

Sigvard Bratlie
Flemming Evensen
Emil Elias Hanken

Erstatning av bæresystem

Rygge Sportshall

Mai 2020

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk

Bacheloroppgave

2020



Sigvard Bratlie
Flemming Evensen
Emil Elias Hanken

Erstatning av bæresystem

Rygge Sportshall

Bacheloroppgave
Mai 2020

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden



Institutt for vareproduksjon
og byggingteknikk

Oppgavens tittel:	Dato: 19.05.2020		
Erstatning av bæresystem	Antall sider: 128		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Navn: Emil Elias Hanken Sigvard Bratlie Flemming Evensen			
Veileder: Fred Johansen			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Roger Johannessen			

Sammendrag:

De fleste industri- og sportshaller i Norge i dag blir satt opp med et bæresystem i stål. Vi ønsker i denne oppgaven å avgjøre hvilken miljøvennlig effekt det ville gitt og byttet ut bæresystemet i stål med limtre, og se i hvilken grad det lar seg gjøre med tanke på det arkitektoniske uttrykket og bruksverdi.


Til å begynne med skal vi dimensjonere hele hallen i limtre så langt det lar seg gjøre. Deretter skal vi regne ut antall kubikk og kilogram med limtre og sammenligne dette resultatet av stål. Ut ifra denne informasjonen skal vi avgjøre om endringen i utslipp vil utgjøre en nevneverdig effekt.

Vi har kommet frem til resultatet at det er mulig å bytte hele bæresystemet fra stål til limtre med hensyn på konstruksjonsikkerhet og utførelse. Om den miljømessige gevinsten ved denne endringen er nevneverdig eller ikke kommer an på hvilket perspektiv det sees i fra. I et nasjonalt perspektiv kan gi et betydelig bidrag til reduksjonen av Norges utslipp hvis denne praksisen hadde blitt overført til alle lignende stålhaller rundt om i landet.

Konklusjonen vår er at den miljømessige gevinsten har potensiell stor effekt.

Stikkord:

Konstruksjonssikkerhet
Limtre
Stål



Sigvard Bratlie

19.05.2020, Hamar



Flemming Evensen

19.05.2020, Hamar



Emil Elias Hanken

19.05.2020, Hamar

Abstract

Most of today's industrial buildings in Norway are built with a steel framework and sandwich elements as facade. There appears to be a lot of speculation as to whether changing out the main traditional building materials with greener and more environmentally friendly materials would actually make a significant difference with regards to CO₂-emissions.

Objective

We wish, in this assignment, to decide what environmental consequences a change as described above will constitute, and to which extent we are able to replace the steel framework without reducing the building's architectural expression or value in practice. We will also consider to what degree this is possible with respect to transport and installation.

Method

We will start off with calculating the structural system in glued laminated timber as far as it goes. Then we will decide what dimensions the trusses, beams and columns will have, and from this information calculate the volume of wood compared to the steel and consider the CO₂-footprint from these two options.

Result

We have come to the result that it is possible to replace the steel framework with glued laminated timber without affecting the architectural expression or value in use. Whether the change in CO₂-emissions would be significant or not depends on what perspective you have. In our analysis we concluded that in comparison with Norway's annual CO₂-emissions it could have a significant positive impact if the majority of industrial buildings were built as described. In that case it would make out about 1 % of Norway's total annual CO₂-emissions.

Forord

Denne bacheloroppgaven er den siste delen av en studie som har vart i tre år. Da vi startet på NTNU, hadde vi kun praktisk erfaring fra bygge bransjen, uten noen form for bakgrunnskunnskap om konstruksjonssikkerhet og dimensjonering. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Pro-Consult Innlandet AS. Vi har fått bistand fra dyktige rådgivere innenfor faget og vil derfor rette en takk til alle ansatte som har hjulpet oss og har valgt å vise interesse for oppgaven vår. I løpet av studietiden har alle tre bidragsytere til denne oppgaven fått jobb hos enten konsulenter eller entreprenører, med arbeid innenfor fagfeltet. Vi har med andre ord hatt muligheten til å se og lære av dyktige medarbeidere fra de respektive selskapene. Dette har uten tvil hjulpet oss mye. Ekstra spennende er det også å kunne skrive om et relativt likt tema som man både studerer og arbeider med.

Å skrive denne oppgaven har vært interessant og lærerikt. Det at man har muligheten til å fordype seg grundig innenfor en enkelt problemstilling har vært en motivator gjennom hele prosjektet. Samtidig har det vært utfordrende å starte helt fra bunn med å beregne og dimensjonere limtre, for deretter å regne dette over i et miljøregnskap. Det har ikke vært uten utfordringer, og det er flere medstudenter og kollegaer som har støttet oss gjennom denne krevende, men spennende oppgaven. Mye av spørsmålet er grunnet i om bransjen er innstilt på en endring, om det er tilrettelagt for det og om det i det heletatt lar seg gjøre.

Vi vil også rette en spesiell takk til Roger Johannessen i Pro-Consult Innlandet AS som gjennom flere fagsamtaler har vært en stor inspirasjonskilde for hvilket tema vi har valgt. I tillegg vil vi takke Fred Johansen som har vært vår veileder, og som har på en god måte hjulpet oss med å legge føringer for hvilken retning oppgaven skal ta videre.

Innholdsfortegnelse

Abstract	iii
Forord	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste.....	vii
1 Innledning.....	ix
2 Problemstilling og forutsetninger.....	1
3 Metode og teori	2
Metode.....	2
3.1.1 Terminologi.....	2
3.1.2 Hvordan løse oppgaven.....	3
3.1.3 Tegningsgrunnlag.....	4
3.1.4 Metode – Dimensjonering.....	7
3.1.5 Metode – Miljø.....	7
3.1.6 Metode – Modellering & visualisering	8
Teori	9
3.1.7 Limtre	9
3.1.8 Miljø	12
3.1.9 Programmer/verktøy.....	16
4 Beregningsgrunnlag	19
Laster og kombinasjoner	19
4.1.1 Egenlaster	19
4.1.2 Snølaster	20
4.1.3 Vindlaster	21
Limtre	25
4.1.4 Generelt	25
4.1.5 Randbjelke.....	26
4.1.6 Søyler	29
4.1.7 Fagverk.....	32
Miljø	37
4.1.8 Stål.....	37

Innledning

4.1.9	Limtre	38
5	Resultat.....	40
	Limtre.....	40
5.1.1	Fagverk.....	40
5.1.2	Søyler	41
5.1.3	Randbjelke og tverrbjelke	41
	Miljø.....	42
5.1.4	Stål.....	42
5.1.5	Limtre	46
5.1.6	Oppsummering.....	46
6	Analyse.....	47
6.1.1	Limtre	47
6.1.2	Miljø.....	48
7	Konklusjon	49
	Litteraturliste	50
8	Vedlegg	52
	Grunnlag og forutsetninger	52
	Fagverk.....	56
8.1.1	Staver.....	56
8.1.2	Overgurt	83
8.1.3	Undergurt	93
	Søyler	100
8.1.4	Hovedsøylen.....	100
8.1.5	Gavlsøylen.....	108
8.1.6	Hjørnesøylen	115
	Bjelker	122
8.1.7	Randbjelken.....	122

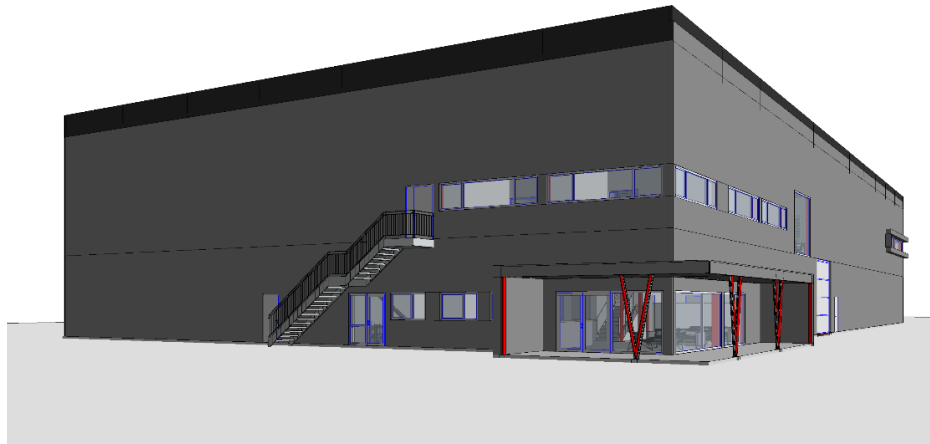
Figurliste

Figur 1 – 3D-modell.....	ix
Figur 2 – Lokasjon	ix
Figur 3 – Lokasjon	ix
Figur 4 – Eksisterende bæresystem.....	4
Figur 5 – Plan 1	4
Figur 6 – Fasade Vest.....	4
Figur 7 – Fasade Øst.....	4
Figur 8 – Fasade Sør.....	5
Figur 9 – Fasada Nord.....	5
Figur 10 – Snittet på kortsiden.....	5
Figur 11 – Snittet på langsiden	6
Figur 12 – Illustrasjon av lameller	10
Figur 13 – Utvikling i global temperatur	13
Figur 14 - Karbonbudsjett	14
Figur 15 – Telegram dashboard	16
Figur 16 – Dropbox dashboard.....	17
Figur 17 – Revit dashboard	17
Figur 18 – Bluebeam Dashboard.....	18
Figur 19 – Solibri dashboard	18
Figur 21 – Tabell NA. 2.3 Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet	19
Figur 20 – NA. 901 Klimaklasser.....	19
Figur 22 – Tabell 5.2: Formfaktorer for snølast.....	21
Figur 23 – Tabell NA.A1.2(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B)	22
Figur 24 – Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestanighet.....	25
Figur 25 – Randbjelke illustrasjon	26
Figur 26 – Søyle illustrasjon	29
Figur 27 – Søyle illustrasjon	29
Figur 28 – Overgurt illustrasjon.....	32
Figur 29 – Overgurt illustrasjon.....	32
Figur 30 – Undergurt illustrasjon	33
Figur 31 – Undergurt illustrasjon	33
Figur 32 – Trykkstav illustrasjon.....	35
Figur 33 – Trykkstav illustrasjon.....	35
Figur 34 – Strekkstav illustrasjon	36
Figur 35 – Strekkstav illustrasjon	36
Figur 36 – Materialdensitet.....	38
Figur 37 – Systemgrense vugge-til-grav.....	39
Figur 38 - Miljøpåvirkning.....	39
Figur 39 – Dimensjoner for fagverk.....	40
Figur 40 – Focusmodell	40
Figur 41 – Dimensjoner på søyler.....	41
Figur 42 – Bjelke dimensjoner	41
Figur 43 – Energikilde.....	42
Figur 44 – Tre største energikilder	43
Figur 45 – Energiklasse	43

Innledning

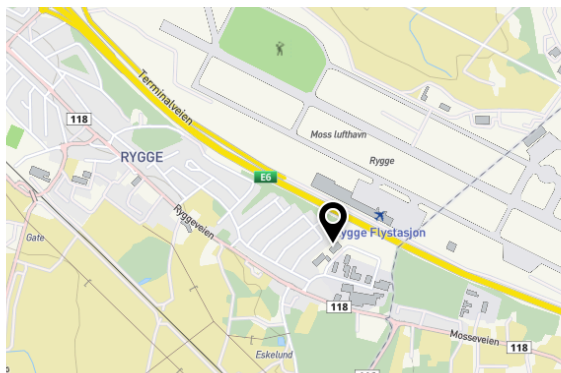
Figur 46 – Utslipp til luft.....	44
Figur 47 – Utslipp til luft.....	44
Figur 48 – Utslipp til luft klassifisert.....	44
Figur 49 – Limtre mengde	46
Figur 50 – Tabell NA.901 Klimaklasser.....	52
Figur 51 – Tabell 3.1 – Verider av K_{mod}	53
Figur 52 – Tabell NA. 2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet.....	53
Figur 53 – Tabell 3.2 – Verdier av K_{def} for tre og trebaserte materialer.....	54
Figur 54 – Stav 3 & 18.....	59
Figur 55 – Stav 4 & 17.....	62
Figur 56 – Stav 5 & 16.....	65
Figur 57 – Stav 6 & 15.....	68
Figur 58 – Stav 7 & 14.....	71
Figur 59 – Stav 8 & 13.....	74
Figur 60 – Stav 9 & 12.....	77
Figur 61 – Stav 10 & 11.....	80
Figur 62 – Overgurt.....	86
Figur 63 – Table 3.1 – Design charrig rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood paneling and woodbased panels .	94
Figur 64 – Determination of K_0 for unprotected surfaces with t in minutes.....	94
Figur 65 – Undergurt.....	96
Figur 66 – Hovedsøyle.....	102
Figur 67 – Gavlsøyle.....	110
Figur 68 – Hjørnesøyle.....	117
Figur 69 – Tabell 6.1 Forholdet mellom effektiv lengde og spennvidde.....	122
Figur 70 – Randbjelke.....	124

1 Innledning

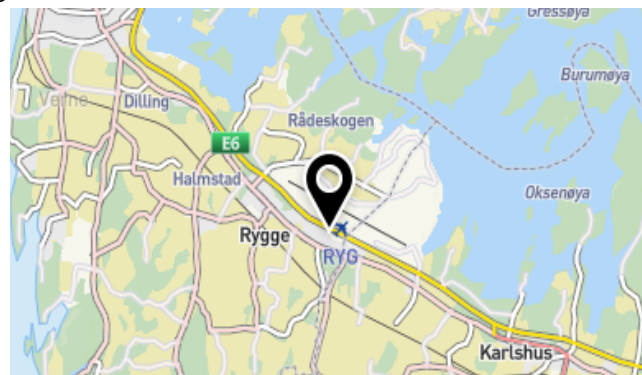


Figur 1 – 3D-modell ((Privat, 2020)

Sprett trampolinepark er en del av en større aktivitetspark i Rygge i Østfold (Sprett aktivitetspark, 2019). Hallen huser i dag et bredt spekter med trampoliner og skumbassenger som barn og unge kan ha glede av. Lokasjonen er strategisk plassert nær E6 og Rygge flyplass for at tilreisende lett kan benytte seg av tilbudet.



Figur 2 – Lokasjon (Google maps, 2020)



Figur 3 – Lokasjon (Google maps, 2020)

Parken ble prosjektert og satt opp i løpet av 2017/2018 og er i dag i full drift. Som de fleste andre haller av samme type ble den prosjektert med et bæresystem i stål.

Med dette som utgangspunkt skal vi se på mulighetene og konsekvensene for et bæresystem i tre. Vi avgrensner oppgaven til å se på alt over grunnflaten på bygget, med hovedfokus på bæresystemet.

Vi har delt inn oppgavene i tre hoveddeler; første del består i problemstilling, metode, teori og beregningsgrunnlag. Del to består i å presentere resultatene, og del tre består i analyse og konklusjon.

2 Problemstilling og forutsetninger

Informasjon om bygget:

Bredde - 61,6 meter

Dybde – 34,5 meter

Høyde – 11,15 meter (*8,8 meter innvendig høyde*)

BYA – 2125,2 m²

Vi har formulert vår problemstilling følgende:

I hvilken grad er det mulig å erstatte det eksisterende bæresystemet, som i dag er i stål, med limtre, og hvilken miljømessig gevinst vil dette utgjøre?

For å kunne besvare vår problemstilling korrekt er vi nødt til å gjøre visse avgrensinger. På den konstruksjonsmessige delen skal vi utelukkende se på konstruksjonsikkerhet og utførelse, med hovedvekt på konstruksjonsikkerhet. Vi kommer heller ikke til å gå inn på utenpåliggende bygningsdeler utenfor bærekonstruksjonen, samt vindavstivningssystemer.

På miljødelen skal vi vurdere begge alternativer, både stål og limtre, men med hovedvekt på stålproduksjonen. Dette er begrunnet med at det er i stålproduksjonen man har størst påvirkningskraft med tanke miljø og energibruk.

Det økonomiske aspektet er i mange tilfeller den skjebnesvangre faktoren i valget om å bygge i limtre eller stål. Vi har valgt å se bort i fra dette aspektet i vår oppgave på grunn av at vi har for lite kunnskap og bakgrunns erfaring til å kunne gi en rett vurdering på de økonomiske forhold involvert.

3 Metode og teori

Metode

3.1.1 Terminologi

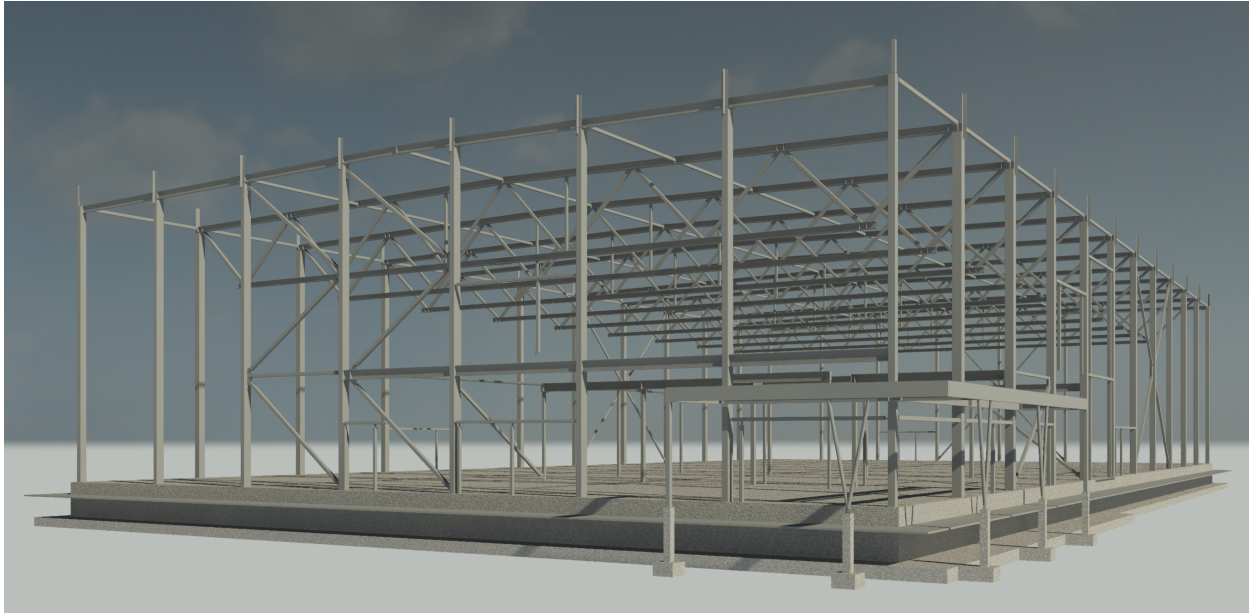
σ_m	Bøyesspenning
σ_c	Trykkspenning
σ_t	Strekkspenning
τ	Skjærspenning
γ_m	Partialfaktor
δ	Nedbøyning
μ	Formfaktor
$K_{c,i}$	Reduksjonsfaktor pga. knekking
K_{sys}	Systemfaktor
K_{def}	Deformasjonsfaktor
K_m	Spenningskorrigerende faktor
K_{mod}	Fasthetsfaktor
K_w	Vindlastfaktor
K_{cr}	Korreksjonsfaktor for effektiv bredde
K_{crit}	Reduksjonsfaktor pga. Vipping.

I	Andre arealmoment
$E_{0,mean}$	Elastitesmodul (middelverdi)
$E_{0,05}$	Elastitesmodul (5% kvartil)
$G_{0,mean}$	Skjærmodul (middelverdi)
$G_{0,05}$	Skjærmodul (5% kvartil)

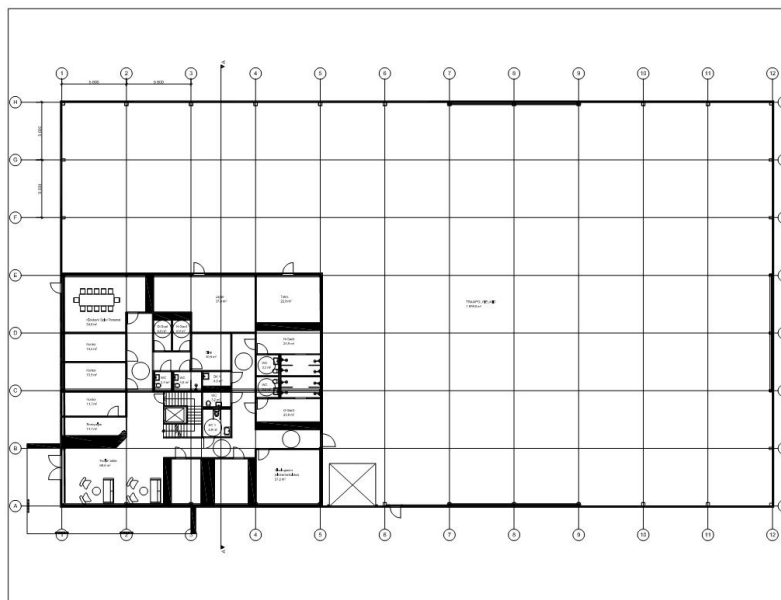
3.1.2 Hvordan løse oppgaven

Vi kommer til å løse denne oppgaven ved å legge vekt på ryddighet. Det å være gjennomtenkt og grundig er grunnprinsipper som vi vil bygge på for å besvare problemstillingen. Vi ønsker å gå gjennom steg for steg fra starten, hvor vi finner limtre-dimensjonene til det aktuelle bygget, ved blant annet å bruke tegningsgrunnlaget som er laget fra før, helt til vi sitter igjen med et komplett bilde av eventuelle CO₂-besparelser. Rent praktisk, så vil vi ta utgangspunkt i de tegningene som allerede er laget fra da bygningen ble prosjektert og tegnet i konstruksjonsstål, og bruke de samme målene på bygningen. Så vil vi bruke standardene NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 for vind, NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 for snø og NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 for tre. Dette gjør vi for å finne ut hvilke dimensjoner limtresøylene, -bjelkene og -fagverkene må ha. Deretter ønsker vi å finne CO₂-avtrykket disse limtreelementene gir. På samme måte tar vi de eksisterende tegningene av bæresystemet i konstruksjonsstål, og finner ut hvor mange kilo stål som går med til dette, for så å regne ut hvor mange CO₂-ekvivalenter det vil gi. Så vil vi sammenligne disse resultatene ut ifra et miljømessig ståsted, og finne ut hvilken miljøgevinst dette byttet av bæresystemet gir. Deretter vil vi forsøke å se det større bildet, med hva slags effekt det ville fått dersom det ville skjedd en større omprioritering med limtre som bæresystemet på liknende prosjekter på landsbasis.

