vegg, utdrag av BTSNITT rapporten	61
Figur 4.4-1: Plassering av kontrollert søyle i Revit-modell	62
Figur 4.4-2: Plassering av kontrollert bjelke i Revit-modell.....	63
Figur 4.5-1: Skråforbindelser i etasjeskillere	65
Figur 4.5-2: Forbindelse mellom etasjeskillere og bjelke.....	65
Figur 4.5-3: Dekke over plan 4.....	66
Figur 4.5-4: Leppeskjøt for kobling mellom CLT-dekker	67
Figur 4.8-1: Visualisering av trykk- og strekkrefter for vindkryss	71
Figur 5.1-1: Dekke spennvidde 9 m.....	73
Figur 5.1-2: Kapping av CLT-dekke	74
Figur 5.1-3: Alternativ løsning ved bruk av rektangulære søyler	76
Figur 5.1-4: Vindkrefter skaper trykk- og strekkrefter i grunnen	76
Figur 5.3-1: Skråkappet dekke med tre oppleggssider.....	78
Figur 5.3-2: Alternativ løsning med dekker på øvre flens på bjelken.....	79

TABELLISTE

Tabell 1.5-1: Kapittelbeskrivelse for bacheloroppgaven	6
Tabell 2.2-1: Oversikt over eurokoder	12
Tabell 2.3-1: Risikoklasser	13
Tabell 2.3-2: Brannklasser	13
Tabell 2.4-1: Livsløpsfaser for bygninger	18
Tabell 2.6-1: Lastfaktorer for bruddgrensetilstanden	22
Tabell 2.6-2: Lastfaktorer for bruksgrensetilstanden	22
Tabell 2.6-3: Karakteristiske nyttelaster på golv	23
Tabell 2.6-4: Klimaklasser	25
Tabell 2.6-5: Pålitelighetsklasser	25
Tabell 2.6-6: Formfaktor for snølast på tak	26
Tabell 2.6-7: Terrengruhetsklasser	27
Tabell 3.1-1: Oversikt over valgte program	30
Tabell 3.2-1: Vindlaster på kortside og langside av bygget	31
Tabell 3.2-2: Resultater av snølast	32
Tabell 4.2-1: Medregnet laster for vegg-element	54
Tabell 4.2-2: Dimensjonerende laster for vegg-element	55
Tabell 4.2-3: Medregnet laster for dekke-element	58
Tabell 4.2-4: Dimensjonerende laster for dekke-element	59
Tabell 4.3-1: Kontroll av grunntrykk for søylefundament	61
Tabell 4.3-2: Kontroll av grunntrykk for veggfundament	62
Tabell 4.4-1: Kapasitetsutnyttelse til søyle ved håndberegninger og FEM-Design	63
Tabell 4.4-2: Kapasitetsutnyttelse til bjelke ved håndberegninger og FEM-Design	64
Tabell 4.4-3: Vindlast ved håndberegninger og Lastberegning av Ove Sletten	64
Tabell 4.6-1: Totalpris for byggematerialer i råbygg av CLT	67
Tabell 4.6-2: Totalpris for byggematerialer i råbygg av betong	68
Tabell 4.6-3: Prisdifferanse mellom CLT og betong	68
Tabell 4.6-4: Prisdifferanse pr kvadratmeter vegg-elementer	68
Tabell 4.6-5: Prisdifferanse pr kvadratmeter dekkelementer	69
Tabell 4.7-1: Oppgitte tall for ulike materials CO ₂ -avtrykk	70
Tabell 4.7-2: Differanse CO ₂ -avtrykk for produktstadiet	70
Tabell 4.7-3: Differanse CO ₂ -avtrykk for produktstadiet og livsløpets sluttstadium	70

SAMMENDRAG

Laminert tre, også kalt massivtre er et relativt nytt konstruksjonsmateriale for fleretasjes bygg. Det er lameller satt sammen til elementer ved bruk av lim, enten parallelt eller ortogonalt på hverandre. Massivtre gir muligheter til å redusere CO₂-utslipp i boligbygg, sammenlignet med betong. Utfordringen er at kunnskapen til denne alternative metoden å bygge på ikke er godt nok utredet.

Bacheloroppgaven har som hensikt å sammenligne massivtre og plaststøpt betong i en 14. etasjes bygning. Hovedfokuset er å analysere og dimensjonere konstruksjonen for vindkrefter og trykkrefter i bygget ved bruk av FEM-Design, Lastberging og BTSNIT. Løsningen i massivtre er modellert i Revit Structure og brukes til å sammenligne pris og CO₂-utslipp for de to bæresystemene.

Resultatene fra denne oppgaven viser at et så komplekst bygg i massivtre vil føre til at søyler og bjelker blir overdimensjonert pga. symmetriens krav. Samtidig er dekker og vegger i massivtre av en slik dimensjon at de greier å ta opp store trykk- og vindkrefter. Plaststøpt betong benytter ikke bjelker, og har færre søyler. Det er her hovedforskjellene mellom de to byggemetodene ligger. Kvadratmeterprisen for massivtre er vesentlig dyrere enn plaststøpt betong. Dette fører til en prisforskjell for råbygget som viser at plaststøpt betong er vesentlig billigere enn massivtre. En av fordelene med massivtre er at det fremstår som mer klimavennlig enn betong.

TERMINOLOGI

Begreper

Innsnitt – Merke som er skåret inn i noe

Kalsinering – Varmebehandling av faste råstoffer i ovn

NS-EN – Standard som er utviklet i Europa, og deretter fastsatt som Norsk Standard

Ortogonal – Rettvinklet

Utsparing – Åpning i etasjeskiller eller vegg for å gi plass for føring av kanaler, rør el.l.

Forkortelser

BIM – Bygningsinformasjonsmodellering

CLT – Krysslagte massivtreelementer

CO₂ – Karbondioksid

dB – Desibel

DOK – Dokumentasjonsforskriften

EUR – Euro (Den europeiske unions myntenhet)

EØS – Det europeiske økonomiske samarbeidsområde

GOF – Godkjenningsforskriften

kg – kilogram

kN – kiloNewton

MEP – Mekanisk, teknisk og VVS

MPa – MegaPascal

NA – Nasjonalt tillegg

NOK – Norske kroner

NS – Norsk Standard

PBL – Plan- og bygningsloven

SAK – Byggesaksforskriften

TEK – Teknisk forskrift

VVS – Varme, ventilasjon og sanitærteknikk

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

Den aktuelle konstruksjonen er det største bygget av de seks som skal prosjekteres og oppføres i Fri Sikt Volsdalsberga i Ålesund. Byggingen er delt i to trinn og konstruksjonen er en del av andre byggetrinn. Leilighetsblokken består av 15 etasjer, inkludert parkeringskjeller. Det er planlagt 46 leiligheter med fjordutsikt og gode dagslysforhold, i tillegg til utvendige sosiale møteplasser.

Multiconsult AS hadde et ønske om at denne leilighetsblokken ble vurdert i et bæresystem av massivtre istedenfor betong. Dette mye på grunn av strengere restriksjoner innenfor utslippene av klimagasser. Gjennom Parisavtalen har Norge sluttet seg til målet om å begrense den globale oppvarmingen til 2 grader og tilstrebe å begrense denne til 1,5 grader innen 2030. Det gjør at Norge har som målsetning å redusere utslippene av klimagasser med 40 prosent (Klima- og miljødepartementet, 2016). Byggesektoren står for en relativ andel av Norges utslipp på 13,5 prosent CO_{2ekv} . Det er spesielt produksjon av byggevarer som bidrar mye. Reduserende tiltak som bør settes fokus på da er å utvikle produkter og løsninger med lavere CO_2 -utslipp (Byggemiljø, 2007). Samtidig vurdere hvordan byggemetoden spiller inn på prosjektøkonomien.

Til nå har mye av bygg i massivtre vært unike bygg som ikke er satt i masseproduksjon. De siste årene har bruken av massivtre begynt å skyte fart i Norge. Prosjekter på nåværende tidspunkt hvor det er brukt massivtre kan man bl.a. nevne:

- Mjøstårnet, Brumunddal 2019
- Moholt 50/50, studentboliger, Trondheim 2016

1.2 Kunnskapsgapet

I dag er kunnskap om bygging i *Cross Laminated Timber* (CLT), som til nå har blitt kalt massivtre, lite utbredt i byggebransjen kontra plasstøpt betong. Det er få publikasjoner rundt de økonomiske forskjellene, og bakgrunn for disse ved prosjektering og produksjon av slike bygg. Årsaken kommer av det som er nevnt over, nemlig at det er få boligprosjekter som er ført opp med CLT som bæresystem. Den kunnskapen som finnes på området ligger stort sett

hos de få aktørene som til nå har bygget med CLT. Dette gir grunn til å tro at det er allmenn mangel på kunnskap innenfor temaet.

1.3 Formål og problemstillinger

Gjennom arbeidet med bacheloroppgaven dette halvåret ønsker vi å oppnå en bedre forståelse for prosessen og arbeidsmetoden i prosjekteringsfaget. Vi ønsker en større forståelse for bruken av dataprogrammene man kan benytte seg av ved analyse og dimensjonering av bygninger.

Vi kommer til å prosjektere bygget etter gjeldende forskrifter og standarder. Ved bruk av dimensjoneringsprogrammene FEM-Design, Lastberegning og BTSNITT skal vi analysere og dimensjonere en 14. etasjes bygning i CLT, for så å sammenligne med plastøpt betong. Hovedfokuset blir da å dimensjonere konstruksjonen for trykk- og vindkrefter i bygget. Vi kommer til å bruke programvaren Calculatis til å kontrollere vegg- og dekkeelementer.

Etter dimensjoneringen vil vi bygge opp en modell i modelleringsprogrammet Revit som viser råbygget i CLT. Deretter kan vi sammenligne denne med forprosjektmodellen av råbygget i plastøpt betong. Vi kommer til å gjøre et overslag på prisdifferens og en grov vurdering på utslippene av CO_2 mellom råbygget i CLT, sammenlignet med plastøpt betong.

Vi ønsker å komme med en anbefaling, på hva slags bæresystem som er mest gunstig for denne type høye og komplekse bygg, etter våre erfaringer fra denne oppgaven.

1.4 Avgrensninger

Bacheloroppgaven ble tilbudt av Multiconsult i Ålesund med formål om å avdekke forskjellene, spesielt innenfor kostnads- og nytteverdien, ved å bygge i CLT kontra betong. Det var da naturlig å avgrense oppgaven til det de ønsket å se nærmere på.

Ved oppbyggingen av modellen i FEM-Design har vi måttet gjort forenklinger pga. måten programmet tolker plasseringer av elementer iht. kraftfordelingen og symmetrien i bygget. Ved dimensjonering av vegger har vi kontrollert den mest belastede, denne vil bli representert i hele bygget. Dette prinsippet gjelder også for dekker. Hadde vi gått inn på hver enkelt etasje

kunne vi ha funnet mindre dimensjoner eller andre løsninger, men her måtte vi gjøre begrensinger pga. tidsaspektet. Vi gikk bort fra å beregne parkeringskjelleren, men beregnet kreftene som ble overført til fundamentet fra de øvrige 14 etasjene.

Det er flere detaljtegninger i prosjektet som vi ikke fikk sett på. Vi har holdt oss til de viktigste detaljene som bjelkeopplegg, etasjeskiller, feste mellom dekker. Vi har ikke valgt å lage detaljer for tak eller heissjakt.

Vi har ikke gått i dybden i det geotekniske aspektet, som vil si samvirke mellom jord og konstruksjon. I tillegg har vi unnlatt å dimensjonere for jordskjelv ettersom NS-EN 1998-1 sier vi kan nytte utelatelseskriteriet for slike konstruksjoner.

Problematikken i forhold til krymping og utvidelser av de ulike materialene har vi ikke vurdert i denne oppgaven. Dette spesielt mtp. at vår løsning er en kombinasjon av CLT og stål, som reagerer ulikt på fuktvariasjoner.

1.5 Leserveiledning

Bacheloroppgavens disposisjon følger IMRoD-modellen, samt råd og retningslinjer for rapportskrivning fra boka *praktisk rapportskrivning* av Nils Olsson. IMRoD står for Introduksjon, metode, resultat og diskusjon. Kapittelinnholdet av oppgaven beskrives i tabell 1.5-1.

Kapittel	Innhold
1. Innledning	Beskriver bakgrunn for arbeidet, kunnskapsgapet, formål og problemstilling, avgrensninger og gir en leserveiledning.
2. Teoretisk grunnlag	Definerer begreper og terminologi i rapporten. Presenterer relevant bakgrunnsteori fra litteraturstudier. Relevant for problemstillingen og skal danne grunnlag for analysene av resultatene.
3. Metode	Kvalitetssikrer arbeidet gjennom å dokumentere hvordan det er utført og hva arbeidet består av. Metodene som er brukt beskrives slik at det kan reproduseres eller etterprøves.

4. Resultat	Resultatene presenteres på en klar, saklig og objektiv måte. Oppsummeres ofte med figurer eller tabeller.
5. Diskusjon	Resultatene analyseres og vurderes etter hvert som de presenteres. Tar opp mulige usikkerheter og feilkilder. Diskusjonen danner grunnlaget for konklusjonen.
6. Konklusjon	Redegjør for hvordan funnene innvirker på det aktuelle temaet og svarer på problemstillingene i oppgaven.
7. Referanser	Informasjonsgrunnlaget som er brukt gis i en liste over anvendte kilder.
8. Vedlegg	Inneholder relevant informasjon som ikke er med i selve oppgavebesvarelsen. Denne informasjonen understøtter innholdet i oppgaven. Finner bl.a omfattende beregninger, større tabeller, dataoversikter.

Tabell 1.5-1: Kapittelbeskrivelse for bacheloroppgaven

2 TEORETISK GRUNNLAG

2.1 Bæresystemer og avstivning

I dette kapitlet presenteres bæresystemene og noen av deres karakteristikk. Bæresystemet i en bygningskonstruksjon skal holde konstruksjonen stabil og overføre opptredende laster til fundamenter, hvor de igjen tas opp av grunnen. I en høyblokk vil avstivning mot horisontale krefter være helt essensielt. Dette i form av avstivende sjakter, vindkryss, påstøp over dekker og rotasjonsstivhet i rammehjørner.

2.1.1 Plasstøpt betong og stål

Betong

Store norske leksikon (2014) definerer plasstøpt betong som en betongkonstruksjon som blir støpt på stedet, motsatt av prefabrikkert betong og elementbygging. Betongen blir støpt i forskalingsformer. Disse formene er midlertidige konstruksjoner som betongen skal ligge i frem til den har herdet. Dekker av plasstøpt betong blir vanligvis støttet opp av stålsøyler uten underliggende bjelker. Bruk av plasstøpt betong er noe man har god erfaring med og er ofte et naturlig alternativ i nybygg.

Betongen har flere gode egenskaper som (Jacobsen, 2014):

- God bestandighet og lang levetid
- God trykkfasthet
- Meget god formbarhet, som gjør den veldig arkitektonisk allsidig
- God brannsikkerhet
- Relativt billig med tanke på pris
- God lydisolering

Plasstøpt betong er erfaringsmessig en god løsning for komplekse bygg med tanke på utforming, ettersom prefabrikkerte elementer må ha bjelker eller andre oppleggsmetoder (Eivind Heimdal, 2018). Plasstøpt betong kan også brukes delvis i konstruksjoner selv om det ikke er hovedløsningen for selve bygget. Dette er som regel i kjeller og fundament i bygget.

Betongen er et materiale med god trykkfasthet som varierer med betongtypen. Strekkfastheten derimot er relativ liten og er 1/10 av trykkfastheten. Når det oppstår krefter i en konstruksjon i form av skjær, trykk og strekk trengs det armering som sørger for at konstruksjonen ikke bryter sammen. Armeringen ligger i trekkør i betongen og bidrar til å bære laster som påføres konstruksjonen (Jacobsen, 2014).

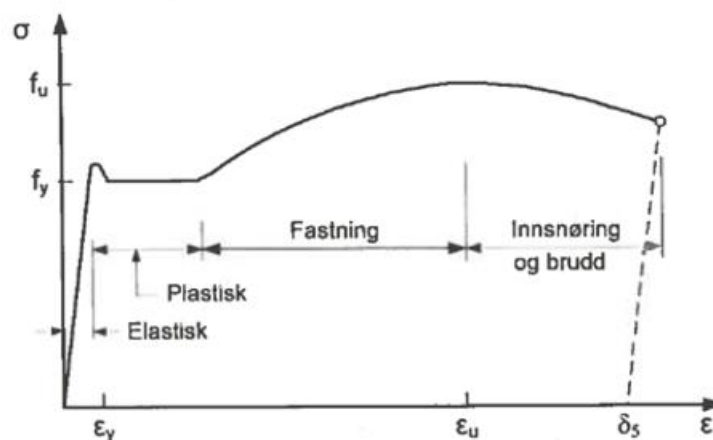
Stål

Stål består hovedsakelig av jern, men det blir også sammensmeltet med andre stoffer i en såkalt legering (Christensen & Almar-Næss, 2018). Legering er når et materiale, som består av minst ett metallisk grunnstoff, blir kombinert med andre grunnstoffer av enten metall eller ikke-metall (Christensen, 2017).

Stål er et material som blir mye brukt i mange forskjellige næringer, bl.a. i byggeindustrien. Grunnen til at det blir brukt mye i byggeindustrien er pga. sin store kapasitet i forhold til vekt. Stål blir vanligvis brukt i bæresystem i kombinasjon med betong eller tre. Stål blir oftest brukt i form av søyler, bjelker og armering.

Et sentralt begrep innen stål i konstruksjonssammenheng, er duktilitet. Det vil si stålets evne til å deformere seg plastisk før brudd. Dersom stål er duktilt vil det være «seigt» og da unngår man plutselige brudd i konstruksjonen. Det er derfor ønskelig at et stål er duktilt (Lohne, 2018).

Flytespenning og bruddspenning



Figur 2.1-1: Spennings- og tøyingsdiagram for stål (Larsen, 2015)

2.1.2 Massivtre (CLT)

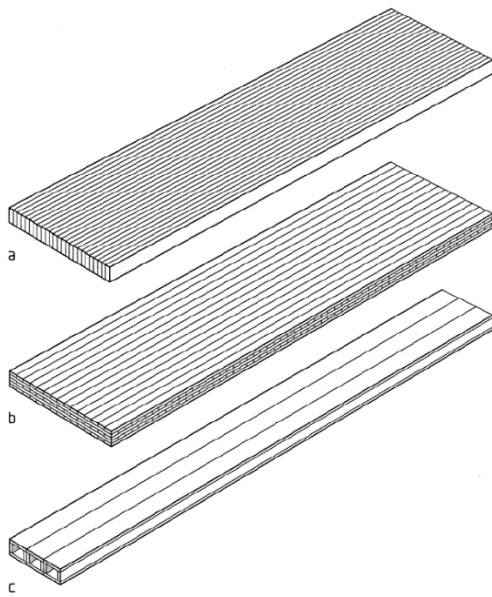
CLT-elementer er lameller satt sammen til elementer ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag. Treslag som ofte blir brukt er gran, furu eller lerk. Elementets tykkelse og antall sjikt kan variere avhengig av elementets funksjon og bruksområde. Man kan få produsert element med tykkelse mellom 60 mm og 320 mm. Lengden kan være oppimot 16 m. Antall sjikt kan variere mellom 3 og 9. Det limes mellom hvert lag og mens limen herder vil elementet bli presset sammen for at limen skal fordele seg utover. Man vil deretter gå over elementet igjen og se om ytterligere overflatebehandling er nødvendig (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015). I dag er bygging med CLT-elementer en anerkjent byggemetode som blir benyttet i bolighus, næringsbygg, skoler og fleretasjes bygg (Aarstad, Glasø, & Bunkholt, 2011).

Bygging med CLT-elementer har flere fordeler (Aarstad mfl., 2011, s. 2):

- Stor fleksibilitet ved formgivning, planløsning og konstruksjon
- Kort byggetid og god totaløkonomi
- Kan enkelt kombineres med andre materialer
- Lav vekt og enkel montering av tekniske installasjoner
- Godt arbeidsmiljø
- Positive miljøegenskaper
- God råstoffutnyttelse og utnytter trevirkets egenskaper på en god måte

CLT-elementene deles inn i følgende hovedtyper (Aarstad mfl., 2011, s. 2):

- *Kantstilte elementer* er elementer som er satt sammen av stående planker. Forbindelsesmiddel i disse elementene er skruer, spiker, lim, tredybler eller stålstag.
- *Krysslagte elementer* er elementer som er satt sammen av planker i flere sjikt. Vanligvis er sjiktene lagt 90 eller 45 grader i forhold til hverandre. Forbindes med lim eller tredybler. Slike elementer er svært dimensjonsstabile.
- *Hulromselementer* har et hulrom mellom et øvre- og nedre sjikt. Disse elementene finnes i mange varianter.



Figur 2.1-2: a) Kantstilte element, b) Krysslagte element (CLT), c) Hulromselement (SINTEF Byggforsk, 2001)

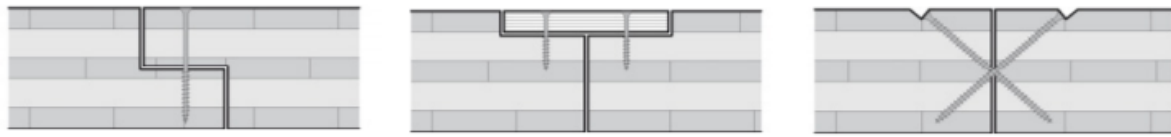
CLT-elementer kan brukes som bærende eller ikke-bærende elementer i gulv, vegger og tak. Man kan velge å bygge bæresystemet opp av bare CLT-elementer eller kombinere med andre materialer, som stål og betong. CLT kan klare store punktlaster, noe som gir muligheter for fleksible bygninger, spesielt i forbindelse med asymmetrisk plassering av vegger. Det at CLT har lav vekt gir positive effekter på andre bærende bygningsdeler og fundamenter. Elementene kan brukes som stabiliserende eller avstivende skive for horisontale krefter (Aarstad mfl., 2011, s. 3).

2.1.3 Avstivningssystem

Ved bruk av CLT-elementer kan disse utgjøre skiveavstivningen. Sammenføyningen mellom elementene må da utformes for å ivareta dette. Stive rammer eller fagverkskonstruksjoner kan også ivareta avstivningen for fleretasjes trehus. CLT-elementer kan lett dimensjoneres med nødvendig antall sjikt og total tykkelse for å oppnå tilstrekkelig styrke og stivhet (Glasø, 2011).

Etasjeskillerne av CLT benyttes vanligvis som stive skiver som fordeler de ytre vindkreftene til avstivende vegger. CLT-elementene kan betraktes som en toveis plate med ulik styrke og stivhet i to hovedretninger. Det er vanlig at flere elementer blir koblet sammen, ved hjelp av leppeskjøter eller not- og fjærløsninger, til en større skive eller plate. Koblingen mellom elementene vil være myke koblinger, som normalt kun tar opp skjærkrefter (Glasø, 2011).

Man vil i tillegg ha en slakkarmert påstøp på 40-80 mm. Denne vil være med på å stive av bygget og gjøre at elementene virker som en skive (SINTEF Byggforsk, 2005).



Figur 2.1-3: Leppeskjøter for kobling mellom CLT-elementer

2.2 Regelverk

2.2.1 Plan- og bygningsloven

Plan- og bygningsloven gjelder for alle typer byggeprosjekter og virksomheter i Norge. Loven brukes for å forvalte arealer på en fornuftig måte. Den har blitt bygd opp og endret på over en lang tid ut ifra erfaringer og teknologiutvikling siden den kom i 1985. Plan- og bygningsloven som blir brukt i dag kom 27. juni 2008 (Solvik, Falkanger, & Reusch, 2017).

2.2.2 Teknisk forskrift

Den gjeldende utgaven av teknisk forskrift ble vedtatt i 2017 og blir ofte referert til som TEK17. Dette er en forskrift under Plan- og bygningsloven, sammen med SAK, DOK og GOF. TEK har også egne veiledninger der man går i detaljnivå på utførelse av det tekniske arbeidet. Forskriften inneholder overordnede tekniske krav til utførelse og utforming. Formålet med forskriften er å sikre at alle bygg innehar en viss kvalitet, samt å danne en forutsigbarhet for næringslivet med hensyn på krav som må tilfredsstilles. Kravene i TEK blir gitt som funksjonskrav. F. eks. så kreves det at i rom for varig opphold, så skal minst ett vindu eller dør kunne åpnes mot det fri (Junker, 2018).

2.2.3 Standarder

Standard Norge (2018) definerer standard som en felles «oppskrift» på hvordan noe skal lages eller gjennomføres. Standarder bidrar til effektivisering, forutsigbarhet og reduserer sannsynlighet for at det blir gjort feil. De skaper også en felles forståelse for hvordan ting skal

gjøres. Hele samfunnet er i dag bygget på standarder, og de finnes innen alle næringer. Det at alle følger standarder gjør det også lettere å finne nye løsninger innen bransjene, ettersom man vet at alle aktører tar samme utgangspunkt i sin prosjektering (Store norske leksikon, 2018).

2.2.4 Eurokoder

Eurokoder er en felles europeisk samling av gjeldende standarder for prosjektering av byggverk. Eurokodene gir nødvendig informasjon om ulike materialer, laster, konstruksjonstyper og produkter. Hensikten med eurokodene er at konstruksjonssikkerheten til byggverk i henhold til byggeforskriften skal bli dokumentert. Alle eurokoder er i dag Norsk Standard, som vil si at alle byggverk som oppføres i Norge blir prosjektert etter eurokodene (Norsk Standard, 2019). Vi har 10 forskjellige eurokoder for prosjektering av byggverk, disse vises i tabell 2.2-1.

NS-EN 1990 – Eurokode 0	Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
NS-EN 1991 – Eurokode 1	Laster på konstruksjoner
NS-EN 1992 – Eurokode 2	Prosjektering av betongkonstruksjoner
NS-EN 1993 – Eurokode 3	Prosjektering av stålkonstruksjoner
NS-EN 1994 – Eurokode 4	Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong
NS-EN 1995 – Eurokode 5	Prosjektering av trekonstruksjoner
NS-EN 1996 – Eurokode 6	Prosjektering av murkonstruksjoner
NS-EN 1997 – Eurokode 7	Geoteknisk prosjektering
NS-EN 1998 – Eurokode 8	Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning
NS-EN 1999 – Eurokode 9	Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner

Tabell 2.2-1: Oversikt over eurokoder (Norsk Standard, 2017)

2.3 Bygningsfysikk ved bruk av CLT

2.3.1 Brann

Alvorlighetsgrad ved evt. brann vil variere med byggets formål, som f. eks. en boligblokk beregnet for overnatting. Tabell 2.3-1 viser en oversikt over risikoklassene og hvilke kriterier som danner grunnlaget for valg av risikoklasse. Konsekvensen av en brann klassifiseres i brannklasser, som vist i tabell 2.3-2 (SINTEF Byggforsk, 2001).

Risikoklasser	Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold	Personer i byggverk kjenner rømningsforhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet	Byggverk beregnet for overnatting	Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare
1	ja	ja	nei	ja
2	ja/nei	ja	nei	nei
3	nei	ja	nei	ja
4	nei	ja	ja	ja
5	nei	nei	nei	ja
6	nei	nei	ja	ja

Tabell 2.3-1: Risikoklasser (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Brannklasse	Konsekvens
1	Liten
2	Middels
3	Stor
4	Særlig stor

Tabell 2.3-2: Brannklasser (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Et bæresystem av stål og betong benytter ubrennbare materialer og det er en metode som man vet erfaringsmessig har gode egenskaper mot brann. Stål har høy varmeledningsevne, reduksjon av fasthetene oppstår raskt ved oppvarming, og dermed blir også bæreevnen raskere redusert. Stål får termisk utvidelse ved oppvarming, som kan forårsake knekking.

Oppvarming av betongen vil føre til avskalling og dermed blir tverrsnittet og bæreevnen redusert. Denne prosessen går sakte sammenlignet med konstruksjonsmaterialer av CLT.

Brannteknisk prosjektering av bæresystem i CLT må vise at konstruksjonen tilfredsstillende kravene til bæreevne og stabilitet ved brann. CLT har lav varmeledningsevne ved brann som gir sakte oppvarming innover i tverrsnittet. I tillegg har det lavere forkullingshastighet enn mer porøse trebaserte elementer. Det vil si at når treet forkuller dannes et isolerende sjikt på overflaten som beskytter den bærende innsiden av tverrsnittet. Dette kan dimensjoneres for ved hjelp av den reduserte tverrsnittsmetoden, som vil si at man overdimensjonerer elementene i tilfelle brann forekommer. Konstruksjoner med store tverrsnitt vil derfor fungere stabiliserende lenge ved brannekspenning. Etter brann er det enkelt å fjerne de skadde delene på konstruksjonen og man kan da forsterke gjenstående tverrsnitt istedenfor å skifte ut hele konstruksjonen (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 20).

2.3.2 Varmeisolasjon

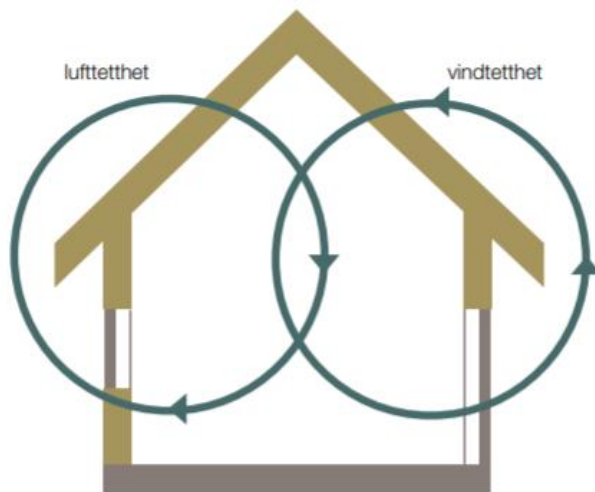
Varmeisolasjon i bygninger omfatter tiltak som reduserer oppvarmingsbehovet om vinteren og kjølebehovet om sommeren. Når man varmeisolerer en bygning, bruker man bygningselementenes egenskaper til å sørge for behagelig temperatur og romklima. Målet er at energiforbruket skal være lavest mulig.

De varmeisolerende egenskapene til et bygningselement bestemmes av U-verdien, varmegjennomgangskoeffisienten. Trevirkets evne til å lede varme bestemmes av romvekten og fuktinnholdet i treet. For CLT er verdien 0,13 W/mK. Betongen derimot har verdien 2,0 W/mK, som vil si at materialet har vesentlig lavere varmeisolerende egenskaper. Det vil si at CLT ikke har samme behovet for tilleggisolasjon som betong (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 11).

2.3.3 Lufttetthet

Luft- og vindtetthet er en viktig faktor for at et bygg skal fungere. Et lufttett lag på innsiden av bygningen forhindrer at det trenger inn fuktig luft, og dermed at det oppstår kondens i bygningselementene. Dette har stor påvirkning på bygningens energibalanse. Hvis bygningen

ikke er lufttett, kan det oppstå en luftgjennomstrømning innenfra og ut i konstruksjonen slik figur 2.3-1 viser.



Figur 2.3-1: Luft- og vindtetthet i bygg (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015)

CLT er lufttett fra og med tre sjikt, men som regel oppnår man ikke vindtettheten som kreves og må da benytte en vindspærre, diffusjonsåpen membran, i bakkant av luftesjiktet bak kledningen (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 13).

2.3.4 Lydisolasjon

God lydisolasjon er viktig for at det skal være behagelig å oppholde seg i en bygning. Kravene til lydisolasjon må sikre at beboerne er tilstrekkelig beskyttet mot støy utenfra og fra de andre boenhetene (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 17).

Lyddempingen for bygningselementer med ett lag CLT bestemmes av massen per flateenhet og bøyestivheten. Iht. Bergers masselov øker lydisolasjonen med 6 dB når massen fordobles. Bygningselementer med flere lag CLT og kledning kan få sterkere lydisolasjon ved lavere masse. Lydisolasjon i etasjeskillere kan bedres enten ved økt masse eller bedre isolasjon. Man bør ha en nedforet himling, i tillegg en påstøp på 40-80 mm for å avstive dekkene og trinnlydsplate for å isolere godt mot gjennomgang av støy (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 18).

Trinnlyd er strukturbåret lyd og betegnelsen på vibrasjoner i faste konstruksjoner som sekundært utstråler lyd. Gangtrafikk er den vanligste årsak til slike vibrasjoner. For å unngå denne typen støy kan man legge inn en trinnlydsplate på 30-40 mm (Aarstad mfl., 2011, s. 5).

2.3.5 Fukt

Fuktisolasjon skal begrense ulike fuktpåvirkninger på bygningskonstruksjoner slik at man unngår skadelige effekter som kan redusere varmeisolasjonen, redusere fastheten, føre til mugg og råte.

CLT er diffusjonsåpent og limfugene danner et dampbremsende isolasjonslag i ytterdelen av elementet. I oppvarmingsseasonen blir fuktinnholdet i inneluften lavere. Da blir CLT-elementenes evne til å transportere fuktighet redusert, og blir diffusjonstette. Dette i motsetning til sommermånedene hvor elementene blir mer diffusjonsåpne igjen, fordi luftfuktigheten innendørs øker. Dette er en egenskap som forekommer naturlig i treverk generelt. Det at CLT-elementer raskt tørker ut etter montasje og holder seg dimensjonsstabile under uttørkingen er en stor fordel i forhold til betong. Det blir som regel brukt naturlig uttørking i CLT for å unngå at flater sprekker opp og at elementene krymper. Dette gir heller ingen større kostnader i forhold til uttørkingen (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 15).

Ved bæresystem med kombinasjonen av stål og betong tar uttørkingen lengre tid. Årsaken til dette er at man ønsker en god herding og da må man ikke forhindre vanntap fra betongoverflaten. Når bygget først er lukket må man som regel bruke en aktiv uttørkingsmetode for å raskere tørke ut bygget.

2.4 Miljøaspekt

2.4.1 Karbondioksid – CO₂

Karbondioksid er en kjemisk forbindelse som består av atomene oksygen og karbon. Denne kjemiske forbindelsen eksisterer både i gass, væske og fast form. Samtidig som gassen er viktig for klimaet på jorden, vil for store mengder av den gi negative effekter. En økning i karbondioksidinnholdet i luften vil bidra til økt drivhuseffekt, som igjen vil føre til en økt

middeltemperatur på jorden. Det er derfor ønskelig å redusere vårt totale utslipp av CO₂ (Haraldsen & Pedersen, 2018).

Utslipp av klimagasser er en av de virkelig store utfordringene på global basis. Det blir gjennomført nye tiltak innen ulike næringer for å få redusert det totale utslippet. Et eksempel på dette er klimakvotesystemet som norske bedrifter har vært en del av siden 2008 gjennom EØS-avtalen. Regjeringen (2017) skriver at klimakvotesystemet er et system for handel av klimakvoter. Det finnes bare et visst antall klimakvoter, og dette antallet blir redusert over tid. Med denne strategien vil man på lang sikt redusere det totale klimagassutslippet. Som vist i figur 2.4-1, så er vi nå på en nedovergående trend. I Norge hadde vi i 2017 et utslipp på 52,7 millioner tonn CO₂-ekvivalenter (Statistisk Sentralbyrå, 2018).



Figur 2.4-1: Norges utslipp av karbondioksid (Norges klimagassutslipp – Klimavakten, 2019)

2.4.2 Livsløpsfaser

Når man vurderer materialets CO₂-avtrykk er det viktig å vurdere hvilke livsløpsfaser man skal inkludere, og hvilke man skal ekskludere. Livsløpsfaser for et material er de stadiene som materialet gjennomgår i sin levetid. Dette er vist i forenklet tabell 2.4-1. En fullstendig oversikt over livsløpsfasene vises i vedlegg 7, s. 3.

Bygningens livsløp			
Produktstadiet	Gjennomføringsstadiet	Bruksstadiet	Livsløpets sluttstadium

Tabell 2.4-1: Livsløpsfaser for bygninger

2.4.3 Miljøaspekt ved bruk av betong

Betong er det vanligste byggematerialet i dag. Dette er på grunn av at det har gode byggetekniske egenskaper, som blant annet at det er fleksibelt, sterkt og praktisk. På verdensbasis bruker vi derfor enorme mengder betong.

Betong blir laget ved å blande sement og vann med sand, stein og tilsetningsstoffer. Den viktigste ingrediensen i betong er sement. Det er ved selve sementproduksjonen det blir frigjort store mengder CO₂. Mer spesifikt forekommer det i den kjemiske prosessen kalsinering, der CO₂ brennes bort fra kalkstein. I 2016 var verdens totale sementproduksjon på ca. 4,2 milliarder tonn, noe som utgjør rundt 5 prosent av totalt CO₂-utslipp på verdensbasis (Biørnstad, 2016).

2.4.4 Miljøaspekt ved bruk av stål

Stål gir et relativt stort CO₂-avtrykk. Et viktig moment for dette materialets miljøegenskaper, er at det er resirkulerbart. Dette vil si at materialet kan gjenbrukes. Man skiller gjerne mellom null prosent resirkulert, 60 prosent resirkulert og 100 prosent resirkulert stål i klimagassregnskapet. Null prosent resirkulert er helt nytt, ubrukt stål, og vil dermed gi det høyeste CO₂-avtrykket. CO₂-avtrykket for null prosent resirkulert stål er fem ganger høyere enn for 100 prosent resirkulert stål. Utover dette, har stål andre gode egenskaper som f.eks. høy styrke i forhold til vekt. Dette vil føre til mindre tungtransport og mindre belastning på miljøet (Myhre, 2015).

2.4.5 Miljøaspekt ved bruk av CLT

CO₂-utslippene som er knyttet til CLT-elementer, kommer hovedsakelig fra transport fra fabrikk til byggeplass, samt utslipp fra benyttede maskineri ved montering. Ettersom det per dags dato eksisterer et begrenset antall fabrikker, så kan denne distansen bli en betydelig stor. Ved bruk av trevirke istedenfor andre byggematerialer er den gjennomsnittlige CO₂-besparelsen satt til 1.6 tonn CO₂-ekvivalenter (Aase, 2016).

Det er to grunner til at bruk av CLT-elementer reduserer CO₂-innholdet i atmosfæren, nemlig substitusjon og karbonlagring. Med substitusjon menes det den besparelsen av utslipp som kommer av å benytte trevirke istedenfor andre byggematerialer. I tillegg til denne besparelsen, sparer vi atmosfæren for enda mer CO₂-utslipp ved at trevirke tar opp og lagrer karbon. Trevirke er også et bærekraftig material som gir muligheter for resirkulering (Aase, 2016).

2.5 Økonomi og fremdrift

2.5.1 Økonomi

Kostnaden et prosjekt blir bedømt etter er resultat av en kostnadsestimeringsprosess som gjennomføres for å gjøre et anslag på hvilke ressurser som kreves for å kunne gjennomføre et prosjekt. Målet med estimeringsprosessen er å skape en best mulig oversikt over prosjektets totale kostnader og usikkerheten forbundet med estimatet. Det er viktig å nevne at et estimat ikke vil gi en eksakt sum, men en forventet kostnad (Torp & Klakegg, 2016).

Parametrisk estimering benytter det statiske forholdet mellom historiske kostnader og andre variabler som f.eks. ytelseskarakteristikker eller entreprenørens produktivitetsmål. Metoden benytter seg av noen av de viktigste kostnadsdriverne for å lage et estimat på kostnadene. Et eksempel på en kostnadsdriver som kan benyttes er kvadratmeter. Denne metoden regner også med håndverkernes læringskurve og at man da får redusere kostandene ved repeterende oppgaver (Project Management Skills, 2016).

Et utfordrende aspekt med kostnadsestimering er usikkerheten knyttet til estimatet. Noen faktorer som bidrar til usikkerheten i et prosjekt er erfaring med lignende prosjekt. Jo mindre erfaring man har med lignende prosjekter, desto større er usikkerheten. Om man har en lang planleggingsperiode, vil usikkerheten reduseres. Prosjektets varighet og de ulike menneskers

kunnskap kan også bli avgjørende faktorer for kostnadsestimatet (Project Management Skills, 2016).

2.5.2 Fremdrift

God fremdrift er viktig for å ferdigstille bygg innenfor fristene og holde prosjektet innenfor kostnadsrammene. Viktige faser å vurdere blir da prosjektering, produksjon, transport og montering.

CLT-elementer

Når man skal bygge med CLT-elementer er det viktig å legge dette til grunn tidlig i prosjekteringsarbeidet. Da vil man få mye ut av CLT-elementenes muligheter og konkurranseevne. Dette kan være om man har mange like elementer, så vil det gi god repeterbarhet og lønnsomhet under produksjon og montasje av elementene. Det er viktig å planlegge bruksområdet for elementene før produksjon i forhold til styrke, holdbarhet og synlige overflater. Samtidig blir det viktig å vurdere egenskapene til CLT-elementer i forhold til nedbør og fremtidig økning av nedbørsmengde i deler av landet, med mulig økt slagregnsmengde, temperaturvariasjoner og fuktvariasjoner. Slike faktorer har innvirkning på produksjon, materialvalg og pris (Aarstad mfl., 2011, s. 3).

Produksjonen av CLT-element må foregå innendørs under tørre og kontrollerbare forhold. Man limer og presser trevirke sammen til CLT-plater, deretter blir de dimensjonert til ønsket størrelse ut ifra standarder som leverandøren har. Helt tilslutt blir CLT-platene kuttet opp og utformet presist og fleksibelt i forhold til bruksområdet. Da vil man ha enkle byggesett på byggeplass (Aarstad mfl., 2011, s. 4).

Størrelsen på elementene blir hovedsakelig avgrenset av transportmuligheter, men lastebil med uttrekkbar henger kan maksimalt transportere element som veier 24 tonn og har en lengde på 16 m. Ved spesielle tilfeller, der elementene er over 20 m, må man ha særskilt tillatelse. Det er viktig å sikre elementene mot fukt, smuss og sollys ved transport fra fabrikk til byggeplass, på byggeplass og ved montering. Elementene blir pakket i en folie og deretter dekt med en lastebilpresenning. I tillegg beskyttes elementene med kantbeskyttelse av papp mellom festestroppene og platene. På byggeplass er det viktig å ha gode adkomstmuligheter

for mobilkran og semitrailer som skal levere elementene (Stora Enso Wood Products GmbH, 2015, s. 29).

Når elementene ankommer byggeplass kan de direkte heises på plass med kran. Man bør også ha plass for mellomlagring for å unngå skader på elementene. Før montasje er det viktig med kvalitetssikring av detaljtegninger på skjøter og forankringer, montasjetegninger, elementtegninger, pakkelister for elementene og heisutstyr. Man vil som regel trenge fire montører for å sette på plass ett CLT-element. Dette gir da en rask og effektiv måte å montere elementene (Aarstad mfl., 2011, s. 4).

Plasstøpt betong

Eivind Heimdal (2018) sier i et intervju til Teknisk Ukeblad at plasstøpte løsninger krever mye planlegging i form av utførelse og logistikk, samtidig som det er arealkrevende pga. nødvendig tilgang til pumpestasjoner og andre nødvendige tekniske innretninger. Fordelen med å bruke plasstøpt betong er at man ofte har lokale produsenter i området. Det vil kunne gi gode muligheter for tett samarbeid. Prefabrikkerte elementer derimot, må ofte fraktes en lang strekning for å komme til byggeplassen. Betongelementer er omtrent fem ganger tyngre enn CLT, som gir restriksjon av lastekapasiteten og dyrere frakt.

Når man bygger med plasstøpt betong så er det visse problemstillinger som man må ta hensyn til. Det kreves faglærte håndverkere og mye planlegging for å få til en god løsning. Plasstøpte løsninger er mer arealkrevende og krever god logistikkplanlegging. Tilgang til kran og plass til pumpestasjoner er eksempel på hvorfor plasstøpte løsninger er mer arealkrevende. Det kreves mye planlegging, tid og arbeid for å støpe betong. Først må man sette opp forskalingsformer som betongen støpes i. Deretter skal betongblandingen bli plassert i forskalingsformene, før herdingen kan starte. Herdingen kan vare flere dager, og man må da kontrollere omgivelsene til betongen under denne perioden. Beskyttelse av betongen blir gjort med hensyn på varme, snø og andre elementer som kan forhindre betongen i å herde riktig (Eivind Heimdal, 2018).

2.6 Lastberegning

Konstruksjoner i Norge blir beregnet iht. Norsk Standard. I NS-EN 1990 finner man den nødvendige informasjonen for å beregne etter Norsk Standard.

2.6.1 Grensetilstander

For beregning av ulike scenarier bruker vi ulike grensetilstander. De ulike grensetilstandene har forskjellige lastfaktorer som benyttes ved beregning. Ved beregning av f. eks. momentkapasitet benytter vi bruddgrensetilstand, mens ved beregning av nedbøying og rissvidde, benytter vi bruksgrensetilstand. Ulykkestilstand benyttes ved dimensjonering for jordskjelv- og brannscenarier (Sørensen, 2013).

For beregninger i bruddgrensetilstanden brukes lastfaktorene gitt i tabell 2.6-1. Det som er viktig er å finne den mest ugunstige, dimensjonerende lasten. Her velger man enten å benytte lastkombinasjonen B1 eller B2 etter hvilken ligning som gir størst dimensjonerende last. Dersom en last vil virke hjelpende på konstruksjonen skal man bruke gunstig lastfaktor, ettersom den vil gi en større total dimensjonerende.

Lastkombinasjoner som skal påvises	Permanente laster		Dominerende variabel last Q_i	Øvrige variable laster Q_i
	Ugunstig	Gunstig		
	$\gamma_{Gj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}$	$\gamma_{Q1}\psi_{0,1}$	$\gamma_{Qi}\psi_{0,i}$
B1 (Ligning 6.10a)	1,35	1,00	1,05	1,05(0,90)*
B2 (Ligning 6.10b)	1,20	1,00	1,50	1,05(0,90)*

Tabell 2.6-1: Lastfaktorer for bruddgrensetilstanden (Rørvik, 2010)

I bruksgrensetilstanden bruker vi lastfaktorene som er gitt i tabell 2.6-2. Lastfaktorene «Ofte forekommende» og «Tilnærmet permanent» tar hensyn til redusert sannsynlighet for at variable laster vil opptre permanent på en konstruksjon. Den karakteristiske lastkombinasjonen vil gi den mest ugunstige dimensjonere lasten. I bruksgrensetilstanden blir det hovedsakelig kontrollert at bygget tilfredsstillt krav i driftsperioden knyttet til normalt bruk og formål (Sørensen, 2013).

Lastkombinasjoner	Permanente laster	Dominerende last	Øvrige variable laster
	γ_{Gj}	γ_{Q1}	γ_i
Karakteristisk	1,0	1,0	0,7
Ofte forekommende	1,0	0,7	0,6
Tilnærmet permanent	1,0	0,6	0,6

Tabell 2.6-2: Lastfaktorer for bruksgrensetilstanden (Rørvik, 2010)

2.6.2 Permanent- og variabel last

Permanent last er en last som vil virke med samme verdi på konstruksjonen over lengre tid. Det er lite usikkerhet rundt disse lastene, og man vil derfor bruke en lav sikkerhetsfaktor når man beregner de. Permanente laster kan f.eks. være egenvekt og jordtrykk (Rørvik, 2011).

En variabel last er på mange måter det motsatte av en permanent last. Lasten vil variere med tiden, og det er knyttet en større usikkerhet opp mot den. Den variable lasten er ofte også en fri last, som kan virke inn på ulike steder på konstruksjonen. Lastfaktoren for variable laster vil derfor være større enn for permanente laster. Variable laster kan f.eks. være nyttelast, snølast og trafikklast. Normverdier for karakteristiske, vertikale nyttelaster i boliger, administrasjonsbygg, institusjonsbygg, forretninger og idrettsanlegg finnes i NS-EN 1991-1-1. De ulike bygningskonstruksjonene er delt opp i bygningskategorier A til E. I tabell 2.6-3 er det gitt eksempler på bygg som kommer inn under de ulike kategoriene (Rørvik, 2011).

Kategori	Bruk	Eksempler	q_k (kN/m ²)	Q_k (kN)
A	Arealer for inneaktiviteter og hjemmeaktiviteter	Rom i boligbygg og hus; rom og avdeliger i sykehus; soverom i hoteller og gjestgiverier; kjøkken og toaletter.		
		- Gulv	2,0	2,0
		- Trapper	3,0	2,0
		- Balkonger	4,0	2,0
		- Loft med liten takhøyde eller begrenset adgang	1,0	1,5
B	Kontorarealer		3,0	2,0
C	Arealer hvor personer kan samles (med unntak av arealer som er definert i kategori A, B, D og E)	Arealer med bord, for eksempel i skoler, kafeer, restauranter, spisesaler, leserom, resepsjoner. C1	3,0	4,0
		Arealer med faste seter, for eksempel arealer i kirker, teatre, kinosaler, konferanserom, forelesningssaler, forsamlingsaler, venterom og lignende. C2	4,0	4,0
		Arealer uten hindringer for personer i bevegelse, for eksempel arealer i museer, utstillingsrom, ankomstråder i offentlige bygg, administrasjonsbygg, hoteller C3	5,0	4,0
		Arealer med mulige fysiske aktiviteter, for eksempel dansesaler, gymnastikkrom, scener og lignende C4	5,0	7,0
		Arealer som lett overfylles, for eksempel i bygg for offentlig bruk som konsertsaler, idrettshaller inklusive tribuner og atkomstområder, utendørs idrettsanlegg C5	5,0	4,0
D	Forretningsarealer	Arealer i detaljhandel, varehus, bok- og papirhandel ... D1	5,0	4,0
		Arealer belastet med pallet papir og lignende D2	5,0	7,0
E	Arealer for oppsamling av varer, innbefattet ankomstråder	Arealer for oppbevaring, innbefattet biblioteker. E1	7,5	7,0

Tabell 2.6-3: Karakteristiske nyttelaster på golv (Rørvik, 2011)

2.6.3 Faktorer

Lastfaktor Y

Lastfaktoren tar hensyn til unormale og uforutsatte laster som en konstruksjon kan utsettes for. Dette kan f.eks. være et støt i horisontalretning mot en søyle som bare er dimensjonert for å ta aksiallast. Lastfaktoren tar også hensyn til redusert sannsynlighet for at flere laster opptrer samtidig (Rørvik, 2010).

Etasjereduksjonsfaktor α_n

Etasjereduksjonsfaktoren brukes ved dimensjonering av fundament, de nederste søylene og veggene. Dette fordi de må bære nyttelastene fra etasjene over. Etasjereduksjonsfaktoren tar hensyn til redusert sannsynlighet for at nyttelasten blir maksimalt utnyttet i flere etasjer samtidig (Rørvik, 2010). Etasjereduksjonsfaktoren er gitt ved:

$$\alpha_n = \frac{[2 + (n - 2) \cdot 0,7]}{n}$$

Der n er lik antall etasjer over den belastede konstruksjonsdelen.

Materialfaktor Y_m

Materialfaktoren Y_m tar hensyn til usikkerhetene og variasjonene som er knyttet til materialets fasthet, samt potensielle geometriske avvik. Denne faktoren blir benyttet bl.a. for å redusere materialets tverrsnittskapasitet. Dette blir gjort for at man ikke overvurderer materialets kapasitet. Ulike typer materialer og produkter av trevirke har ulike materialfaktorer (Rørvik, 2010).

2.6.4 Klimaklasser

Klimaklasser blir bestemt ut ifra den påkjenning trevirket får fra miljø som påvirker fuktinnholdet i trevirket. Grunnen til at vi korrigerer for fuktighet er at fuktig trevirke tåler mindre last enn tørt trevirke. Det blir delt inn i 3 klimaklasser, som vist i tabell 2.6-4.

	Kjennetegn	Fuktinnhold i materialet
Klimaklasse 1	Omfatter blant annet innendørs bærende elementer i vanligvis oppvarmede område, og yttervegger i vanligvis oppvarmede bygninger som er bygd etter norsk standard. (Eie, 2016)	Ca. 12%
Klimaklasse 2	Omfatter blant annet bærende elementer i konstruksjoner som ikke vanligvis er oppvarmet, men ventilerte. (Eie, 2016)	Ca. 20%
Klimaklasse 3	Denne klassen gjelder for konstruksjoner som ikke er beskyttet mot verken regn eller vann, eller konstruksjonen kan stå i direkte kontakt med terreng. (Eie, 2016)	Over 20%

Tabell 2.6-4: Klimaklasser (Eie, 2016)

2.6.5 Pålitelighetsklasser

Pålitelighetsklasser blir bestemt ut ifra den konsekvens et brudd i konstruksjonen vil gi. Det blir delt inn i fire pålitelighetsklasser, som vist i tabell 2.6-5. Konstruksjoner i de ulike pålitelighetsklassene skal undersøkes og dimensjoneres for ulike påkrevde scenarier (Rørvik, 2010). Pålitelighetsklasser handler i hovedsak om krav til kontroll. Desto høyere pålitelighetsklasse, desto høyere krav er det til kontroll. Krav til kontroll kan gjelde for hele bygget, eller deler av bygget som krever høyere sikkerhet. (Rørvik, 2010).

Pålitelighets-klasse	Bruddkonsekvens	Eksempler på konstruksjoner
1	Liten	Småhus, rekkehus, mindre lagerbygg, landbruksbygg, kaier og fortøyningsanlegg for sport og fritid.
2	Middels	Større boligbygg, skoler, kontor- og forretningsbygg, institusjonsbygg, fiskerihavner, kaier, industrianlegg, tårn.
3	Stor	Byggverk for større menneskemengder: tribuner, kinosaler, sportshaller, kjøpesentre og lignende. Dammer, veg- og jernbanebruer, marine konstruksjoner for petroleumsindustri.
4	Særlig stor	Atomreaktorer. Lager for radioaktivt avfall.

Tabell 2.6-5: Pålitelighetsklasser (Rørvik, 2010)

2.6.6 Snølast

Snølast beregnes ut ifra Norsk Standard for snølast NS-EN 1991-1-3 (6). Dimensjonering for snølast tar utgangspunkt i den enkelte kommunes 50 års last. Det blir også tatt hensyn til takutformingen i dimensjoneringen. Dette er på grunn av at de forskjellige taktyper har ulik evne til å unngå oppsamling av snø. Ut ifra tabell 2.6-6 kan man, med hensyn på takvinkel, finne formfaktoren μ .

Formfaktor	Takvinkel		
	$0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60^\circ - \alpha)/30^\circ$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8\alpha/30^\circ$	1,6	-

Tabell 2.6-6: Formfaktor for snølast på tak

Snølast på tak er gitt ved $s = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k$

Der μ er formfaktoren

C_e er eksponeringsfaktor

C_t er termisk faktor

S_k er karakteristisk snølast på mark på byggestedet

Eksponeringsfaktoren C_e tar hensyn til vind som reduserer snømengden på taket. Den termiske faktoren C_t tar hensyn til at snømengden på taket kan bli redusert ved smelting som følge av varmegjennomgang i taket.

2.6.7 Vindlast

Vindlast beregnes ut ifra Norsk Standard for vindlaster NS-EN 1991-1-4 (7). Dimensjonering for karakteristisk vindbelastning på en bygning blir beregnet med utgangspunkt i den største vindhastigheten som i gjennomsnitt forekommer hvert 50. år. Denne vindlasten blir kalt referansevindhastighet og blir hentet ut fra NS-EN 1991-1-4. Hver enkelt kommune har sin målte referansevindhastighet. Denne faktoren danner grunnlaget for dimensjonering av den endelige vindlasten.

Videre i beregningen brukes det flere faktorer som tar hensyn til bl.a. terrenget rundt en bygning, terrengruhet og turbulensintensitet. De ulike faktorene er vist i vedlegg 11, s. 5.

Et annet viktig moment når det kommer til beregning av vindlast er å finne ut hvilken terrengruhetsklasse den aktuelle konstruksjonen faller under. Terrengruhetsklassen blir bestemt ut ifra omgivelsene til konstruksjonen. Terrengruhetskategoriene vises i tabell 2.6-7.

Terrengruhet	Beskrivelse	k_r	z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Åpent, opprørt hav	0,16	0,003	2
I	Kystnær, opprørt sjø. Åpne vidder og strandsoner uten trær eller busker	0,17	0,01	2
II	Landbruksområde, område med spredte små bygninger eller trær	0,19	0,05	4
III	Sammenhengende småhusbebyggelse, industriområder eller skogsområder	0,22	0,3	8
IV	Byområder der minst 15% av arealet er dekket med bygninger, og deres gjennomsnittlige høyde overskrider 15 m. Granskogsområder.	0,24	1	16

Tabell 2.6-7: Terrengruhetsklasser

Det man tilslutt ønsker å regne seg frem til er vindkasthastigheten slik at man kan finne hastighetstrykket som virker mot veggen. Den totale ytre vindlasten som en konstruksjon må dimensjoneres for, består av både trykket som virker på lo-siden, og undertrykket (sug) som oppstår på le-siden av konstruksjonen.

2.7 Programvare

2.7.1 FEM-Design

FEM-Design er et modellerings- og analyseprogram utviklet av det svenske selskapet StruSoft AB som tar høyde for verdier i Eurokodene og de norske NA-tilleggene. I programmet kan man løse alt fra enkle til kompliserte konstruksjoner, og analysere de med stor nøyaktighet. Utfører statikk, dynamikk, stabilitet, jordskjelvsanalyser og dimensjonering av betong, stål og tre på den komplette 3D modellen. Geometri og resultater etter dimensjonering vises med avansert grafikk eller som animasjon.

2.7.2 Revit Structure

Revit Structure er Autodesk sitt BIM verktøy for å konstruere objekt baserte 3D-modeller. Revit er et kraftig, men brukervennlig program som inkluderer funksjoner for arkitektdesign, MEP og konstruksjonsteknikk. I programmet kan man designe fysiske modeller av stål,

betong og tre, eller en kombinasjon av disse. Verktøyet kan brukes til å skape arbeidsflyt av konstruksjonen og visualiserer oppbyggingen av de ulike elementene. Ut ifra modellen kan man lage arbeidstegninger, detaljtegninger og tegninger som brukes i produksjonen av byggeelement. Strukturmodellen i Revit baseres på en arkitektmodell som oftest kommer som en IFC-fil.