3.1.3 Tegningsgrunnlag



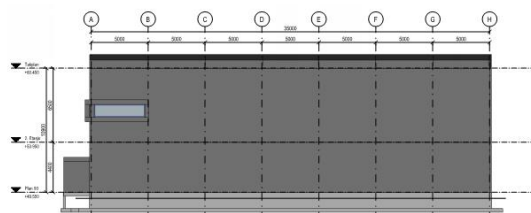
Figur 4 – Eksisterende bæresystem (Privat, 2020)



Figur 5 – Plan 1 (Privat, 2020)

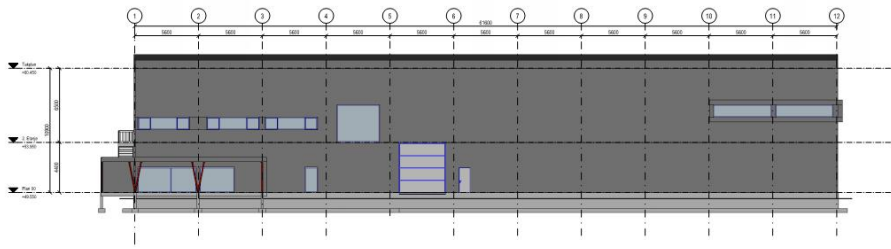


Figur 6 – Fasade Vest (Privat, 2020)

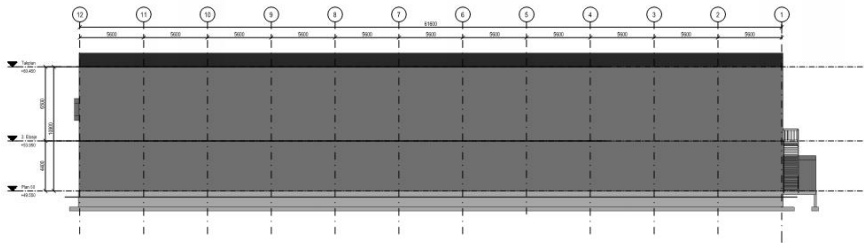


Figur 7 – Fasade Øst (Privat, 2020)

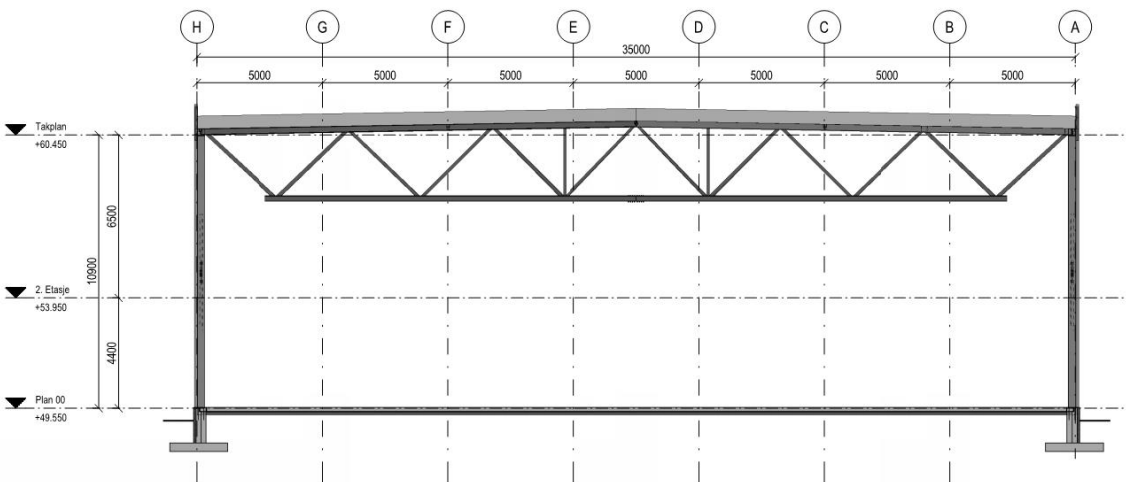
Metode og teori



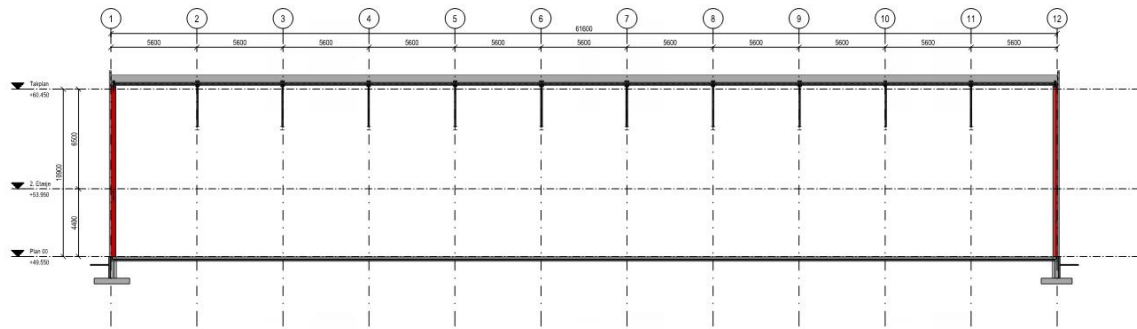
Figur 8 – Fasade Sør (Privat, 2020)



Figur 9 – Fasada Nord (Privat, 2020)



Figur 10 – Snittet på kortsiden (Privat, 2020)



Figur 11 – Snittet på langsiden (Privat, 2020)

3.1.4 Metode – Dimensjonering

Dimensjonering i bruks- og bruddgrensetilstand

For fagverket tegner vi opp hele konstruksjonen i Focus 2D hvor vi starter med søylene og tilhørende opplagerkrefter og deretter fagverket ovenpå søylene. Da konstruksjonen er tegnet inn legger vi på laster i henhold til grunnlaget som er utarbeidet med tanke på snø-, vind-, nytte- og egenlast. Disse lastene er ofte oppgitt i kN/m² og må derfor ganges med lastbredden for at de kan legges inn i figuren. Da alle horisontale og vertikale laster er lagt inn definerer vi lastkombineringer i programmet. Her velger vi hvilke laster som ikke skal opptre samtidig, hvor mange lastkombinasjoner vi ønsker og hvilke tilstander vi skal kombinere i. Videre velger man den aktuelle lastkombinasjonen man ønsker å kontrollere for, og trykker «utfør analyse».

Dimensjonering i ulykkestilstand (Brann)

Brann dimensjonering har i stor grad samme fremgangsmåte som dimensjonering i bruks- og bruddgrensetilstand. Her må man først legge inn visse forutsetninger om hvor lenge brannen er dimensjonert til å vare og hvor dyp forkullningsdybde som oppstår. Da dette er gjort velger man den aktuelle lastkombinasjonen for analysen, i dette tilfelle brann, og utfører analyse.

3.1.5 Metode – Miljø

Det er hovedsakelig to aspekter vi skal se på når det gjelder stålet: Hvor mye energi som kreves i produksjonen og hvor mange kg CO₂-evivalenter som kommer som følge av produksjon.

Først og fremst skal vi bruke dataene vi har fra tegningsgrunnlaget for å finne ut hvor mange kg stål som det er prosjektert med. Grunnen for at vi trenger mengden stål, er fordi vi ved hjelp av undersøkelsene i miljødatabasen ProBas skal komme til et endelig tall på hvor mange CO₂-evivalenter det kommer som følge av produksjon av 1 kg stål. Deretter skal vi ved omregning finne ut hvilke energikilder som brukes i produksjon av 1 kg stål, og hvor mye av hver enkelt energikilde som brukes. Dette er svært relevant informasjon for oss, siden vi kan finne ut i hvilken grad det blir brukt fornybar energi. Dette viser oss om stålet som er

miljøvennlig, for igjen å kunne sammenligne med limtre. Vi skal også se på andelen fornybar energi og ikke-fornybar energi av disse energikildene. Videre kan man finne ut hvilke utslipp som kommer ut i lufta som følge av stålproduksjonen, og vi skal klassifisere disse slik at vi kan sitte igjen med antall CO₂-evivalenter per produserte kg stål. På denne måten skal vi finne ut hvor stort CO₂-avtrykket blir når hallen bygges som planlagt; i stål.

3.1.6 Metode – Modellering & visualisering

For å best mulig visualisere og beskrive bæresystemet har vi tegnet det i sin helhet i Revit. Vi fikk tilgang til Revit-filen som Pro-Consult brukte i prosjektet. I filen var det en IFC-modell av det opprinnelige bæresystemet av stål, samt alt av betongkonstruksjoner. Naturligvis var det tegnet inn et aksesystem som vi gikk ut ifra da vi begynte å dimensjonere. Da alle søyler, gavlbjelker og fagverk var ferdig dimensjonert, tegnet vi dette inn i modellen. Vi brukte arkitekt-modellen (IFC) som allerede lå inne i filen for å finne riktige høyder og mål. Malfilen som ble brukt hadde kun søyler og bjelker i stål og betong, og av den grunn måtte vi duplisere elementene, for så å endre dimensjonene og materialet. Noe mer problematisk var det med fagverket da det ikke var et tilsvarende fagverk i malfilen. Vi måtte derfor laste inn en «familie» av riktig type og gi fagverket de riktige dimensjonene og vinkel. Fagverket ble gruppert til et element bestående av flere under-elementer. Da ett fagverk var komplett tegnet dupliserte vi dette til hele bygget.

For visualisering brukte vi en funksjon i Revit som heter «Rendering». Ved hjelp av denne metoden lagde vi realistiske bilder med riktige proporsjoner ut ifra 3D-modellen. Da «viewet» var rendret eksporterte vi det som et PDF-dokument og limte inn i oppgavefilen. For å best mulig vise det aktuelle elementet i den gitte situasjonen, uthevet vi det med en transparent rødfarge. For dette brukte vi Bluebeam Revu, et PDF-program som lar deg redigere PDF-dokumenter.

Teori

3.1.7 Limtre

Allerede på 1800-tallet i Tyskland og Russland har sammenlimte trekonstruksjonene blitt brukt (Trefokus, 2020). Under 2. verdenskrig ble det en etterspørsel av limtre på grunn av mangel på stål. Materialet ble blant annet benyttet i forskjellige krigsmateriale. Deriblant ble det bygget torpedobåter med laminerte spant, kledd med kryssfiner. Limtre ble også benyttet på minesveipere for å unngå å utløse magnetiske miner. Den norske limtreindustrien kom ikke i gang for fullt før 1960-tallet.

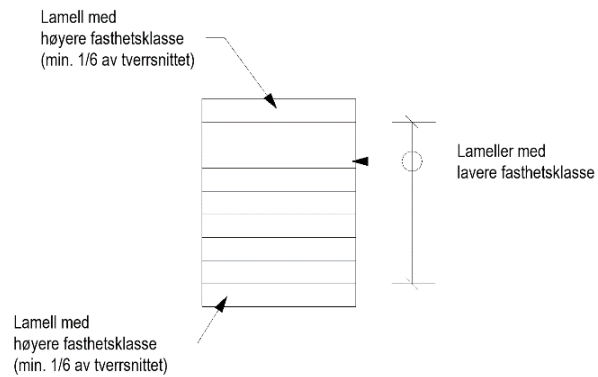
Takket være en rekke nordiske og nasjonale utviklingsprogrammer og prosjekter har limtreteknologien de siste årene opplevd en rask utvikling, både for knutepunkter og lange spenn. Det har åpnet opp for nye muligheter for bruk av tre i større konstruksjoner. Eksempler på dette er Gardermoen og Vikingskipet i Hamar.

Trefokus beskriver limtre i denne sammenhengen som «bærende komponent hvor tverrsnittet er bygd opp av minst fire lameller med tilnærmet parallell fiberretning, som ved hjelp av lim har full statisk samvirke.» (Trefokus, 2020).

I Norge produseres limtre av 45mm tykke lameller av enten gran eller furu, med mindre limtreelementet skal som brukes i klimaklasse 3 eller for krumme konstruksjonselementer. For limtreelementer som skal brukes i klimaklasse 3, blir lammer med mindre tykkelse enn 45mm brukt. For krumme konstruksjonselementer vil krumningsradiusen bestemme tykkelsen på lamellen.

Det er kun godkjent lim som skal benyttes til å lime sammen lamellene. Tidligere har lim av typen PRF (fenol-resorcinol-formaldehyd) blitt benyttet. I den senere tid har det blitt mer vanlig å bruke lim av typen MUF (melamin-urea-formaldehyd). Grunnen for dette er hovedsakelig for de lyse og tilnærmet usynlige limfugene.

Opptrendene trykk- og strekkrefter varierer i tverrsnittet. Trykk- og strekkreftene er størst ytterst i tverrsnittet. Altså i bunn og topp. Derfor består ofte limtrevversnitt av lameller med to eller flere forskjellige fasthetsklasser. Lamellene i de ytterste lagene (minimum 1/6 av tverrsnittshøyden) har en høyere fasthetsklasse, spesielt med tanke på strekkfasthet. På denne måten oppnås det en akseptabel fasthet uten unødvendig bruk av lameller i den høyeste fasthetsklassen. Det vil si at man også kan bruke lameller med lavere fasthetsklasse, uten at det nevneverdig påvirker kvaliteten, og dermed benytte en større del av råstoffene. Se figur 12.



Eksempel på limtrevversnitt

Figur 12 – Illustrasjon av lameller (Privat, 2020)

Limtre produseres i forskjellige type former. Eksempler på dette er rette bjelker og søyler, krumme bjelker, pulttaksbjelker, rammehalvdeler og saltaksbjelker med rett eller krum underside.

For å forsikre seg at lamellene er av riktig kvalitet styrkesorters lamellene enten maskinelt eller visuelt for så å fingerskjøtes. Før lamellene limes sammen tørkes de til en fuktighet på 10-12%. Dette gjøres for at produktet ikke skal krympe ved innvendig bruk på grunn av nedtørring til vanlig fuktighet innendørs. Deretter høvles lamellene rett før de limes for å oppnå en optimal limflate. For å sikre riktig limtrykk og temperatur plasseres de limte lamellene i spesielle presser. Etter at produktet er limt blir det høvlet på alle fire sider. På denne måten blir produktets riktige dimensjon sikret, samtidig som det får en glatt og fin overflate og at utvendig limsøl fjernes.

Limtre kan impregneres. Impregneringen kan skje i forkant eller etterkant av oppliming avhengig av impregneringsmiddelet. Kreosot, for eksempel, må impregneres på ferdig, opplimt tverrsnitt.

Som nevnt produseres limtre med forskjellig form og dermed har materialet forskjellige bruksområder. Eksempler på dette er hovedbjelker i trebruer, delstaver i

Metode og teori

fagverkskonstruksjoner, bjelkelag i gulv med store spenn eller ekstra store laster, hovedbjelker i boliger, næringsbygg og mye mer.

Under brann vil limtreet forkulle. Det laget som forkulles vil etter hvert begrense og/eller forhindre oksygentilgangen i limtreet og innbrenningshastigheten reduseres. Dette gjør at limtre og trevirke generelt har gode branntekniske egenskaper, selv under direkte brann. Dessuten er varmeledningsevnen i limtre lav. Det vil si at tre har en god isoleringsevne. Dette gjør at limtreet kan brukes som et brannisolerende sjikt, som for eksempel ved innslissede knutepunktsplater av stål.

3.1.8 Miljø

Historie

Ordet «miljø» kommer fra fransk «milieu», og betyr 'midte'. Miljø er definert som omgivelser og ytre livsvilkår. I vår tid, så viser uttrykk som miljøriktig, miljøvennlig og miljø ofte til saksområdet som gjelder miljøvern (Tjernshaugen, 2020). Miljøvern kan man si er arbeidet for å verne om økosystemer og arter, og for å trygge en god miljøforvaltning. (Tore J. Brænd, 2009). Det økende fokuset for å trygge en god miljøforvaltning kan man kalle «Miljøbevegelsen». Dette er kun en løs betegnelse som består av organisasjoner og personer som ønsker å sette et sterkt fokus på å verne om naturen, ved å blant annet å minske mengden av drivhusgasser, deriblant CO₂ i atmosfæren og hindre at plast kommer i havet og sørge for ren og fornybar energi.

Vi kan se på hvordan fokuset rundt miljøvern har tiltatt i nyere tid. Mot slutten av 1960-årene og i 1970-årene ble flere miljøorganisasjoner opprettet. Blant dem som ble startet i denne tiden, og som fortsatt eksisterer er «Natur og Ungdom» og «Framtiden i våre hender». Denne tankegangen rundt miljøet ble også mer vanlig i politikken. Dette kan man anta var en motreaksjon av det som skjedde i 1950- og 1960-årene hvor hovedfokuset for de politiske partiene var økonomisk vekst. Denne økonomiske veksten som etter hvert kom, fikk også bivirkninger ved at naturressurser ble beslaglagt for å drive industriell virksomhet. Vern av vassdrag som planlagt skulle bli til store energikilder ble en hovedsak for miljøorganisasjonene. Det ble blant annet demonstrert mot utbyggingen av Grytten kraftverk, som kunne resultert i tørrlegging av Norges høyeste fossefall, nemlig Maradalsfossen i Møre og Romsdal. Miljødepartementet og Statens forurensningstilsyn kom tidlig på 1970-tallet. På grunn av den økonomiske verdenskrise mot slutten av 1970-årene ble det etter hvert en dalende interesse for miljøvern og et økende søkelys på å bevare arbeidsplasser og kommersielle virksomheter (Benum, 2015).

Videre i 1980-årene var det en solid forbruksvekst og for det meste kun «klassisk naturvern». Med det menes blant annet fredning av naturområder og vassdrag, samt oppretting av nasjonalparker for å trygge uberørt natur. Mot slutten av 1980-tallet var det en rekke hendelser som imidlertid skulle endre politikernes- og vanlige menneskers syn på miljø. Tsjernobyl-ulykken, oppdagelse av filtersyre nedgravd i Fredrikstad, slamdeponering i Jøssingfjorden, ozonhullet over Antarktis, atomavfall i usikrede tønner på Kjeller,

Metode og teori

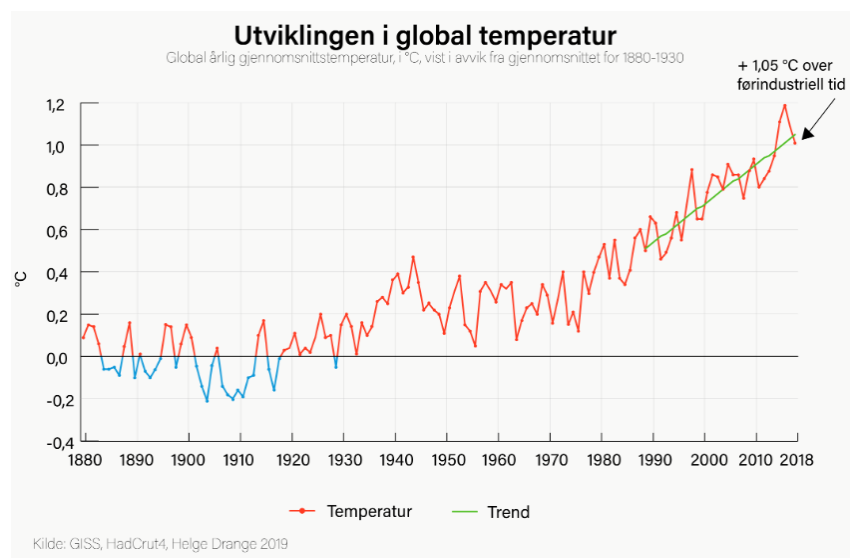
Brundtland-kommisjonen og tung forurensning av havnebassenget i Oslo førte til at miljø fikk større oppmerksomhet av allmennheten. Engasjementet nådde toppen ved stortingsvalget i 1989, hvor miljøbevissthet var en av de klare valgsakene.

I 1990-årene var norsk oljeindustri sterk vekst, noe som førte til et større utslipp av drivhusgasser, og særlig CO₂. Stadig flere funn resulterte i at Norge etter hvert kuttet ut målet om å få et stabilt CO₂-utslipp på nivået det var på i 1989. Videre kan man si at denne langvarige økonomiske påvirkningen av olje har blitt et problem for den norske miljøpolitikken.