2.7.3 Lastberegning

Lastberegning av Ove Sletten eies av Focus Software og er et program for beregning av snølast på tak, eller vindlast på vegger og tak. Beregningene er basert på de norske NA-tilleggene for snølast og vindlast.

2.7.4 BTSNITT

BTSNITT av Ove Sletten eies av Focus Software og er et program for tverrsnittskontroll av betongtverrsnitt. En kan beregne søylefundament og veggbankett, men også beregning for konsoll, støttemur, kjellervegg, vegg, søyle og gjennomløkkingskontroll.

2.7.5 Office 365

Office 365 er en tjeneste som gir brukeren alt man trenger for å få en jobb gjennomført. Programmet er utviklet av Microsoft og inneholder verktøy som Word, Excel, PowerPoint, Outlook, Onenote, Publisher og Onedrive.

2.7.6 Calculatis

Calculatis er et gratis plattformuavhengig beregningsprogram for CLT-konstruksjoner utviklet av Stora Enso, som er produsent av CLT-produkter. Beregninger fra Stora Enso inneholder alle designmodulene og de kan enkelt benyttes i beregningen. Programmet kan dimensjonere CLT vegger, dekker, bjelker, forbindelser mellom dekker, fundamentforankring og nedbøyning over vindu. Dimensjoneringen kan utføres i bruddgrensetilstand, bruksgrensetilstand og ulykkessituasjonen brann.

3 METODE

3.1 Valg av dataprogram

Grunnlaget bak valget av program har flere aspekt. Det er kjente program for oss studenter, samtidig som man vil komme borti disse i arbeidslivet. Faglærere på NTNU Ålesund har god kunnskap i Revit og Office 365, så dette er opplagte valg. FEM-Design får vi veiledning og oppfølging i fra Multiconsult, som bruker dette på daglig basis. Calculatis ble anbefalt fra kontaktperson i Woodcon, som er spesialister på CLT. Dermed får vi god rådgivning og kvalitetssikring om nødvendig. Tabell 3.1-1 viser oversikten av valgte dataprogram med en kort beskrivelse av brukerområdet.

Dimensjonerings- og analyseprogrammet vi skal bruke er FEM-Design. Dette er et komplekst tredimensjonalt analyseprogram som man kan bruke for beregninger og analyser på hele konstruksjonen samtidig. Programmet kan analysere alle typer laster i tillegg til automatisk generering av vind og snølaster. Dette fører til mer nøyaktige analyser og evnen til å forstå de statiske oppsettene blir avgjørende. Samtidig vil vi benytte Calculatis til kontroll for enkelt element, som gir oss et nøyaktig resultat uavhengig av nærliggende dekker.

Dimensjoneringen av CLT-elementene ble her utført på de mest belastede veggene og dekkene. Lastberegning av Ove Sletten brukes til å kontrollere verdiene for snølast og vindlast, som settes inn i FEM-Design for videre dimensjonering- og analyse av modellen. BTSNITT av Ove Sletten brukes til å kontrollere det overførte grunntrykket oppimot bæreevnen i fundamentet.

Som modelleringsverktøy har vi valgt Revit Structure. Vi har en god forståelse av Revit fra før av og vil derfor bruke kompetansen vår til å bygge opp en avansert strukturmodell. Med den kan vi beregne mengden av materialer og lage arbeidstegninger. Modellen skal også brukes til mal for videre beregninger og analyser i FEM-Design.

Samarbeids- og styringsverktøy som Dropbox og Office 365 vil brukes kontinuerlig gjennom hele oppgaven. Dropbox er skybasert lagring og gjør det mulig å lagre og dele filer enkelt. Programmene i Office 365, som Excel, Word og PowerPoint, blir brukt som verktøy til fremdriftsplan, skriving, fremføring og fildeling.

DATAPROGRAM	PRODUSENT	BESKRIVELSE
FEM-Design	StruSoft	Tredimensjonalt dimensjonerings- og analyseprogram
Revit Structure	Autodesk	Modelleringsprogram
Lastberegning	Ove Sletten	Beregningsprogram for snølast og vindlast
BTSNITT	Ove Sletten	Beregningsprogram for søyle- og veggfundament
Office 365	Microsoft	Skrive- og styringsverktøy
Calculatis	Stora Enso	Beregningsprogram for CLT

Tabell 3.1-1: Oversikt over valgte program

3.2 Lastberegning

3.2.1 Nyttelast

Nyttelast ble hentet ut ifra NS-EN 1991-1-1, som vist i tabell 2.6-3. Denne standarden gir oss karakteristisk nyttelast på gulv og balkong i bygningskategori A, som er arealer for inneaktiviteter og hjemmeaktiviteter.

3.2.2 Egenlast og påført egenlast

Egenlasten av CLT-dekker er beregnet ut ifra tyngdetettheten som er 500 kg/m^3 og tilsvarer 5 kN/m^3 . For å få enheten fra per kubikkmeter til per kvadratmeter, multipliserte vi tyngdetettheten med tykkelsen av dekket. Da kom vi frem til $1,3 \text{ kN/m}^2$ for dekkene. Påført egenlast på dekkene er permanent. Her regner vi med en 5 cm påstøp, som tilsvarer $1,25 \text{ kN/m}^2$ og er utregnet med samme metode som egenlasten. I tillegg samler vi himling, membran, lettvegger, isolasjon og fyllmasse under en felles påført egenlast $0,5 \text{ kN/m}^2$. Dette gir oss en samlet påført egenlast på $1,75 \text{ kN/m}^2$.

Egenlasten av CLT-veggene ble også beregnet på samme metode, men her som stripelast. Dette ble utført ved å multiplisere tyngdetettheten med høyden og tykkelsen av veggen. Da fikk vi enheten per meter.

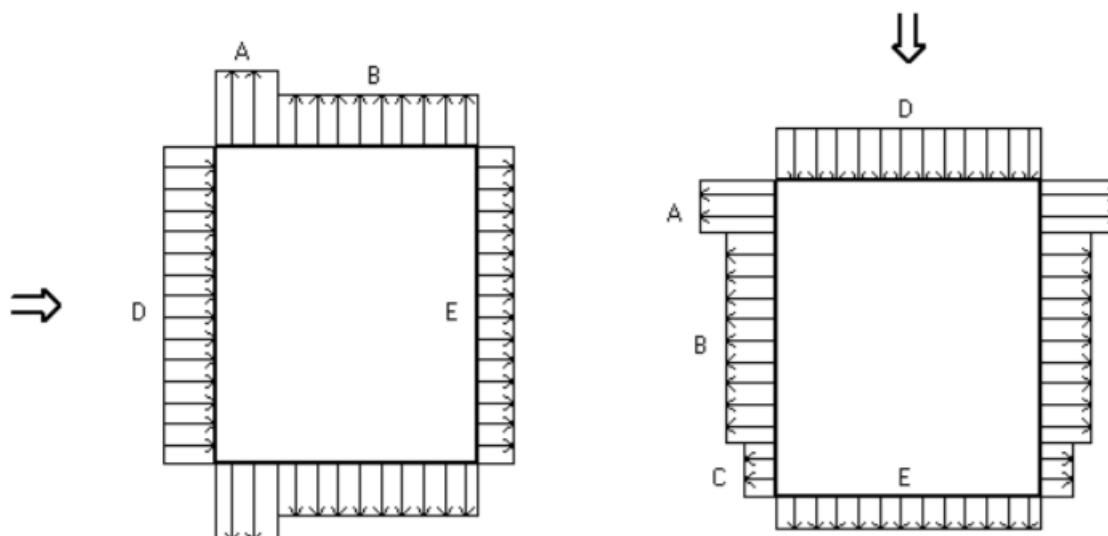
3.2.3 Vindlast

Vindlast ble dimensjonert for 30 m på langsiden og 25 m på kortsiden. Beregninger blir gjennomført etter standard NS-EN 1991-1-4 om vindlaster. Vedlegg 20 viser håndberegninger tatt for vindlast. Dimensjonerende vindlastbelastning er 2,64 kN/m² på langsiden og 2,61 kN/m² på kortsiden. I FEM-Design vil vi ha lasten som linjelast (kN/m) og må da multiplisere vindbelastningen med belastningshøyden som virker inn på en etasje. Videre multipliserer vi lasten med 2/3 for å benytte resultatene av vindkreftene.

	Hastighetstrykk, Q_p (kN/m ²)	Formfaktor sone D, $C_{pe,10}$	Formfaktor sone E, $C_{pe,10}$	Vindlast sone D, (kN/m ²)	Vindlast sone E, (kN/m ²)	Total Vindlast (kN/m²)
Langside (30m)	1,97	0,80	-0,54	1,58	-1,06 (Sug)	2,64
Kortside (25m)	1,97	0,80	-0,53	1,58	-1,03 (Sug)	2,61

Tabell 3.2-1: Vindlaster på kortside og langside av bygget

Tabell 3.2-1 viser vindlaster som virker inn på byggets geografiske område. Vedlegg 11 viser full utregning for vindlast i programmet Lastberegning av Ove Sletten. Figur 3.2-1 viser de ulike vindsonene til bygget. Vi beregner ikke sone A, B eller C, fordi disse vil utligne hverandre og summen av krefter blir null. Sone D er vindlast på bygget, mens sone E er suget. Disse er av betydning og når disse summeres vil man få total vindlast.



Figur 3.2-1: Soneinndeling av vindlast på bygget i 0 grader og 90 grader

3.2.4 Snølast

Snølast beregnes ut fra den norske standarden for snølast NS-EN 1991-1-3. Vedlegg 12 viser den dimensjonerende snølasten på 2,4 kN/m² ut ifra programmet Lastberegning av Ove Sletten. Formfaktor for snølast på tak er hentet fra tabell 2.6-6. Den dimensjonerende snølasten regnes frem ved å multiplisere karakteristisk snølast og formfaktor. Tabell 3.2-2 viser resultatet av snølasten som brukes i beregningene.

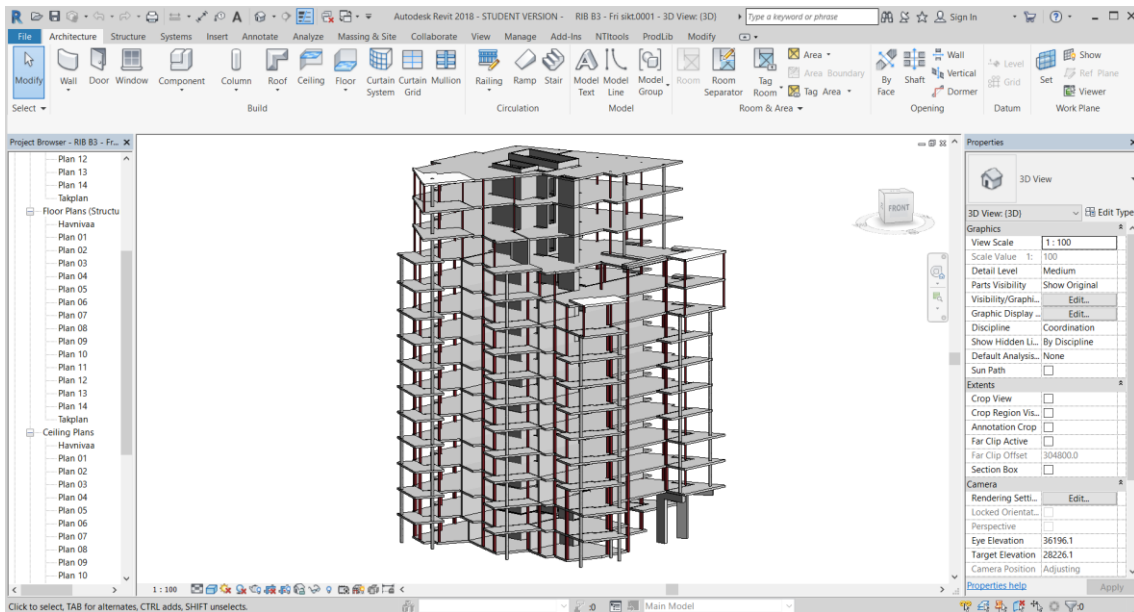
Karakteristisk snølast, S_{k0}	Formfaktor, μ_1	Dimensjonerende snølast, q_1
3,0	0,8	2,4

Tabell 3.2-2: Resultater av snølast

3.3 Programvare

3.3.1 Oppbygging av Revit strukturmodell

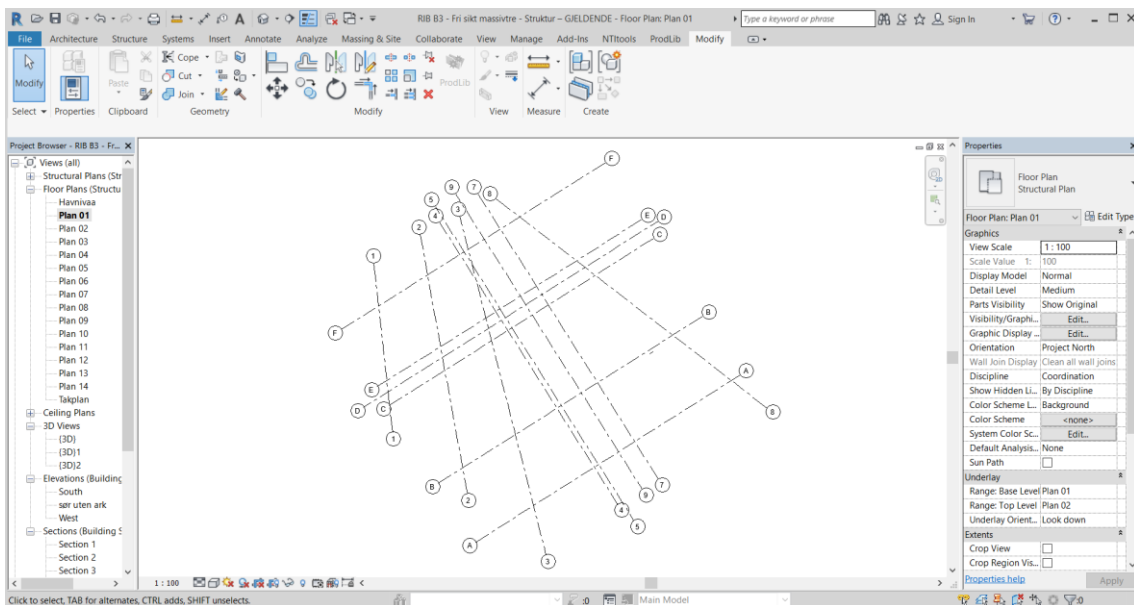
Vår løsning av høyblokken med bæresystem av CLT-elementer, kombinert med stålsøyler og stålbjelker, er en alternativ løsning til Multiconsults bæresystem av plassenbetong og stålsøyler. Når vi startet med modelleringen av strukturen tok vi utgangspunkt i deres forprosjektmodell, for så å endre og tilpasse den til vårt bæresystem. Dette gjorde vi for å unngå store avvik iht. sentrale momenter i forprosjektmodellen, som f. eks. etasjehøyder og totalhøyden på bygget. Vi hadde også tilgang til arkitekttegningen. Den brukte vi aktivt for å forsikre oss om at vår løsning ikke ga store unødige ulemper i forhold til praktisk bruk av bygget, f. eks. plassering av søyler kan påvirke hvor ulike vegger skal plasseres. Ettersom bæresystemet i CLT ikke hadde de samme egenskapene som den originale løsningens bæresystem, måtte vi finne noen nye løsninger enkelte steder i bygget, samt noen avgrensninger for vår egen skyld med tanke på tidsperspektivet i oppgaven. Figuren 3.3-1 viser Multiconsults løsning fra forprosjektet.



Figur 3.3-1: Forprosjekt Multiconsult

Grids

Vi brukte delvis forprosjektets *grid*-system som gjør at vi kan arbeide ut ifra ønsket strukturløsning, se figur 3.3-2. *Grids* er et nettsystem, som blir utformet med hensyn på byggets utforming, og blir aktivt brukt i prosjektet som permanente hjelpelinjer. Dette gjør det enkelt å henvise til de ulike delene i modellen.



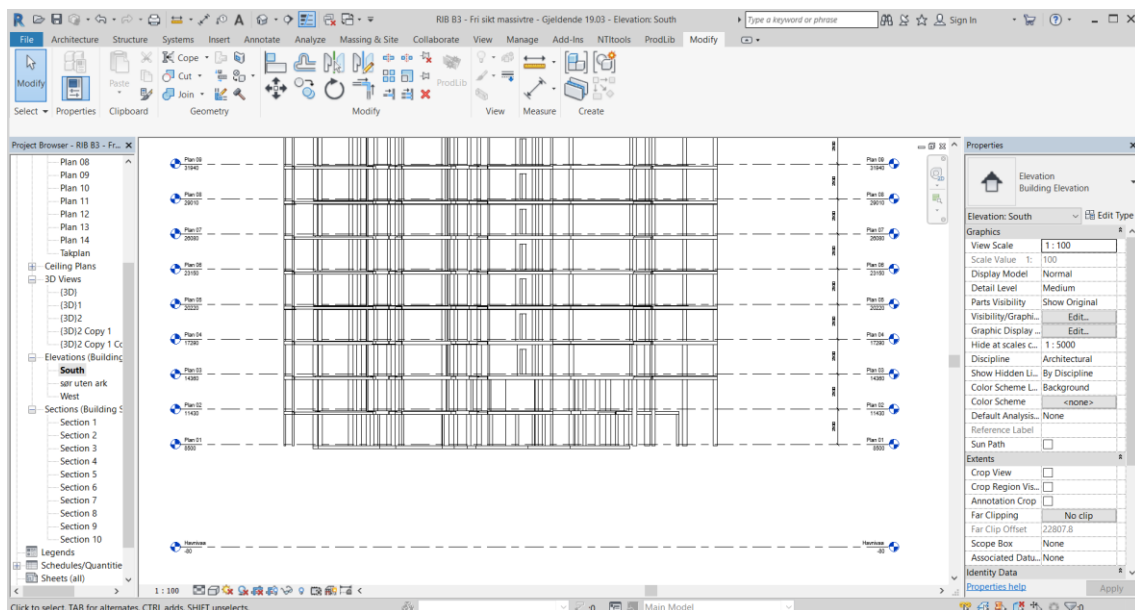
Figur 3.3-2: Oppbygging av grid-system i Revit Structure

Levels

Disse nivålinjene blir brukt for å få oversikt over de ulike plannivåene, se figur 3.3-3.

Alle elementer som vi tegner i modellen, blir plassert i forhold til disse definerte nivålinjene.

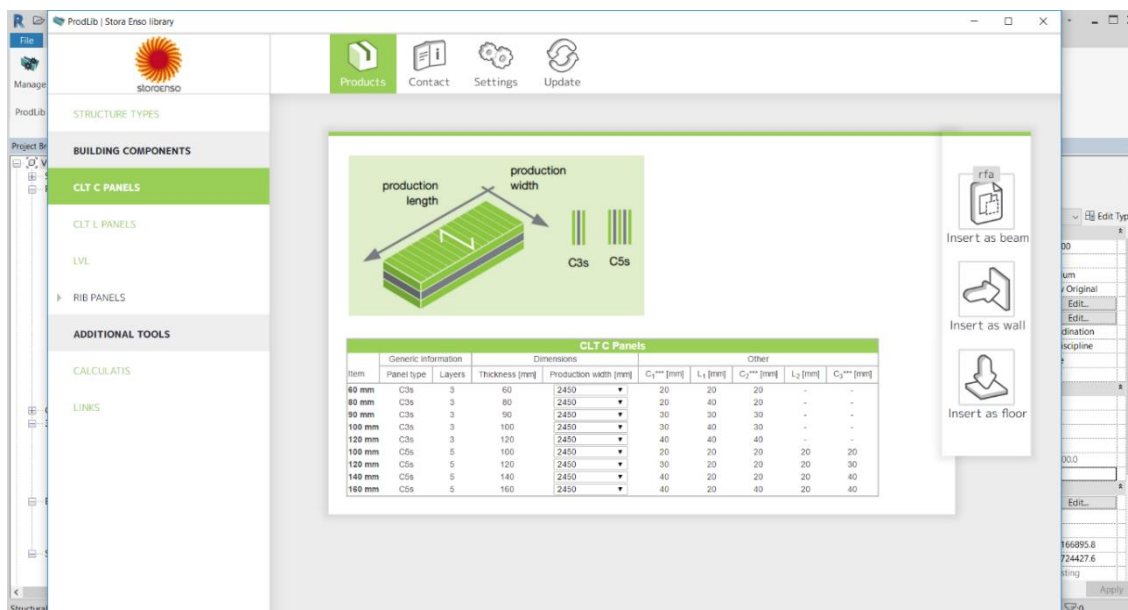
Elementene justeres med en funksjon kalt *offset* som bestemmer nøyaktig avstand fra *levels* til elementet. Gjennom arbeidet for å bygge opp en modell brukte vi *levels* som Multiconsult hadde definert i forprosjektet. Dette for å kunne forholde oss til etasjehøyder, samtidig som vi benyttet de for å unngå overskridelse av den totale høyden på bygget.



Figur 3.3-3: Oppbygging av levels i Revit Structure

Vegger og dekker

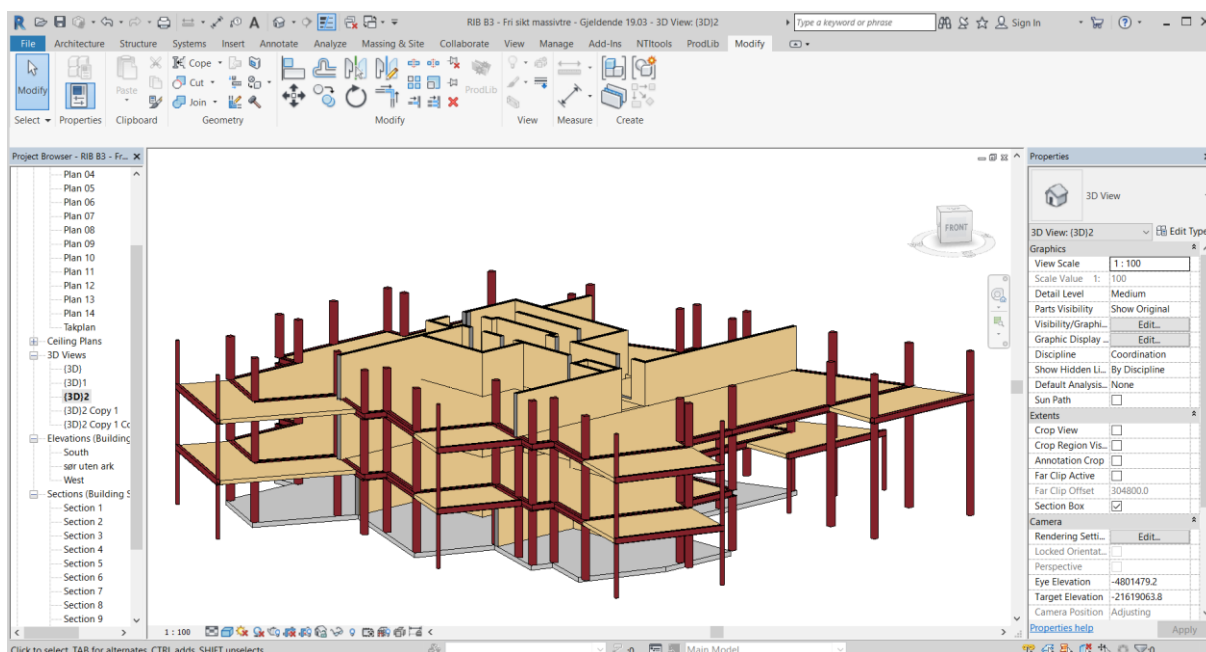
Stora Enso leverer på sine nettsider en såkalt BIM Toolbox for deres CLT-elementer, kalt ProdLib. Dette er et digitalt bibliotek som man laster direkte inn i Revit, se figur 3.3-4. Her fikk vi full tilgang til 3D-objekter ut ifra Stora Enso sine standarder for både vegg- og dekkelementer. Disse elementene ble sentrale i oppbyggingen av strukturmodellen.



Figur 3.3-4: Digitalt bibliotek i ProdLib for CLT-elementer

Søyler og bjelker

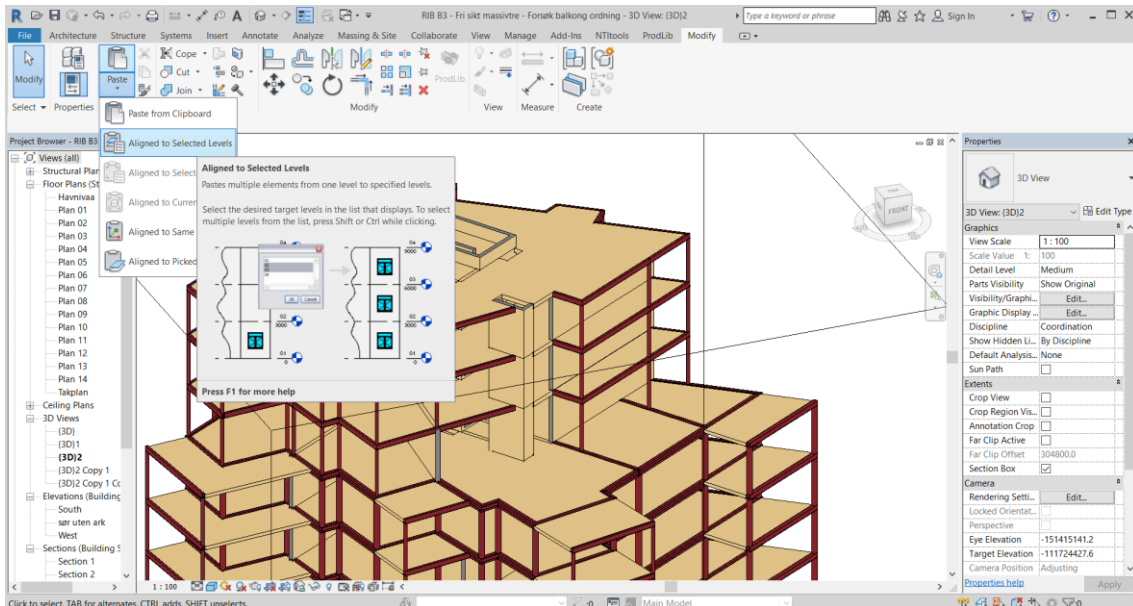
I denne fasen vises en av de største forskjellene i den nye modellen i forhold til Multiconsults forprosjektmodell. Bæresystemet i CLT-elementer krever kontinuerlige bjelker og søyler i ytterkant av byggets utforming. Disse ble plassert i strukturmodellen som vist i figur 3.3-5.



Figur 3.3-5: Oppbygging strukturmodell

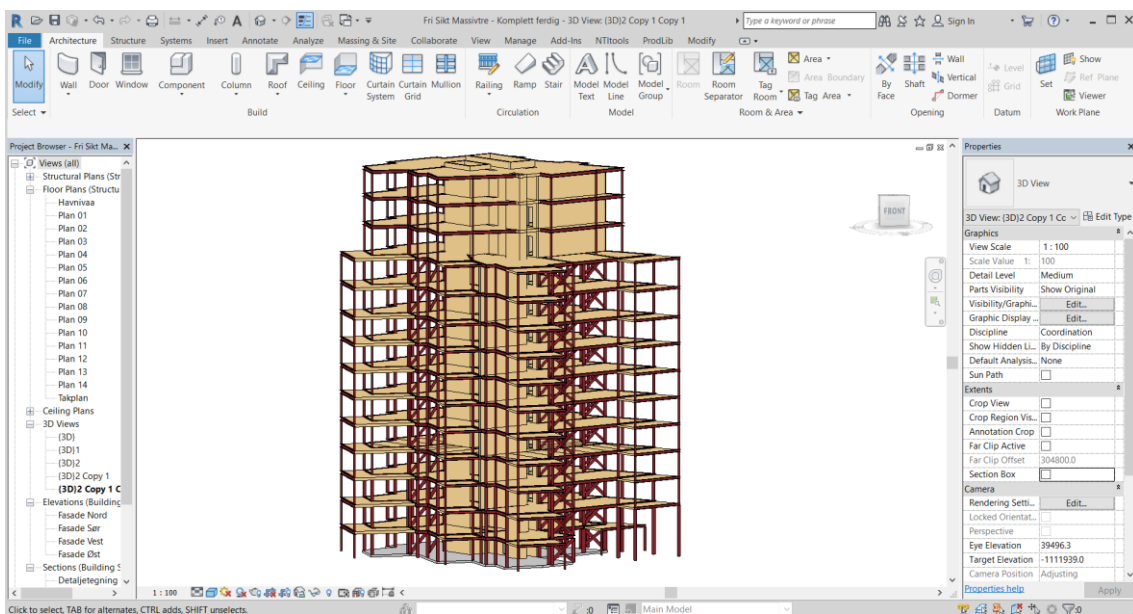
Paste-funksjon

Ettersom mange av etasjene var relativt like brukte vi en effektiv funksjon som reduserte arbeidstiden vår i Revit betraktelig. *Paste*-funksjonen gjør at vi kan markere ønskelige objekter eller hele etasjer, og kopiere dem oppover i bygget til valgte etasjer. Funksjonen vises i figur 3.3-6.



Figur 3.3-6: Bruk av *paste*-funksjon til oppbygging

Komplett strukturmodell

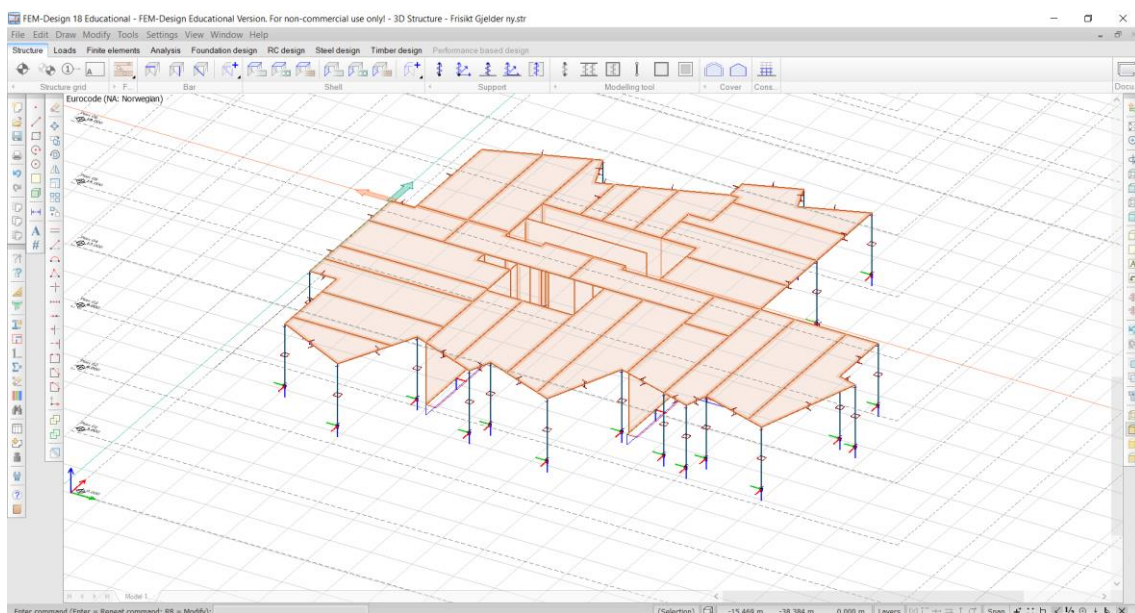


Figur 3.3-7: Komplett Revit strukturmodell

3.3.2 Oppbygging av FEM-Design modell

Modellen vi har bygd opp er basert på Revit-modellen og alle mål er hentet derfra. Vi startet med å definere de ytre rammene av bygget, men siden bygget er svært usymmetrisk velger vi 40 x 40 m, som er en større ytre ramme enn nødvendig. Deretter definerte vi etasjehøyden til 3 m, som er en forenkling i forhold til Revit-modellen som er mer nøyaktig.

Søylene er av typen HUP og bjelkene består av typen HEA. Veggene er bygd opp med CLT veggelementer med tykkelse 300 mm og høyde på 3000 mm. Dekkene er bygd opp av CLT plateelementer med tykkelse 300 mm og her vil symmetrien i bygget gjøre at dekkene ofte blir ulike, både i forhold til spennvidde og bredde. Brukte materialverdier, for bl.a. styrke og stivhet for CLT-elementer, ble hentet fra vedlegg 8. Vi startet med å bygge opp 1. etasje, som vist i figur 3.3-8. For nøyaktig plassering av vegger og søyler brukte vi koordinater fra Revit-modellen.

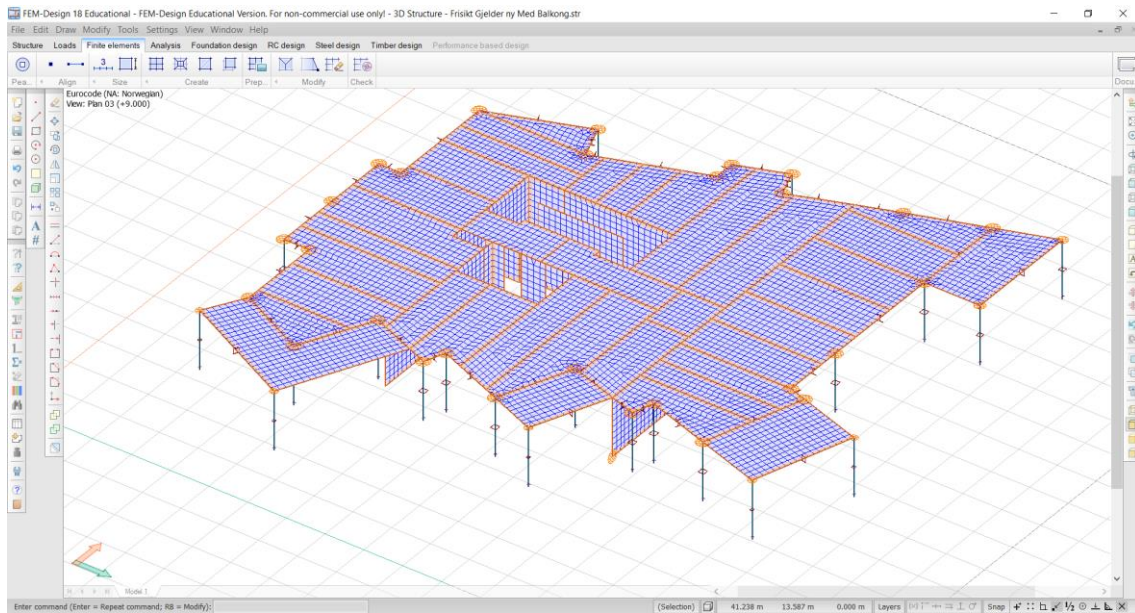


Figur 3.3-8: FEM-Design modell av 1. etasje med levels og påførte krefter i fundament

Mesh-kontroll

For å kontrollere modellen gjør vi enkle beregninger. Vi gjennomførte en kontroll for hver etasje vi bygde opp slik at feil ble oppdaget tidlig. Denne kontrollen ble bare gjort med hensyn på egenvekt, stabilitet og likevekt av krefter i x-, y- og z-retning. Det stilles krav til den geometriske formen på elementene. Ved å trykke på knappen *check*, sjekket vi elementene ut fra de kriteriene som er satt i programmet. Programmet gir beskjed dersom det finnes geometriske feil i bygget. En geometrisk feil i FEM-Design vil ofte være linjer som ikke treffer på hverandre, eller andre åpenbare feil som har blitt gjort ved feiltagelser gjennom

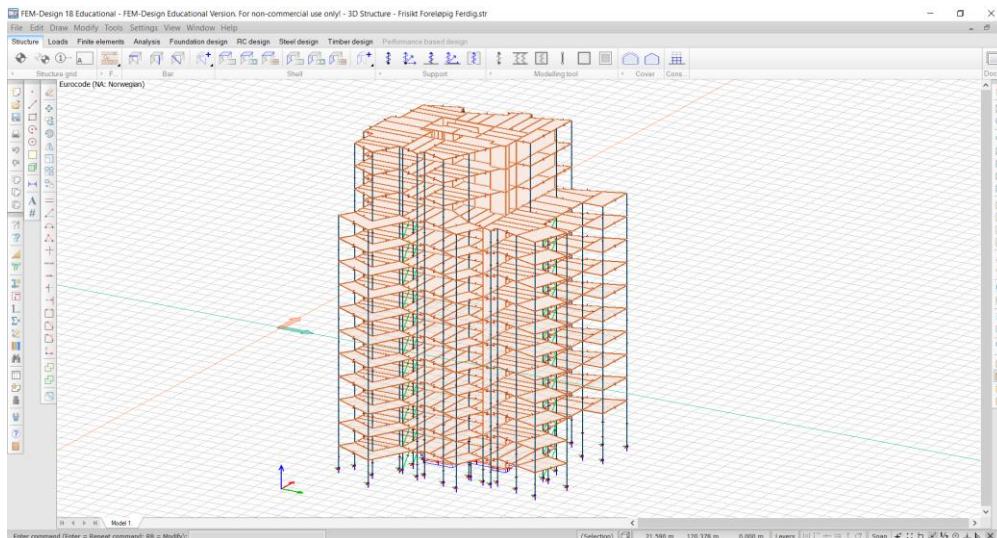
oppbyggingen av modellen. I et så stort og komplisert bygg er det viktig med hyppige kontroller av den geometriske formen. Dersom vi gjennomfører en kontroll, og FEM-Design finner en geometrisk feil, så vil dette vises med både feilmelding og forandring i det blå rutenettet. Forandringen til rutenettet, som forekommer ved at rutene blir delt i mindre ruter, gjør det enklere å identifisere hvor den geometriske feilen ligger. Figur 3.3-9 viser resultatet av en *check* for 3. etasje.



Figur 3.3-9: Generert elementnett for 3. etasje

Komplett FEM-Design modell

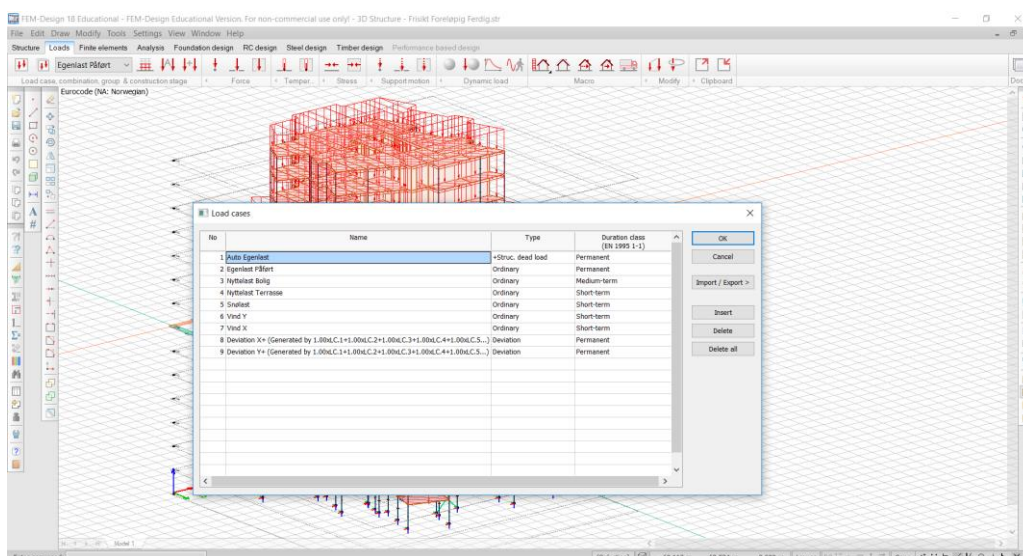
I likhet med oppbyggingen av Revit-modellen brukte vi en kopieringsfunksjon som gjorde det mulig å kopiere etasjer oppover i bygget. Denne funksjonen brukte vi på alle etasjer i bygget, for å deretter gjøre endringer for å tilpasse de enkelte etasjene til sine reelle utforminger. Denne funksjonen, kombinert med *mesh*-kontrollen, gjorde at vi raskt kunne bygge opp en ferdig modell i FEM-design.



Figur 3.3-10: Komplet FEM-Design modell

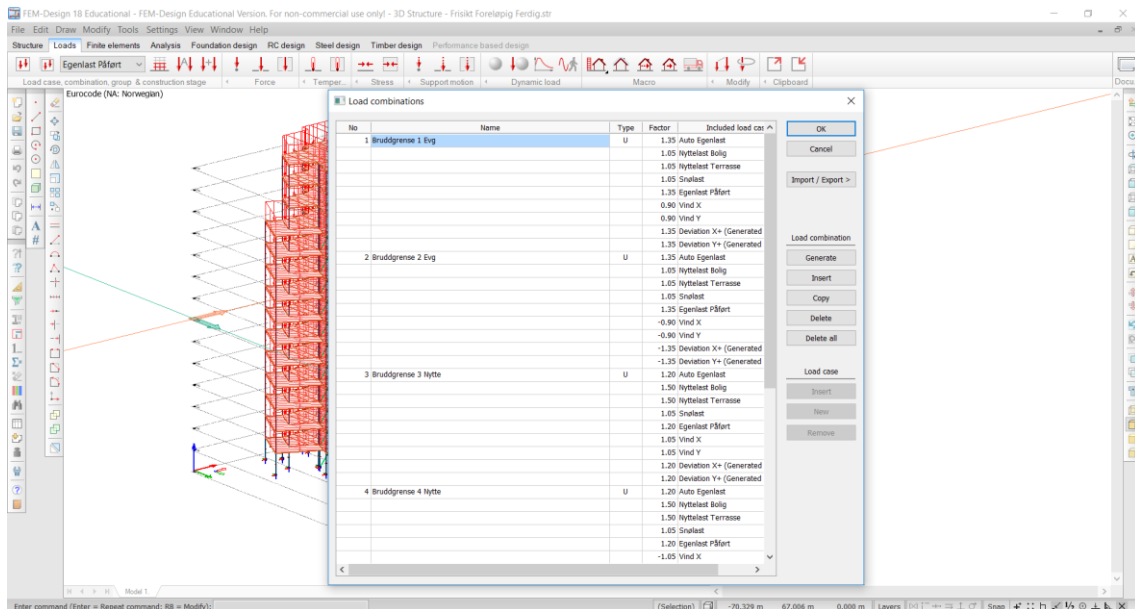
Laster

Under kategorien *load cases* legger vi til hver enkel last. F.eks. er «Egenlast» ført inn i *load cases* og denne genereres automatisk. Andre laster som f.eks. «Snølast» velger vi å føre på selv, dette pga. at lastarealet noen steder får terrasselast. Dette gjør at man har bedre kontroll på lastene. Påført egenlast definerer vi selv for å ta høyde for bl.a. påstøp på dekket. Nyttelastene som settes på modellen er hentet fra tabell 2.6-3 om karakteristiske nyttelaster på golv. Vindlasten er satt på i to retninger, langsiden og kortsiden. *Deviation* beregner skjevstillinger i programmet og dette legges automatisk på modellen. Figur 3.3-11 viser de ulike lasttilfellene.



Figur 3.3-11: Input for load cases

Lastene grupperte vi inn under kategorien *load groups*, en gruppe for hver *load case*. Dette gjør at når vi kjører analysen, med ønskede *load combinations*, blir lastkombinasjonene automatisk generert. Alle lastgrupper og lastkombinasjoner som er brukt vises i vedlegg 9. Figur 3.3-12 viser noen av lastkombinasjonene vi har generert.



Figur 3.3-12: Input for load combinations

Analyse

Analysen kalkulerer *load cases* og *load combinations*. For *load cases* får vi beregnet statikken for alle de karakteristiske lastene som er ført inn. For *load combinations* beregner programmet de ulike lastkombinasjonene som virker inn på modellen. Analysen benyttes til å finne bl.a. tverrsnittskapasitet, nedbøyning og aksialkrefter.

3.3.3 Snølast og vindlast i Lastberegning

Under viser vi metoden for beregningen av snølast og vindlast i programmet Lastberegning av Ove Sletten. Resultatet får vi ut ifra lastberegningen iht. NS-EN 1991-1-3 og NA, Snølast og NS-EN 1991-1-4 og NA, Vindlast. Dette blir brukt videre i FEM-Design for å generere vind- og snølast.

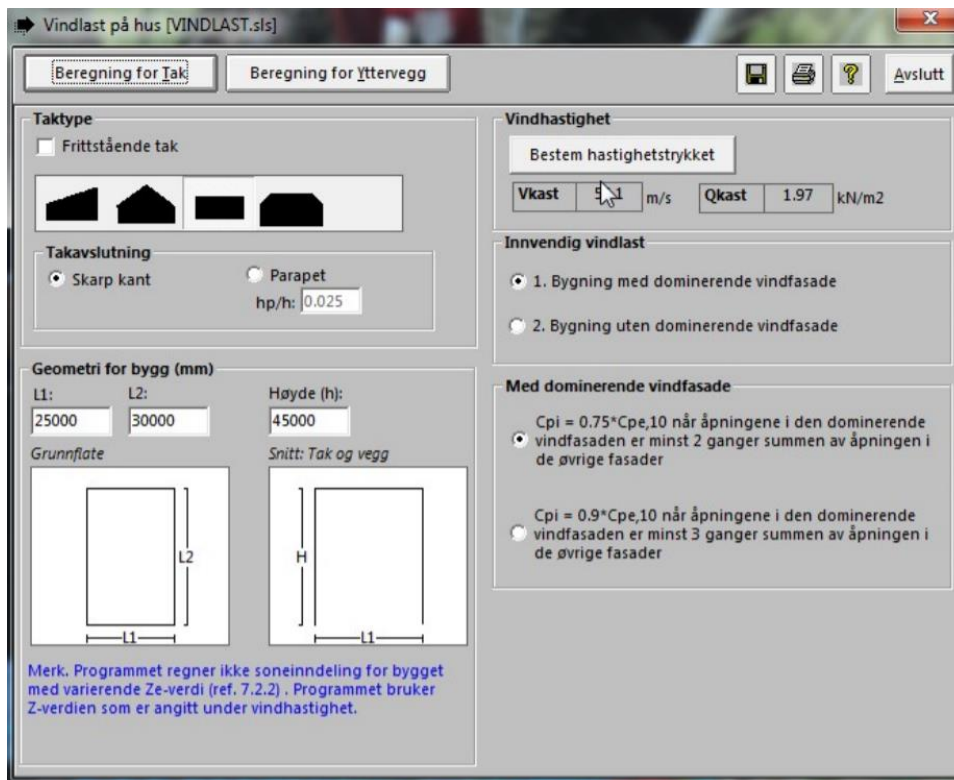
Snølast

Beregning for snølast for tak er lite krevende i programmet. Vi oppgir plassering av bygget i form av fylke, kommune og sted. Da henter programmet den karakteristiske snølasten S_k gitt for den enkelte kommune iht. NA.4.1. F.eks. i Ålesund er denne satt til $3,0 \text{ kN/m}^2$. Taktypen vi legger inn i programmet vil bestemme formfaktoren. Geometrien kan bestemmes ved å velge en bredde og høyde, der bredden er lengden av ett enkelt element, mens høyden er fallet på taket. Dette vises i figur 3.3-13. Karakteristisk snølast kan korrigeres for byggestedets høyde. Etter at all nødvendig informasjon er fylt ut tar man beregningen og får snølasten på taket.

Figur 3.3-13: Input data for snølast

Vindlast

Programmet brukes til beregning av vindlast, men metoden er mer omfattende og krevende enn beregning for snølast. Figur 3.3-14 viser input for taktype, takhøyde og geometrien for bygningens grunnflate og høyde for vegger. Selv om byggets grunnflate er usymmetrisk velger vi rektangulær grunnflate på $30 \times 25 \text{ m}$ og høyden til 45 m . Bygningen har en dominerende vindfasade, som vil si at innvendig vindtrykk beregnes som funksjon av utvendig vindtrykk.



Figur 3.3-14: Input data for vindlast

Ved bestemmelse av hastighetstrykket finner vi først referansevinden ut ifra valg av fylke og kommune. Ålesund har referansevind $V_{b,0}$ på 26 m/s. Deretter må det bestemmes en rekke faktorer for beregning av basisvindhastighet V_b . Teori 2.6.7 om vindlast og vedlegg 11 s. 5 forklarer de ulike faktorene som er brukt for beregning av vindlast. I programmet velger vi høyde over havet for byggestedet for å beregne nivåfaktoren C_{alt} . Returperiode settes på 50 år og vi får da en faktor C_{prob} som bestemmer årlig sannsynlighet for overskridelse. Årstidsfaktoren C_{season} settes til 1,0. Dette er tilfelle for alle varige bygningskonstruksjoner i Norge. Dimensjonerende vindretning C_{dir} settes til 1,0. Denne kan antas mindre for en vindretning som ikke gir maksimale vindstyrker. Videre valgte vi terrengruhetskategori I som gjelder kystnær, opprørt sjø og har åpne vidder og strandsoner uten trær eller busker. Terrengformfaktor $C_{0(z)}$ og turbulensfaktor K_1 settes begge til 1,0. Dette vil si ingen topografisk påvirkning, som f.eks. luftstrømninger over fjell og åser som fører til økt hastighet pga. turbulensvirkninger og trykkendringer. Etter at all input data er registrert, som vist i figur 3.3-15, beregner programmet vindhastigheten.

Vindhastighet og vindkasthastighet (Qkast)

Norge Sverige

Fylke: Møre og Romsdal | Kommune: Ålesund | Referansevind Vb,0: 29 m/s

Faktorer for beregning av basisvindhastighet, Vb

Høyde over havet: 2 m → C-alt: 1
 Returperiode (år): 50 | C-prob: 1
 Årstidsfaktoren: C-season: 1 Hele året

Region (dimensjonerende vindretning)

Møre og Romsdal, ytre | C-dir: 1

N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV
0.8	0.8	0.6	0.6	0.9	1	0.8	0.8

Terrengkategorier og tilhørende parametre

Kategori: 0 I II III IV
 Kystnær, opprørt sjø. Åpne vidder og strandområder uten trær eller busker.

Overgangssone (Nabosone A)

Terrengformfaktor Co(z) og turbulensfaktor KI

Ingen topografisk påvirkning. Co(z)=1 og KI=1

Skjema for beregning av Co(z) -->

Terrengformfaktor Co(z)	1
Turbulensfaktor KI	1

Beregnet vindhastighet

Vkast	56,1	m/s
Qkast	1,97	kN/m ²

Figur 3.3-15: Input data for beregning av vindhastighet

3.3.4 Fundamentbelastning i BTSNITT

Under viser vi eksempelvis metoden for beregning av fundamentbelastning i BTSNITT. Som forklart i teori 2.7.4 har programmet andre funksjoner, men vi skal ta utgangspunkt i søylefundament og veggbankett. Grunnundersøkelser rettet mot det aktuelle prosjektet viser at det er mellom 0,6 til 8,4 m dypt til berg ved undersøkte posisjoner. Løsmassene i området består av sand og grus, med innslag av stein og finere masser som silt og leire.

Ved beregning for søylefundament må man først velge lastfaktorer for permanent og variabel last. Siden vi velger å bruke FEM-Design for å finne aksialkraften som blir overført til grunnen fra den mest belastede søylen, setter vi lastfaktorer til 1,0 og velger å sette lastverdiene som permanent last. Dette pga. at FEM-Design allerede har beregnet konstruksjonen med gjeldende lastfaktorer i bruddgrensetilstand. Deretter setter vi inn 4004 kN som er den utregnede aksialkraften fra FEM-Design. Momentet som er påsatt regner vi som 2 prosent av aksialkraften etter anbefalinger fra veileder i Multiconsult.

Før man beregner må man definere en rekke materialdata. Det viktigste som vi velger her er bl.a. materialfaktorer, betongkvalitet B35, relativ fuktighet og eksponeringsklasse XC2, som vil si at betongen er i kontakt med vann i lengre tid. Samtidig er overdekningen essensiell og vi får minimum nominell overdekning på 35 mm etter at toleransen er satt til 10 mm.

Materialdata for jord må også defineres og her velger vi at bæreevnen skal angis.

Fundamentdybde under marknivå settes til 70 cm og netto bæreevne i bruddgrense angis til 500 kN/m^2 , dette ble gjort etter anbefalinger fra veileder i Multiconsult. Grunnvannsnivå settes på underkant av fundament. Figur 3.3.16 viser input data for fundamentbelastninger.

Fundamentbelastning

Lastfaktorer

	Riss-kontroll	Bruddgrense B1	Bruddgrense B2	Grunnbrudd
Permanent (g)	1	1	1	1
Variabel (p)	0.3	1	1	1

Skriv inn egne lastfaktorer

Antall lasttilfeller: 1

Lasttilfelle nr: 1

Momenter, horisontalkrefter og aksialkrefter i bruksgrense

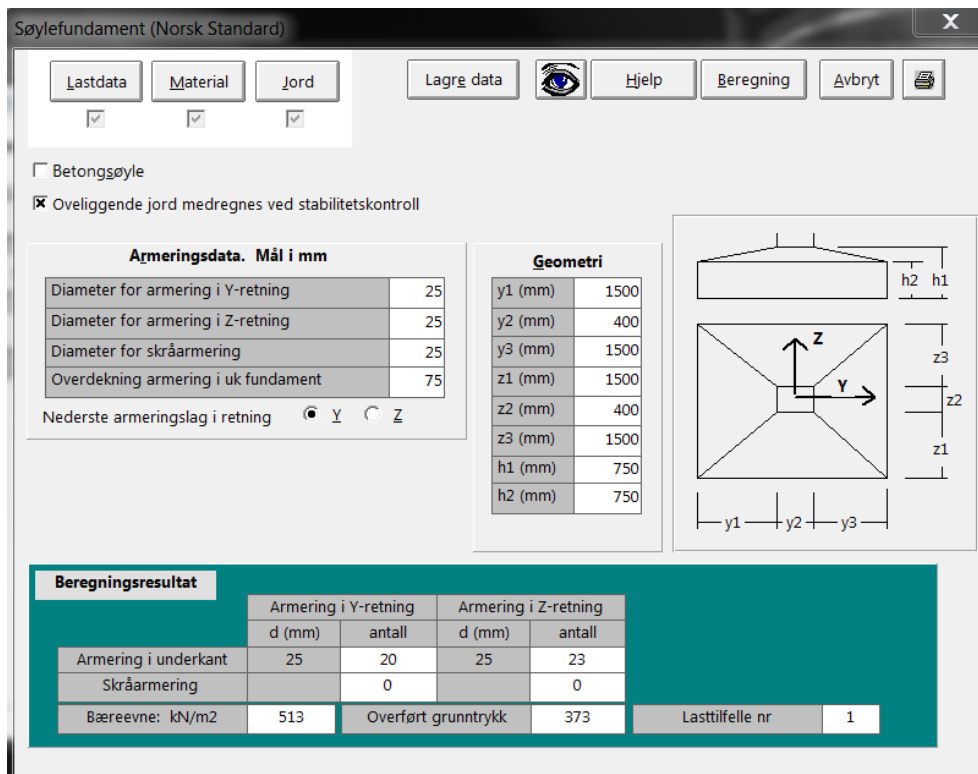
Lasten påføres i overkant av fundament

Permanent (G)		Variabel (P)	
Mg_Y (kNm)	80	Mp_Y (kNm)	0
Mg_Z (kNm)	80	Mp_Z (kNm)	0
Vg_y (kN)	0	Vp_y (kN)	0
Vg_z (kN)	0	Vp_z (kN)	0
Ng (kN)	-4004	Np (kN)	-0.00001

Pos. moment- og kraftvektorer i Y og Z-retning. Mg_Y og Mp_Y dreier om Y-aksen

Figur 3.3-16: Input data for fundamentbelastninger

Etter at lastdata, materialdata og jord er definert vil man angi armeringsdata. Vi velger $\phi 25$ i begge retninger og $\phi 25$ skråarmering. Overdekning til armering i underkant av fundamentet blir automatisk generert etter valg av materialdata. Tilslutt må geometrien bestemmes. Figur 3.3-17 viser oppbyggingen og valgte verdier for fundamentet. Beregningsresultatet vil vise tillat bæreevne i grunnen, kontra overført grunntrykk fra fundamentet. Her vil det også komme frem antall og type armering. Her ser vi bl.a. at det ikke er nødvendig med skråarmering, men bare armering i underkant.



Figur 3.3-17: Beregningsdata for søylefundament

Denne metoden brukes også for veggbankett, men da med en annen oppgitt aksialkraft. Linjelasten som går gjennom veggen og ned i grunnen er ujevnt fordelt. Aksiallasten vi da har brukt er noe mindre enn det mest belastede området ned i grunnen. På denne måten unngår vi å overdimensjonere grunnen.

3.3.5 Dimensjonering i Calculatis

Under viser vi eksempelvis metoden for dimensjonering av vegger og dekker i Calculatis. Som forklart i teori 2.7.6 har programmet andre funksjoner slik som dimensjonering av bjelker, forbindelser mellom dekker, fundamentforankring og nedbøyning over vinduer, men vi skal ta utgangspunkt i vegger og dekker for å vise hvordan programmet kan brukes.