Klimamål

Nå til dags er det et så høyt fokus på miljø som kanskje aldri har vært før. FNs miljøprogram (FN, 2019b) er organisasjonen i spissen for å ivareta miljøet i våre dager på internasjonal basis. De formulerer at det er tre hovedutfordringer innenfor miljøet som verden står overfor i dag, og det er:

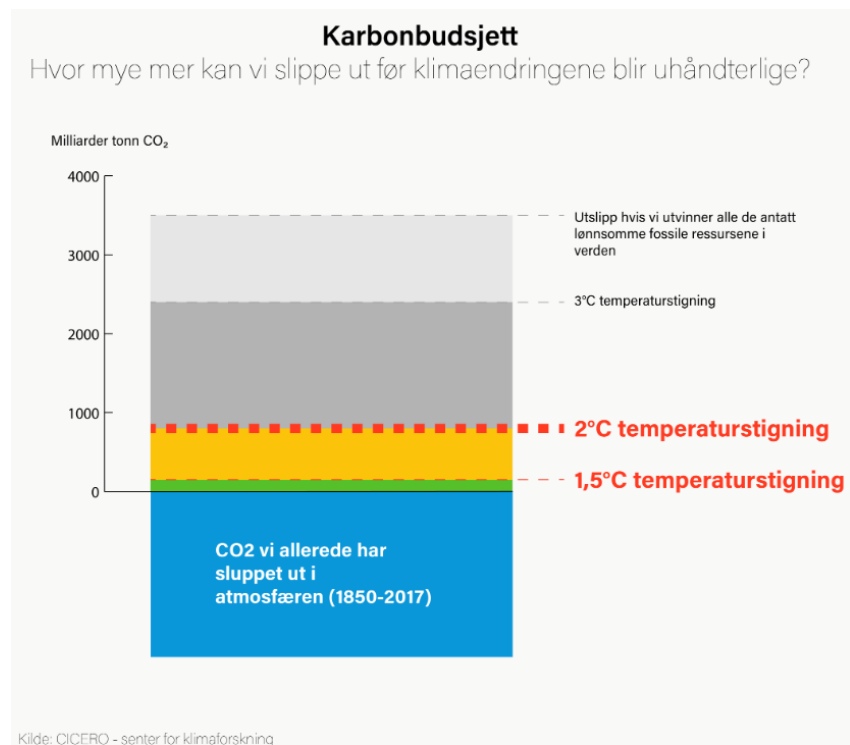
Klimaendringer, regnskog og naturmangfold. (FN, 2017). Disse tre utfordringene går også litt ut på hverandre, for eksempel så vil både klimaendringene og naturmangfoldet få store konsekvenser dersom store deler av regnskogen hogges. Bolken som kalles for klimaendringer, er nok den aller største utfordringen innenfor miljøet. I figur 13 kan du se



Figur 13 – Utvikling i global temperatur (FN, 2019a)

utviklingen i global temperaturstigning fra de siste 140 årene. Verdensomspennende klimaforhandlinger har ført til at landene har kommet til enighet om å begrense den globale temperaturstigningen fra år 1850 til år 2100 på 2 grader. Dette er det såkalte «togradersmålet». Så har man i tillegg «Parisavtalen», hvor det formidles at alle landene i verden skal forsøke å begrense temperaturstigningene til 1,5 grader. I figur 14 vises det hva som må til for å nå disse målene. Ifølge FN så er det fullt mulig å nå togradersmålet, men da må alle land i hele verden kutte sine klimagassutslipp med en gang. Skjer ikke dette, så er det lite sannsynlig at man når togradersmålet. FNs klimapanel skriver at klimaendringene vil føre til følgende:

- Økonomisk ulikhet
- Dårligere tilgang til mat og vann
- Skader på natur, infrastruktur og bygninger
- Helseproblemer
- Tap av naturmangfold
- Konflikter og flyktninger



Figur 14 – Karbonbudsjett (FN, 2019a)

(FN, 2019a). Ifølge IDMC

(Internal Displacement Monitoring Centre) så må i gjennomsnitt 25,3 millioner mennesker forlate hjemmet på grunn av klimarelaterte problemer i året (*Global Internal Displacement Database*, 2019). FNs miljøprogram påstår også at det er de fattige og lavstilte i samfunnet som blir hardest rammet, rett og slett fordi de ikke på samme måte er rustet til å ta hånd om slike endringer.

Stålproduksjon

Man kan si at det er to hovedkilder til at produksjon av stål ikke er like miljøvennlig som flere andre byggematerialer: For det første er det energien som kreves gjennom hele prosessen, til man har ferdig varmevalset konstruksjonsstål, og den andre store grunnen er utslippet av CO₂ som stålproduksjonen medfører ved at kalk, malm og kull brennes. En av grunnene til at det er fint å dele opp i disse to hovedkildene er fordi selve produksjonen av stål består av to metoder som gjenspeiler disse hovedkildene meget godt.

Det er hovedsakelig to metoder som brukes for å produsere stål; oksygenkonverter og masovn, eller elektrisk lysbueovn (Stål, 2020). Det som skiller disse to måtene å produsere på er at oksygenkonverter og masovn bruker kalk, malm, kull og små mengder med skrapmetall, mens elektrisk lysbueovn benytter for det meste elektrisitet og skrap. Produksjonen ved bruk av den malmbaserte metoden står for om lag 70% av produksjonen av stål på verdensbasis. Den skrapbaserte metoden, som er mer miljøvennlig, står for 30% av produksjonen. Ifølge OECD, så er det en stor fordel å bruke EAF-metoden (Electric Arc Furnace), som på norsk kalles elektrisk lysbueovn. «Recycling scrap in EAF's is the most efficient available technology, not just for energy. The energy needed to melt scrap represent 40% of the energy and 30% of CO₂ to melt iron ore in a modern BF/BOF integrated mill» (*Impacts of energy market developments on the steel industry*, 2013). Både BF (Blast Furnace) og BOF (Basic Oxygen Furnace) er malmbaserte metoder som vi på norsk kaller masovn og oksygenkonverter. Det OECD skriver over er kort fortalt at man ved å bruke elektrisk lysbueovn har et redusert energiforbruk på 60% og CO₂ utslipp på 70%.

Dette med at det er flere metoder å produsere stål på med veldig stor forskjell på hvilket klimaavtrykk de forskjellige produksjonsmetodene gir, gjør at klimaregnskapet blir mer komplisert å regne ut. Fordi da er man nødt til å avgjøre hvilken av metodene en skal ta utgangspunkt i; malmbasert- eller skrapbasert produksjon, eller en blanding.

Vi har lagt til grunn en rapport fra den tyske databasen ProBas (Probas, 2020a). Denne rapporten er en blanding mellom BOF og EAF, hvor 80% av stålet er produsert med BOF-metoden, mens 20 % er produsert med EAF-metoden. Denne blandingen er godt beskrevet av tyske ProBas i rapporten (Probas, 2020d) som er beskrevet som en «mix». Hvilke resultater den elektro-baserte metoden gir, står det mer om i rapporten (Probas, 2020b), mens resultatene for den oksygen-baserte metoden er beskrevet i rapporten (Probas, 2020c).

3.1.9 Programmer/verktøy

Focus Konstruksjon

Vi har i alle våre beregninger brukt Focus Konstruksjon som hovedverktøy. Programvaren er utviklet av selskapet Focus Software AS som er et Norsk Software-utviklingselskap med hovedkontor på Billingstad i Asker Kommune. Utvikleren tilbyr en rekke programvarer for bygge- og anleggsindustrien, men vi har kun benyttet oss av Focus Konstruksjon.

Microsoft Word

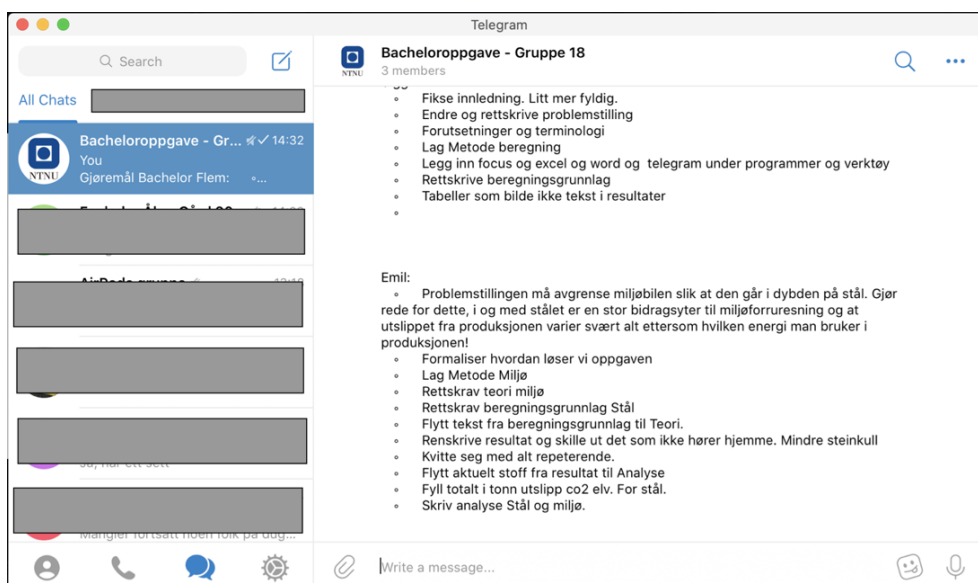
Microsoft Word er programmet vi har brukt for å skrive selve oppgaven. Programvaren er utviklet av selskapet Microsoft og er et rent skriveprogram.

Microsoft Excel

Microsoft Excel er programmet vi har brukt til diagrammer, tabeller og beregninger som går utenfor de øvrige beregningsprogrammene vi bruker.

Telegram

Telegram er kommunikasjonsverktøyet vi har benyttet for organisering, oppgavefordeling og samtaleverktøy. Vi har i Chat-funksjonen dannet en gruppe for denne konkrete oppgaven. Igjennom denne gruppen går det fri informasjonsflyt i oppgave-relaterte ting.

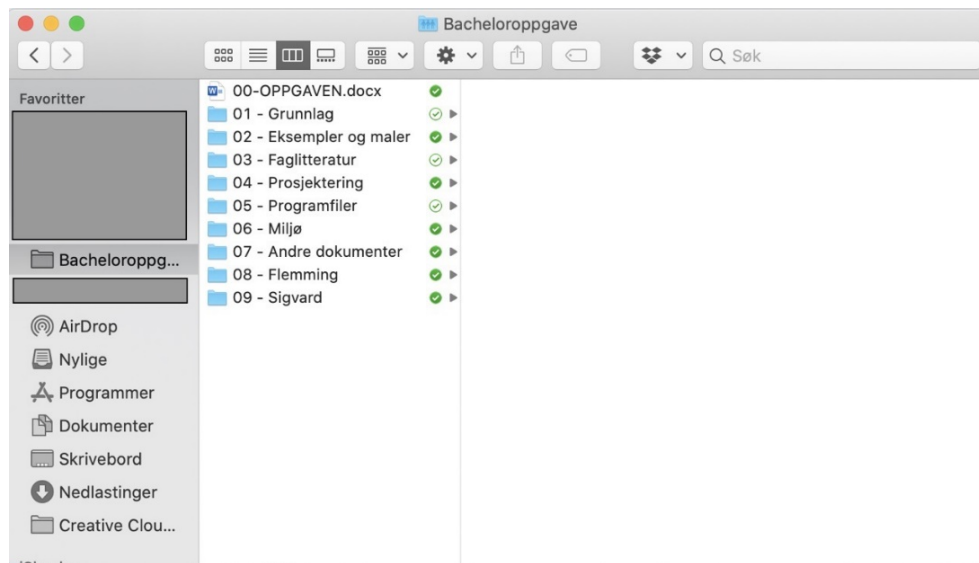


Figur 15 –Telegram dashboard (Privat, 2020)

Metode og teori

Dropbox

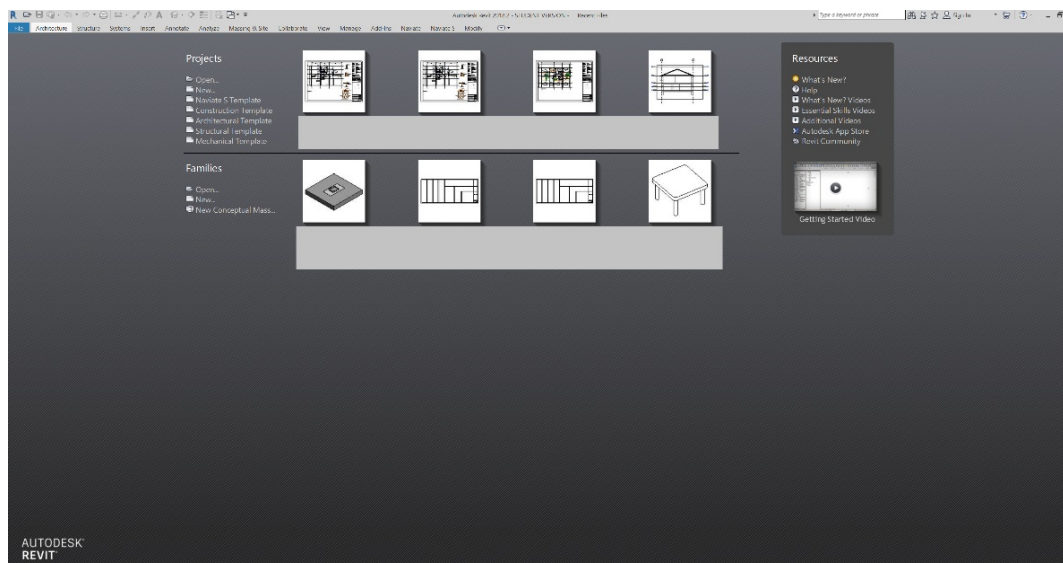
Dropbox er fildelingssystemet vi har brukt. I applikasjonen har vi laget en delt mappe med alle deltakere i oppgaven hvor alle relaterte filer ligger i en organisert mappestruktur.



Figur 16 – Dropbox dashboard (Privat, 2020)

Revit AUTODESK REVIT

Revit er et 3D-modelleringsprogram utviklet av Autodesk. Dette er programmet som er brukt for å tegne bæresystemet vi har dimensjonert. Lisensen som ble brukt er en studentlisens.

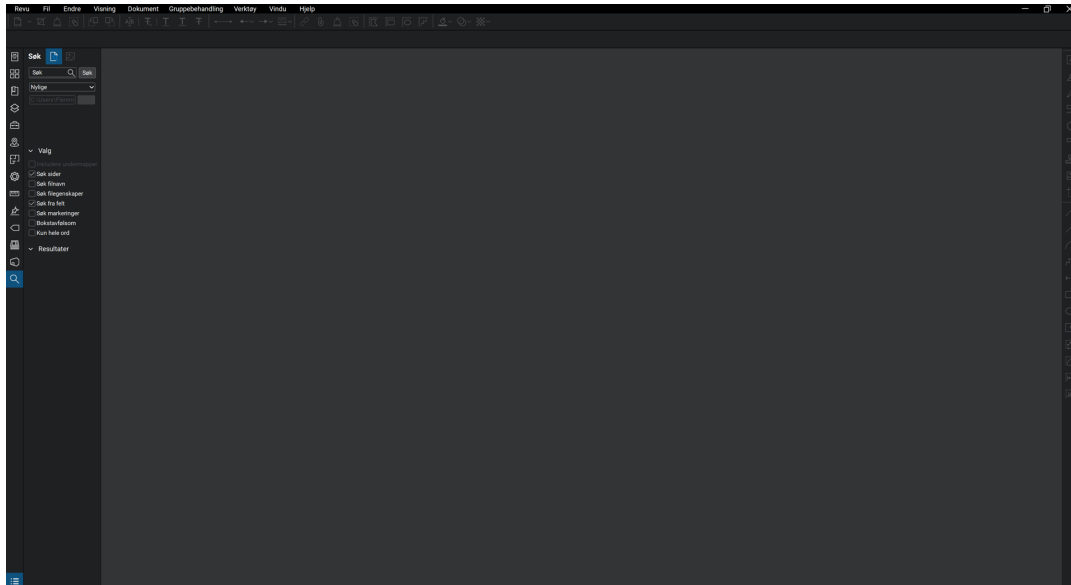


Figur 17 – Revit dashboard (Privat, 2020)

Bluebeam Revu



Bluebeam Revu et PDF-verktøy. Dette har blitt brukt for å lese og redigere PDFer. Utvikleren av programmet er Bluebeam Software.

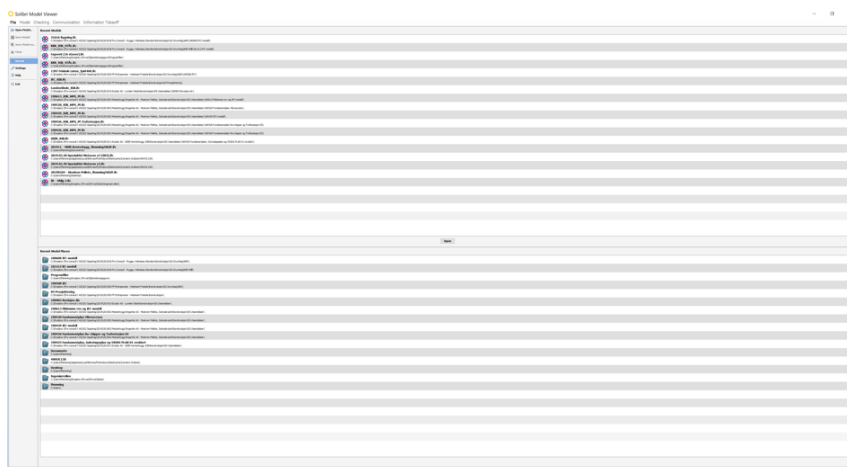


Figur 18 – Bluebeam Dashboard (Privat, 2020)

Solibri Model Viewer



Solibri Model Viewer er et program som lar deg se og analysere IFC-modeller. Vi brukte programmet til å hente ut stålmengder fra det eksisterende bæresystemet i stål. Programmet er et produkt av Solibri Inc.



Figur 19 – Solibri dashboard (Privat, 2020)

4 Beregningsgrunnlag

Laster og kombinasjoner

4.1.1 Egenlaster

For limtrebjelkene og søylene brukes følgende forutsetninger

Limtrekvalitet GL30C

Densitet ρ_m 430 kg/m³ (NS-EN 14080:2013+NA2016: Tabell 1-4)

Klimaklasse 1 (Tabell NA.901 Klimaklasser)

Partialfaktor for limtre γ_m 1,15 (Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og betsandighet)

Tabell NA.901 Klimaklasser

Klima-klasse	Relativ luftfuktighet RF	Fuktighetsinnhold for trevirke ^a ω	Eksempler
1	RF < 65 %	$\omega < 12$ %	bærende elementer innendørs i rom som vanligvis er oppvarmet loftsbjelkelag og bærende takkonstruksjoner i kalde, men luftede loftsrom over rom som vanligvis er oppvarmet yttervegger i bygninger som vanligvis er oppvarmet og som er beskyttet av dampspærre på varm side og av bl.a. vindspærre
2	65 % ≤ RF ≤ 85 %	12 % ≤ ω ≤ 20 %	bærende elementer i bygninger som vanligvis ikke er oppvarmet, men ventilerte taktro konstruksjoner i friluft, når disse er effektivt beskyttet mot regn og vann.
3	RF > 85 %	$\omega > 20$ %	konstruksjoner som ikke er beskyttet mot regn og vann. konstruksjoner som er i direkte kontakt med terreng. MERKNAD Bare i unntakstilfeller anses tildekte konstruksjoner å tilhøre klimaklasse 3.

^a Tilsvarende omtrentlig fuktighetsinnhold for konstruksjonsvirke av gran og furu ved 20 °C

Figur 21 – NA. 901 Klimaklasser (Standard, 2010)

Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet

Materialer og produkter	γ_m
Konstruksjonstre	1,25
Limtre	1,15
Parallellfiner (LVL), kryssfiner	1,15
OSB	1,3
Sponplater	1,3
Trefiberplater (alle typer)	1,3
Forbindelser	1,3
Spikerplater	tredelen 1,25 ståldelen 1,0
Bruks- og ulykkeskombinasjoner	1,0

Figur 20 – Tabell NA. 2.3 Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet (Standard, 2010)

Beregningsgrunnlag

Beregning

Alle beregninger av lastkombinasjoner inkludert egenlast er gjort i Focus Konstruksjon. Egenlasten av bæresystemet vil automatisk bli medregnet og gjøres ikke for hånd utenom programmet. Kun de øvrige bygningsdelene utenom bæresystemet vil bli regnet ut på forhånd.

Lett tak	1,1	kN/m ²
----------	-----	-------------------

4.1.2 Snølaster

Beregninger som er lagt til grunn for snølasten er NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008 (Standard, 2018). Beregningene er utført i Focus Konstruksjon og programmet baserer seg på samme beregningsmetode som ligger til grunn i standarden.

Snølasten er beregnet ut ifra følgende formel:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * S_k \quad (5.1)$$

Hvor:

μ – snølastens formfaktor (*Tabell 5.2: Formfaktor for snølast*)

S_k – karakteristisk verdi for snølast på mark (*Tabell NA.4.1(901) – Karakteristisk snølast på mark for kommuner og Svalbard*)

C_e – Eksponeringskoeffisienten (*Tabell 5.1 Anbefalte verdier C_e for forskjellige topografier*)

C_t – Den termiske koeffisienten (*Lasttilfelle 5.2(8)*)

Grunnlag for våre beregninger:

Fylke Østfold

Kommune Rygge

Takvinkel 1°

Høyde H_g 49,5 m.o.h < 150 m.o.h $\Rightarrow N \cdot \Delta S_k = 0$

Beregningsgrunnlag

Snølast på tak $S_{k,0}$ 3,0 kN/m²

Formfaktor μ 0,8

Tabell 5.2: Formfaktorer for snølast

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

Figur 22 – Tabell 5.2: Formfaktorer for snølast (Standard, 2018)

4.1.3 Vindlaster

Beregninger som er lagt til grunn for vindlasten er NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 (Standard, 2009b). Beregningene er gjort i Focus. Programmet baserer seg på samme beregningsmetode som i standarden.

$$q_p = K_w * V_{b,0}$$

$V_{b,0}$ – Referansevindhastighet

K_w – Vindlastfaktor

Grunnlag for våre beregninger:

Fylke	Østfold
Kommune	Rygge
Referansevindhastighet $V_{b,0}$	24 m/s
Høyde over havet	49,5 m
Høyde Z over bakkenivå	11,15 m
Terrengruhetskategori II	Landbruksområde

Beregningsgrunnlag

Lastkombinasjoner

Det er mange mulige lastkombinasjoner som gir forskjellige utfall alt ettersom hva som kontrolleres. Vi ser på lastkombinasjoner i både bruddgrense- og bruksgrense- og ulykkestilstand. Alle lastkombinasjoner beregnes i henhold til NS-EN 1990 (Standard, 2016a) og er gitt ved følgende formler:

Bruddgrensetilstand

For bruddgrensetilstand brukes formlene 6.10a og 6.10b fra tabell NA.A1.2(B) «Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (SETT B)». Her velger man aktuell ψ -verdi i henhold kategori i tabell A1.1 «Anbefalte verdier for ψ -faktorer for bygninger» og settes inn i formlene.

Tabell NA.A1.2(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B)

Vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner	Permanente laster		Dominerende variabel last (*)	Øvrige variable laster (*)
	Ugunstig	Gunstig		
(Ligning 6.10a)	$\gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(Ligning 6.10b)	$\xi \gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(*) Variable laster er de som er oppført i tabell NA.A1.1

MERKNAD 1 Det brukes følgende sett med γ - og ξ -verdier ved bruk av uttrykk 6.10a og 6.10b:
 $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$;
 $\gamma_{Gj,inf} = 1,00$;
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig);
 $\gamma_{Q,i} = 1,50$ hvis ugunstig (0 hvis gunstig);
 $\xi = 0,89$.
(I Norge brukes 6.10a og 6.10b, slik at $\xi \gamma_G = 0,89 \times 1,35 = 1,20$).

Se også NS-EN 1991 til NS-EN 1999 for γ -verdier som skal brukes for påførte deformasjoner.

MERKNAD 3 De karakteristiske verdiene for alle permanente laster fra ett opphav multipliseres med $\gamma_{G,sup}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er ugunstig, og med $\gamma_{G,inf}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er gunstig. F.eks. kan alle laster med opprinnelse i konstruksjonens egenvekt anses å komme fra én kilde; dette gjelder også om forskjellige materialer er brukt.

MERKNAD 4 For spesielle påvisninger kan verdiene for γ_G og γ_Q igjen deles inn i verdiene γ_0 og γ_1 og modellens usikkerhetsfaktor γ_{sd} . En verdi for γ_{sd} som ligger mellom 1,05 til 1,15, kan brukes i de fleste vanlige tilfeller.

Figur 23 – Tabell NA.A1.2(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B) (Standard, 2016a)

Bruksgrensetilstand

q_{def} (ofte forekommende) er gitt ved:

$$q_{OF}^{def} = q_{EV} * (1 + K_{def}) + q_{K,NL} * (\psi_1 + \psi_2 * K_{def})$$

Ulykkestilstand

Lastkombinasjon for dimensjonerende ulykkessituasjoner (6.4.3.3)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ eller } \psi_{2,1}) * Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,1} * Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

Der

$G_{k,j}$ - Egenlast

$Q_{k,1}$ – Dominerende nyttelast

$Q_{k,1}$ – Øvrige nyttelaster

P - Forspeningslast i forspente konstruksjoner

A_d - Påført tilleggslast pga. ulykken(brann),

$\psi_{1,1}$ og $\psi_{2,1}$ - Kombinasjonsfaktorer/sannsynlighetsfaktorer

Branndimensjonering

Branndimensjoneringen er utført i henhold til NS-EN 1995-1-2 (Standard, 2009a).

Formler

$$d_{ef} = d_{char} + d_0$$

der:

$$d_{char} = \beta_n * t = \text{Forkullingsdybde (mm)}$$

$$\beta_n = 0,7 \text{ mm/min (limtre)}$$

t = Branntid

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

Forutsetninger

Vi legger følgende forutsetninger til grunn for branndimensjoneringen:

- Lastkombinasjon for dimensjonerende ulykkessituasjon ihht. 6.4.33
- Risikoklasse 5 (§11-2 Tabell: Risikoklasser. TEK17)
- Brannklasse 1 (§12-3 Tabell: Brannklasser. TEK17)
- Brannmotstand R30 (§11-4 Tabell 1: bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse)

Limtre

4.1.4 Generelt

Alle beregninger er gjort ut ifra standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 (Standard, 2010). Limtretype som er brukt igjennom hele oppgaven er GL30C som gir følgende forutsetninger:

$$\gamma_m = 1,15 \quad \text{Tabell NA.2.3}$$

$$K_{mod} = 0,8 \quad \text{Tabell 3.1 – verdier av } K_{mod}$$

ved

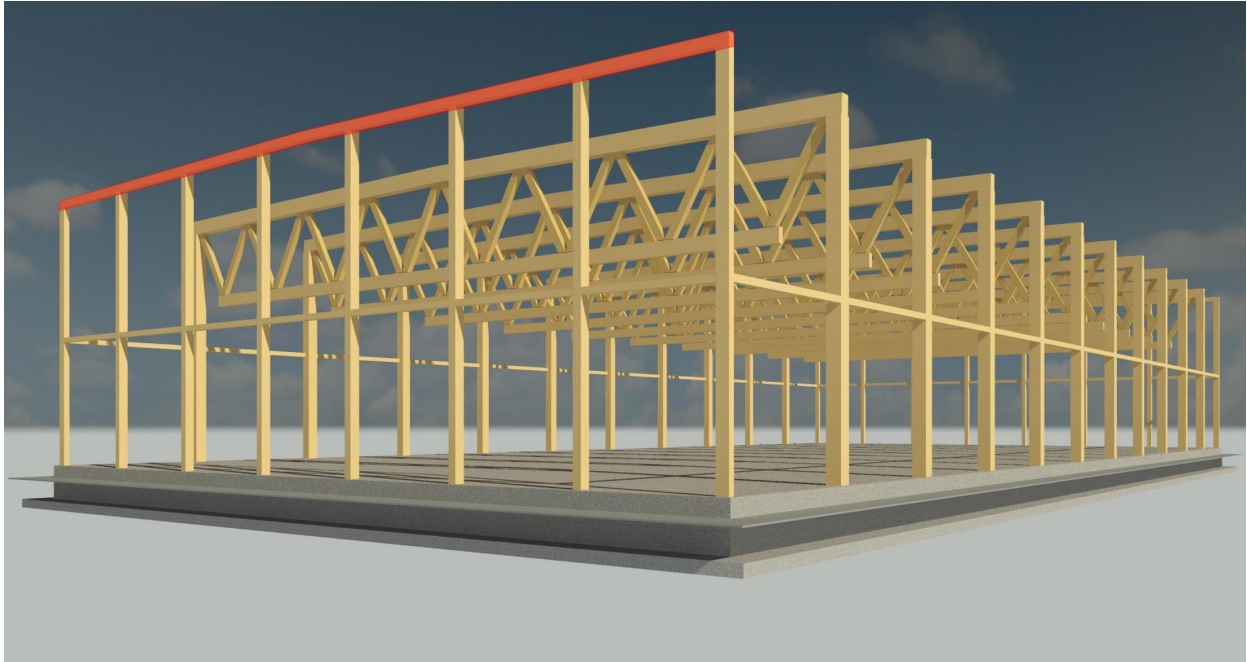
Klimaklasse 1 (tabell NA.901 Klimaklasser) & mellomlangtidslast

Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet

Materialer og produkter	γ_m
Konstruksjonstre	1,25
Limtre	1,15
Parallellfiner (LVL), kryssfiner	1,15
OSB	1,3
Sponplater	1,3
Trefiberplater (alle typer)	1,3
Forbindelser	1,3
Spikerplater	1,25
tre delen	
ståk delen	1,0
Bruks- og ulykkeskombinasjoner	1,0

Figur 24 – Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet (Standard, 2010)

4.1.5 Randbjelke



Figur 25 – Randbjelke illustrasjon (Privat, 2020)

Randbelken bærer snølasten og egenlasten fra taket og er det ytterste bærende elementet i takkonstruksjonen. Bjelken er understøttet av gavlsøylene som fører laste videre ned i betongen.

Momentkontroll (6.1.6)

Bjelken må kontrolleres for moment som kommer som følge av snølasten og egenlasten på taket. Momentet virker om sterk akse Y.

$$K_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.12)$$

Tegnforklaring:

$\sigma_{m,y,d}$ – Opptredende bøyespennning om sterk akse Y

$\sigma_{m,z,d}$ – Opptredende bøyespennning om svak akse Z

$\frac{f_{m,y,d}}{f_{m,z,d}}$ – Dimensjonerende bøyefasthet

Beregningsgrunnlag

K_m

– Faktor som tar hensyn til omfordeling av spenninger og inhomogeniteter i materialet i tverrsnittet.

Skjærkontroll (6.1.7)

Skjærkraften oppstår som følge av den fordelte lasten på bjelken. Vi kontrollerer i henhold til standarden:

$$\tau_d < f_{v,d} \quad (6.13)$$

Hvor:

$$\tau_d = \frac{V * S}{I * b}$$

Tegnforklaring:

τ_d – Opptredende bøyespenning om sterk akse Y

$\sigma_{m,z,d}$ – Opptredende bøyespenning om svak akse Z

$f_{v,d}$ – Dimensjonerende skjærfasthet

V – Skjærkraft

S – 1. Arealmoment (Statisk moment)

I – Tregghetsmoment

b – Bredde

Kontroll for vipping (6.3.3)

$$\sigma_{m,d} \leq K_{crit} * f_{m,d} \quad (6.33)$$

Tegnforklaring:

$\sigma_{m,d}$ – Opptredende bøyespenning om sterk akse Y

$f_{m,d}$ – Dimensjonerende bøyefasthet

Beregningsgrunnlag

K_{crit}

– Faktor som tar hensyn til den reduserte bøyefastheten som følge av sideveis utbøyning (vipping)

Nedbøyning

$$\delta_m = \frac{5 * q_{def} * l^4}{384 * E_{0,mean} * I} \left[1 + 0,96 * \left(\frac{h}{l} \right)^2 * \frac{E_{0,mean}}{G_{0,mean}} \right]$$

Tegnforklaring:

q_{def} – Dimensjonerende fordelt last .

l – Lengde

h – Tversnittshøyde

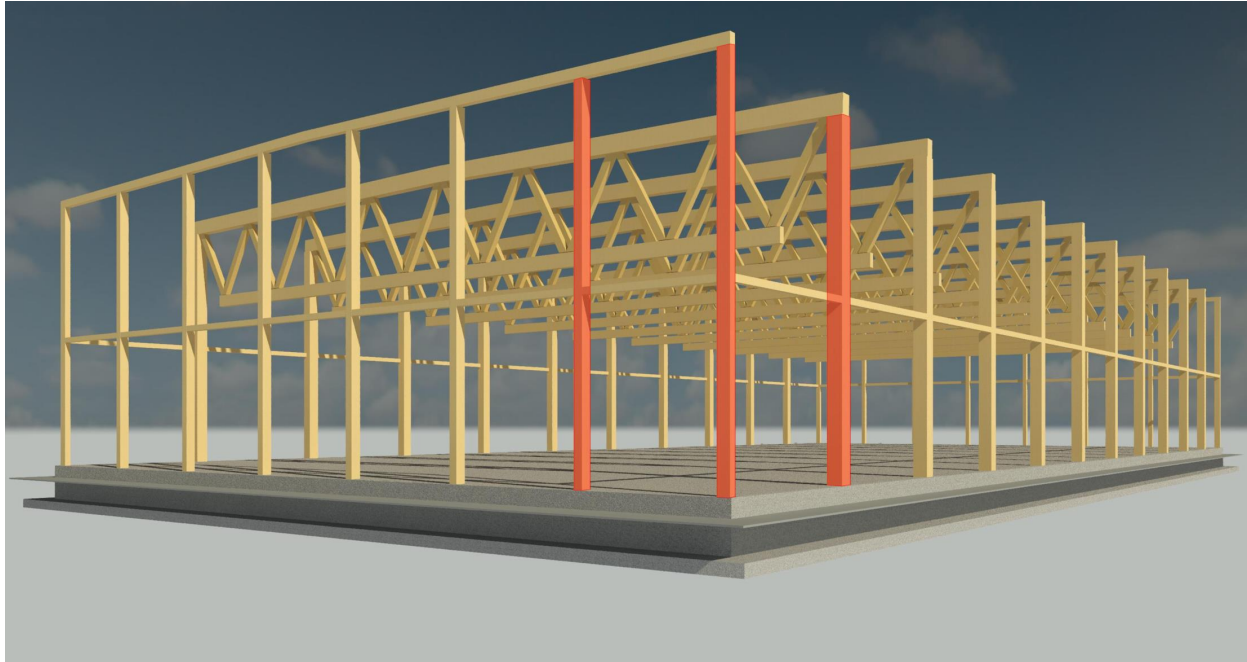
$E_{0,mean}$ – Elastitesmodul

I – Treghetsmoment

$G_{0,mean}$ – Skjærmodul

q_{def} (ofte forekommende)

4.1.6 Søylar



Figur 26 – Søyle illustrasjon (Privat, 2020)

Søylene opptar kreftene fra taket og fører de vidare ned i fundamentene, samt den horisontale vindlasten. Hovedsøylene på langsidene og gavlveggene kontrolleres for både moment, skjær og kombinasjon av aksialtrykk og moment. Hjørnesøylene vil måtte kontrolleres for kombinasjon av bøyning om både sterk og svak akse (y og z), samt aksialtrykk.

Søylar utsatt for kombinasjon av trykk og bøyning (6.3.2)

Hjørnesøylen

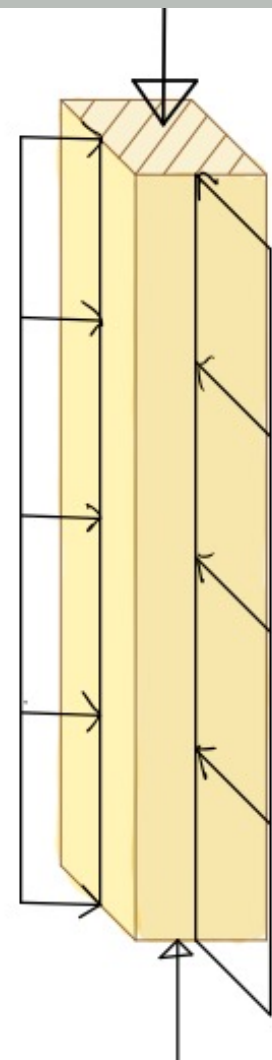
For $\lambda_{rel,i} \leq 0,3$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.19)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + K_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.20)$$

For alle andre tilfeller

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$



Figur 27 – Søyle illustrasjon (Privat,2020)

Beregningsgrunnlag

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.24)$$

For alle andre søyler enn hjørnesøylen vil det kun være et moment om sterk akse Y i kombinasjon med en aksialkraft og formlene vil bli følgende:

For $\lambda_{rel,i} \leq 0,3$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} < 1,0 \quad (6.19)$$

For alle andre tilfeller

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

**bruker 6.19/6.23 da 6.24 gir et mildere krav pga $k_m=0,7$*

Tegnforklaring:

$\sigma_{m,y,d}$ – Opptredende bøyespenning om sterk akse Y

$\sigma_{m,z,d}$ – Opptredende bøyespenning om svak akse Z

$\sigma_{c,0,d}$ – Opptredende trykkspenning

$\frac{f_{m,y,d}}{f_{m,z,d}}$ – Dimensjonerende bøyefasthet

$f_{c,0,d}$ – Dimensjonerende trykkfasthet

$K_{c,y}$ – Knekkfaktor

K_m

– Faktor som tar hensyn til omfordeling av spenninger og inhomogeniteter i materialet i tverrsnittet.

Knekking (6.3.2)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.23/6.24)$$

Tegnforklaring:

Beregningsgrunnlag

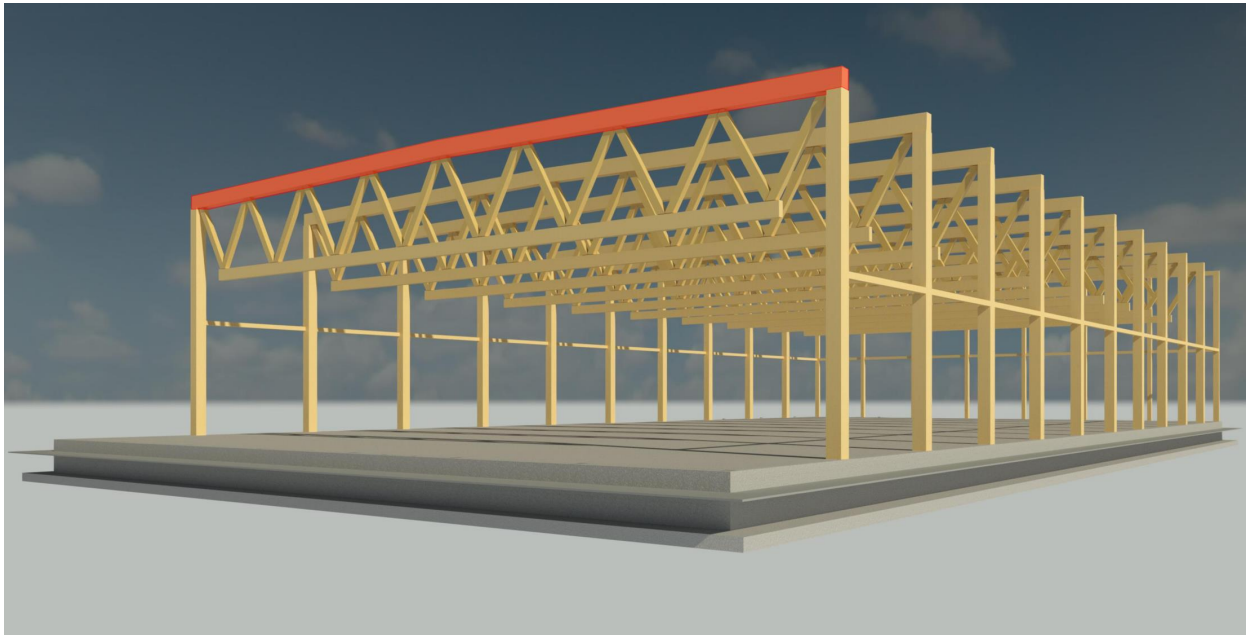
$K_{c,i}$ – Knekkfaktor

$\sigma_{c,0,d}$ – Opp tredende trykkspenning i tverrsnittet

$f_{c,0,d}$ – Dimensjonerende trykkfasthet

4.1.7 Fagverk

OVERGURT



Figur 28 – Overgurt illustrasjon (Privat, 2020)

Overgurten bærer snølast fra taket og egenlast fra den overbyggende takkonstruksjonen i tillegg til sin egen vekt.