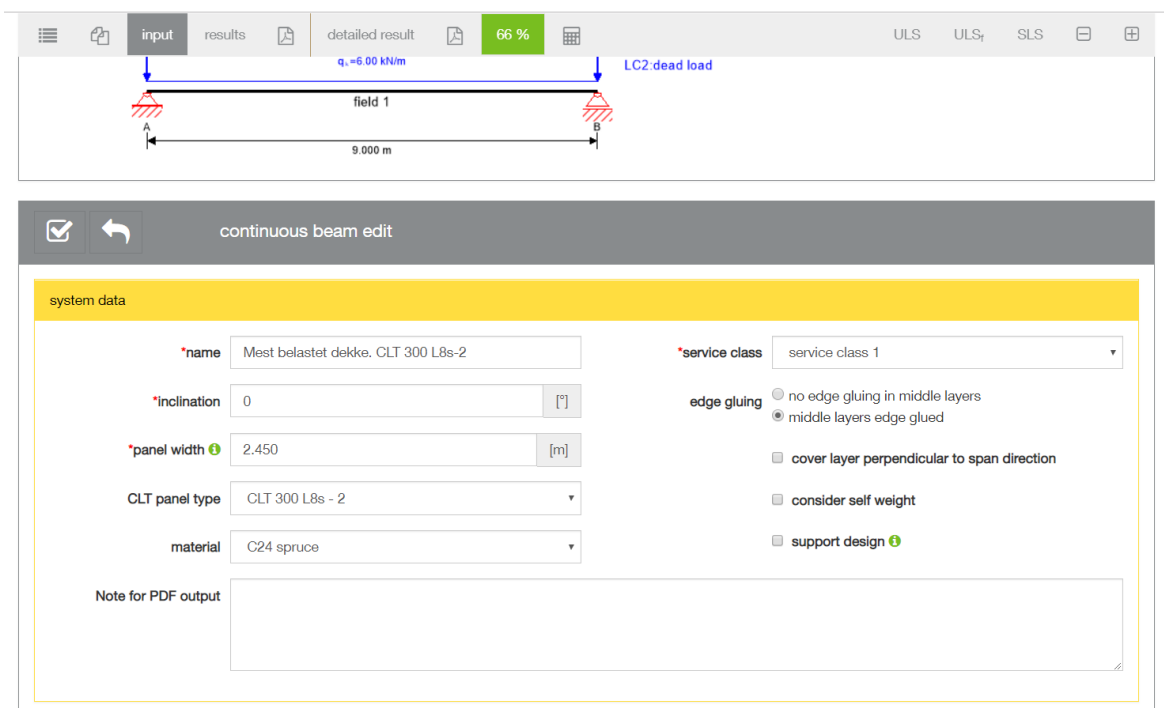
Dimensjonerende laster

All dimensjonering av både vegger og dekker i Calculatis ble gjort i forbindelse med håndberegninger. Dette ble gjort på grunnlag av at programmet er tilpasset de eksakte dekkene i vår løsning. Vi ble informert av vår kontaktperson i Woodcon om at momentkapasiteten til CLT-elementer er altfor komplisert å regne for hånd, og at det anbefales å benytte Calculatis. Måten vi dimensjonerte CLT-elementer på i Calculatis, var at

vi først regnet ut dimensjonerende laster ved håndberegning. Deretter la vi inn de aktuelle lastene i programmet for å beregne resultatene.

Dekker

Når man i Calculatis velger å dimensjonere CLT-element, så vil man automatisk få opp et felt der man kan definere detaljene til dekket. Her må vi selv gå inn på de ulike detaljene og gjøre endringer for å tilpasse dekket i Calculatis til det reelle dekket. Eksempel på disse er paneltype, material, bredde på dekket og aktuell klimaklasse. Her vil man også få muligheten til å dimensjonere dekket for vibrasjon og brannscenarier. Av avgrensingsgrunner valgte vi å se bort fra disse. Figur 3.3-18 viser *input*-feltet i Calculatis.



Figur 3.3-18: Figur av input data i Calculatis

Neste punkt er å tilpasse det statiske systemet til dekket. Her definerer vi dekkets opplegg, der man velger mellom fastlager, glidelager eller fast innspent. Videre legger vi inn ferdig utregnede laster som virker på dekket. Under det statiske systemet velger vi *create load cases group*. Derfra kan vi velge hvilken type last som skal virke på dekket, bl.a. egenlast, nyttelast, snølast. Calculatis gir muligheten til å regne ut egenvekten av CLT-elementet automatisk, men resten av lastene legger vi inn manuelt. For takplan regnet vi ikke med nyttelast, men erstattet den med snølast. Lastene vi legger inn i Calculatis er definert med enheten kN/m. Dette betyr at lasten som vi regner ut må multipliseres med bredden på belastningsarealet for at enhetene skal stemme overens.

Vegger

Fremgangsmåten for dimensjonering av veggelementer i Calculatis er tilnærmet lik dimensjoneringen for dekker. Forskjellen blir hvordan vi regner oss frem til de påførte lastene i håndberegningen. Her tar vi hensyn til etasjereduksjonsfaktoren, som er forklart i teori 2.6.3.

Tolking av resultat

Elementene som vi dimensjonerte i Calculatis var de mest belastede elementene. Dette for å forsikre oss om at mindre belastede elementer ikke er underdimensjonerte. Resultatene for beregningen i Calculatis finner vi ved å trykke på *detailed result* i programmet. *Detailed result* gir en oversikt av bl.a. utnyttelsesgrad, moment- og spenningsdiagram, nedbøyning.

Når vi valgte hvilken standard det skulle dimensjoneres for i Calculatis så valgte vi tysk standard, ettersom Calculatis ikke har Norsk Standard. Grunnen til at vi valgte tysk standard er at den er veldig lik norsk standard. Den eneste forskjellen er at Calculatis benytter $\gamma_G = 1,35$ og $\gamma_{Q1} = 1,50$ i samme lastkombinasjon. Dette er en mer ugunstig lastkombinasjon enn den vi bruker for beregninger etter Norsk Standard. Måten vi løser dette på er å dividere på de lastfaktorene som blir brukt i Calculatis før vi legger lastene inn i programmet. På denne måten kan vi beregne lastkombinasjoner i bruddgrensetilstand, uten at Calculatis påvirker utregnede laster.

3.4 Prissammenlikning

Utregningen av kostnader for råbygget blir basert på en grov kostnadsestimering. Ved hjelp av Revit-modellen greier vi å finne mengden i kubikkmeter for elementene som skal estimeres. Vi multipliserer mengden med oppgitte priser for materialene.

For CLT-elementene er prisen oppgitt som EUR per kubikkmeter. Når man multipliserer prisen med mengden, gitt i kubikkmeter, vil dette resultere i en totalpris for elementene. Denne metoden er lik for både vegg- og dekkeelementer av CLT. For stål er det oppgitt pris per kg. Mengden av stål som vi innhenter fra vår Revit-modell er oppgitt i kubikkmeter og må da multipliseres med massetettheten for stål, 7850 kg/m^3 . Ved å benytte denne metoden vil mengden bli oppgitt i kg istedenfor kubikkmeter. Når vi da multipliserer prisen per kg med mengden som er regnet om til kg, får vi den totale prisen for stål-elementene.

Massetetthet er gitt ved formelen $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{masse (kg)}}{\text{Volum (m}^3\text{)}}$

Ved å snu om formelen for massetetthet finner vi at massen $m = \rho \cdot V$

For å få en korrekt prissammenligning er det også viktig at alle priser gjelder for materialene i sin helhet. Det vil si at alle av materialets kostnader er inkludert i den samlede prisen som vi benytter i vår utregning. Disse kostnadene vil være pris for material, prosjektering, produksjon, transport, arbeid for montering.

3.5 Beregning for utslipp av CO₂

Beregninger av CO₂-avtrykk blir gjort i forbindelse med vedlegg 6 som viser oversikt over mengder av materialer i de to løsningene. Formålet med beregningen er å finne ut CO₂-avtrykket til en CLT-løsning i forhold til en løsning i betong, gitt ved kg CO₂-ekv. Enheten for et materials CO₂-utslipp er gitt i enheten kg CO₂-ekv/m³. Dette tallet multipliserer vi med volum av aktuelt material og finner dermed antall kg CO₂-ekv. Beregningene tar hensyn til ulike livsløpsfaser, som forklart i teori 2.4.2 om livsløpsfaser.

4 RESULTAT

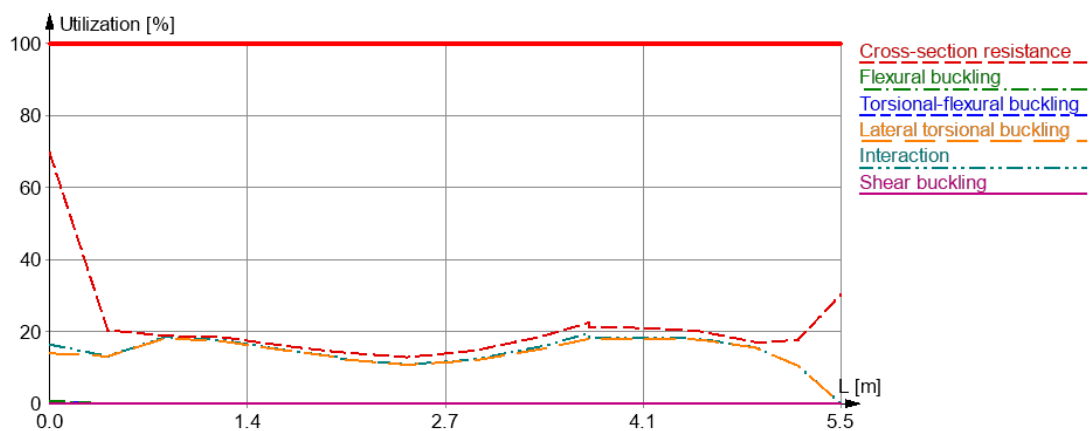
4.1 Dimensjonering i FEM-Design

Resultatene hentet fra FEM-Design blir vist i vedlegg 10, som viser resultater fra de mest belastede elementene. Vedlegget viser også utnyttelsesgrad for samtlige elementer i bygget, men ikke utregningen for disse. Resultater i FEM-Design har vært avgjørende for dimensjoneringen av konstruksjonselementer i bygget.

4.1.1 Bruddgrensetilstand

Bjelke

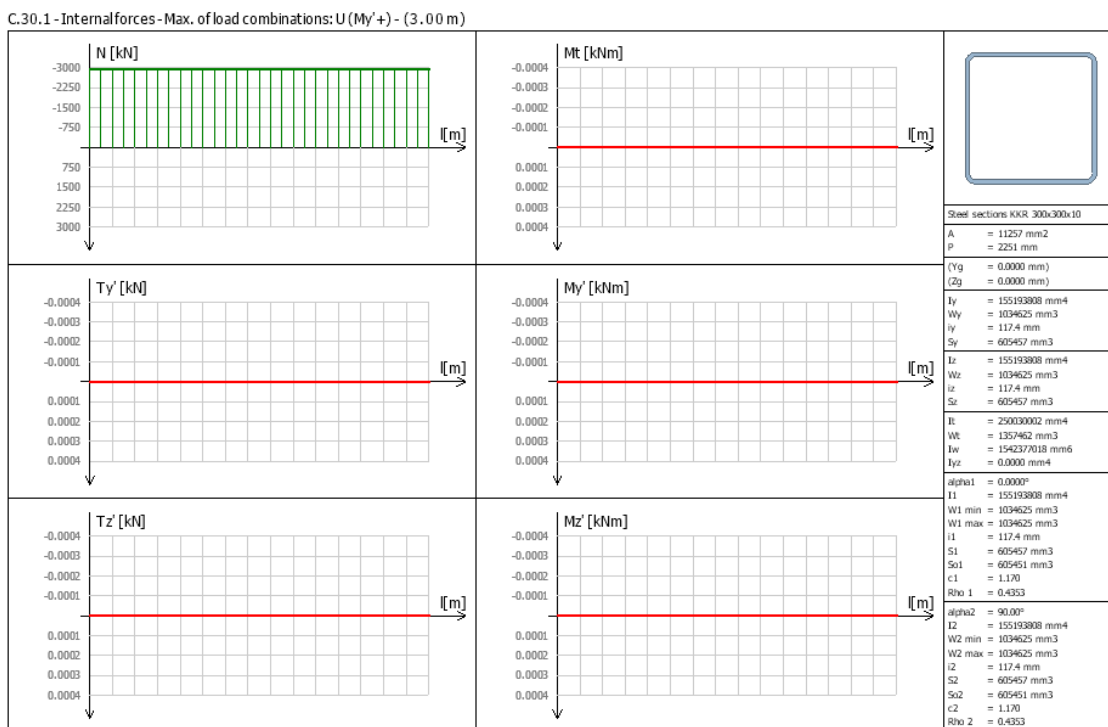
Den mest belastede bjelken i konstruksjonen viste seg å være mest belastet ved den ene opplagersiden. Figur 4.1-1 viser en oversikt av bjelkens påkjenninger. Utnyttelsen er på dette punktet blitt beregnet til 70 prosent. Man kan også se at utnyttelsen på midten av bjelken ligger på ca. 15 prosent. Årsaken til dette er at den påførte lasten på bjelken består hovedsakelig av overliggende vegger. Ettersom bjelken ikke vil bli belastet før den får nedbøyning, forklarer det den lave utnyttelsen på bjelkens midtpunkt. Kraftene vil fordele seg på to opplagersider. Den ene delen av kreftene vil gå inn i et av bjelkens opplagerpunkt, og blir videreført til underliggende søyle. Den andre delen vil gå ned i et annet bærende veggelement. Årsaken til dette er at bjelken er innfestet ved konsoll. Denne delen av kraften vil derfor ikke påvirke bjelkens andre opplagerpunkt betydelig. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.3.1 Mest belastet bjelke.



Figur 4.1-1: Utnyttelse for mest belastet bjelke

Søyle

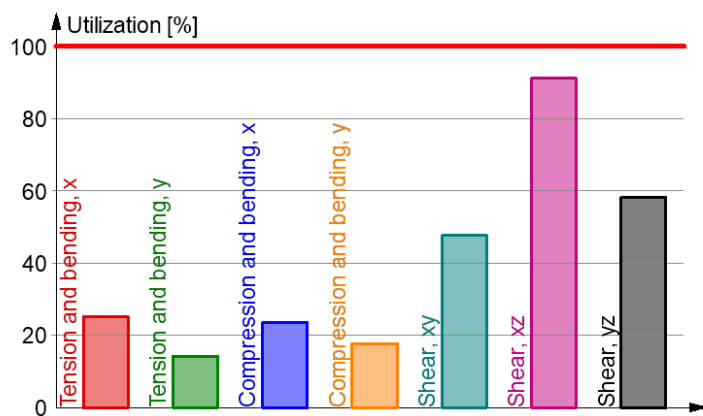
Når vi ser på søyler i bruddgrensetilstand er gjennomgående aksialkraft et relevant og interessant tema. Oppe i venstre hjørne i figur 4.1-2 kan vi lese av at søylen får en aksialkraft tilsvarende 3000 kN. Den aktuelle søylen ligger i første plan og er den mest utnyttede søylen i konstruksjonen. Den har en høyde på 3 m og er av typen HUP 300 x 300 x 10. FEM-Design viser at søylen har en utnyttelse på 91 prosent. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.3.2 Mest belastet søyle.



Figur 4.1-2: Aksialkraft for mest belastede søyle

CLT-dekke

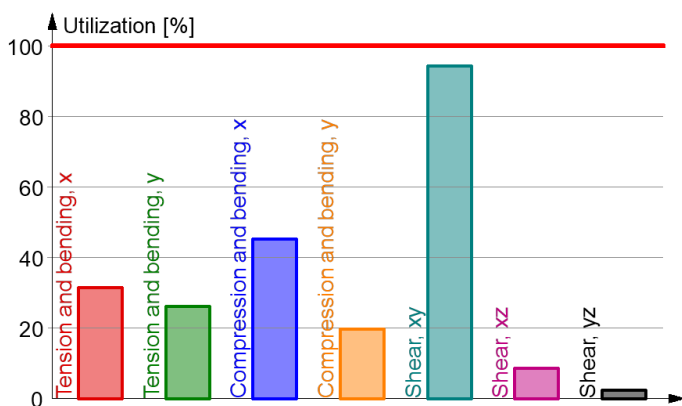
Utnyttelse for mest belastet CLT-dekke blir i FEM-Design beregnet til 91 prosent. Figur 4.1-3 viser dekkets utnyttelsesgrad. Skjærkrefter i xz-plan forårsaker den største utnyttelsen på 91 prosent for dekket. Dette vil si at kreftene som opptrer vertikalt i dekkets lengde har påført den største belastningen. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.3.3 Mest belastet CLT-dekke.



Figur 4.1-3: Utnyttelse mest belastede CLT-dekke

CLT-vegg

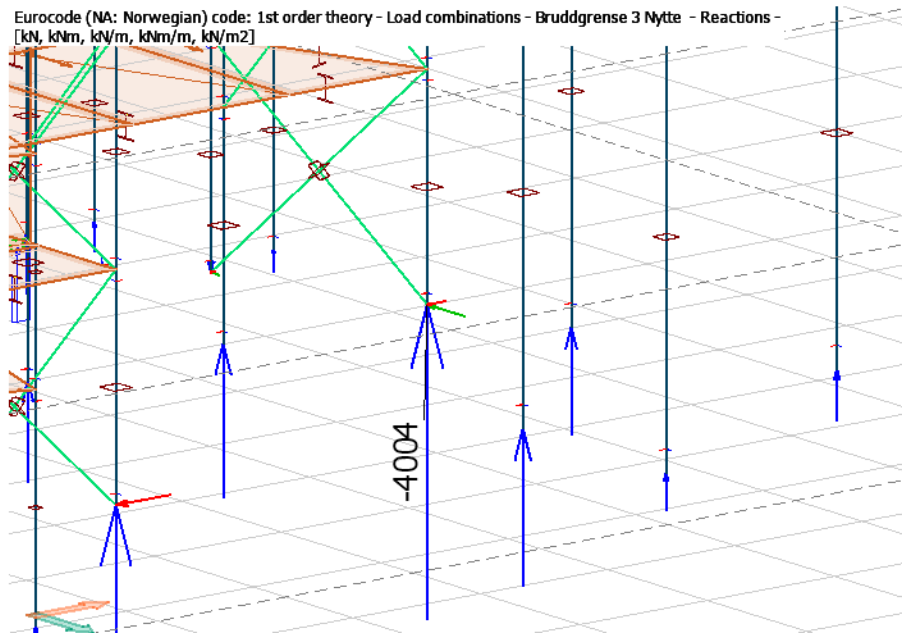
Utnyttelsen for CLT-veggelementet blir vist i figur 4.1-4. Utnyttelsesgraden for aktuelt vegg-element er blitt beregnet til 94 prosent. Denne blir bestemt av skjærkrefter i xy-plan. Dette vil si at det er horisontale krefter som har forårsaket veggens høye utnyttelse. I motsetning til CLT-dekket, har veggen god kapasitet for krefter som oppstår i xz-plan. Dette vil si at veggen har god kapasitet for trykkrefter. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.3.4 Mest belastet CLT-vegg.



Figur 4.1-4: Utnyttelse mest belastede CLT-vegg

Trykkraft i fundament

Figur 4.1-5 viser dimensjonerende trykkraft i fundament. Denne belastningen er blitt beregnet til 4004 kN, og kommer fra aksiallast fra både søyle og trykkstaven i nærliggende vindkryss. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.3.5 Trykkraft i fundament.

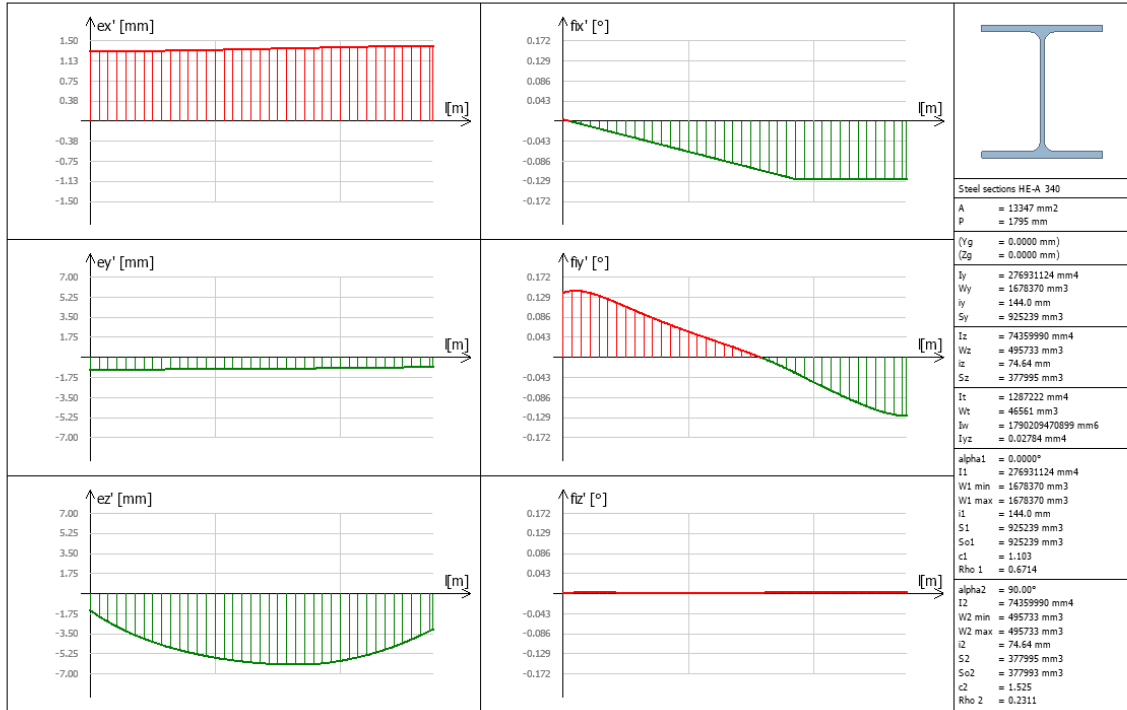


Figur 4.1-5: Trykkraft i fundament

4.1.2 Bruksgrensetilstand

Figur 4.1-6 viser nedbøyning for mest belastet bjelke. Som forklart i 4.1.1 bjelke, har ikke denne bjelken tatt opp mye av sin last ved nedbøyning om sterk akse. Diagrammet som her er relevant for nedbøyning om sterk akse, vises i figur 4.1-6 ved ez'. En fullstendig oversikt over beregninger og resultat er vist i vedlegg 10, kap. 2.4.1 Mest belastet bjelke.

B.58.1 - Displacements - Load combination: Bruksgrense (5.49 m)

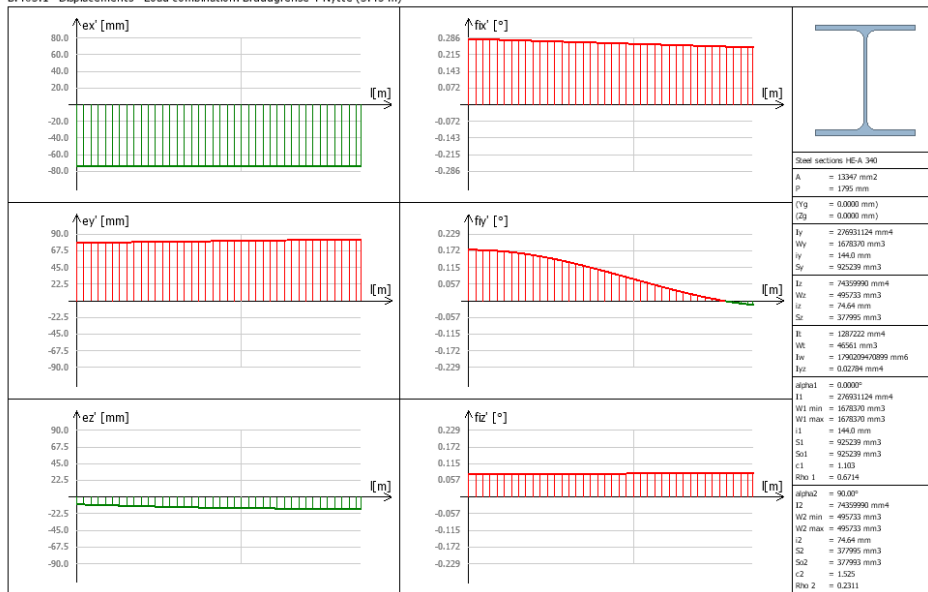


Figur 4.1-6: Nedbøyning mest belastet bjelke

4.1.3 Stabilitet for horisontale krefter

Resultater for stabilitet for vindlast, viser forskyvninger i henholdsvis første plan og takplan. Det som er interessant her er å finne total maksimal forskyvning i horisontal retning. Dette beregnet vi til å bli i overkant av 90 mm i y-retning. Figur 4.1-7 viser forskyvning i takplan.

B.403.1 - Displacements - Load combination: Bruddgrense 4 Nytte (3.45 m)

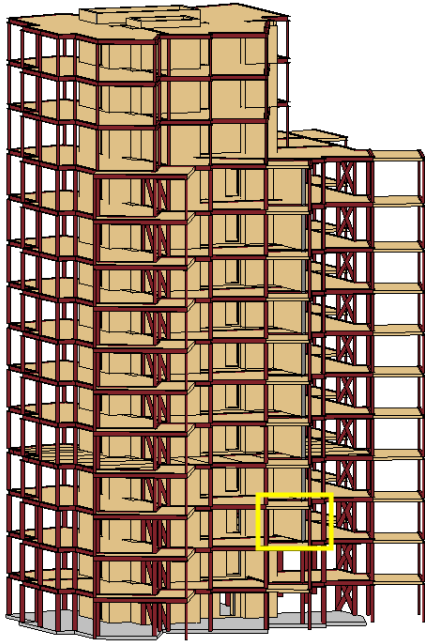


Figur 4.1-7: Forskyvninger i takplan

4.2 Dimensjonering i Calculatis

4.2.1 Dimensjonering av vegger

Den aktuelle CLT-veggen som vi dimensjonerte var av typen CLT 300 L8s-2. Denne veggen hadde en lengde på 6,4m og bredde på 0,3m. Veggen ble lagt som flere elementer over 9 etasjer. Figur 4.2-1 viser plassering av den aktuelle veggen i Revit-modellen, markert i gult. Laster som ble tatt med i dimensjoneringen for veggen vises i tabell 4.2-1.

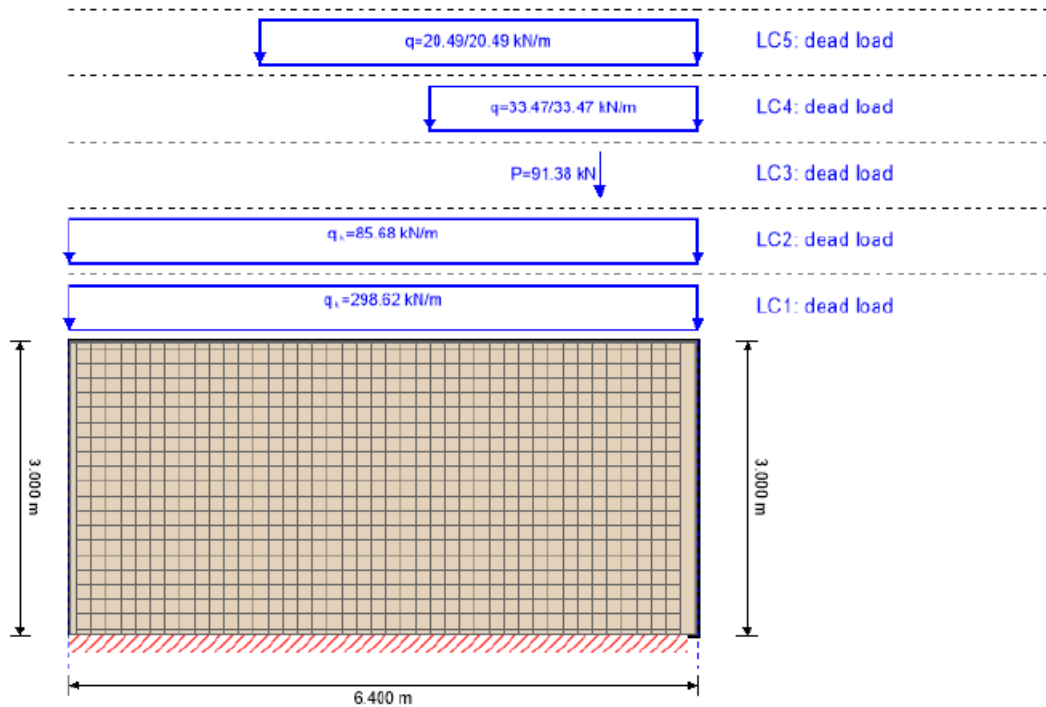


Figur 4.2-1: Plassering av beregnet CLT-vegg

Laster	Type	Samlet verdi	Lastfaktor
Egenvekt vegg	Jevnt fordelt	4.5 kN/m	1.2
Egenvekt dekke	Jevnt fordelt	9.5 kN/m	1.2
Egenvekt påført – Himling, lettvegger etc.	Jevnt fordelt	3.17 kN/m	1.2
Egenvekt påført - Påstøp	Jevnt fordelt	7.93 kN/m	1.2
Nyttelast på dekke	Jevnt fordelt	9.77 kN/m	1.5
Egenvekt dekke	Punktlast	27.9 kN	1.2
Egenvekt påført – Himling, lettvegger etc.	Punktlast	9.3 kN	1.2
Egenvekt påført – Påstøp	Punktlast	23.25 kN	1.2
Egenvekt bjelke	Punktlast	6.5 kN	1.2
Nyttelast på dekke	Punktlast	28.64 kN	1.5

Tabell 4.2-1: Medregnet laster for vegg-element

Figur 4.2-2 viser punktlasten og de jevnt fordelte lastene på CLT-veggen i Calculatis. Tabell 4.2-2 viser laster som ble ført inn i Calculatis. Lastfaktorene som er brukt ble hentet fra ligning B2, ettersom den viste seg å gi størst dimensjonerende last.