Overgurtens mest kritiske situasjon kontrolleres ved formel 6.23 i standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 for kombinasjonen av både bøyespenning og trykkspenning.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

Hvor

$\sigma_{t,0,d}$ = Opptredende strekkspenning

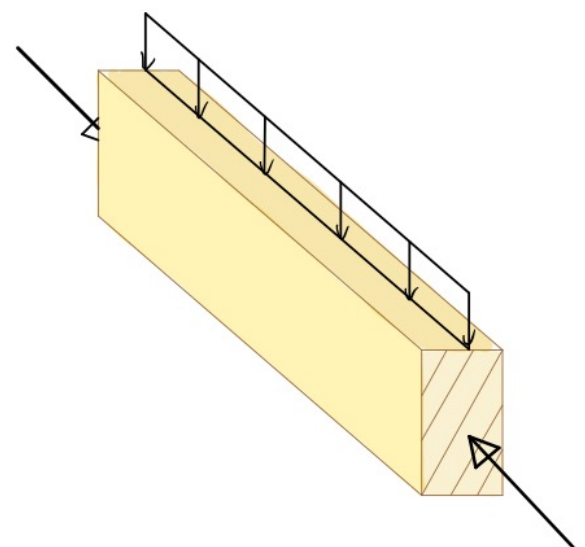
$\sigma_{m,y,d}$ = Opptredende bøyespenning om sterk akse Y

$\sigma_{m,z,d}$ = Opptredende bøyespenning om svak akse Z

$f_{t,0,d}$ = Dimensjonerende strekkfasthet

$f_{m,y,d}$ = Dimensjonerende bøye­fasthet om sterk akse Y

$f_{m,z,d}$ = Dimensjonerende bøye­fasthet om svak akse Z



Figur 29 – Overgurt illustrasjon (Privat, 2020)

Beregningsgrunnlag

Det blir også gjort en skjærkontroll ihht. 6.1.7 Skjær

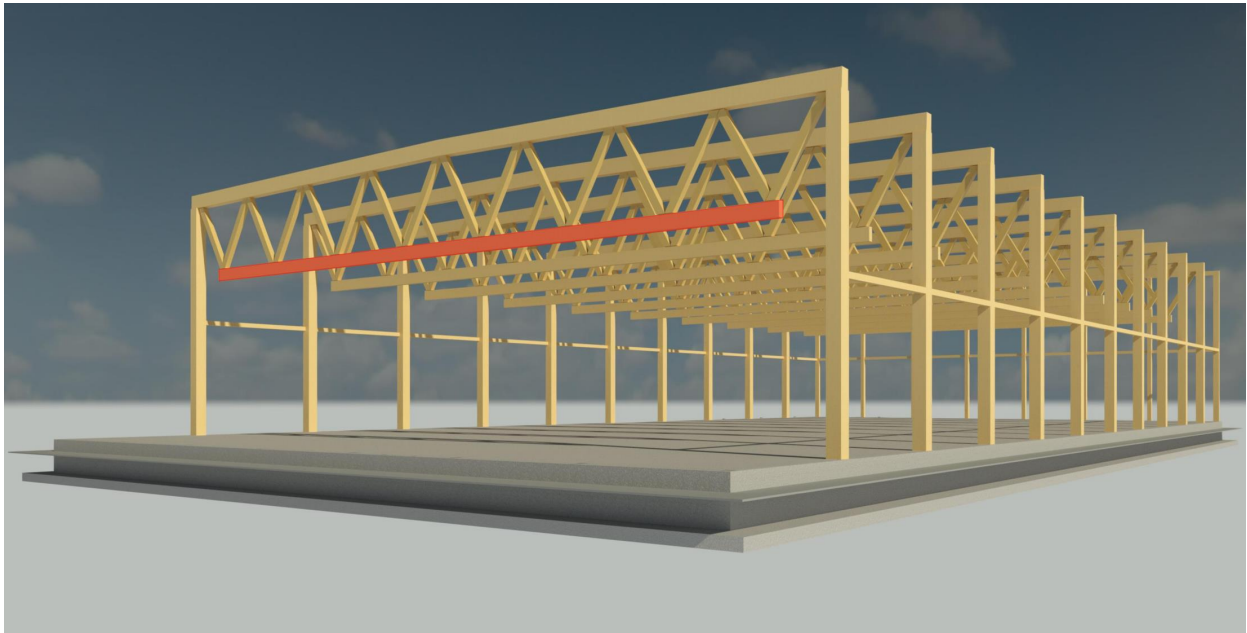
$$\tau_d < f_{v,d} \quad (6.13)$$

Hvor

τ_d = Opptredende skjærspenning

$f_{v,d}$ = Dimensjonerende skjærfasthet

UNDERGURT

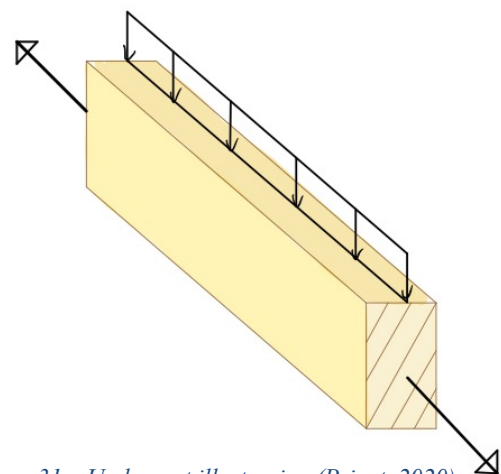


Figur 30 – Undergurt illustrasjon (Privat, 2020)

Undergurten mottar i all hovedsak krefter fra stavene i fagverket og får ved det en strekkraft som er gjennomgående.

Her kontrollerer vi for den dimensjonerende situasjonen 6.17 i standarden NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 for kombinasjon av bøyning og aksial strekk.

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$



Figur 31 – Undergurt illustrasjon (Privat, 2020)

Beregningsgrunnlag

Hvor

$\sigma_{t,0,d}$ = Opptredende strekkspenning

$\sigma_{m,y,d}$ = Opptredende bøyespenning om sterk akse Y

$\sigma_{m,z,d}$ = Opptredende bøyespenning om svak akse Z

$f_{t,0,d}$ = Dimensjonerende strekkfasthet

$f_{m,y,d}$ = Dimensjonerende bøyefasthet om sterk akse Y

$f_{m,z,d}$ = Dimensjonerende bøyefasthet om svak akse Z

Det blir også gjort en skjærkontroll ihht. 6.1.7 Skjær

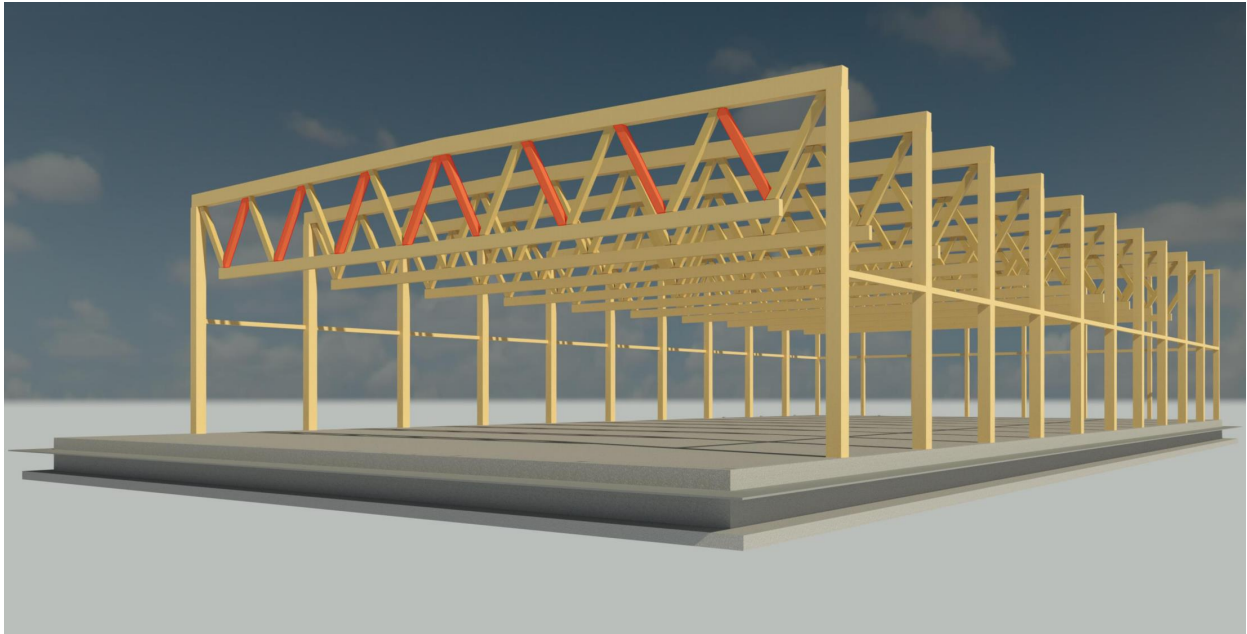
$$\tau_d < f_{v,d} \quad (6.13)$$

Hvor

τ_d = Opptredende skjærspenning

$f_{v,d}$ = Dimensjonerende skjærfasthet

TRYKKSTAVER



Figur 32 – Trykkstav illustrasjon (Privat, 2020)

Skråstavene som blir utsatt for trykk kontrolleres for trykk i fiberretning med reduksjon for knekking og er gitt ved følgende formel i standarden NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,o,d}}{K_{c,z} * f_{c,o,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Da det ikke opptrer noe moment i stavene vil vi kun sitte igjen med siste del av ligningen.

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{K_{c,z} * f_{c,o,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Hvor

$\sigma_{c,o,d}$ = Opptredeende trykkspenning

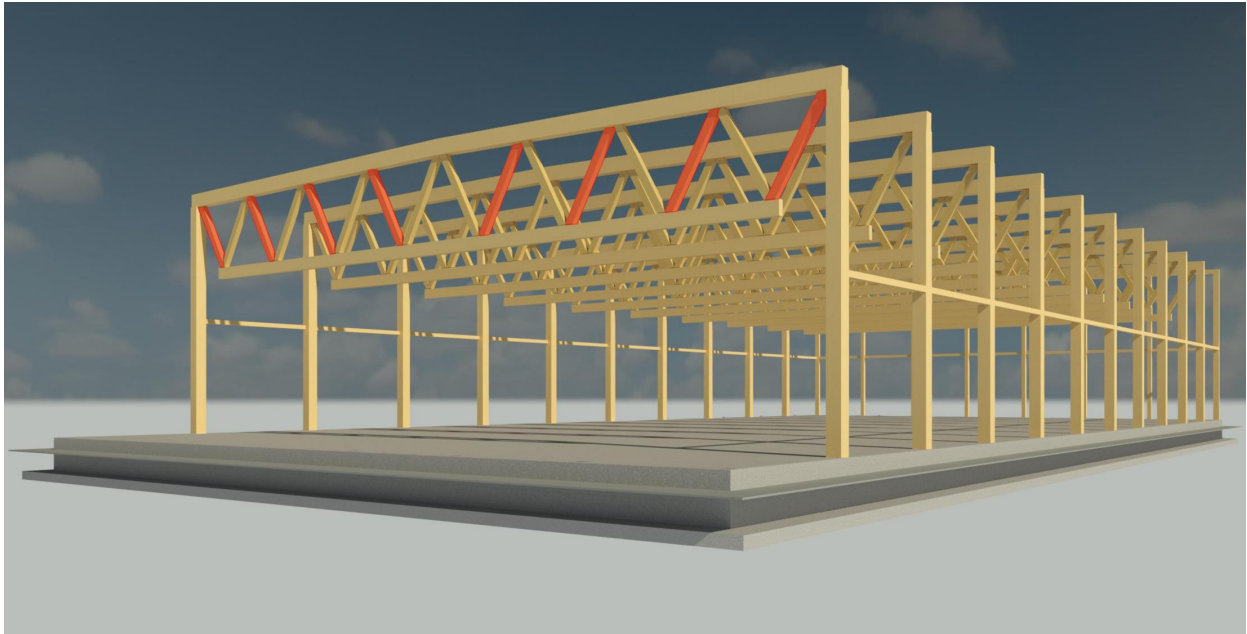
$K_{c,z}$ = Reduksjonsfaktor for knekking

$f_{c,o,d}$ = Dimensjonerende trykkfasthet



Figur 33 – Trykkstav illustrasjon (Privat, 2020)

STREKKSTAVER



Figur 34 – Strekkstav illustrasjon (Privat, 2020)

Skråstavene som blir utsatt for strekk kontrolleres ihht. formel 6.17 i 6.2.3 kombinert bøyning og aksialtrekk.

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

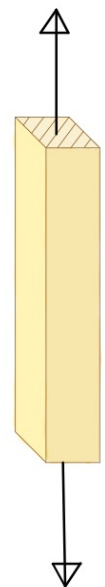
Da det ikke opptrer noe moment i stavene vil vi kun sitte igjen med første del av ligningen.

$$\frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Hvor

$\sigma_{t,o,d}$ = Opptredende strekkspenning

$f_{t,o,d}$ = Dimensjonerende strekkfasthet



Figur 35 – Strekkstav illustrasjon (Privat, 2020)

Miljø

4.1.8 Stål

Ut ifra Revit-modellen fra da Rygge sportshall ble tegnet og dimensjonert i stål, kan vi se at samlet mengde konstruksjonsstål som måtte til for å bære sportshallen ligger på 9747 liter.

Det er ikke mulig å ta ut antall kg stål direkte fra Revit-modellen, derfor må vi ta en liten omregning fra liter til kg ved hjelp av å bruke massetettheten til stål. Som du ser i formelen nedenfor så er massetettheten det samme som masse delt på volum:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Benevning for massetetthet henger også sammen med formelen, og en av benevningene da er g/cm³. Vi skal ha ut antall kg, så vi omgjør formelen:

$$m = V * \rho$$

Stål har en massetetthet på 7,9 g/cm³. Vi vet også at 1 dm³ er det samme som 1 liter. Med det som grunnlag, så regner vi ut regnestykket:

$$m = 9747 \text{ dm}^3 * 7,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Deretter gjør vi om dm³ til cm³:

$$m = 9747000 \text{ cm}^3 * 7,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Så regner vi det ut, og finner ut antall gram stål, før vi omregner det til antall kg stål.

$$m = 77001300 \text{ g} = 77001,3 \text{ kg} \approx 77 \text{ t}$$

Som beregningsgrunnlag innenfor stålberegningen har vi brukt databasen «ProBas». ProBas er et system som inneholder en stor mengde informasjon innenfor prosessorienterte basisdata for miljøledelsessystemer. ProBas-kontaktperson; Uwe R. Fritsche uttalte i en personlig e-post til oss følgende: «ProBas offers several data sets concerning (construction) wood, as well as for steel. Some of those are exported from the GEMIS model which is freely available».

Systemet opprettholdes av det tyske føderale miljøbyrået; «Umweltbundesamt», også kalt «UBA». I tillegg så har vi hentet inn mye informasjon fra OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), World Steel Association og IEA (International Energy Agency).

4.1.9 Limtre

I grunnlaget for miljøberegningen for limtre har vi lagt til grunn Moelven Limtre AS sin EPD (Environmental product declaration) (Limtre, 2018). Miljøsystemet er basert på ISO 9001:2015 (Standard, 2015a) og ISO 14001:2015 (Standard, 2015b). Verdiene i utregningen tar høyde for 1 m³ limtre av gran.

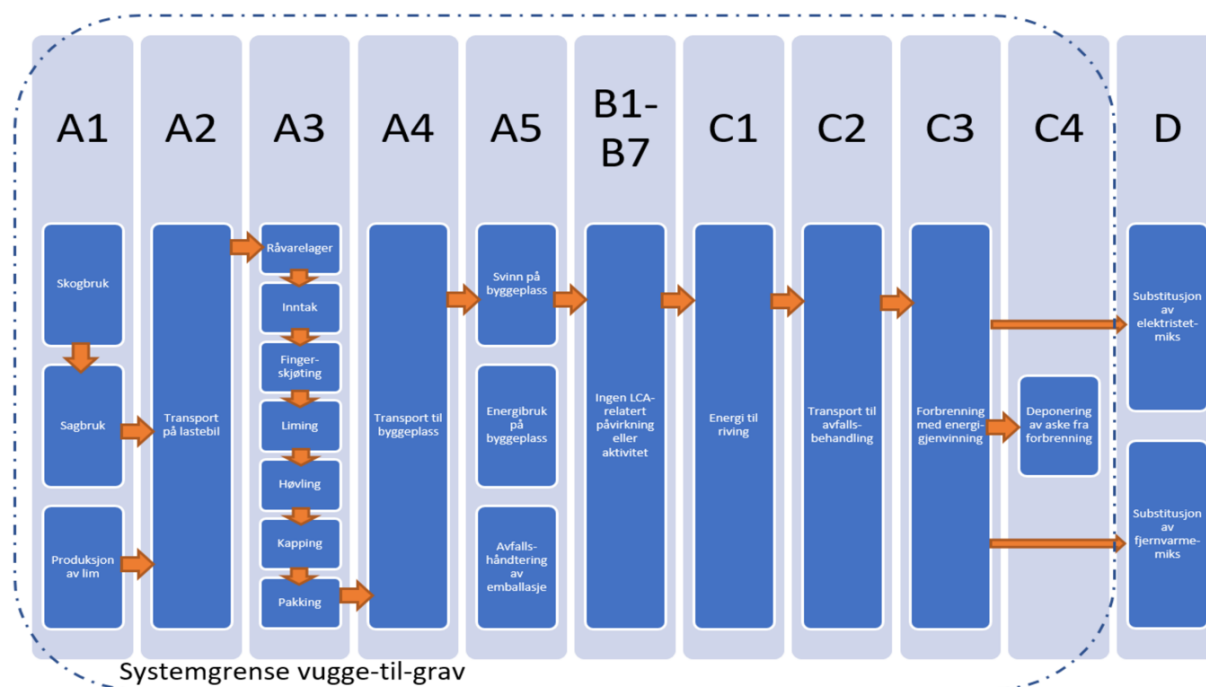
Vi tar utgangspunkt i limtrestyrke GL30C, produsert etter NS-EN 14080:2013 (Standard, 2016b). I henhold til standarden har limtreet en densitet på 470 kg/m³, men den gjennomsnittlige faktiske densiteten er på omtrent 425 kg/m³. Vi tar utgangspunkt i 430 kg/m³ da det er verdien vi har brukt i de andre utregningene av oppgaven.

Materialer	kg	%
Trevirke av gran, tørrvekt	375	88,27
Vann, i trevirke	45	10,59
Lim, tørrvekt	4,85	1,14
Totalt for produktet	424,85	100
Plastemballasje	1,46	
Totalt med emballasje	426,31	

Figur 36 – Materialdensitet (Limtre, 2018)

Beregningsgrunnlag

Vi vil kun se på utslippene i forbindelse med produksjonen av limtreet, det vil si fase A1-A3. A1 er skogbruk, sagbruk og produksjon av lim. A2 er transport til fabrikk og A3 er råvarelager, inntak, fingerskjøting, liming, høvling, kapping og pakking.



Figur 37 – Systemgrense vugge-til-grav (Limtre, 2018)

Miljøpåvirkning									
Parameter	Unit	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
GWP	kg CO ₂ -ekv	-6,08E+02	1,03E+01	1,05E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ODP	kg CFC11-ekv	1,17E-05	1,99E-06	1,51E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
POCP	kg C ₂ H ₄ -ekv	4,49E-02	1,57E-03	5,13E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
AP	kg SO ₂ -ekv	5,53E-01	2,49E-02	6,97E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EP	kg PO ₄ ³⁻ -ekv	9,87E-02	3,33E-03	1,32E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ADPM	kg Sb-ekv	2,37E-04	2,83E-05	2,8 Last ned	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ADPE	MJ	1,11E+03	1,71E+02	1,49E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Figur 38 - Miljøpåvirkning (Limtre, 2018)

Verdiene for miljøpåvirkning er hentet ut ifra Moelven sin EPD side 6. Påvirkningen måles med flere forskjellige parametere, men vi skal kun se på den som heter GWP (*Globalt Oppvarmingspotensial*|*Global warming potential*). Parameteren er oppgitt i enheten kg CO₂-ekvivalenter og måler hvor mange kilogram CO₂-ekvivalenter som bidrar til miljøet per kubikkmeter med limtre produsert.

5 Resultat

Limtre

5.1.1 Fagverk

I dimensjoneringsprosessen har vi utforsket og prøvd mange forskjellige mulige fagverk.

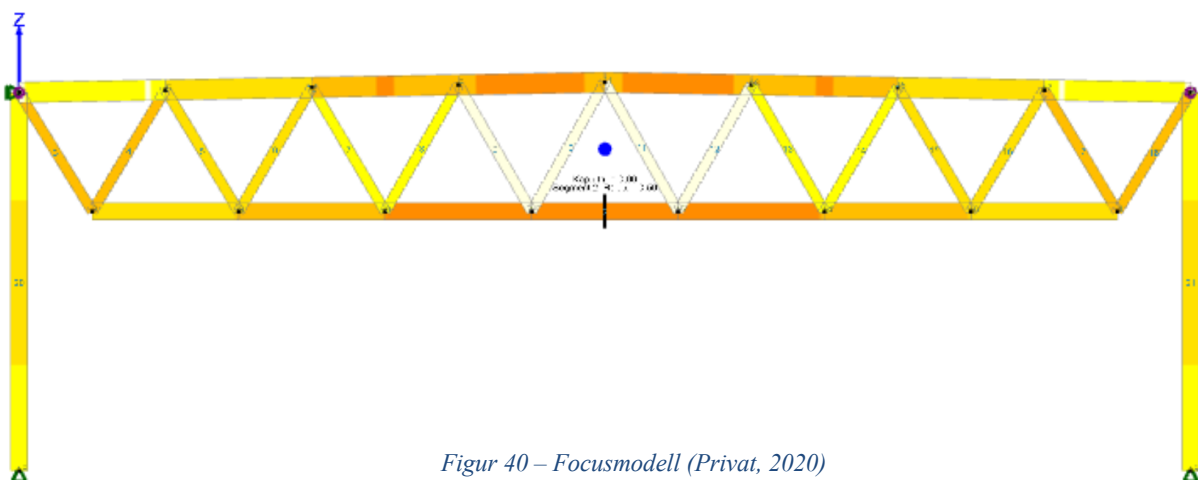
Vi har eksperimentert med både dimensjonene på stavene, over- og undergurt og antall staver i fagverket. Etter nøye vurdering har vi kommet frem til følgende løsning:

Fagverk	b (m)	h (m)	L (m)	Ant	rste utnytt	Form	Kommentar
Stav 18 & 3	200	300	4 111	2	69,0 %	6.17	Kombinert bøyning og aksial strekk
Stav 17 & 4	200	300	4 175	2	78,4 %	6.35	Trykk og knekking
Stav 16 & 5	200	300	4 175	2	46,0 %	6.17	Kombinert bøyning og aksial strekk
Stav 15 & 6	200	300	4 240	2	53,0 %	6.35	Trykk og knekking
Stav14 & 7	200	300	4 240	2	27,0 %	6.17	Kombinert bøyning og aksial strekk
Stav 13& 8	200	300	4 305	2	29,9 %	6.35	Trykk og knekking
Stav 12 & 9	200	300	4 305	2	7,0 %	6.17	Kombinert bøyning og aksial strekk
Stav 11 & 10	200	300	4 370	2	7,5 %	6.35	Trykk og knekking
Overgurt	350	600	17 253	2	43,6 %	6.23	Kombinert trykk og bøyning
Undergurt	200	500	30 188	1	89,5 %	6.17	Kombinert bøyning og aksial strekk

Figur 39 – Dimensjoner for fagverk (Privat, 2020)

Limtreboka anbefaler at helningen på fagverket burde være omtrent mellom $1/20$ og $1/10$ og vi har derfor satt fagverkets midthøyde til 3,5 m og endehøyde til 3,0 m.