Figur 4.2-2: Laster på CLT-vegg, hentet fra rapport i Calculatis

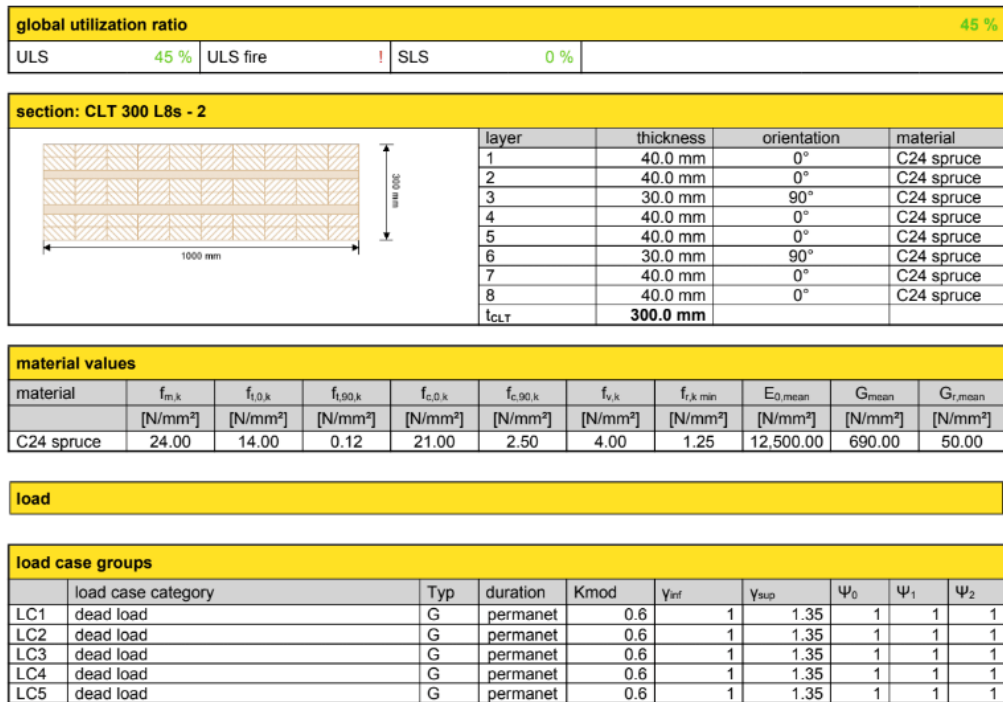
Laster	Type	Verdi	Antall etasjer
P_{dim}	Punktlast	91.38 kN/m	1
Q_{dim}	Jevnt fordelt	33.18 kN/m	9
P_{dim} fordelt på 2.73m	Jevnt fordelt	33.47 kN/m	1
P_{dim} fordelt på 4.46m	Jevnt fordelt	20.49 kN/m	1
P_{dim} fordelt på 6.4m	Jevnt fordelt	14.28 kN/m	6

Tabell 4.2-2: Dimensjonerende laster for vegg-element

Lasten P_{dim} er en punktlast som kommer fra en bjelke som er innfestet i vegg. I dette tilfellet står det 9 vegger over hverandre, og punktlastene vil derfor fordele seg over lengden til vegg. Lasten vil fordele seg med en 30 graders helning ut fra angrepslinjen. Punktlasten som virker inn på overliggende vegger blir derfor regnet som en jevnt fordelt last over en varierende lengde av vegg. Dette er grunnen til at P_{dim} er delt opp i tre ulike laster.

Punktlasten som virker direkte inn på vegg er den eneste lasten som blir beregnet som

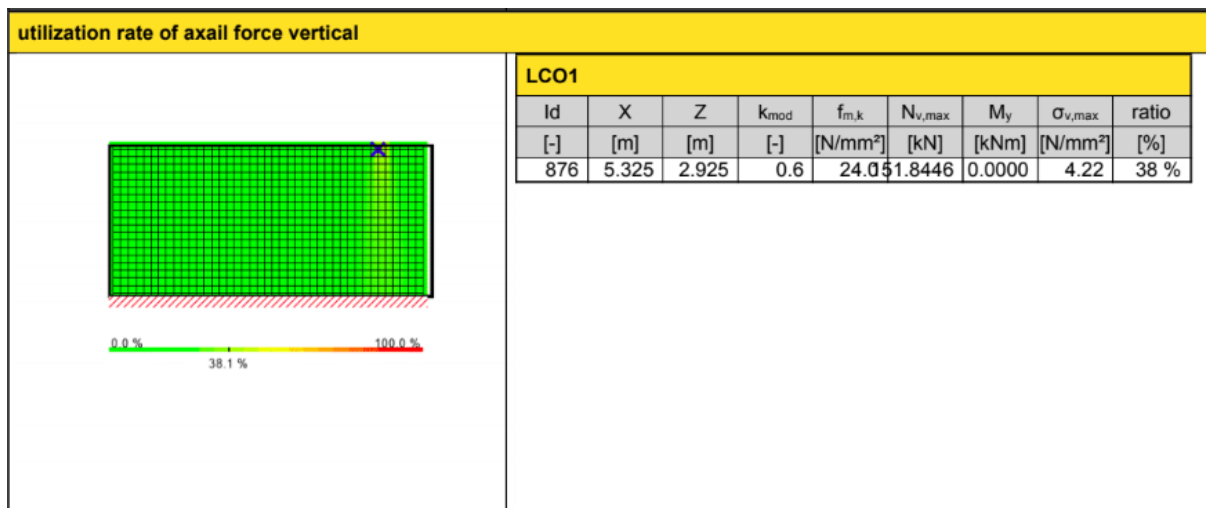
punktlast i dette tilfellet. Lasten Q_{dim} er en jevnt fordelt last som blir fordelt på veggens fulle lengde.



Figur 4.2-3: Utdrag fra beregningsrapport i Calculatis

Figur 4.2-3 viser en del av resultatet som ble beregnet i Calculatis. Øverst på figuren finner vi global utnyttelsesgrad på 45 prosent. Resultatet står under ULS, som står for *Ultimate limit state* og betyr bruddgrensetilstand. Det er dette resultatet som var mest relevant å finne i Calculatis. Figuren viser også et tverrsnitt av vegg der det blir vist hvordan lamellene er blitt lagt med hensyn på retning. Det blir også oppgitt nøyaktig tykkelse på lamellene, samt retning og material. De ulike materialfaktorene som er blitt brukt i beregningen blir vist under *material values*.

Under *load case groups* ser vi faktorene som er blitt brukt for lastene som ble lagt inn. Her ser vi at alle lastene er lagt inn som egenlast, og lastfaktor γ_{sup} er blitt satt til 1,35. K_{mod} er blitt satt til 0,6. Denne faktoren blir bestemt av både lastvarighets- og klimaklasse.

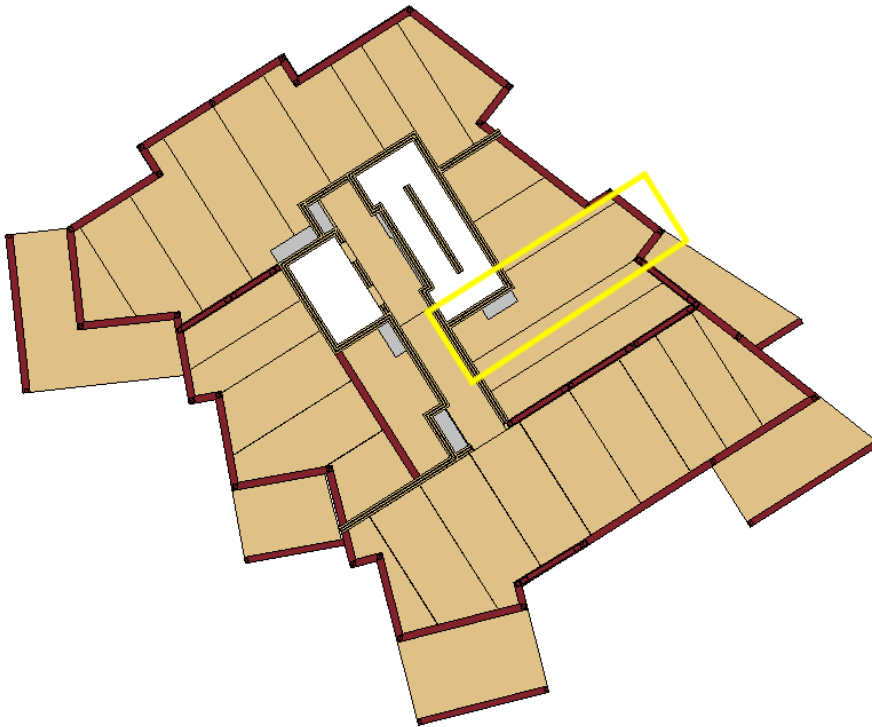


Figur 4.2-4: Belastningsareal fra punktlast, hentet fra rapport i Calculatis

Ettersom vi hadde en betydelig punktlast som virket på veggen, er dette både et interessant og kritisk punkt som må undersøkes. Calculatis gir oss en rekke analyser for dette punktet. I figur 4.2-4 er det hovedsakelig vist utnyttelsesgraden fra punktlasten. Utnyttelsesgrad på 38 prosent.

4.2.2 Dimensjonering av dekker

Det valgte CLT-dekke som ble dimensjonert var av typen CLT 300 L8s-2. Dekket har en bredde på 2,45m og en spennvidde på 9,0m. Figur 4.2-5 viser plassering av det aktuelle dekket i Revit-modellen, markert i gult. Laster som ble tatt med i dimensjoneringen for dekket vises i tabell 4.2-3.

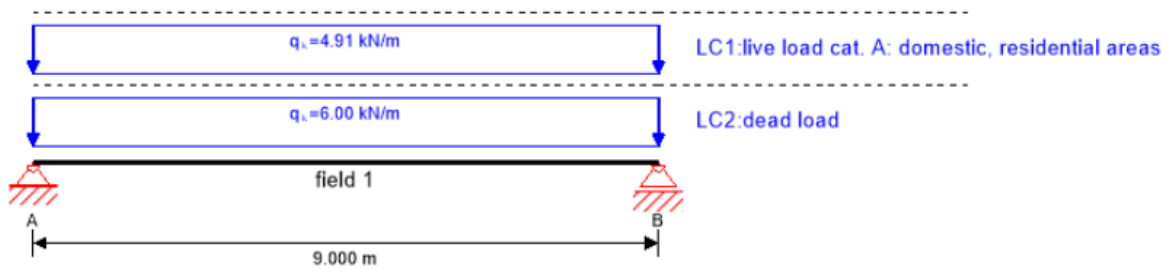


Figur 4.2-5: Plassering av beregnet CLT-dekke

Laster	Type	Samlet verdi	Lastfaktor
Egenvekt dekke	Jevnt fordelt	3.675 kN/m	1.2
Nyttelast	Jevnt fordelt	4.9 kN/m	1.5
Egenvekt påført – Himling, lettvegger etc.	Jevnt fordelt	1.23 kN/m	1.2
Egenvekt påført - Påstøp	Jevnt fordelt	3.06 kN/m	1.2

Tabell 4.2-3: Medregnet laster for dekke-element

Laster måtte regnes ut med hensyn på bredden til dekket. De dimensjonerende lastene hadde enheten kN/m^2 og ble multiplisert med bredden 2,45 m. De oppgitte lastene har derfor enheten kN/m . Lastfaktorene blir hentet fra ligning B2, ettersom den gitte størst dimensjonerende last. Figur 4.2-6 viser jevnt fordelte laster på CLT-dekket i Calculatis. Tabell 4.2-4 viser hvilke laster som ble lagt inn i Calculatis.



Figur 4.2-6: Jevnt fordelte laster på CLT-dekke, hentet fra rapport i Calculatis

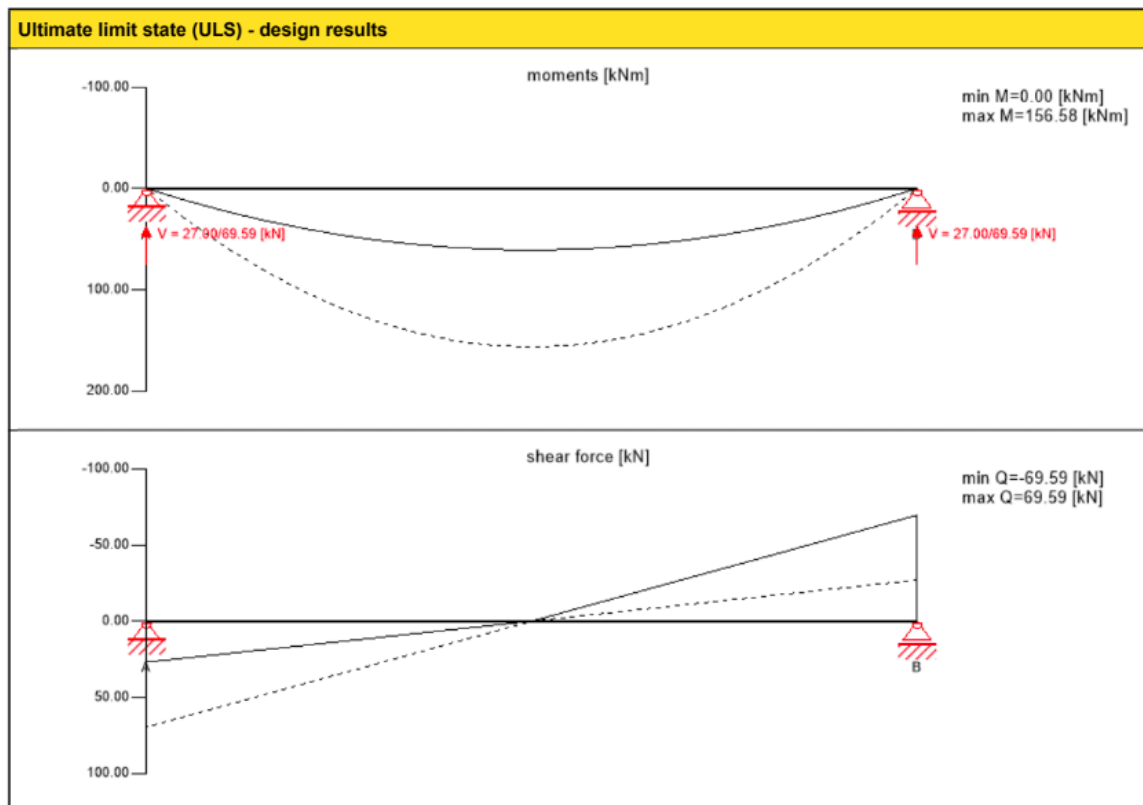
Laster	Type	Verdi
$q_{dim(e)}$	Jevnt fordelt	6.0 kN/m
$q_{dim(n)}$	Jevnt fordelt	4.91 kN/m

Tabell 4.2-4: Dimensjonerende laster for dekke-element

Den jevnt fordelte lasten $q_{dim(e)}$ er en samlet verdi for alle egenlaster.

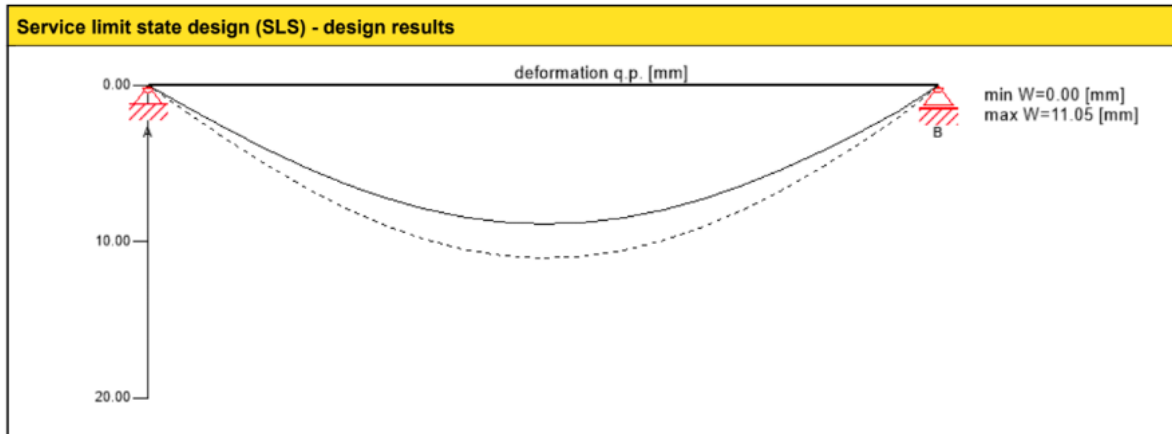
Den jevnt fordelte lasten $q_{dim(n)}$ er en samlet verdi for nyttelasten.

Figur 4.2-7 viser moment- og skjærkraftdiagram for dekket. Diagrammene blir automatisk generert med hensyn på inputen i programmet.



Figur 4.2-7: Utdrag fra rapport - Moment- og skjærkraftdiagram for påførte laster fra Calculatis

I tillegg til moment- og skjærkraftskapasitet er også nedbøying relevant for dimensjoneringen av dekket. Calculatis setter krav for nedbøying til $L/300$. Figur 4.2-8 viser at nedbøyningen til dekket er 11,05 mm.

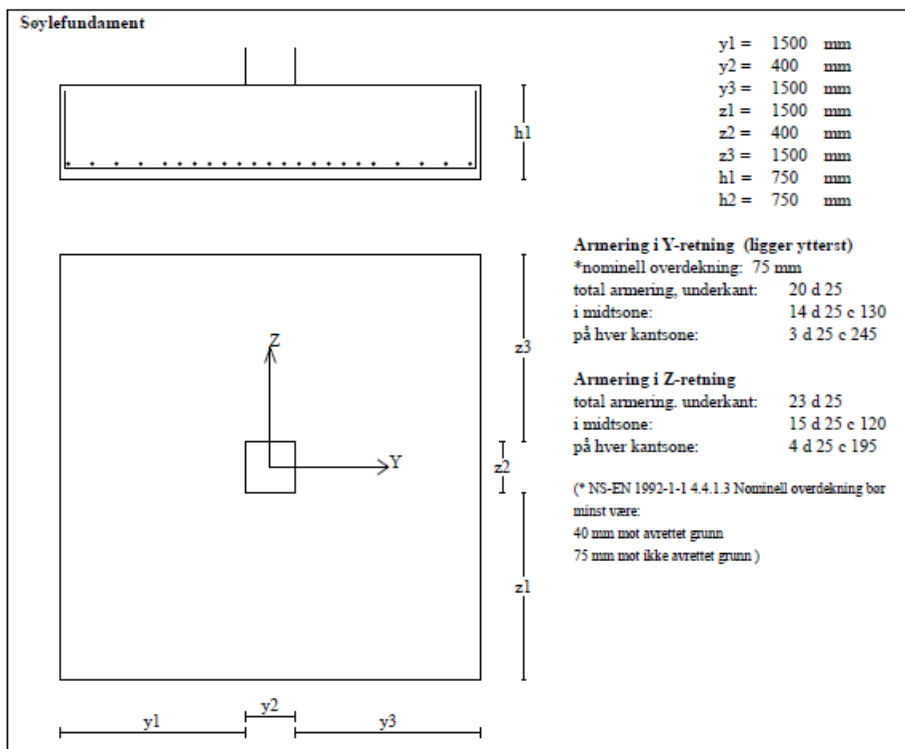


Figur 4.2-8: Utdrag fra rapport - Nedbøying for dekke-elementet fra Calculatis

4.3 BTSNITT av Ove Sletten

4.3.1 Trykk i fundament

Søylefundament



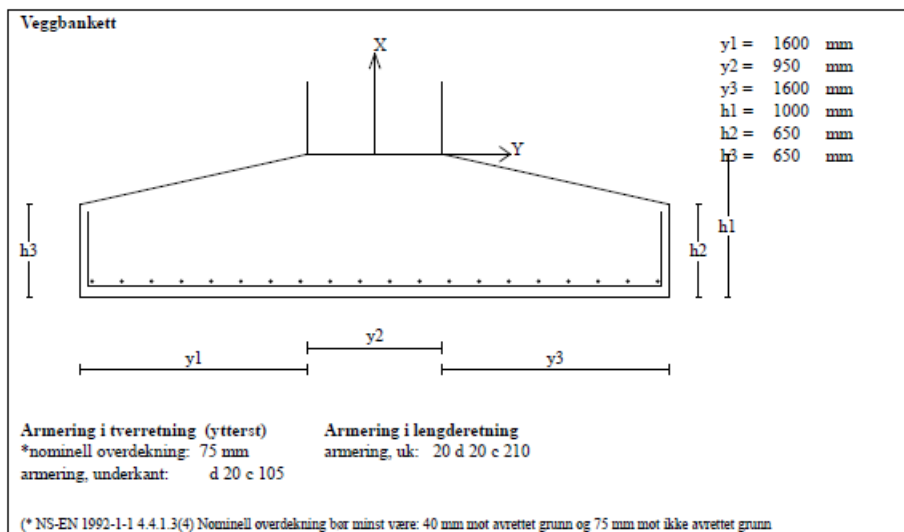
Figur 4.3-1: Fundament fra mest belastet søyle, utdrag av BTSNITT-rapporten

Figur 4.3-1 viser et utdrag av BTSNITT-rapporten for beregning av grunntrykk fra søylefundament. Fundamentet er beregnet for søylen med størst aksialkraft, dette gir en høyde på 0,75 m og totalbredde på 3,4 m. Spennarmering blir lagt i underkant i begge retninger og har diameter 25 mm. I midtsonen vil senteravstanden mellom armeringene være 130 mm i y-retning, mens den i z-retning vil være 120 mm. Det trengs ikke skjærarmering fordi skjærkapasiteten uten skjærarmering er innenfor kravet. Vedlegg 13 viser fullstendig moment- og skjærkontroll i bruddgrensetilstand. Tabell 4.3-1 viser overført grunntrykk, fra søylefundament, i forhold til bæreevnen.

Kontroll av grunntrykk	Bæreevne	Overført grunntrykk
Fundament søyle	513 kN/m ²	373 kN/m ²

Tabell 4.3-1: Kontroll av grunntrykk for søylefundament

Veggfundament



Figur 4.3-2: Fundament fra mest belastet vegg, utdrag av BTSNITT-rapporten

Figur 4.3-2 viser et utdrag av BTSNITT-rapporten for beregning av grunntrykk, fra fundament for mest belastet vegg. Fundamentet er beregnet for vegggen med størst aksialkraft og dette gir en total høyde på 1 m, inkludert fall mot enden. Fundamentet har en total bredde på 4,15 m. Armering i tverretning har diameter 20 mm med senteravstand 105 mm, mens armering i lengderetning har diameter 20 mm med senteravstand 210 mm. Vedlegg 14 viser fullstendig moment- og skjærkontroll i bruddgrensetilstand. Tabell 4.3-2 viser overført grunntrykk, fra veggfundament, i forhold til bæreevnen.

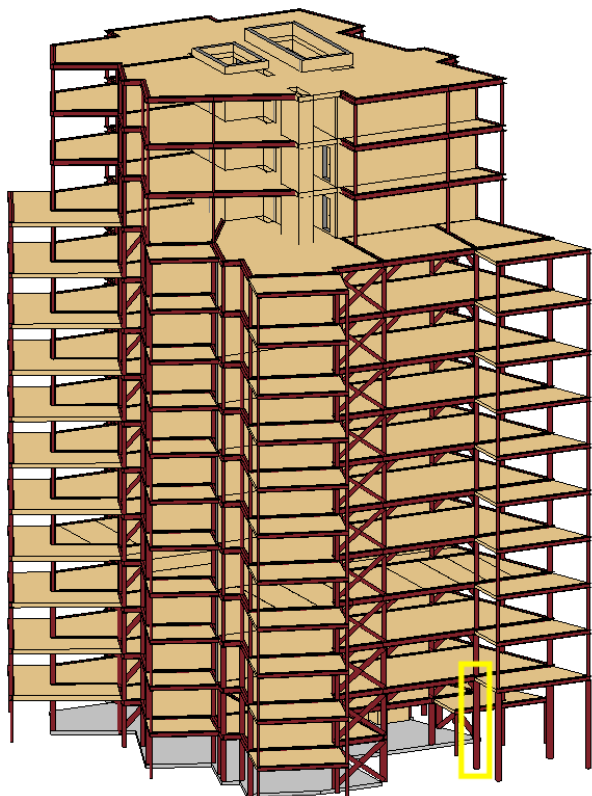
Kontroll av grunntrykk	Bæreevne	Overført grunntrykk
Fundament vegg	513 kN/m ²	508 kN/m ²

Tabell 4.3-2: Kontroll av grunntrykk for veggfundament

4.4 Håndberegningskontroll

4.4.1 Håndberegning av søyle

Figur 4.4-1 viser den aktuelle søylen, fra Revit-modellen, som vi kontrollerer. Søylen er av typen HUP 300 x 300 x 10 mm. Søyelens høyde er 5,6 m og går gjennom plan 1 og 2. Vedlegg 18 viser hvordan vi for hånd regnet ut alle kreftene som gikk ned i søylen, både aksialkraft og momentkraft. Det ble utført en kapasitetskontroll. Vipping vil ikke oppstå pga. kvadratisk tverrsnitt. Det vil si at søylen bare er kontrollert for knekking. Statiske system som er benyttet i beregningen er vist i vedlegg 17.



Figur 4.4-1: Plassering av kontrollert søyle i Revit-modell

Tabell 4.4-1 viser resultatet fra håndberegningen sammenlignet med resultatet fra FEM-Design. Differansen ligger på 28 prosent, og denne kontrollen tilsier at det er forskjell mellom

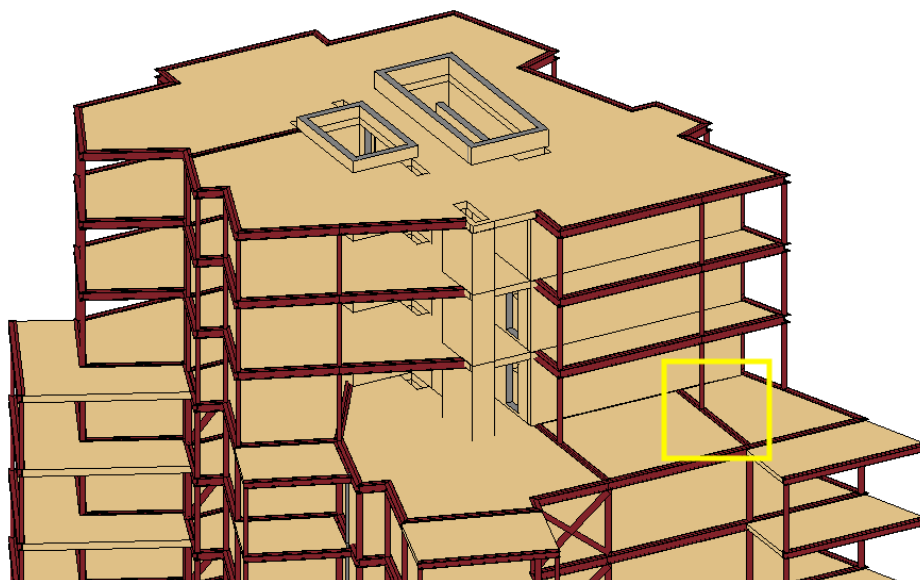
FEM-Design og håndberegningen. Dette skyldes nok at FEM-Design regner med vindlast som har stor påvirkning på konstruksjonen, men den ble ikke regnet med i håndberegninger.

	Håndberegninger	FEM-Design	Differanse
Kapasitet (%)	43	71	28

Tabell 4.4-1: Kapasitetsutnyttelse til søyle ved håndberegninger og FEM-Design

4.4.2 Håndberegning av bjelke

Figur 4.4-2 viser bjelken i et kritisk punkt, fra Revit-modellen, som vi kontrollerer. Bjelken er av typen HEA-340. Bjelkens lengde er 6 m og ligger over plan 11. Vedlegg 19 viser hvordan vi for hånd regnet ut alle kreftene som belastet bjelken. Lastene som virker inn på bjelken er en punktlast fra overliggende konstruksjon, i tillegg til en jevnt fordelt last. Det ble utført kontroll for både kapasitet og nedbøyning. Statiske system som er benyttet i beregninger er vist i vedlegg 17.



Figur 4.4-2: Plassering av kontrollert bjelke i Revit-modell

Tabell 4.4-2 viser resultat fra håndberegningen sammenlignet med resultatet fra FEM-Design. Differansen ligger på 27 prosent, og denne kontrollen tilsier at det også her er forskjell mellom FEM-Design og håndberegningen. I likhet med beregningen av søylen er det ikke medregnet vindlast, noe som kan ha påvirket resultatet.

	Håndberegninger	FEM-Design	Differanse
Kapasitet (%)	66	39	27

Tabell 4.4-2: Kapasitetsutnyttelse til bjelke ved håndberegninger og FEM-Design

4.4.3 Håndberegning av vindlast

Vindlasten som manuelt ble lagt inn i FEM-Design ble kontrollert for hånd, som vist i vedlegg 21, s. 15. Lastberegning av Ove Sletten i vedlegg 11 viser også beregning av vindlast. Bygget er 45 m høyt og har en kortside på omkring 25 m og en langside på omkring 30 m. Vindlasten som belaster langsiden går i x-retning, mens kortsiden går i y-retning. Tabell 4.4-3 viser at vindlasten, både i x- og y-retning, er lik for håndberegninger og i Lastberegning av Ove Sletten.

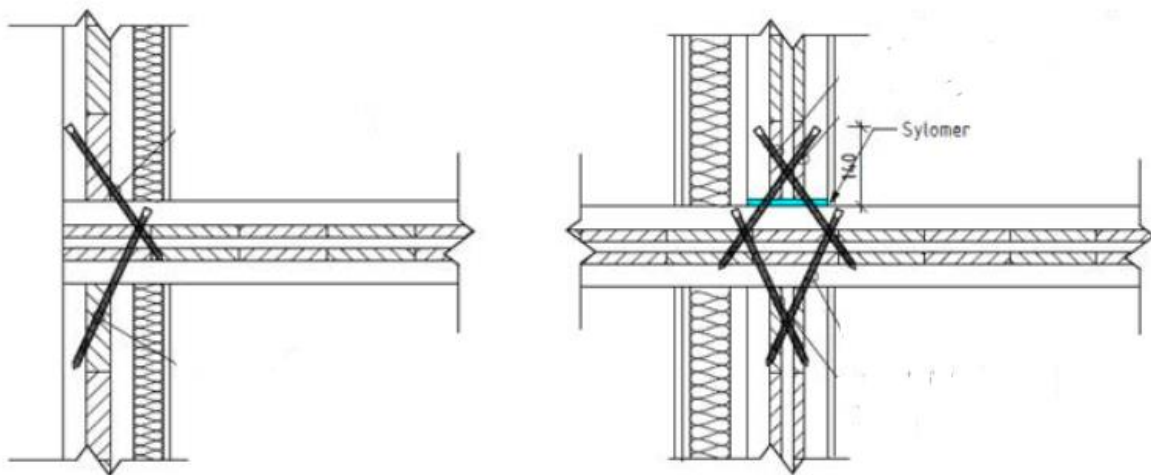
	Håndberegninger	Lastberegning av Ove Sletten	Differanse
Vindlast x-retning (kN/m²)	2,61	2,61	0
Vindlast y-retning (kN/m²)	2,64	2,64	0

Tabell 4.4-3: Vindlast ved håndberegninger og Lastberegning av Ove Sletten

4.5 Forbindelser og opplegg

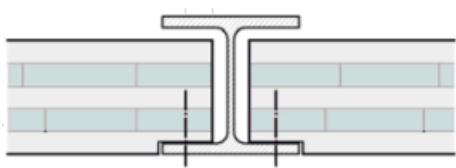
4.5.1 Etasjeskiller

Den valgte metoden for forbindelser mellom dekker (CLT 300 L8s-2) og vegger (CLT 300 L8s-2), som hovedsakelig ligger i kjernen av bygget, er vist i figur 4.5-1. Dette på grunnlag av anbefaling fra kontaktperson i Woodcon. Med hensyn på avgrensinger valgte vi å se bort ifra dimensjonering av skruer. Likevel bør det nevnes at før det belastes med påførte strekkrefter i elementplanet, så må skruene overholde en minimumshelning på 30 grader i fiberretningen for å unngå at skruer hviler i enden. Skråforbindelsene vil sikre at vi tar opp skjærkrefter og gir høyere stivhet i konstruksjonsdelene. Vedlegg 22 viser detaljer for etasjeskillere i Revit.



Figur 4.5-1: Skråforbindelser i etasjeskillere

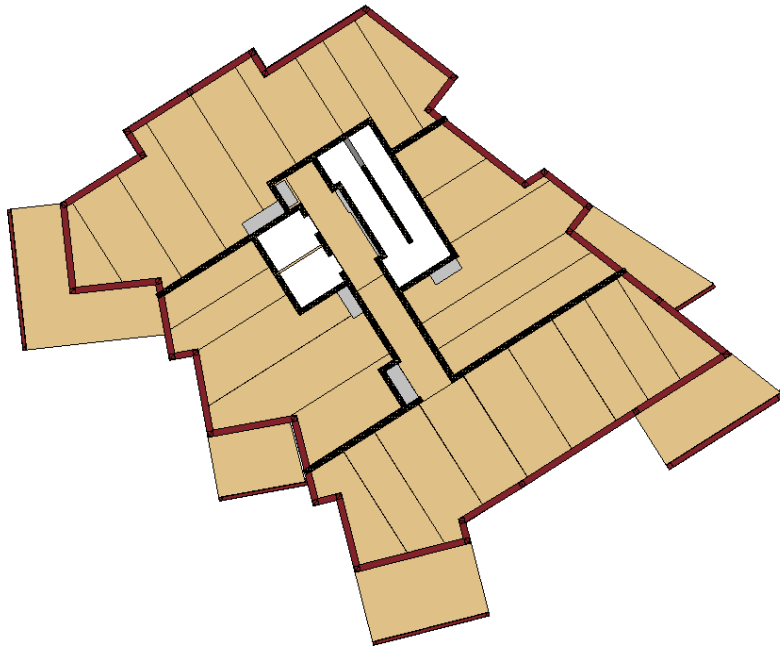
I den ytre delen av bygget, som har bæring av stålsøyler- og bjelker, vil det forekomme en annen type forbindelse. Figur 4.5-2 viser forbindelse mellom dekker (CLT 300 L8s-2) og bjelke (HEA-340). Et innsnitt i nedre sjikt ved endeopplegg hos dekket sikrer en større klaring til øvre flens, som gjør at dekket kan kiles på plass ved montering. Det blir i tillegg lagt inn en klaring fra steget til dekket på minimum 35 mm for å unngå å treffe sveisen. Samtidig som vi vil bevare oppleggsbredden på minimum 110 mm. Skruer blir ført gjennom forhåndsbåret hull i bjelken og festet oppi dekket. Revit-detalljer for dekke ved opplegg, vedlegg 22, viser hvordan man nytter stålplater som en rotasjonslås. Vedlegg 20 viser skisse med gjeldende målsetting.



Figur 4.5-2: Forbindelse mellom etasjeskiller og bjelke

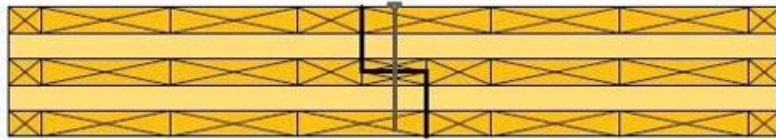
4.5.2 Dekkeforbindelser og skivevirkning

Figur 4.5-3 viser hvordan vi kan legge ut CLT-dekker med hensyn på opplegg og spennvidde. Symmetrien i bygget gjør CLT-dekker til en relativt god løsning, blant annet pga. sin fleksibilitet ved formgivning, som er forklart i teori 2.1.2 om CLT. Når symmetrien er så utfordrende som ved dette bygget, vil man ikke komme uten skråkappinger. Da er det stor fordel at CLT-dekkene fungerer som en toveis plate med ulik styrke og stivhet i to hovedretninger, som forklart i teori 2.1.3 om avstivningssystem. Det at elementene blir koblet sammen ved leppeskjøter, i tillegg til en påstøp på 50 mm, gir et samvirke av alle dekkene. CLT 300 L8s-2 har ulik styrke og stivhet, som vedlegg 8 viser. Vi har valgt CLT-dekker som har mer styrke og stivhet i den ene retningen for å ta opp kreftene ved de lengste spennviddene.



Figur 4.5-3: Dekke over plan 4

For forbindelser mellom CLT-dekker er det vanlig å bruke leppeskjøt som vises i figur 4.5-4. Denne løsningen er også anbefalt fra veileder i Woodcon. Det blir brukt skrueforbindelser av statiske hensyn og fugebånd mellom forbindelsen for å fordele kreftene. Da vil vi få utnyttet CLT-elementene sin evne til å bære i to retninger og lasten vil fordeles til nærliggende dekker i tillegg til opplegget.



Figur 4.5-4: Leppeskjøt for kobling mellom CLT-dekker

4.6 Prissammenligning av CLT og betong

Kostnadene som blir beregnet gjelder kun for råbygget, altså bæresystemet til bygget inkludert balkonger. Prisene inkluderer materialene i sin helhet. Det vil si at inkludert i prisen inngår prosjektering, produksjon, materialkostnad, transport og arbeid for montering. Alle kostnader er beregnet eksklusiv mva.

Prisen for CLT-elementer fikk vi tak i via vår kontaktperson i Woodcon. Den ble satt til 1200 EUR/m³. Vi estimerte 1200 EUR til 11.616 NOK per 30.04.19 med en valutakurs lik 9,68.

Prisen for stålelementer fikk vi fra veileder i Multiconsult. Vi legger til 5 prosent av prisen for stålelementene for å ta hensyn til andre typer stålelementer som f. eks. mindre stålplater, bolter og vinkler.

Den brukte prisen for plasstøpt betong og andre betongelementer fikk vi oppgitt av utbygger Peab K. Nordang. Prisen inkluderer alle kostnader på lik linje som andre material i kostnadsestimeringen.

4.6.1 CLT

Material	Pris	Mengde	Totalpris
CLT-elementer (dekker)	11 616 NOK/m ³	1.660,01 m ³	19.282.560,00 NOK
CLT-elementer (vegger)	11 616 NOK/m ³	781,92 m ³	9.082.782,72 NOK
Stål-elementer (søyler)	28 NOK/kg	106.532,35 kg	2.982.905,80 NOK
Stål-elementer (bjelker)	28 NOK/kg	172.911,95 kg	4.841.534,60 NOK
Stål-elementer for innfesting	1.4 NOK/kg		391.222,02 NOK
Betong (påstøp 5 cm)	500 NOK/m ²	5.533,37 m ²	2.766.683,33 NOK
Sum			39.347.688,47 NOK

Tabell 4.6-1: Totalpris for byggematerialer i råbygg av CLT

Tabell 4.6-1 viser hvilke priser og mengder vi benyttet for prisestimering av råbygget i CLT.

4.6.2 Betong

Material	Pris	Mengde	Totalpris
Betong-elementer (dekker)	7.727,27 NOK/m ³	1344,23 m ³	10.386.982,10 NOK
Betong-elementer (vegger)	4.500,00 NOK/m ³	562,00 m ³	2.529.000,00 NOK
Egne betongelement	30.000,00 NOK/stk	7 stk	210.000,00 NOK
Søyler (betong)	10.000,00 NOK/stk	75 stk	750.000,00 NOK
Søyler (stål)	28,00 NOK/kg	70.210,40 kg	1.965.891,20 NOK
Stål-elementer for innfesting	1.4 NOK/kg		98.294,56 NOK
Stål-element (tak)	700 NOK/m ²	67,73 m ²	47.414,34 NOK
Sum			15.987.582,20 NOK

Tabell 4.6-2: Totalpris for byggematerialer i råbygg av betong

Tabell 4.6-2 viser hvilke priser og mengder vi fikk oppgitt for betongbygget, etter forprosjektet til Multiconsult. Dette blir estimert til en total kostnad av råbygget i betong.

4.6.3 Prisdifferanse

Pris råbygg CLT	39.347.688,47 NOK
Pris råbygg betong	15.987.582,20 NOK
Differanse	23.360.086,27 NOK

Tabell 4.6-3: Prisdifferanse mellom CLT og betong

I tabell 4.6-3 har vi oppsummert prisene på de to byggene. Differansen blir beregnet til å ligge i overkant av 23 mill. NOK.

For tabell 4.6-4 og 4.6-5 er kvadratmeterprisen blitt beregnet ut fra ulike tykkelser. Ettersom CLT-elementer krever en større tykkelse for å oppnå samme styrke som betong, blir dette prisestimatet en tilnærming for å finne prisdifferansen gitt i NOK per kvadratmeter.

Kvadratmeterpris dekkelementer

	Tykkelse	Pris
CLT 300 L8s-2	300 mm	3484,80 NOK/m ²
Dekke-element plasstøpt betong B30 (armert)	230 mm	1777,27 NOK/m ²
Differanse (NOK)		1707,53 NOK/m ²
Pris CLT kontra betong (%)		196%

Tabell 4.6-4: Prisdifferanse pr kvadratmeter dekke-elementer

Kvadratmeterpris veggelementer

	Tykkelse	Pris
CLT 300 L8s-2	300 mm	3484,80 NOK/m ²
Vegg-element plasstøpt betong B30 (armert)	200 mm	900,00 NOK/m ²
Differanse (NOK)		2584,80 NOK/m ²
Pris CLT kontra betong (%)		387%

Tabell 4.6-5: Prisdifferanse pr kvadratmeter veggelementer

4.7 Besparelse på miljø

CO₂-avtrykkene her blir beregnet av tall gitt fra Multiconsult, og blir beregnet fra modellene av råbygget, både i CLT og betong. Beregningens hensikt er å finne ut antall kg CO₂-ekvivalenter som kommer fra de ulike materialene som er benyttet i de to aktuelle bæresystemene. Tallene for de ulike materialers CO₂-avtrykk, som vi fikk oppgitt fra miljøavdelingen hos Multiconsult, er vist i tabell 4.7-1. Tallene blir brukt i sammenheng med vedlegg 6 som viser oversikt over mengder av materialer.

I beregningen av CO₂-avtrykket skiller vi mellom utslipp i forskjellige livsløpsfaser. Dette gjøres for å finne ut CO₂-avtrykket for to deler av livsløpet til materialene. Ved utslipp fra produktstadiet er det medregnet bl.a. bearbeidelse av material og transport. Som vist i figur 4.7-1, viser materialutslippene for trevirke negative tall. Dette er på grunn av karbonlagring, som forklart i teori 2.4.3 om miljøaspekt ved bruk av CLT. Tallet for betong er medregnet CO₂-utslippet for armering. Benyttede tall i tabell 4.7-2 og 4.7-3 er hentet fra vedlegg 20.

Material	Utslipp produktstadiet (kg CO₂-ekv/m³)	Utslipp produktstadiet og livsløpets sluttstadium (kg CO₂-ekv/m³)
Trevirke (dekker)	-567	702
Trevirke (vegger)	-671	731
Stål (0% resirkulert)	24.000	60
Stål (60% resirkulert)	16.000	60
Stål (100% resirkulert)	4.900	60
Betong B35 inkl. armering	193	-

Tabell 4.7-1: Oppgitte tall for ulike materials CO₂-avtrykk

4.7.1 Differanse (produktstadiet)

CO ₂ -avtrykk råbygg CLT	-611.493,99 kg CO ₂ -ekv
CO ₂ -avtrykk råbygg plasstøpt betong	962.247,66 kg CO ₂ -ekv
Differanse	1.573.641,65 kg CO₂-ekv

Tabell 4.7-2: Differanse CO₂-avtrykk for produktstadiet

4.7.2 Differanse (produktstadiet og livsløpets sluttstadium)

CO ₂ -avtrykk råbygg CLT	1.127.504,43 kg CO ₂ -ekv
CO ₂ -avtrykk råbygg plasstøpt betong	963.718,86 kg CO ₂ -ekv
Differanse	163.785,57 kg CO₂-ekv

Tabell 4.7-3: Differanse CO₂-avtrykk for produktstadiet og livsløpets sluttstadium

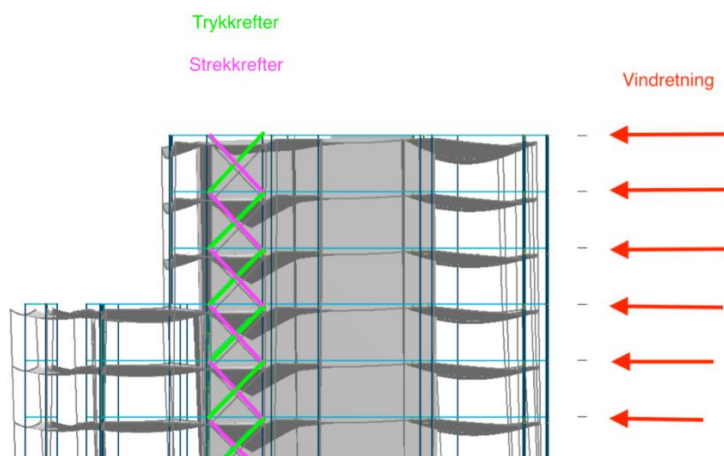
4.8 Konstruksjonssystem

Bæresystemet består av CLT-dekker som ligger på underflensen til stålprofiler, som vist i figur 4.5-2. Dette blir gjort fordi dekkene ikke tåler opplagerkraften som vil oppstå dersom de

hadde hatt direkte kontakt med søylene, samt at de krever større opplagerflate. Bjelkene blir støttet opp av søyler som ligger over hverandre i hele byggets høyde. Dette blir gjort for å kunne føre kreftene gjennom søylene ned til fundament.

Belastning som opptrer på dekker er bla bl.a. egenlast, påført egenlast og nyttelast. Denne lasten vil bli fordelt på de opplagerpunktene som dekket har. Opplagerpunktene for dekkene i dette bæresystemet er bjelker og vegger. Kraften som blir overført til vegger, blir videreført ned til fundament via kontinuerlige vegger. Kraften som blir overført til bjelken, blir fordelt på bjelkens opplagerpunkter. Disse punktene består av søylene som støtter opp bjelken. Denne kraften blir ført vertikalt ned til fundament via kontinuerlige søyler. Dette vil si at både nederste søyle og vegg må tåle kreftene som kommer fra sitt belastningsområde i hele byggets høyde, for å kunne føre de videre ned til fundament. Formålet med bæresystemet er å fordele kreftene så direkte som mulig ned til fundamentet. I dette bæresystemet vil dekker bare få belastning fra belastningsarealet i den etasjen det befinner seg i.

Vindkrefter vil virke i horisontal retning i bygget. Disse kreftene vil først gå gjennom dekkene i konstruksjonen, før de blir ført inn til elementer som bærer i horisontal retning. I dette bæresystemet består disse elementene av bærende vegger, vindkryss og fagverk. Disse har alle den hensikt å kunne ta opp horisontale vindkrefter, og på den måten avstive bygget. Måten kreftene blir tatt opp på, er ved en kombinasjon av strekk- og trykkrefter i de stabiliserende bygningselementene. Figur 4.8-1 viser strekk- og trykkrefter i vindkryss.



Figur 4.8-1: Visualisering av trykk- og strekkrefter for vindkryss

5 DISKUSJON

5.1 Dimensjonering

5.1.1 Dimensjonering av vegger og dekker

Resultatene fra dimensjonering i Calculatis gir i seg selv ikke en gjeldende vurdering for CLT-elementenes kapasitet. En av årsakene til dette er at horisontale vindkrefter ikke er medregnet. Grunnen til at vindlast ikke er medregnet er at det i et så komplekst bygg iht. geometrisk utforming, vil være altfor komplisert å finne fordelingen av horisontale krefter. Beregningen i Calculatis vil da kun gi en kapasitetskontroll for vertikale trykkrefter, der vindlast ikke er medregnet. Dette vil skape et avvik mellom resultater i Calculatis og FEM-Design. En annen årsak til avvik mellom de to programmene, er at FEM-Design tar hensyn til at CLT-dekker har bæring i to retninger. Dette vil virke gunstig for utnyttelsen til dekkene i FEM-Design. Ettersom det finnes betydelige avvik i måten beregningene har blitt gjort på er ikke resultatene sammenlignbare.

Vegger

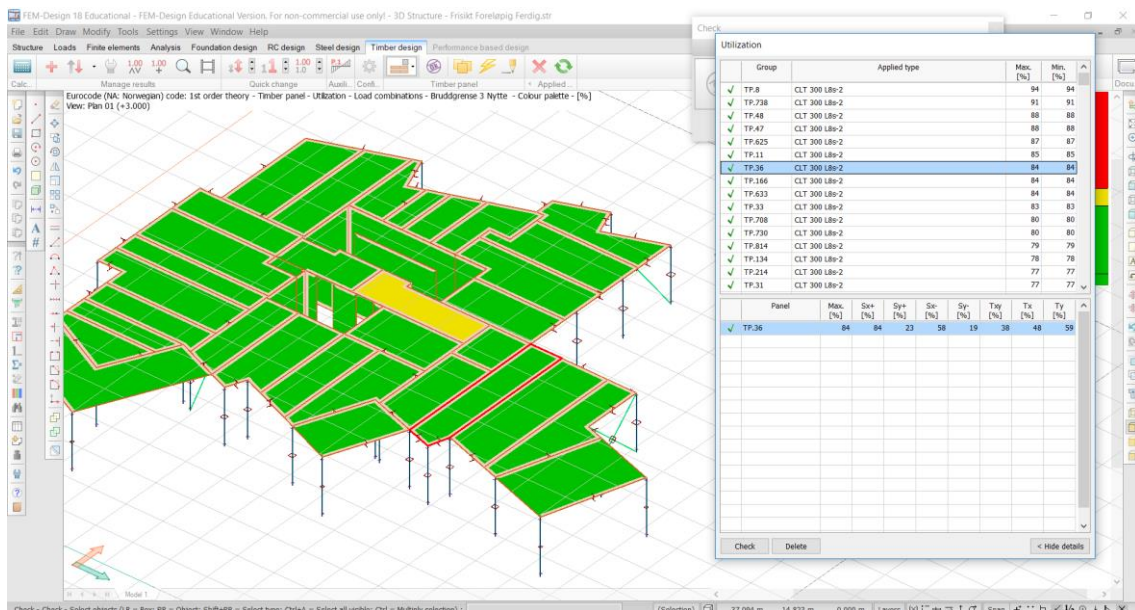
Som vi ser i resultat 4.2.1 for dimensjonering av vegger, har den mest utsatte veggen for vertikale trykkrefter bare en utnyttelsesgrad på 45 prosent i Calculatis. Den tilsvarende veggen ble i FEM-Design beregnet til å ha en utnyttelsesgrad på 78 prosent. Ettersom resultater i FEM-Design viser en mye høyere utnyttelsesgrad, tilsier det at dimensjonen på veggelementer ble bestemt i stor grad ut ifra horisontale vindkrefter. Dette avviket kommer hovedsakelig av at FEM-Design benytter et mer nøyaktig belastningsareal, samt at horisontale vindkrefter er medregnet.

Grunnet avgrensninger brukte vi lik dimensjon på alle vegger i bygget. Det er klart at veggelementene i en slik konstruksjon, som har et stort antall bærende vegger, vil få noe ulik utnyttelsesgrad. Noen av veggene ble maksimalt utnyttet mens noen ble lite utnyttet. Det var spesielt veggene i de nederste etasjene som fikk høyest utnyttelse pga. trykkrefter.

Dekker

I resultat 4.2.2 for dimensjonering av dekker i Calculatis, kan vi lese av at det mest belastede CLT-dekke hadde en utnyttelse på 66 prosent. Grunnen til at vi valgte ut dette dekket for kontroll var hovedsakelig at dekket har en spennvidde på 9 m. I FEM-Design fikk det samme

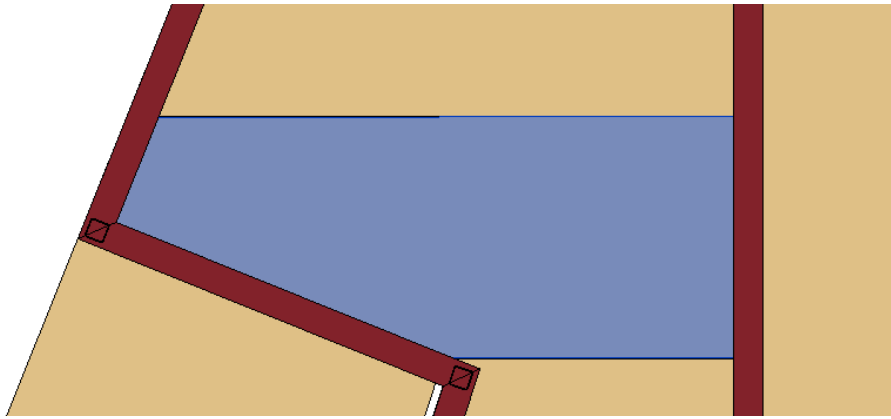
dekket en utnyttelse på 84 prosent, se figur 5.1-1. Det vil si et avvik på 18 prosent mellom resultatene i Calculatis og FEM-Design. Det er hovedsakelig to årsaker til dette.



Figur 5.1-1: Dekke spennvidde 9 m (markert i rødt)

En av grunnene til dette avviket oppstår, i likhet med avviket for veggelementene, er at vindlast ikke er medregnet i Calculatis. I FEM-Design blir det tatt hensyn til at vindlasten går gjennom dekkene før den blir ført inn i avstivende elementer.

Den geometriske utformingen til dekket er også en årsak til at FEM-Design har beregnet en større utnyttelse. I Calculatis fikk vi ingen mulighet til å forme dekket utover å kunne bestemme bredde, tykkelse og lengde. Dekket fikk derfor en rektangulær utforming i Calculatis. Ettersom konstruksjonen har en veldig kompleks utforming, må CLT-elementene i realiteten kappes og tilpasses byggets utforming. Dette vil i noen tilfeller føre til at bredden til dekket ved opplager kan bli så lav at det ikke tåler oppleggskraften. Dette vises i figur 5.1-2. I FEM-Design derimot, fikk vi forme dekket til den riktige geometriske utformingen. Her fikk vi erfare at dekkene ble utnyttet i mye større grad når det ble tatt hensyn til kapping.



Figur 5.1-2: Kapping av CLT-dekke (markert i blått)

Troverdighet

Resultater hentet fra FEM-Design mener vi har stor troverdighet, ettersom dette er et program som blir mye brukt i byggebransjen. Resultatene blir hentet fra en modell som vi har bygget opp med hjelp fra veileder i Multiconsult, som har god erfaring med programmet. FEM-Design vil også gi en mer nøyaktig beregning enn håndberegninger. Grunnen til dette er at belastningsareal, kraftfordelinger og andre viktige momenter i beregningene blir automatisk generert fra oppbygd modell. Risikoen for at resultater inneholder feil er i FEM-Design knyttet til feiltagelser ved input i programmet. Eksempel på disse feilene er feil ved oppbygging av modell, feil input av laster, feil definering av opplagertype.

Ved håndberegninger er feil gjerne knyttet opp mot matematiske feil, misforståelser av oppgaven som løses og andre menneskelige feil. Dette er feil som har større sannsynlighet for å oppstå ved en beregning, og er en risiko som blir redusert når man benytter dimensjoneringsprogrammet FEM-Design.

Usikkerheten knyttet til resultater fra FEM-Design kommer hovedsakelig fra vår manglende erfaring med programmet. Da vi først startet å benytte programmet hadde vi et møte med ekstern veileder der vi fikk en god forklaring på hvordan vi skulle benytte programmet.

Vi fikk kontinuerlig veiledning ved bruk av programmet, samt utdelt brukermanualer. Derfor føler vi oss trygge på at resultatene er troverdige.

Vi mener at resultatene fra Calculatis har stor troverdighet. Grunnen til dette er at programmet er skreddersydd for de CLT-elementene vi brukte i vår løsning, samtidig som at programmet kommer direkte fra leverandør av elementene. Usikkerheten knyttet til resultatene i Calculatis er mer knyttet opp mot håndberegningene som har gitt inputen for beregningen i programmet. For å redusere denne usikkerheten har vi gjennomført hyppige gjennomganger med vår

veileder ved NTNU Ålesund for å kontrollere arbeidet. I tillegg til dette har vi diskutert beregningene med hverandre, for å sørge for at arbeidet har blitt gjennomført riktig.

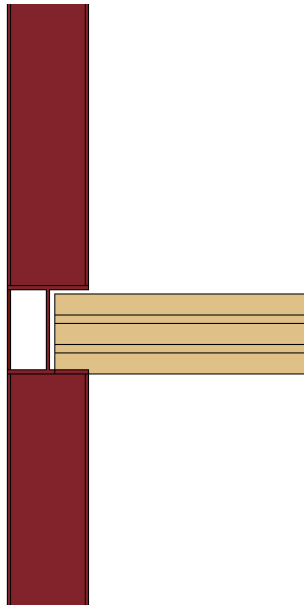
5.1.2 Dimensjonering av søyler og bjelker

For dimensjonering av stålsøyler- og bjelker ble resultatene i FEM-Design gjeldende, men vi utførte også håndberegningkontroll. Den tok vi ved kritiske punkt der søylen og bjelken var blant de mest utnyttede i bygget. En av årsakene til avvik i resultatene, mellom FEM-Design og håndberegningkontrollen, er vindkreftene. Her gjelder mye av det samme som for vegger og dekker, men spesielt søylen vil få enda større trykkraft i FEM-Design fra vindlasten pga. den ligger på fundamentnivå. Figur 5.1-4 viser vindlasten som belaster motsatt side slik at konstruksjonen blir trykt mot grunnen på siden hvor søylen er plassert. Beregningen for hånd vil kunne gi en kapasitetskontroll både for søylen og bjelken, som ikke kommer fra vindlast. Derfor blir det ikke samsvar mellom FEM-Design og håndberegningene, men det er fint for å ta en kontroll i forhold til å reflektere over avviket og for å forstå kraftfordelingen i konstruksjonen.

Dimensjonering av søyler

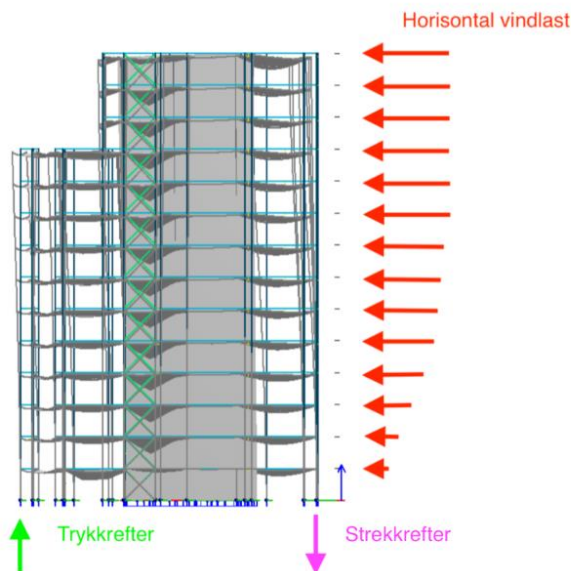
Som vi ser i tabell 4.4-1 viser håndberegningen utnyttelsesgrad 43 prosent, mens FEM-Design 71 prosent. En differanse på 28 prosent er i det meste laget og det sier oss at de horisontale vindkreftene er store. Samtidig vil belastningsarealet i FEM-Design være mer nøyaktig. Det er vanskelig å beregne nøyaktig belastningsareal både pga. symmetrien i bygget og toveis bæring i dekkene.