Totalt sett veier alle 10 fagverkene 61,6 tonn med en densitet på 430 kg/m^3 . Et fagverk har et totalt volum på $14,3 \text{ m}^3$ og veier omtrent 6,2 tonn.



Figur 40 – Focusmodell (Privat, 2020)

5.1.2 Søyler

Vi har totalt sett tre typer søyler; hovedsøylene, som bærer fagverkene på langveggene, hjørnesøylene som står i hvert hjørne og gavlsøylene som bærer randbjelken på gavlveggen.

Søyler	b (m)	h (m)	L (m)	Ant	rste utnytt	Form	Kommentar
Hovedsøyle	450	450	8 145	10	49,0 %	6.23	Kombinert trykk og bøyning
Hjørnesøyle	200	400	10 845	4	56,0 %	6.23	Kombinert trykk og bøyning
Gavlsøyle	300	300	10 845	6	95,0 %	6.23	Kombinert trykk og bøyning

Figur 41 – Dimensjoner på søyler (Privat, 2020)

Hovedsøylen

Hovedsøylene har dimensjonene 450x450mm. De har en total vekt på tilsammen 7,1 tonn og et volum på 16,5 m³ for alle 20 søylene.

Hjørnesøylene

Hjørnesøylene er litt ekstra utsatt med tanke på at den får last fra to sider samtidig, og i tillegg aksiallast fra randbjelken. De har dimensjonene 200x400mm og veier tilsammen 1,5 tonn.

Gavlsøylene

Denne søylen var opprinnelig tenkt å være en del mindre enn det som ble resultatet, med tanke på at kreftene på gavlveggen og randbjelken er mindre enn resten av bygget. Det viser seg at vindlastene er den dominerende lasten i dette tilfelle. På grunn av knekkfare og en relativt høy søyle uten avstivning og y-aksen ble det nødvendig å bruke en langt større dimensjon enn først antatt.

5.1.3 Randbjelke og tverrbjelke

Bjelker	b (m)	h (m)	L (m)	Ant	rste utnytt	Form	Kommentar
Randbjelke	200	300	34 500	2	77,8 %	-	Nedbøyning
Tverrbjelke - langvegg	140	135	5 600	22	-	-	-
Tverrbjelke - kortvegg	140	135	5 000	14	.	.	.

Figur 42 – Bjelke dimensjoner (Privat, 2020)

Randbjelken er plassert på gavlveggen på hver side av bygget og bærer endene av lastene fra taket. Tverrbjelken har vi kun valgt en dimensjon og ikke vist utregning på. Dette er på grunn av at fasaden som er tiltenkt bygget vil stive av alle søylene om den svake aksene Z og randbjelken vil ved det ikke være til nytte.

Miljø

5.1.4 Stål

Vi vet nå at det er 77001,3 kg konstruksjonsstål som må til i bæresystemet på Rygge sportshall. I figur 43 ser man hvor mange MJ (megajoule) fra de forskjellige energikildene som benyttes for å produsere stålet. Siden testen fra ProBas handler om å produsere kun ett kilo stål, så står det derfor MJ/kg. I tabellen er det noen av energikildene som er angitt med negativt fortegn. Dette kan ved første øyekast se litt rart ut fordi man regner med at alle gir energi inn i produksjonen av stålet og ikke tar energi ut av produksjonen. Det tyske føderale miljøbyrået skriver følgende: «Negative Werte durch Gutschriftenrechnung.» Dette oversettes til at «Negative verdier oppstår på grunn av kreditering». Det som blir kreditert er energi som brukes til flere formål. Hva det vil si i praksis kan forklares nøyere: ProBas bygger i utgangspunktet på «GEMIS», som er en brutto-prosess hvor all energibruk dokumenteres. Så gis det en godskrivning ved hjelp av system-ekspansjon, som alternativt allokeres i «LCA» (Life Cycle Assessment) fordi energien brukes til flere formål. De negative verdiene vil på den måten ikke ha noe nevneverdig innvirkning på estimatet i databasen. De er bare små verdier som er der for å vise hvordan system-ekspansjon gir «Gutschrift».

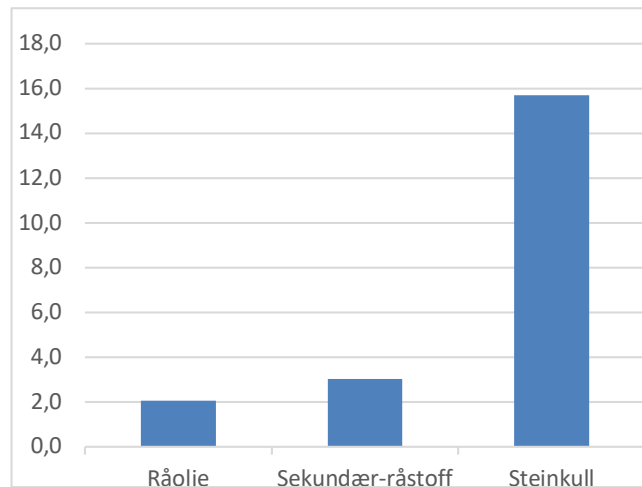
Energikilde	MJ/kg
Avfall	0,0
Biomasse-reststoff	-0,2
Brunkull	-0,2
Geotermisk energi	0,0
Kjernekraft	-0,2
Naturgass	-0,8
Råolje	2,1
Sekundær-råstoff	3,0
Solenergi	-0,1
Steinkull	15,7
Vannkraft	0,1
Vindkraft	-0,1
Sum	19,4

Figur 43 – Energikilde (Privat, 2020)

Ut ifra figur 43 har vi laget et diagram. Vi ser tydelig og klart at mesteparten av energien kommer fra steinkull. De to største energikildene som kommer etter, er vesentlig lavere enn steinkull. Sekundær-råstoff er ifølge databasen den nest største energikilden som er brukt,

Resultat

med 3,0 MJ på ett kg. Sekundær-råstoff kan virke litt uklart hva det egentlig er, men kort fortalt så er det som Uwe R. Fritsche uttaler til oss i en e-post: «... that represents recycled materials». Det er altså resirkulert materiale som kan komme fra enten private husstander, offentlige institusjoner eller kommersielle forretninger. Dette skjer for eksempel ved at man brenner avfall i et forbrenningsanlegg, så omgjøres varmen til



Figur 44 – Tre største energikilder (Privat, 2020)

energi, som igjen går til forskjellige utløp, deriblant produksjon av stål. Råolje ble i dette datasettet den tredje største energikilden til produksjon av stål (Lundberg, 2019). Råolje er naturlig forekomst av flytende hydrokarboner som eksisterer i berggrunnen. Dette brukes til blant annet å produsere strøm, som igjen går til produksjon av stål i vårt tilfelle.

Vi kan også klassifisere etter energiklasse. Det vil si hvorvidt de forskjellige energikildene som er brukt er fornybare eller ikke. Det kommer ikke som en overraskelse at hovedandelen av energien er ikke fornybar energi, i og med at den største energikilden er steinkull, som er en fossil energikilde. I figur 45 ser man at andelen av fornybar energi er marginal, og ganske ubetydelig.

Energiklasse	MJ/kg
Fornybar energi	-0,3
Ikke fornybar energi	16,6
Andre	3,0

Figur 45 – Energiklasse (Privat, 2020)

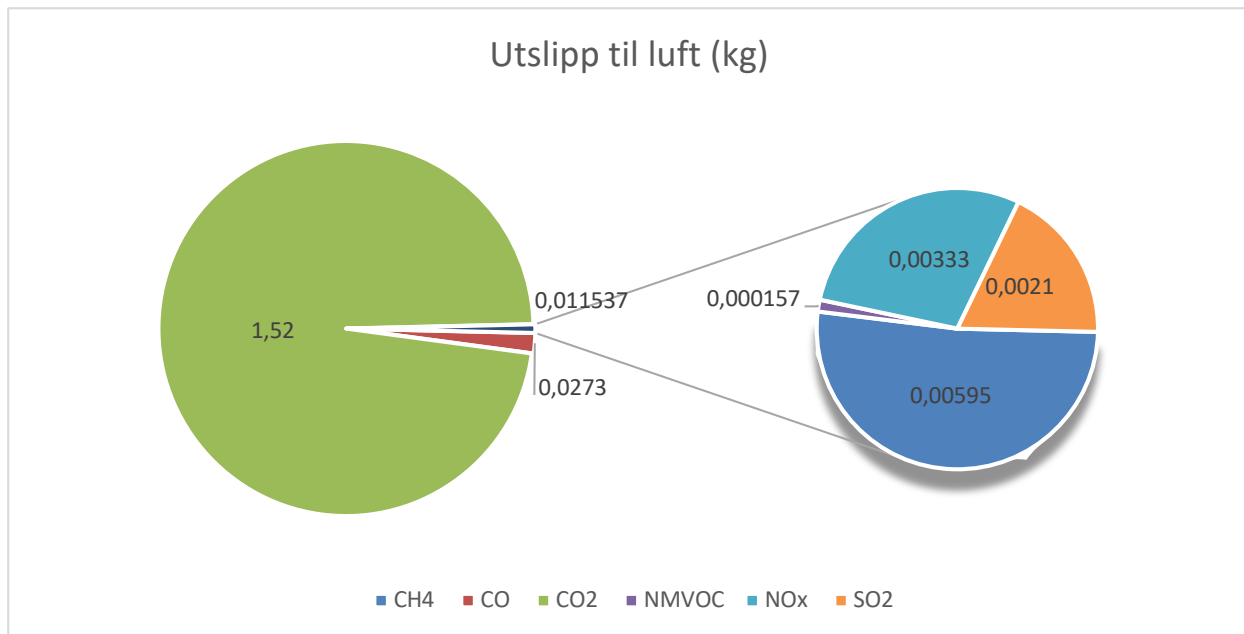
Vi skal nå se nærmere på den delen som går inn under ikke fornybar energi, rett og slett fordi vi ønsker å finne ut hvor mange CO₂-ekvivalenter som kommer ved produksjon av stål. Dette gjør vi ved å se på hvilke utslipp til luft som kommer som følge av produksjonen.

Resultat

Som man kan se i figur 46, så er det en rekke utslipp fra produksjonen av stål som går ut i luften. Alle disse er fra den indirekte posten, som gjenspeiler hvilke energikilder som er brukt i produksjonen. Det største utslippet er rent karbondioksid (CO₂), som er på 1,52 kg fra produksjon av 1 kg stål. Utenom karbondioksidet så er det andre utslipp som skiller seg ut fra de andre i størrelse. Karbonmonoksid (CO), metan (CH₄), nitrogenoksider (NO_x), svoveldioksid (SO₂) og andre flyktige organiske forbindelser (NMVOC).

Navn	Direkte	Indirekte	Enhet
As (luft)		7,73E-08	kg
Cd (luft)		4,83E-08	kg
CH ₄	0	0,00595	kg
CO	0	0,0273	kg
CO ₂	0	1,52	kg
Cr (luft)		3,88E-07	kg
H ₂ S	0	-4,99E-09	kg
HCl	0	2,98E-06	kg
HF	0	1,08E-07	kg
Hg (luft)		9,70E-08	kg
N ₂ O	0	1,29E-05	kg
N ₂ 3	0	-4,98E-06	kg
Ni (luft)		3,25E-07	kg
NMVOC	0	0,000157	kg
NO _x	0	0,00333	kg
PAH (luft)		1,38E-12	kg
Pb (luft)		2,54E-06	kg
PCDD / F (luft)		3,92E-12	kg
Perfluoraethan	0	1,69E-10	kg
Perfluoromethane	0	1,42E-09	kg
SO ₂	0	0,0021	kg
Støv	0	0,00185	kg

Figur 46 – Utslipp til luft (Privat, 2020)



Figur 47 – Utslipp til luft (Privat, 2020)

I figur 47 har vi et sektordiagram av sektor. Det illustrer forholdet mellom de forskjellige utslippene som følge av produksjonen av 1 kg stål. Her har vi valgt å bare ta med de største utslippene.

Når vi legger sammen alle disse utslippene til luft, og kategoriserer dem på CO₂-, SO₂- og TOPP-ekvivalenter, får vi

Navn	Direkte	Indirekte	Enhet
CO ₂ -ekvivalenter	0	1,68	kg
SO ₂ -ekvivalenter	0	0,00441	kg
TOPP-ekvivalenter	0	0,00731	kg

Figur 46 – Utslipp til luft klassifisert (Privat, 2020)

Resultat

en oversikt over hvilke utslipp til lufta som kommer fra produksjonen. I figur 48 ser vi at fra produksjon av 1 kg stål, kommer det et utslipp på 1,68 kg CO₂-ekvivalenter.

Som tidligere nevnt, så har konstruksjonsstålet i Rygge sportshall en vekt på 77001,3 kg. For å finne totalt antall CO₂-ekvivalenter som følge av produksjon av stålet, så må vi gange antall kg stål med antall kg CO₂-ekvivalenter per kg produsert stål.

$$m = 77001,3 \text{ kg} * 1,68 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$$

$$m = 129362,18 \text{ kg CO}_2 \approx 129,36 \text{ tonn CO}_2$$

Konsekvensen av å bruke konstruksjonsstål i bæresystemet, er et utslipp på omtrent 129,36 tonn CO₂-ekvivalenter.

5.1.5 Limtre

I tillegg vet vi at dersom det skal bygges i limtre, så trenges det til sammen 76 096 kg treverk for å bære sportshallen. Ut ifra elementlistene for bæresystemet i limtre ser vi at det totale volumet er gitt til 177 m³. Dette er volumet for alle elementer i bæresystemet; over- og undergurt, samt staver i fagverket, hjørne-, gavll- og hovedsøyler og rand- og tverrbjelker.

Limtreet har ifølge EPD en GWP på -608 kg CO₂-ekvivalenter per m³ i produksjonsfasen (Limtre, 2018). Dette vil utgjøre et totalt bidrag til biolagring på 107 616 kg CO₂-ekvivalenter. I praksis vil dette si at vi ved bruk av limtre som bæresystem sparer miljøet for 107,62 tonn CO₂-ekvivalenter.

Fagverk	Volum (m ³)	Vekt (kg)
Stav 18 & 3	0,49	212
Stav 17 & 4	0,50	215
Stav 16 & 5	0,50	215
Stav 15 & 6	0,51	219
Stav14 & 7	0,51	219
Stav 13& 8	0,52	222
Stav 12 & 9	0,52	222
Stav 11 & 10	0,52	225
Overgurt	7,25	3 116
Undergurt	3,02	1 298
Sum (*et fagverk)	14,34	6 164
Sum (*Alle fagverk)	143,36	61 643
Bjelker	Volum (m ³)	Vekt (kg)
Randbjelke	4,14	1 780
Tverrbjelke - langvegg	2,32848	1 001
Tverrbjelke - kortvegg	1,323	569
Sum	7,79	3 350
Søyler	Volum (m ³)	Vekt (kg)
Hovedsøyle	16,49	7 092
Hjørnesøyle	3,47	1 492
Gavlsøyle	5,86	2 518
Sum	25,82	11 103
TOTAL SUM	177	76 096

Figur 47 – Limtre mengde (Privat, 2020)

5.1.6 Oppsummering

I oppgaven har vi definert problemstillingen slik at vi skal se hvilken miljømessig gevinst det vil gi å bytte ut bæresystemet fra stål til limtre. Som beskrevet under kapittelet for stål så har den en GWP på omtrent 1,68 kg CO₂-ekvivalenter per kg, mens limtreet hadde en GWP på -608 kg CO₂-ekvivalenter per m³, noe som ved omregning utgjør omtrent -1,29 kg CO₂-ekvivalenter per kg ved bruk av limtreets densitet definert i standard EN 14080:2013.

Stålet veier noe mer enn limtreet så sammenligningen kan ikke bli gjort per kilogram. Vi ganger opp etter de totale mengdene og sammenligner deretter.

Stål = 129 361,68 kg CO₂-ekvivalenter

Limtre = -107 616 kg CO₂-ekvivalenter

Vi ser av resultatene at det ved å bytte ut bæresystemet i stål med limtre vil gi en positiv differanse i miljøregnskapet på 236 977,68 kg CO₂-ekvivalenter.

6 Analyse

6.1.1 Limtre

Vi så på flere løsninger for bæresystem. Til å begynne med forsøkte vi en løsning med kun bjelker fremfor fagverk. Bjelkene var dimensjonert til 300x2100mm og skulle strekke seg 34,5 meter for å dekke hele spennet på kortsiden. Bjelken ble kontrollert for alle områder, herunder; skjær, bøyning, vipping, nedbøyning og brann og hadde god nok kapasitet. Da transport i denne forbindelse ble utfordrerne og Moelven limtre anbefalte lengder ikke lenger enn 30 meter måtte bjelken i så fall skjøtes. Det var i denne skjøten problemet oppsto da det ville opptre et så stort moment at skjøten ville blitt unaturlig massiv.

Da vi forsøkte å regne på skjøten kom det frem at løsningen ikke var realistisk. Bare volumet av bjelkene alene ville utgjort 217,4 m³ med en vekt på 93,5 tonn mot fagverket som har et volum på 143,4 m³ som utgjør en vekt på 61,6 tonn. Både beregningsmessig og praktisk gjennomførbart stilte fagverket sterkest, og på bakgrunn av det konkluderte vi med at vi fokuserte videre på fagverket og la fra oss muligheten med bjelker.

Angående hovedsøylene som bærer fagverkene har vi valgt en relativt stor dimensjon for begge akser for å forhindre knekking i størst mulig grad. Dette er begrunnet med at aksialkraften og bøyemomentet, som for øvrig er temmelig store i disse søylene, virker sammen om å knekke søylen. Knekkfaren er størst om sterk akse Y da vindlasten kommer i tillegg til aksiallasten, men om svak akse Z bidrar kun aksiallasten til knekking. Bredden på søylen (svak akse Z) er ønskelig å ha samme dimensjon som overgurten i fagverket da denne er den understøttende søylen. Derfor endte vi opp med en dimensjon på 450x450 mm.

6.1.2 Miljø

Som beskrevet i kapitlet om resultat kommer det frem at differansen ved bruk av limtre istedenfor stål vil «spare» miljøet for 237 tonn CO₂-ekvivalenter kun i produksjonsprosessen. Dette er et betraktelig bidrag og vil være med på å redusere utslipp på nasjonal basis. For å sette det i perspektiv ble det sluppet ut 52 000 000 tonn CO₂-ekvivalenter fra Norsk territorium i 2018 (sentralbyrå, 2019).

I 2019 ble det gitt igangsettelsestillatelse til 5 619 700 m² bruksareal til annet enn bolig (Sentralbyrå, 2020). Hvis vi antar at 75 % av de er sportshaller og andre stålhaller og at den gjennomsnittlige størrelsen på en slik hall er 2000 m² så kan vi regne oss frem til at det blir omtrent satt opp 2100 haller per år. Hvis alle disse hallene blir satt opp i limtre som bæresystem istedenfor stål vil dette spare miljøet for omtrent 0,5 millioner CO₂-ekvivalenter, noe som utgjør ca. 1,0 % av Norges totale årlige CO₂-utslipp.

Stål

Vi ser av resultatet at produksjon av stål ikke er miljøvennlig. Tidligere i oppgaven er det presentert datasett som tok utgangspunkt i en såkalt «stålmix», hvor 80% av stålet var produsert med BOF-metoden, mens 20 % kom fra EAF-metoden. Dette gjenspeiles i resultatet, og det er derfor antall kg CO₂-ekvivalenter kom på 1,68. Dersom det hadde blitt brukt mer av den skrapbaserte metoden i denne stålblandingen, ville resultatene sett annerledes ut. Men allikevel er det viktig å huske på at dette er et tysk datasett som ikke nødvendigvis gir pålitelige data for andre stålprodusenter. Dersom man kunne klare å vekte det annerledes, slik at andelen av fornybar energi økes ved at man for eksempel bruker mer vannkraft, og mindre steinkull, så ville det naturligvis resulter i at produksjon av stål ble mer miljøvennlig.

7 Konklusjon

Vår problemstilling er:

I hvilken grad er det mulig å erstatte det eksisterende bæresystemet, som i dag er i stål, med limtre, og hvilken miljømessig gevinst vel dette utgjøre?

Det er høyst gjennomførbart å erstatte det eksisterende bæresystemet med et bæresystem i limtre uten kompromiss for det arkitektoniske uttrykket og byggets funksjonalitet.

Resultatene viser at ved å benytte limtre fremfor stål i det aktuelle bæresystemet vil man spare miljøet for 237 tonn CO₂-ekvivalenter. Isolert sett utgjør dette svært lite på Norges klimaregnskap, men det ligger en relativt stor potensiell gevinst i en slik utskiftning hvis det skjer et skifte i byggepraksis i lignende haller rundt om i landet.

Litteraturliste

- Benum, E. (2015) *Forurensning og naturvern*. Tilgjengelig fra: <https://www.norgeshistorie.no/oljealder-og-overflod/1902-forurensning-og-naturvern.html> (Hentet: 11. mai 2020).
- FN (2017) *Klima og miljø*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe> (Hentet: 20.04.2020).
- FN (2019a) *Klimaendringer*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer> (Hentet: 11. mai 2020).
- FN (2019b) *FNs miljøprogram (UN Environment)*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-organisasjoner-fond-og-programmer/FNs-miljoeprogram-UN-Environment> (Hentet: 19.05.2020).
- Global Internal Displacement Database* (2019). Tilgjengelig fra: <https://www.internal-displacement.org/database/displacement-data> (Hentet: 20.04.2020).
- Impacts of energy market developments on the steel industry* (2013). OECD: Laplace Conseil.
- Limtre, M. (2018) *Standard limtre*. (ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION). www.epd-norge.no: Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner.
- Lundberg, N. H. (2019) *Råolje Store Norske Leksikon*. www.snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/r%C3%A5olje> (Hentet: 15.05.2020).
- Probas (2020a) *MetallStahl-WarmWalz-DE-2020*. www.probas.umweltbundesamt.de: Probas.
- Probas (2020b) *MetallStahl-Elektro-DE-2020*. www.probas.umweltbundesamt.de: Probas.
- Probas (2020c) *MetallStahl-Oxygen-DE-2020*. www.probas.umweltbundesamt.de: Probas.
- Probas (2020d) *MetallStahl-mix-DE-2020*. www.probas.umweltbundesamt.de: Probas.
- sentralbyrå, S. (2019) *Utslipp til luft, i sentralbyrå, S. (red.)*. www.ssb.no: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn>.
- Sentralbyrå, S. (2020) *Byggeareal, i Sentralbyrå, S. (red.)*. www.ssb.no. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/byggeareal/aar>.
- Sprett aktivitetspark* (2019). Tilgjengelig fra: <https://sprettaktivitetspark.no/rygge/trampolinepark/> (Hentet: 15.05.2020).
- Standard, N. (2009a) *Rettelsesblad AC - Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering* (s. 12). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=382917>.
- Standard, N. (2009b) *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster* (s. 188). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055>.
- Standard, N. (2010) *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger* (s. 132). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137>.
- Standard, N. (2015a) *Ledelsessystemer for kvalitet - Krav (ISO 9001:2015)* (s. 40). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=773201>.

Konklusjon

- Standard, N. (2015b) Ledelsessystemer for miljø - Spesifikasjon med veiledning (ISO 14001:2015) (s. 44). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=771074>.
- Standard, N. (2016a) Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner (s. 128). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=814847>.
- Standard, N. (2016b) Trekonstruksjoner - Limtre og limt laminert heltre - Krav (s. 112). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055>.
- Standard, N. (2018) Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster (s. 64). www.standard.no: Norsk Standard. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1004200>.
- Stål, N. (2020) *Grønnere – Stålproduksjon i dag*. Tilgjengelig fra: <https://www.norskstaal.no/om-oss/miljoe-og-baerekraft/groennere-staalproduksjon-i-dag> (Hentet: 20. april 2020).
- Tjernshaugen, A. (2020) Miljø, i Nordbø, B. (red.) *Store Norske Leksikon*. www.snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/milj%C3%B8>.
- Tore J. Brænd, K. O., Jo Halvard Halleraker, Andreas Tjernshaugen (2009) Natur- og miljøvern *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/natur-og-milj%C3%B8vern>.
- Trefokus (2020) *Limtre*. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/materialer/limtre> (Hentet: 20 April 2020).

8 Vedlegg

Grunnlag og forutsetninger

Limtrekvalitet

Limtre GL30C

Klimaklasse

Standarden sier i følgende i tabell NA.901 Klimaklasser:

«Bærende elementer innendørs i rom som vanligvis er oppvarmet»

Klimaklasse 1

NA.2.3.1.3 Klimaklasser

NA.2.3.1.3(1)P Klimaklasser er gitt i tabell NA 901

Tabell NA.901 Klimaklasser

Klima-klasse	Relativ luftfuktighet RF	Fuktighetsinnhold for trevirke ^a ω	Eksempler
1	RF < 65 %	$\omega < 12 \%$	bærende elementer innendørs i rom som vanligvis er oppvarmet loftsbeleg og bærende takkonstruksjoner i kalde, men luftede loftsrom over rom som vanligvis er oppvarmet yttervegger i bygninger som vanligvis er oppvarmet og som er beskyttet av dampspærre på varm side og av bl.a. vindspærre
2	65 % ≤ RF ≤ 85 %	12 % ≤ ω ≤ 20 %	bærende elementer i bygninger som vanligvis ikke er oppvarmet, men ventilerte takro konstruksjoner i friluft, når disse er effektivt beskyttet mot regn og vann.
3	RF > 85 %	$\omega > 20 \%$	konstruksjoner som ikke er beskyttet mot regn og vann. konstruksjoner som er i direkte kontakt med terreng. MERKNAD Bare i unntakstilfeller anses tildekte konstruksjoner å tilhøre klimaklasse 3.

^a Tilsvarende omtrentlig fuktighetsinnhold for konstruksjonsvirke av gran og furu ved 20 °C

Figur 48 – Tabell NA.901 Klimaklasser

Vedlegg

K_{mod}

Ut ifra Tabell 3.1

Vi anser snø som mellomlangtidslast som i klimaklasse 1 gir:

$$K_{mod} = 0,8$$

Tabell 3.1 – Verdier av k_{mod}

Materiale	Standard	Klima-klasse	Lastvarighetsklasse				
			Perma-nent last	Langtids-last	Mellom-langtids-last	Korttids-last	Øyeblikks-last
Konstruksjonstre	NS-EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Limtre	NS-EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Figur 49 – Tabell 3.1 – Verider av K_{mod}

Partialfaktor for materialegenskaper og bestandighet NA.2.4.1

Hentet ut ifra Tabell NA.2.3

Tabell NA.2.3 – Partialfaktorer γ_M for materialegenskaper og bestandighet

Materialer og produkter	γ_M
Konstruksjonstre	1,25
Limtre	1,15
Parallellfiner (LVL), kryssfiner	1,15
OSB	1,3
Sponplater	1,3
Trefiberplater (alle typer)	1,3
Forbindelser	1,3
Spikerplater	1,25
tre delen	1,25
ståldelen	1,0
Bruks- og ulykkeskombinasjoner	1,0

Figur 50 – Tabell NA. 2.3 – Partialfaktorer γ_m for materialegenskaper og bestandighet

For limtre er partialfaktoren satt til:

$$\gamma_m = 1,15$$

Systemfasthet 6.6

I punkt 2 i kapittel 6.6 i Standarden sies det følgende:

«Forutsatt at det kontinuerlige lastfordelingsystemet kan overføre lastene fra én konstruksjonsdel til den neste, settes faktoren»:

$$K_{\text{sys}} = 1,1$$

K_{def} - Tabell 3.2

Klimaklasse 1 og limtre gir:

$$K_{\text{def}} = 0,6$$

Tabell 3.2 – Verdier av k_{def} for tre og trebaserte materialer

Materiale	Standard	Klimaklasse		
		1	2	3
Konstruksjonstre	NS-EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Limtre	NS-EN 14080	0,60	0,80	2,00

Figur 51 – Tabell 3.2 – Verdier av K_{def} for tre og trebaserte materialer

K_m

I avsnitt 6.1.6 Bøyning punkt 2 står følgende:

«For konstruksjonstre, limtre og parallelfinner:

- Rektangulære tverrsnitt: $K_m=0,7$

Vedlegg

Formfaktor μ

$\mu = 0,8$ (se vedlegg xx for snølastberegning)

Verdier fra tabell

$$f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,g,0,k} = 24,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,\text{mean}} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,05} = 10\,800 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{g,\text{mean}} = 650 \text{ N/mm}^2$$

$$\psi_{1,\text{snø}} = 0,7$$

$$\psi_{1,\text{snø}} = 0,5$$

$$\psi_{2,\text{snø}} = 0,2$$

Lastbredde = 5,6 m

L = 34,5 m

Takvinkel = 1gr

Fagverk

8.1.1 Staver

Alle stavene er like gjennom hele fagverket, derfor regnes de repeterende verdiene ut her:

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} = 17 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} = 13,6 \frac{N}{mm^2}$$

KNEKKING

Reduksjonsfaktor for knekking $K_{c,i}$:

Om sterk akse Y

Hvor:

$$K_{c,i} = \frac{1}{K_i + \sqrt{K_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (6.25) / (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,y} = \frac{1}{0,786 + \sqrt{0,786^2 - 0,728^2}} = 0,923$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1 - 0,923 = 7,7\%$

hvor:

Vedlegg

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/ (6.28)$$

$$\Rightarrow K_y = 0,5(1 + 0,1 * (0,728 - 0,3) + 0,2728^2) = 0,786$$

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)/ (6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{48 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,73$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{4175 \text{ mm}}{87 \text{ mm}^2} = 48 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 4175 \text{ mm}$$

$$i_y = 0,29 * h = 0,29 * 300 = 87 \text{ mm}$$

Om svak akse Z

Hvor:

$$K_{c,y} = \frac{1}{K_y + \sqrt{K_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (6.25)/ (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,i} = \frac{1}{1,135 + \sqrt{1,135^2 - 1,091^2}} = 0,691$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1 - 0,691 = 31\%$

Vedlegg

$$N_{Rd} = K_{c,i} * f_{c,0,d} * A = 1,0 * 18,4 \frac{N}{mm^2} * 60 * 10^3 mm^2 = 777,3 kN$$

hvor:

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/(6.28)$$

$$\Rightarrow K_z = 0,5(1 + 0,1 * (1,091 - 0,3) + 1,091^2) = 1,135$$

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)/(6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{72 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 1,091$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_z = \frac{4175 mm}{58 mm^2} = 72 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 4175 mm$$

$$i_i = 0,29 * b = 0,29 * 200 mm = 58 mm$$

BRANN

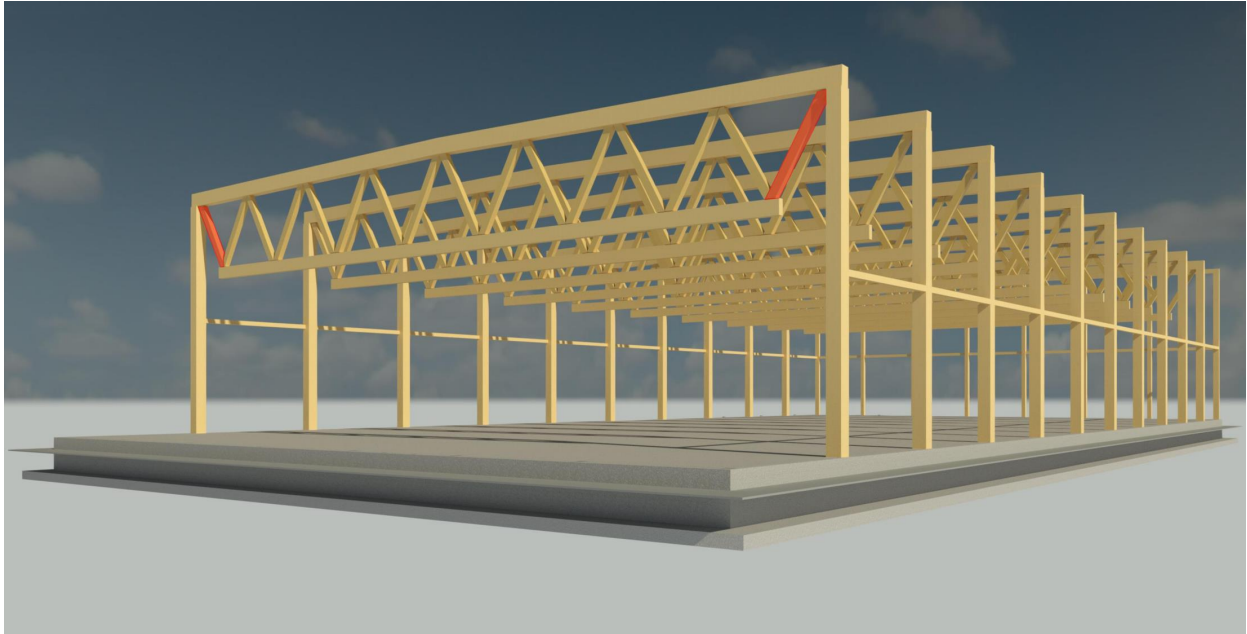
Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 200 mm - 2 * 28 mm = 144 mm$$

$$h_{ef} = 300 mm - 2 * 28 mm = 244 mm$$

$$A_{ef} = 144 * 272 mm = 35,1 * 10^3 mm$$

Stav 3 & 18 (Strekk)



Figur 52 – Stav 3 & 18 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4111$ mm

$N_d = 562,5$ kN

STREKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Opptredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{562,5 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 9,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 9,4 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{9,4}{13,6} = 69\%$$

BRANN

Strekkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$$b_{ef} = 144 \text{ mm}$$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$$h_{ef} = 244 \text{ mm}$$

Lengde $l = 4175 \text{ mm}$

$$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}^2$$

$$N_d = 102,1 \text{ kN}$$

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

Vedlegg

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{102,1 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 2,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

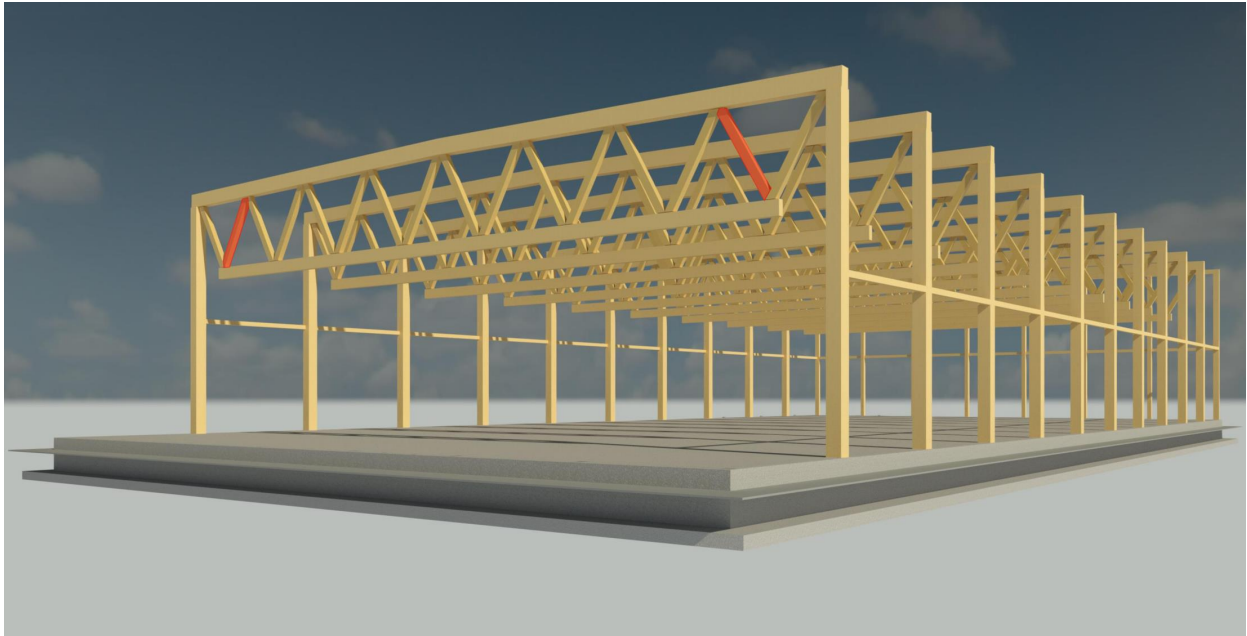
Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 2,9 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til strekkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{2,9}{13,6} = \mathbf{21\%}$$

Stav 4 & 17 (Trykk)



Figur 53 – Stav 4 & 17 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4175$ mm

$N_d = 553,9$ kN

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{396 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 9,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 9,2 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{9,2}{17} = 54\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{9,2 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,78 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

78,4%

BRANN

Trykkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

Vedlegg

$$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}$$

$$N_d = 99 \text{ kN}$$

6.1.4 Trykk i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{99 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 2,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 2,8 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2,8}{17} = 17\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

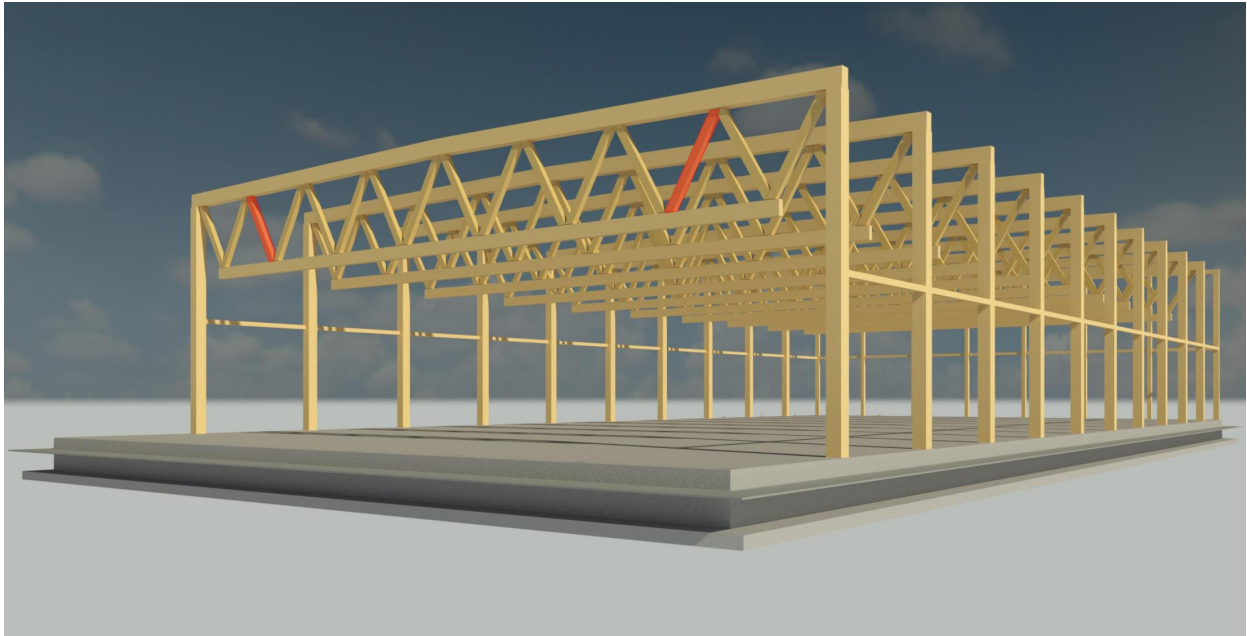
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{2,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,691 * 17} = 0,239 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

23,9%

Stav 5 & 16 (Strekk)



Figur 54 – Stav 5 & 16 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4175$ mm

$N_d = 377$ kN

STREKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Opptredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{391,7 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 6,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 6,3 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til Strekkspenning

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{6,3}{13,6} = 46\%$$

BRANN

Strekkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

Lengde $l = 4175 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}^2$

$N_d = 70 \text{ kN}$

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Vedlegg

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{N}{mm^2}$$

Oppredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{70 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 2,0 \frac{N}{mm^2}$$

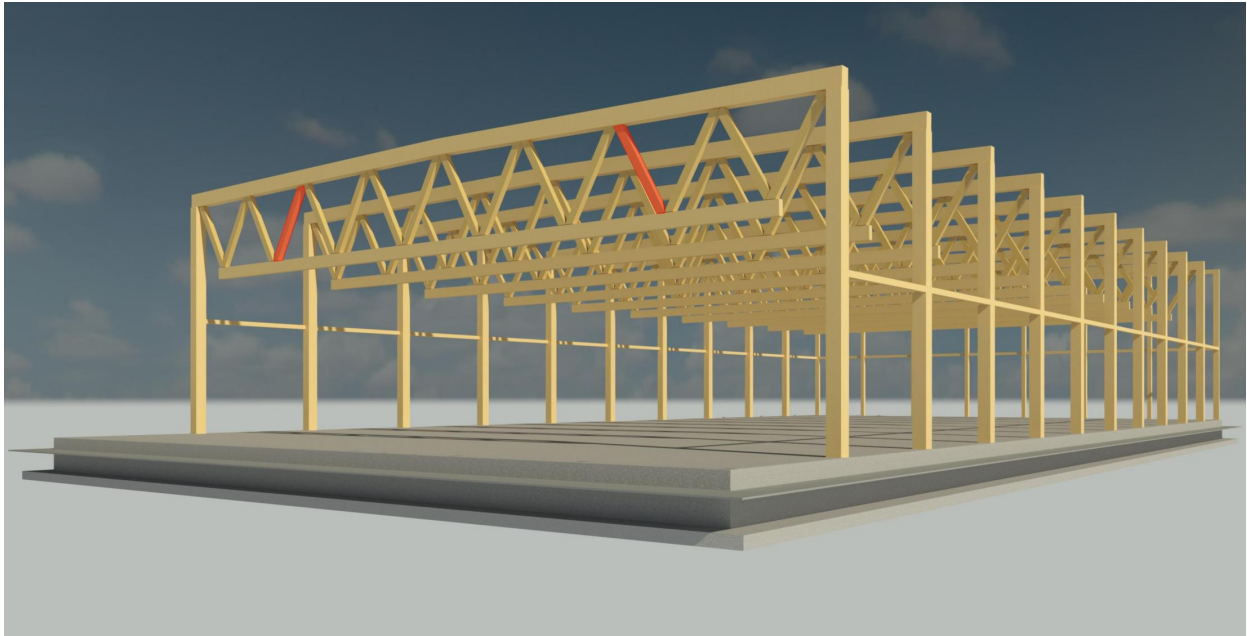
Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 2,0 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til strekkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{2,0}{13,6} = 15,0\%$$