Vi valgte å benytte fire ulike søyletyper, da av typen HUP. Grunnen til dette var tips fra veileder i Multiconsult. Vi benyttet kvadratiske søyler, men et annet alternativ som ble sett i retrospektiv var rektangulære søyler, som vist i figur 5.1-3, der bredden var lik med bjelkebredden. Dette for enklere montering av stålplaten.



Figur 5.1-3: Alternativ løsning ved bruk av rektangulære søyler

Det ble benyttet mange stålsøyler pga. symmetrien og dette gjorde at mange av søylene ble overdimensjonerte. Dette er en bakdel med bæresystem i elementer, fordi de er avhengig av opplegg og da kreves det et visst antall søyler og bjelker. Forprosjektets modell i plasstøpt betong har ikke et så stort krav til antall søyler, men dimensjonene på de søylene som benyttes er oftest større. Dette gjenspeiles også i kostnadene for de to ulike bæresystemene.



Figur 5.1-4: Vindkrefter skaper trykk- og strekkrefter i grunnen

Dimensjonering av bjelker

Fra tabell 4.4-2 ser vi at utnyttelsesgraden fra håndberegningen er 66 prosent, mens bare 39 prosent i FEM-Design. En differanse på 27 prosent som kan forklares ved at belastningsarealet i håndberegningen ikke tar høyde for toveis bæring av dekket som gjør at punktlasten fra søylen, fra figur 4.4-2, blir større enn det som faktisk er tilfelle. FEM-Design har beregnet dette belastningsarealet nøyaktig mtp. toveis bæring og opplegg.

Et annet viktig punkt er at vindkraften ikke har like mye å si for bjelken i FEM-Design pga. dens plassering. Det er nærliggende vindkryss som tar opp mesteparten av vindkreftene. For håndberegningsskontroll av bjelken har vi sett bort fra vindkraft, fordi man ikke kan regne seg frem til en nøyaktig verdi. Dette har med byggets symmetri og at kraftfordelingen er vanskelig å forutse.

5.2 Fundament- og grunntrykk

En fordel som står forklart i teoretisk grunnlag 2.1.2 er at CLT har lav vekt og dette gir positive effekter på andre bærende bygningsdeler og fundamenter. Fundament og grunn blir ikke belastet med like stor trykkraft fra bæresystemet i stål og CLT. Samtidig kan man fordele trykket på flere søylefundament for bæresystemet i stål og CLT. Grunnen blir belastet i forhold til fundamentets utforming, så dette kan variere. Geometrien til fundamentet har dermed påvirkning på bæreevnen til grunnen. Grunnen belastes mer jo tykkere fundamentet er, derfor er det en fordel å fordele fundamenttrykket utover et større lastareal.

Netto bæreevne i grunnen blir bestemt av geoteknikerne, men som oftest settes denne til 500 kN/m². Vi har dimensjonert ut ifra denne verdien og vi ser da fra tabell 4.3-1 og 4.3-2 at overført grunntrykk er overholdt iht. bæreevnen.

5.3 Forbindelser og opplegg

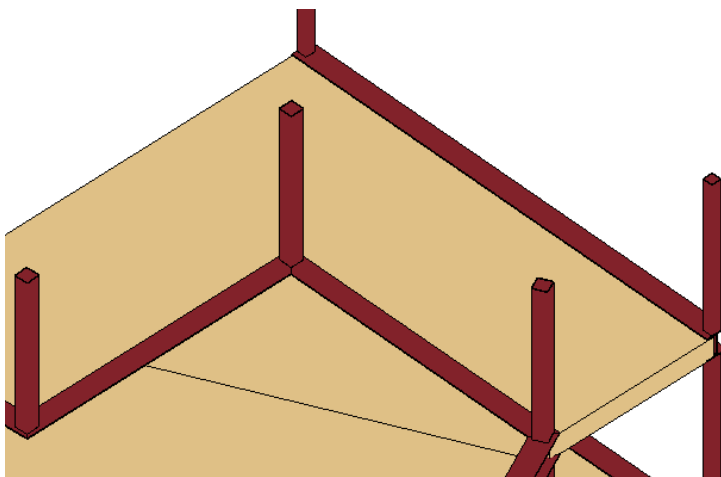
5.3.1 Etasjeskiller

Det er viktig å vise detaljer for opplegg og forbindelser for å forstå kraftfordelingen, i tillegg for at montørene vet hvordan elementene skal kobles sammen. Vi har begrenset oppgaven slik at å vurdere hvilke dimensjoner forbindelsene må ha, ikke er en del av oppgaven.

Prinsippløsningen, som figur 4.5-1 viser, fikk vi fra vår kontaktperson i Woodcon.

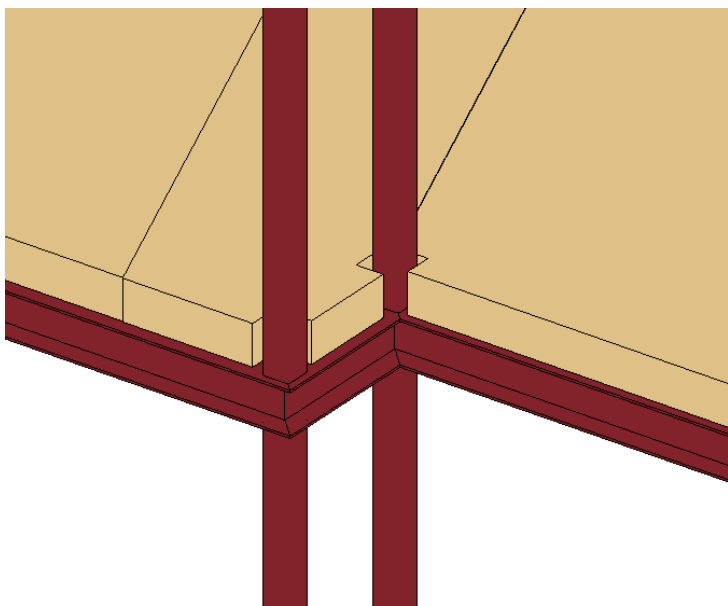
De har erfaring med prosjektering og bygging med CLT-elementer, så dette er en typisk løsning de benytter for forbindelser mellom elementer. Løsningen som blir valgt her er viktig for å ta opp skjærkrefter, men det kan være andre metoder som er bedre egnet for denne konstruksjonen.

Figur 4.5-2 viser forbindelsen mellom etasjeskiller og bjelke. Den valgte prinsippløsningen fikk vi også fra vår kontaktperson i Woodcon, mens detaljer om oppleggsbredde og minimumskrav dekkene har for klaring til øvre flens er godkjent av veileder i Multiconsult. Det kan likevel bli knapt ved montering av dekker pga. symmetrien, som gjør at noen av dekkene vil både få endeopplegg og sideopplegg. Figur 5.3.1 viser et slikt skråkappa dekke som har tre oppleggssider og da kreves det god planlegging fra montørene for å få kilt dekke på plass. Samtidig er CLT-element passende til en slik løsning pga. stor fleksibilitet ved formgivning og planløsning som det står i teori 2.1.2 om CLT.



Figur 5.3-1: Skråkappet dekke med tre oppleggssider

Vi valgte å legge dekkene på underflensen, inni profilet, for å unngå utsparing i dekkene ved opplegg. Da unngår vi at dekkene mister kapasitet og vil tåle en større oppleggskraft. Figur 5.3-2 viser hvordan en løsning kunne sett ut om dekkene hadde ligget på øvre flens på bjelken.



Figur 5.3-2: Alternativ løsning med dekker på øvre flens på bjelken

5.3.2 Dekkeforbindelser og skivevirkning

Det er viktig å presisere at figur 4.5-3 bare viser en prinsipløsning på hvordan man kan legge ut CLT-dekkene. Når man legger ut elementene må man ta hensyn til spennvidde, opplegg og krefter som virker på dekkene. Ved bruk av CLT-elementer, som fungerer som en toveis plate, vil man ha mest mulig sjans til å unytte dette iht. kraftfordelingen og skivevirkningen. Samtidig valgte vi CLT 300 L8s-2 som har vesentlig større bæreevne i den ene retningen. Dette ble gjort bevisst for at dekkene kunne tåle lengre spennvidder. Løsningen der elementene er koblet sammen ved leppeskjøter, figur 4.5-4, fikk vi med vår kontaktperson i Woodcon. Oppgaven har vi avgrenset slik at vi ikke sier noe om dimensjoner av skrueforbindelser eller avstand mellom skruer. Andre løsninger som kan være vanlig er not- og fjærløsning, men vi har konsentrert oss om leppeskjøt i vår løsning.

5.4 Prissammenligning av CLT og betong

Som vist i resultatdelen 4.6, prissammenligning av CLT og betong, blir løsningen i CLT betydelig dyrere enn løsningen i plasstøpt betong. Prisforskjellen vil bli i overkant av 23 mill. NOK. Hovedårsakene til dette er kostnadene knyttet til selve CLT-elementene, og den mengde stål de krever i en så kompleks og usymmetrisk konstruksjon.

CLT-dekkene koster nesten det dobbelte av de armerte betongdekkene, og CLT-veggene koster nesten tre ganger så mye som de armerte betongveggene dersom vi regner pris per kubikkmeter. Det eksisterer svært mange dekke- og veggelementer, og det er kostnaden knyttet til disse som gir det største utslaget mtp. totalkostnaden. Samlet verdi for vegger og dekker i CLT havnet i overkant av 28 mill. NOK, sammenlignet med samlet verdi for vegger og dekker i betong i underkant av 13 mill. NOK. Bare dette tatt i betraktning har vi en prisforskjell på omtrent 15 mill. NOK.

Kostnadene knyttet til stålelementer gir også et stort utslag på prisforskjellen. For bæresystemet i CLT ble stålbjelkene overdimensjonert. CLT-dekkene ble lagt mellom flensene i I-profiler. For å få til dette måtte vi velge en bjelketype som var høy nok til å få montert dekket på underflensen. Dette medførte at dimensjoner på bjelker ble bestemt av tykkelsen på dekket, og ikke bjelkens kapasitet. Avgrensninger i oppgaven, pga. tidsaspektet, førte til at vi ikke fikk sett på en spesielløsning for bjelkene, som f.eks. hatteprofil. Samtidig så krevde bæresystemet i CLT et stort antall bjelker og søyler. Det var nødvendig med kontinuerlige bjelker og søyler rundt hele byggets omkrets for å kunne støtte opp CLT-dekkene. Noen kritiske spennvidder for dekkene endte med at det ble støttet opp med ekstra bjelker og søyler.

Overdimensjonering av stålsøyler ble også en grunn til økt totalpris i vår løsning. Årsaken til dette var at antall søyler ble bestemt av bjelkenes plassering. Vi måtte plassere søyler i alle hjørner i byggets utforming, ved lange spennvidder, samt andre steder hvor bjelker trengte opplager. Dette kunne i noen tilfeller, spesielt i hjørner av bygget, føre til at søyler ble liggende svært nære hverandre og fikk dermed svært lav utnyttelse. Antallet søyler i løsningen av CLT ble av denne grunn veldig høyt. Normalt sett vil man da gå ned i søyledimensjoner, fordi kreftene blir fordelt på flere søyler, men i dette tilfellet var denne muligheten avgrenset. Søyledimensjoner ble her til en viss grad begrenset av tykkelsen til overliggende bjelker, som hadde en bredde på 300 mm. Vi valgte dermed å ikke bruke søyler med mindre bredde enn 150 mm, altså halvparten av bjelketykkelsen. Disse årsakene førte til at en del av våre søyler ble overdimensjonert, som videre påvirket totalkostnaden.

Troverdighet

Oppnådde resultater for prissammenligningen er en grov estimering ment for å oppdage betydelige prisforskjeller mellom de to løsningene. Prisen inkluderer både materialkostnader og arbeid for montering. Samtidig som prisen for materialkostnader er relativt sikker, ligger det en større usikkerhet knyttet til kostnadene for montering. Usikkerheten oppstår på grunnlag av at prisene inkluderer forhold som vi ikke kjenner til, som f. eks. transportlengde for materialene og nøyaktig arbeidsmengde som kreves for montering. En faktor som kan spille en rolle i forhold til prissammenligningens usikkerhet er erfaring. Prisene vi har brukt, har vi fått oppgitt direkte fra ingeniørbedrifter som har god erfaring i byggebransjen.

I motsetning til bygging i CLT, finnes det mye kunnskap og erfaringer fra bygging med plasstøpt betong i lokalområdet. Den brukte prisen for plasstøpt betong vil dermed ha en stor sikkerhet knyttet til arbeid for montering. Som forklart i teori 2.5.1 om økonomi, vil usikkerheten øke ved lav erfaring fra lignende prosjekter. Dette vil gjøre det mer sannsynlig at kostnader knyttet til prosjektering og arbeid på byggeplass vil overgå de planlagte kostnadene. Uforutsette kostnader har også større sannsynlighet for å oppstå ved manglende kunnskap og erfaring. Usikkerheten knyttet til montering av CLT-elementer vil dermed være avhengig av hvem som utfører arbeidet.

5.5 Besparelse på miljøet

Når man skal beregne et samlet CO₂-utslipp av en konstruksjon er livsløpsfaser et viktig begrep. Ifølge NS 3720:2018 skal man inkludere alle livsløpsfaser som er mulig å innhente og som er relevant til det man skal beregne. Her skal man også spesifisere hvilke livsløpsfaser man skal inkludere og ekskludere. Vi har i den sammenheng delt opp resultatene i to deler. Første del består av produktstadiet, mens andre del er en kombinasjon av produktstadiet og livsløpets sluttstadium. Årsaken til dette er hva som generelt er ønsket av kunder i en slik sammenheng. Vi fikk informasjon fra Multiconsult om at kunden ofte bare krever en beregning av produktstadiet. Produktstadiet er vist i vedlegg 7, s. 3. Denne samleposten inkluderer CO₂-utslipp knyttet til råvarer, transport og produksjon. Vårt resultat fra beregning av produktstadiet er vist i resultat 4.7.1.

Resultatet viser en differanse på over 1,5 mill. kg CO₂-ekvivalenter når vi tar for oss produktstadiet. Denne differansen er ekstremt stor og sier mye om materialenes egenskaper med hensyn på miljø. Resultatet viser at den samlede utslippsmengden av løsningen i CLT er på den negative siden. Dette vil si at bygget faktisk er miljøvennlig, og ikke miljøskadelig. Årsaken til dette er hovedsakelig trevirkets egenskaper, da spesielt karbonlagring, som forklart i teori 2.4.5. CO₂-utslippene knyttet til denne løsningen kommer bare fra stålet som er brukt. Ettersom denne løsningen krever et stort antall stålbjelker og stålsøyler, fikk vi et betydelig utslipp fra derfra. Resultatet viste da at om man bare regner med produktstadiet, så kommer CLT-løsningen mye bedre ut enn løsningen i betong.

Tabell 4.7-3 viser resultatene fra beregningen av kombinasjonen produktstadiet og livsløpets sluttstadium. I dette resultatet ser vi at CLT-løsningen kommer dårligere ut enn løsningen i betong. Hovedårsaken til dette er at trevirkets gode egenskap, nemlig karbonlagring, ikke blir gjeldende ettersom trevirket blir nedbrutt. Dersom vi bare sammenligner dekker og vegger av henholdsvis CLT og betong, kommer likevel CLT bedre ut. Dette vil si at materialutslippene knyttet til CLT, sett bort fra karbonlagring, er lavere enn utslippene fra betong. En annen grunn til at løsningen i CLT kommer dårligst ut er utslippene fra stål. Som man ser i tabell 4.7-1, gir stål som er null prosent resirkulert det største CO₂-avtrykket. Det er viktig å presisere at dette er gitt ved enheten kg CO₂-ekv per kubikkmeter, ettersom stålelementer vanligvis har relativt lavt volum. Dette er også et viktig punkt angående vegg- og dekkeelementer, ettersom CLT krever en større tykkelse enn betong for å oppnå lik bæreevne.

I beregningen vår valgte vi å benytte tall for null prosent resirkulert stål. Dette vil si at materialet er helt nytt og vil dermed ha et større utslipp enn resirkulerte ståltyper. Dersom vi hadde benyttet 100 prosent resirkulert stål ville CO₂-avtrykkene knyttet til stål blitt redusert opptil fem ganger.

Spørsmålet om CLT-løsningen faktisk er mer miljøvennlig enn løsningen i betong har derfor et splittet svar. Dette bestemmes av hva man gjør med materialet etter byggets levetid. Dersom CLT-elementene blir fullstendig nedbrutt ved riving vil frigjøring av CO₂ gjøre at denne løsningen totalt sett blir mer miljøskadelig. Ettersom trevirke er et bærekraftig materiale, har det fordelen av at det kan bli resirkulert. På denne måten unngår man frigjøring av karbonlagringen i CLT-elementene. Man vil dermed sitte igjen men en konstruksjon som faktisk er miljøvennlig.

Troverdighet

I likhet med estimering av pris, er også dette en grov estimering ment for å finne betydelige forskjeller i CO₂-avtrykk mellom bæresystemet i CLT kontra betong. Tallene vi har benyttet kommer fra Multiconsults miljøavdeling som driver med slike beregninger daglig. Tallene som er benyttet mener vi derfor kommer fra en pålitelig kilde. Utrekningene blir da det eneste usikkerhetsmomentet for vår beregning. På bakgrunn av at vi fikk god veiledning fra Multiconsult angående beregninger for utslipp, mener vi at våre beregninger av CO₂-avtrykk er troverdig.

5.6 Erfaringer

Gjennom perioden vi har arbeidet med bacheloroppgaven har vi gjort oss nye erfaringer, både ved bruk av dataprogram og kunnskap om ulike bæresystemer. Vi har opparbeidet et bredt erfaringsgrunnlag mtp. fordeler og ulemper med bæresystem i stål og betong, sammenlignet med stål og CLT. Fra resultatene i denne rapporten vil et slikt bygg bli dyrere i et bæresystem av stål og CLT, til tross for at man sparer kostnader med hensyn på en raskere byggetid. Analyse- og dimensjoneringsprogrammet FEM-Design har vært tidkrevende, men vi sitter igjen med stort utbytte. Programmet er et godt hjelpemiddel for å vise samvirket mellom kreftene som virker inn på konstruksjonen. Når man skal kombinere en modell i Revit og FEM-Design bør man starte i FEM-Design for å slippe store endringer i Revit ettersom dette bestemmes fra dimensjoneringen.

Vi har fått arbeidet med ulike aktører innenfor bransjen og tilegnet oss mye kunnskap fra fagpersoner. Denne oppgaven var stor med tanke på omfang og tidsaspektet. Den tar utgangspunkt i flere temaer, som gjør at vi får et bredt innblikk i forskjellene mellom bæresystemene. En anbefaling er å fordype seg i et av dem, f.eks. miljøaspektet, for å få et enda mer holdbart resultat.

6 KONKLUSJON

I denne oppgaven har vi tatt for oss flere problemstillinger med den hensikt å undersøke mulighetene for å bygge opp råbygget på 14. etasjer i CLT, ved prosjektet Fri Sikt Volsdalsberga. Etter arbeidet med denne oppgaven, har vi på bakgrunn av innhentet informasjon og gjennomførte vurderinger, kommet frem til svar og løsninger på problemstillinger. Dette vil omtales før det til slutt gis en konklusjon på hovedproblemstillingen, nemlig om bygget kan bygges mer klimavennlig i CLT uten økning av kostnader.

Ved bruk av FEM-Design har vi på en tilfredsstillende måte analysert og dimensjonert bæresystemet i stål og CLT. Blant annet har vi sett på betydningen av vindkrefter og trykkrefter nedover i konstruksjonen. Vegger, dekker, bjelker og søyler er dimensjonert etter gjeldende standarder og anbefalinger fra fagpersoner mtp. de mulighetene CLT gir. Etter å ha brukt Calculatis, som er spesialisert til CLT, har vi kunnet kontrollere ulike konstruksjonsdeler. Samtidig er fundament og grunn dimensjonert i FEM-Design og BTSNITT for å tåle belastninger fra konstruksjonen.

Etter å ha sammenlignet prisene på de to forskjellige bæresystemene, konkluderte vi med at prisen for et råbygg i betong er mye rimeligere enn et råbygg i CLT.

Når man vurderer kombinasjonen produkt- og livsløpets sluttstadium vil råbygget i CLT komme dårligere ut enn råbygget i betong iht. beregningene av CO₂-utslipp. Dersom man bare legger vekt på produktstadiet og ser bort i fra livsløpet sluttstudium vil råbygget i CLT være svært miljøvennlig.

Anbefalinger

FEM-Design er til å anbefale som analyse- og dimensjoneringsprogram, fordi dette gir et helhetlig bilde av hvordan en kompleks konstruksjon fungerer om det statiske systemet ikke er lett definert. Den mest tidskrevende delen her er å dimensjonere de enkelte konstruksjonselementene, spesielt for de horisontale kreftene som opptrer med stor kraftpåvirkning.

I oppgavens hovedproblemstilling stilte vi spørsmålet om bygget kan bygges mer klimavennlig i CLT uten økning av kostnader. For å gi et inntrykk av dette har det blitt gjort en grov estimering av kostnaden, samt en sammenligning av CO₂-utslipp av råbygget for de to

ulike bæresystemene. Ut ifra denne sammenligningen vil vi anse det som lite gunstig å bygge opp råbygget i en kombinasjon av stål og CLT. Man får besparelse av CO₂-utslipp, men prisen å betale for å få dette gjennomført er for høy i dette tilfellet. Vi vil anbefale at man først ser på en løsning i plastøpt betong for denne konstruksjonen. Om man vurderer en CLT-løsning, anbefaler vi å velge en løsning av utelukkende trevirke, slik som et søyle- og bjelkesystem i limtre kombinert med dekker og vegger i CLT.

7 REFERANSER

- Biørnstad, L. (2016, desember 8). *Kan vi bruke betong med god klimasamvittighet?* Hentet 11. april 2019, fra <https://forskning.no/bygningsmaterialer-klima/kan-vi-bruke-betong-med-god-klimasamvittighet/379248>
- Byggemiljø. (2007, februar 14). *byggenaeringens_miljosekretariat2.pdf*. Hentet 2. mai 2019, fra https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/md/vedlegg/forurensing/et-klimavennlig-norge/byggenaeringens_miljosekretariat2.pdf
- Christensen, N. (2017). legering. I *Store norske leksikon*. Hentet fra <http://snl.no/legering>
- Christensen, N., & Almar-Næss, A. (2018). stål. I *Store norske leksikon*. Hentet fra <http://snl.no/st%C3%A5l>
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Direktoratet for byggkvalitet*. Hentet 6. februar 2019, fra <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/12/ii/12-7/>
- Eie, J. (2016). *Trekonstruksjoner*. NKI Forlaget AS.
- Eivind Heimdal. (2018, juli 17). *Plasstøpt betong*. Hentet 8. februar 2019, fra Tu.no website: <https://www.tu.no/artikler/vaer-tro-mot-ideen-og-strategien-du-har/442113>
- Glasø, G. (2011). *Fleretasjes trehus* [Pdf]. Hentet 19. februar 2019, fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/32-Fleretasjes-trehus.pdf>
- Haraldsen, H., & Pedersen, B. (2018). karbondioksid. I *Store norske leksikon*. Hentet fra <http://snl.no/karbondioksid>
- Jacobsen, T. (2014). *Kompendium TBA4130 Produksjonsteknikk i BA*. 309.
- Junker, E. (2018). Byggteknisk forskrift (TEK). I *Store norske leksikon*. Hentet fra [http://snl.no/Byggteknisk_forskrift_\(TEK\)](http://snl.no/Byggteknisk_forskrift_(TEK))
- Klima- og miljødepartementet. (2016, juni 21). *Norge har ratifisert Parisavtalen* [Nyhet]. Hentet 2. mai 2019, fra Regjeringen.no website: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-har-ratifisert-parisavtalen/id2505365/>

- Klimakvoter [Redaksjonellartikkel]. (2017, januar 11). Hentet 11. april 2019, fra *Regjeringen.no* website: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimakvoter/id2076655/>
- Larsen, P. K. (2015). *Dimensjonering av stålkonstruksjoner* (2. utg.). Fagbokforlaget.
- Lohne, O. (2018). Duktilitet. I *Store norske leksikon*. Hentet fra <http://snl.no/duktilitet>
- Myhre, K. (2015). *Norsk Stålforbund har -har promotert bruken av stål siden 1993*. Hentet fra https://www.ntnu.no/documents/1264930397/1265429912/AsplanViak++1.+okt+2015_st%C3%A5l+og+milj%C3%B8.pdf/691df733-9edd-4654-afa0-d84a75f5d70d
- Norsk Standard. (2017). *Oversikt Eurokoder* | standard.no. Hentet 11. april 2019, fra <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/samlet-oversikt-over-eurokodene/>
- Norsk Standard. (2019). *Eurokoder*. Hentet 15. mai 2019, fra <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/>
- Olerud, K. (2018). CO2-utslipp. I *Store norske leksikon*. Hentet fra <http://snl.no/CO2-utslipp>
- Project Management Skills. (2016). *Project Cost Estimating Tools and Techniques*. Hentet 22. februar 2019, fra <https://www.project-management-skills.com/project-cost-estimating.html>
- Rørvik, T. (2010, Desember). *Konstruksjonssikkerhet og belastning*.
- Rørvik, T. (2011). *LASTKOMPENDIUM*. Hentet 13. februar 2019, fra https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-450156-dt-content-rid-17255786_1/courses/194_IB303812_1_2018_H_1/2011-09-08%20LASTKOMPENDIUM%20.pdf
- SINTEF Byggeforsk. (2001). 520.205 *Massive treelementer*. Typer og bruksområder - Byggeforskserien. Hentet 1. februar 2019, fra

- https://www.byggforsk.no/dokument/3009/massive_treelementer_typer_og_bruksomr_aader
- SINTEF Byggforsk. (2005). 541.201 Påstøp og golvpuss på golv - *Byggforskserien*. Hentet 19. februar 2019, fra https://www.byggforsk.no/dokument/458/paastoep_og_golvpuss_paa_golv
- Solvik, F., Falkanger, T., & Reusch, M. (2017). plan- og bygningsloven. I *Store norske leksikon*. Hentet fra http://snl.no/plan-_og_bygningsloven
- Statistisk Sentralbyrå. (2018). Statistisk sentralbyrå. Hentet 11. april 2019, fra ssb.no website: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-endelige/2018-12-11>
- Stora Enso Wood Products GmbH. (2015, mars). Stora-Enso_CLT-Teknisk-brosjyre [Pdf]. Hentet 1. februar 2019, fra http://woodcon.no/wp-content/uploads/2018/03/Stora-Enso_CLT-Teknisk-brosjyre.pdf
- Store norske leksikon. (2014). Plasstøpt betong. I *Store norske leksikon*. Hentet fra http://snl.no/plasst%C3%B8pt_betong
- Store norske leksikon. (2018). Norsk Standard. Hentet 11. april 2019, fra https://snl.no/Norsk_Standard
- Sørensen, S. I. (2013). *Betongkonstruksjoner*.
- Torp, O., & Klakegg, O. J. (2016). Challenges in Cost Estimation under Uncertainty—A Case Study of the Decommissioning of Barsebäck Nuclear Power Plant. *Administrative Sciences*, 6(4), 14. <https://doi.org/10.3390/admsci6040014>
- Aarstad, J., Glasø, G., & Bunkholt, A. (2011, januar 8). Fokus på tre [Pdf]. Hentet 1. februar 2019, fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/20-Massivtre.pdf>
- Aase, H. J. (2016). *Massivtre, klimavennlige og konkurransedyktige byggkonstruksjoner*. Hentet fra

<https://gammel.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMTE/Landbruk%20og%20mat/Skogbruk/Massivtreinfo%20Dyrskun%202016.pdf>

VEDLEGG

1. Avtale mellom bedrift, student og NTNU Ålesund
2. Oppstartsmøte
3. Fremdriftsrapporter
4. Timelister
5. Forprosjektrapport
6. Mengdeoversikt av materialer
7. Beregninger for CO₂-avtrykk
8. Materialverdier for CLT-elementer
9. Lastgrupper og lastkombinasjoner i FEM-Design
10. Dimensjonering av konstruksjon i FEM-Design
11. Beregning av vindlast
12. Beregning av snølast
13. Beregning av søylefundament
14. Beregning av veggfundament
15. Dimensjonering av vegg i Calculatis
16. Dimensjonering av dekke i Calculatis
17. Statistiske tabeller og diagram for knekking
18. Håndberegningsskontroll av søyle
19. Håndberegningsskontroll av bjelke
20. Kontroll av etasjehøyde
21. Håndberegning av laster
22. Tegninger