Stav 6 & 15 (Trykk)



Figur 55 – Stav 6 & 15 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4240$ mm

$N_d = 373,2$ kN

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{373,2 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 6,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 6,2 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{6,2}{17} = 36\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{6,2 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,53 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

53%

BRANN

Trykkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}$

$N_d = 66,4 \text{ kN}$

Vedlegg

6.1.4 Trykk i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredeende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{66,4 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 1,9 \frac{N}{mm^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 1,9 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{1,9}{17} = 11\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

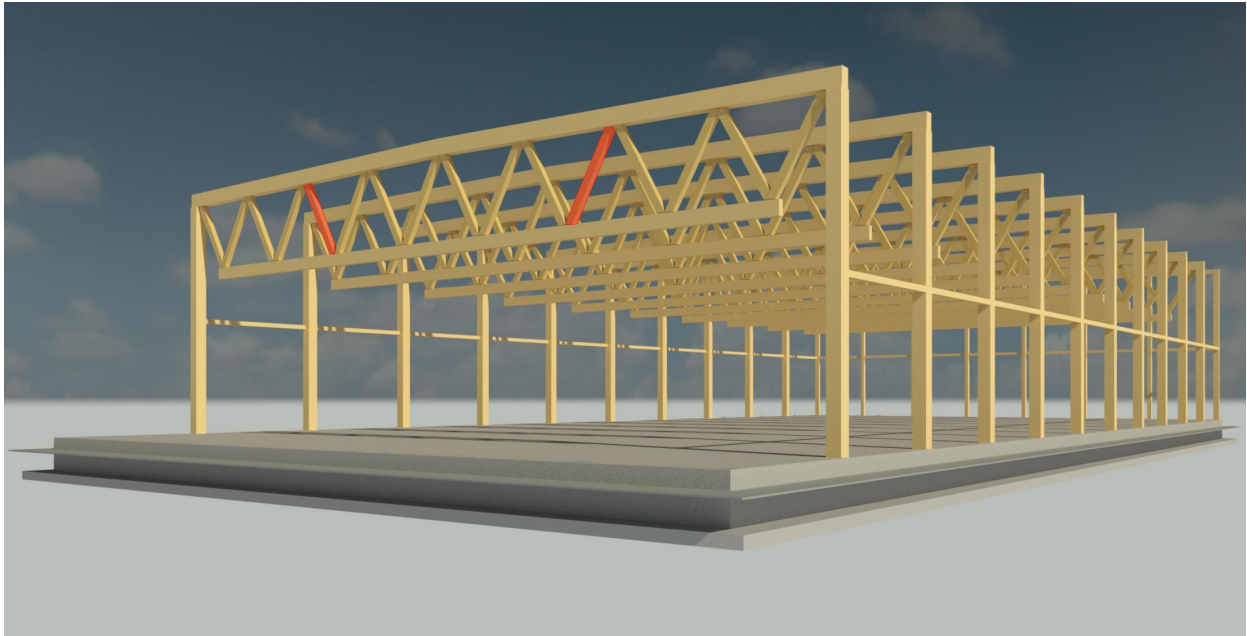
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{1,9 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,16 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

16%

Stav 7 & 14 (Strekk)



Figur 56 – Stav 7 & 14 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4240$ mm

$N_d = 216$ kN

STREKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Opptredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{216 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 3,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 3,6 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{3,6}{13,6} = 27\%$$

BRANN

Strekkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}^2$

$N_d = 40,4 \text{ kN}$

6.1.2 Strekk i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (6.1)$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Oppredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{40,4 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 1,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

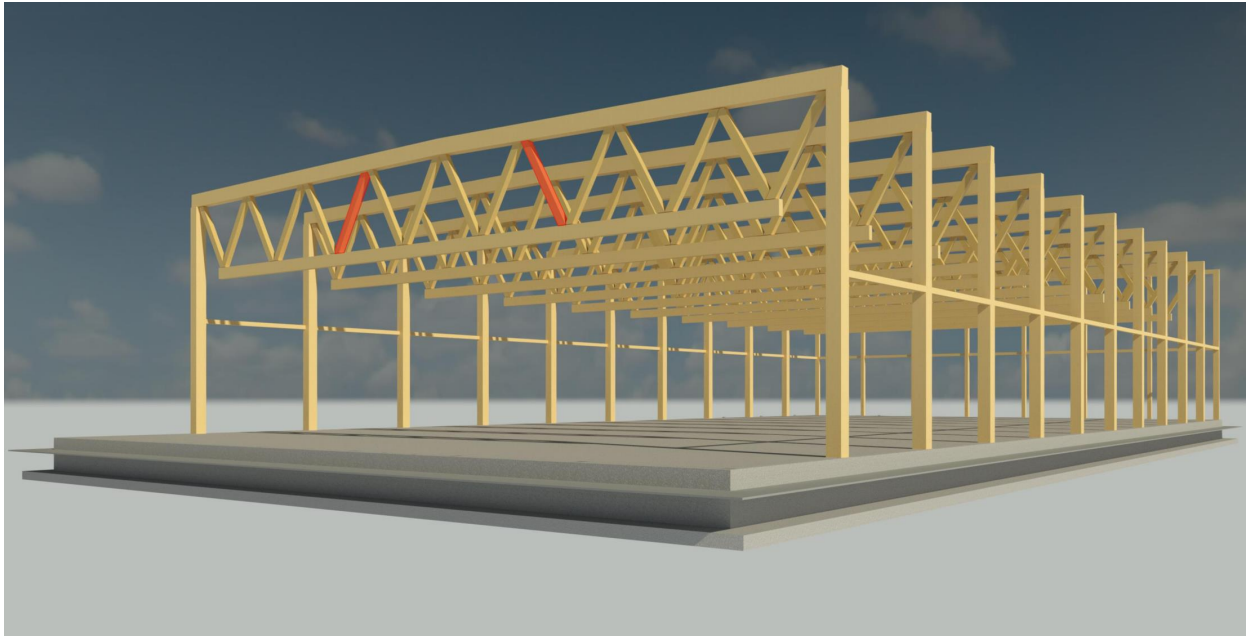
Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 1,1 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til strekkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{1,1}{13,6} = 8 \%$$

Stav 8 & 13 (Trykk)



Figur 57 – Stav 8 & 13 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

Lengde $l = 4305 \text{ mm}$

$N_d = 211 \text{ kN}$

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Oppredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{211 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 3,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

Vedlegg

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 3,5 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{3,5}{17} = 21\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{3,5 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,3 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

29,9%

BRANN

Trykkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}$

$N_d = 37 \text{ kN}$

Vedlegg

6.1.4 Trykk i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{37 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 1,1 \frac{N}{mm^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 1,1 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{1,1}{17} = 6\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

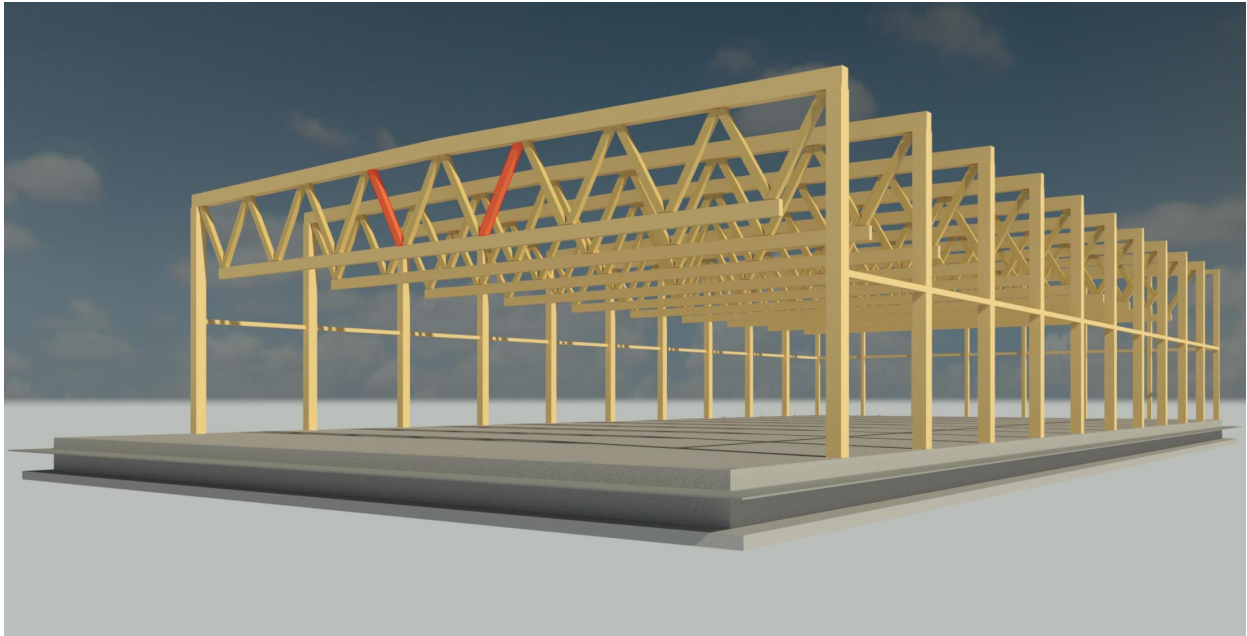
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{1,1 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,09 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

9%

Stav 9 & 12 (Strekk)



Figur 58 – Stav 9 & 12 (Privat, 2020)

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4305$ mm

$N_d = 57,5$ kN

STREKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.2.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det første leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1,0$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opp tredende strekkspenning i fiberretning

Vedlegg

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{57,5 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 0,96 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 0,96 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{0,96}{13,6} = 7\%$$

BRANN

Strekkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}^2$

$N_d = 11,7 \text{ kN}$

6.1.2 Strekk i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (6.1)$$

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 13,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende strekkspenning i fiberretning

Vedlegg

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{11,7 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 0,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

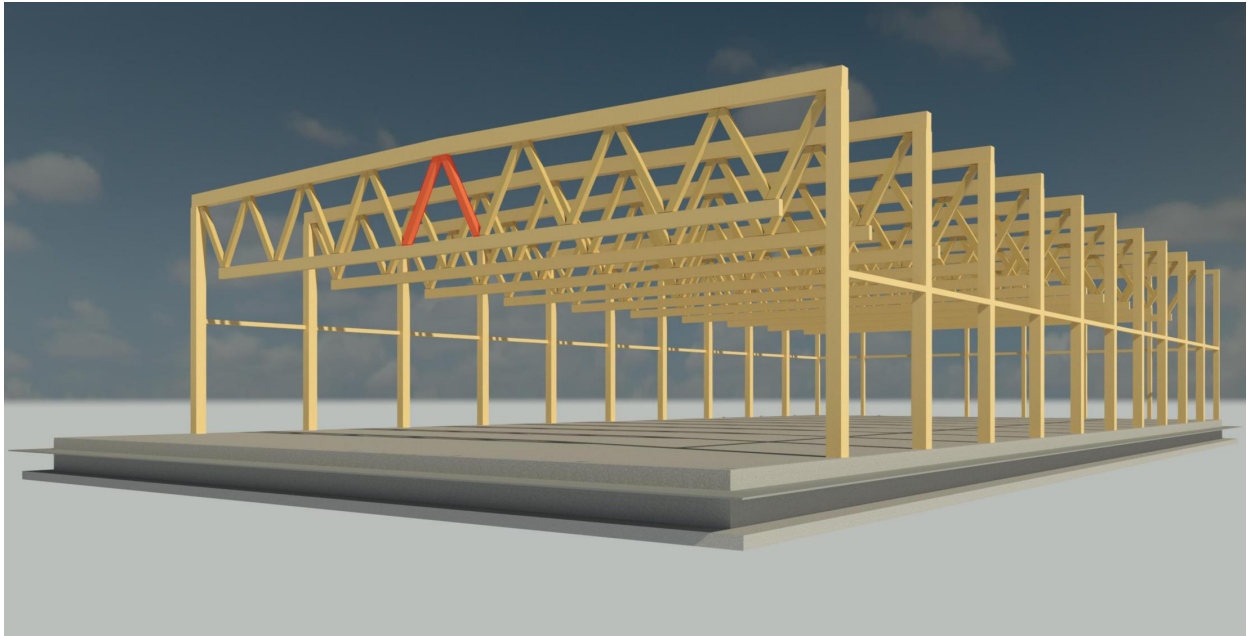
Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 0,3 \leq 13,6 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til strekkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{0,3}{13,6} = 2\%$$

Stav 10 & 11 (Trykk)



Figur 59 – Stav 10 & 11 (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 4370$ mm

$N_d = 53,3$ kN

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{53,3 \text{ kN}}{200\text{mm} * 300\text{mm}} = 0,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,9 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,9}{17} = 5\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{0,9 \frac{N}{mm^2}}{0,691 * 17} = 0,08 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

7,5%

BRANN

Trykkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

Bredde = 200 mm

$b_{ef} = 144 \text{ mm}$

Høyde $h = 300 \text{ mm}$

$h_{ef} = 244 \text{ mm}$

$A_{ef} = 35,1 * 10^3 \text{ mm}$

Vedlegg

$$N_d = 8,3 \text{ kN}$$

6.1.4 Trykk i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptrедende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{8,3 \text{ kN}}{35,1 * 10^3} = 0,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,2 \leq 17 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,2}{17} = 1\%$$

6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

Følgende krav må være oppfylt:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{K_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

Siden det ikke inntreer noe moment i staven blir kun det siste leddet igjen i ligningen:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1,0 \quad (6.35)$$

$$\Rightarrow \frac{0,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,691 * 17} = 0,02 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

2%

Vedlegg

8.1.2 Overgurt

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

BØYNING

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

KNEKKING

Reduksjonsfaktor for knekking $K_{c,i}$:

Knekkning om sterk akse Y

Hvor:

$$K_{c,i} = \frac{1}{K_i + \sqrt{K_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (6.25)/ (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,y} = \frac{1}{0,574 + \sqrt{0,574^2 - 0,376^2}} = 1,0$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1,0 - 0,99 = 1\%$

Denne reduksjonen er så liten at den ikke vil gi noen betydelig utslag og vi velger å se bort i fra den.

hvor:

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/ (6.28)$$

Vedlegg

$$\Rightarrow K_y = 0,5(1 + 0,1 * (0,376 - 0,3) + 0,376^2) = 0,574$$

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)/(6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{25 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,376$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{4313 \text{ mm}}{174 \text{ mm}^2} = 25 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 4313 \text{ mm}$$

$$i_y = 0,29 * h = 0,29 * 600 = 174 \text{ mm}$$

Knekking om svak akse Z vil ikke være relevant da den overbyggende takkonstruksjonen vil stive av for knekking om denne aksen.

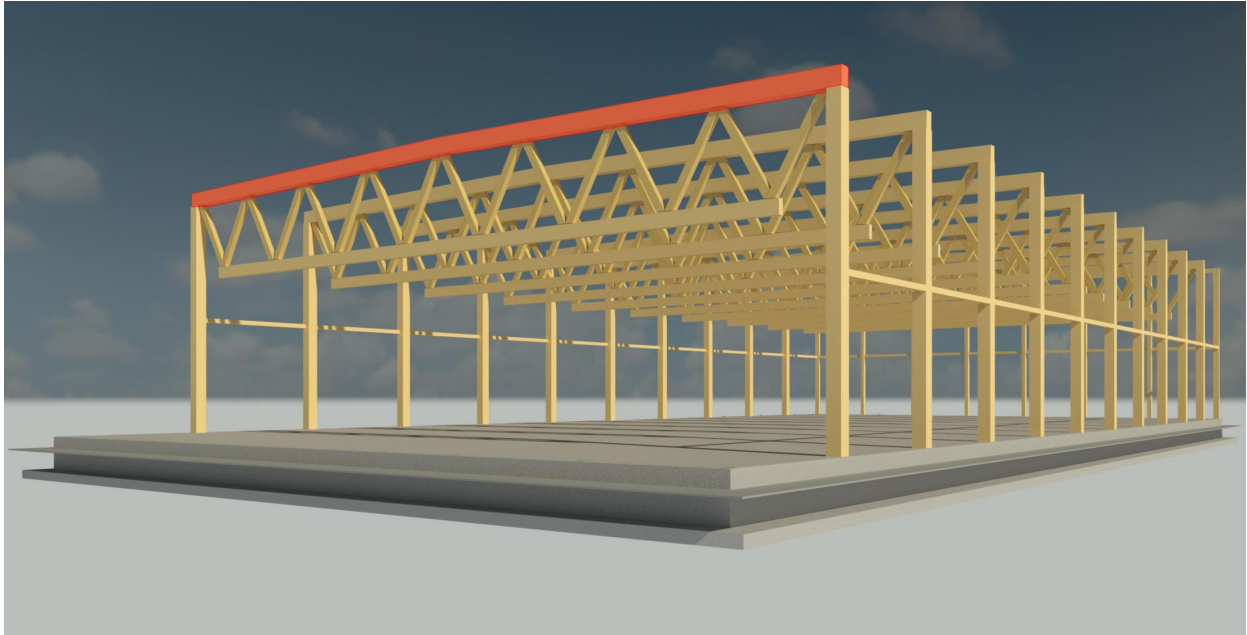
Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 350 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 294 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 600 \text{ mm} - 28 \text{ mm} = 572 \text{ mm}$$

Vedlegg

$$A_{ef} = 144 * 272 \text{ mm} = 168,2 * 10^3 \text{ mm}$$



Figur 60 – Overgurt (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 350 mm

Høyde $h = 600$ mm

Lengde $l = 4313$ mm (Lengste lengde)

$N_d = 1209$ kN

$M_y = 60,6$ kNm

$V_y = 68,7$ kN

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

Vedlegg

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{1209 \text{ kN}}{350\text{mm} * 600\text{mm}} = 5,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 5,8 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{5,8}{18,7} = 31\%$$

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende bøyespenning

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{60,6 \text{ kNm}}{21 * 10^6 \text{ mm}^3} = 2,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{350\text{mm} * 600^2\text{mm}}{6} = 21 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 2,9 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,9}{23,0} = 12,6\%$$

6.3.2 SØYLER UTSATT FOR TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING

Følgende krav må være oppfylt:

Vedlegg

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

Siden konstruksjonen er avstivet for bøyning om svak akse z vil ligningen se slik ut:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{5,8 \frac{N}{mm^2}}{1,0 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} + \frac{2,9 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} = 0,436 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

43,6%

6.1.7 SKJÆR

Følgende betingelse må være oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \quad (6.13)$$

Skjærfasthet

$$\int_{v,d} = 2,7 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende skjærspenning

$$\tau_d = \frac{V * S}{I * b}$$

For maksverdien av τ kan vi sette V_{maks} og S_{NA} (dette gir størst spenning), da andre arealmoment I er konstant. Forenklet blir den følgende:

$$\tau_{Ed,v}^{max} = \frac{3 * V_{Ed}}{2 * h * b_{eff}}$$

$$\Rightarrow \tau_{Ed,v}^{max} = \frac{3 * 68,7 \text{ kN}}{2 * 600 \text{ mm} * 280 \text{ mm}} = 0,61 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

Vedlegg

$$b_{eff} = K_{cr} * b = 0,8 * 350 = 280 \text{ mm} \quad 6.13a$$

$$K_{cr} = 0,8 \text{ (for limtre, i følge rettelsen i 2013)}$$

Krav er oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \Rightarrow 0,61 < 2,7 \text{ Ok}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn på skjær

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,61}{2,7} = 22,6 \%$$

Vedlegg

BRANN

Trykkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

$$b_{ef} = 294 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 572 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 168,2 * 10^3 \text{ mm}$$

$$N_d = 219,7 \text{ kN}$$

$$M_y = 10,15 \text{ kNm}$$

6.1.4 Trykk i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Oppredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A_{ef}} = \frac{219,7 \text{ kN}}{168,2 * 10^3} = 1,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 1,3 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning i ulykkestilstand:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{1,3}{18,7} = 7\%$$

Vedlegg

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyespenning om hovedaksen y:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y}$$

Følgende betingelser er oppfylt:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.11)$$

$$\sigma_{m,z,d} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} < 1,0$$

$$\Rightarrow \sigma_{m,y,d} < f_{m,y,d}$$

Maksimalt oppredende moment på bjelken.

$$M_{Ed,y} = 10,15 \text{ kNm}$$

Finner oppredende spenning i tverrsnittet

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{10,15 \text{ kNm}}{16 * 10^6 \text{ mm}^3} = 0,63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{294 * 572^2}{6} = 16 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Resultat

$$\Rightarrow \sigma_{m,y,d} < f_{m,y,d}$$

$$\Rightarrow 0,63 < 23 \quad \text{OK}$$

Overgurten er med hensyn på moment utnyttet:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,63}{23} = 3\%$$

SØYLER UTSATT FOR TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING (6.3.2)

Følgende krav må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

Siden konstruksjonen er avstivet for bøyning om svak akse z vil ligningen se slik ut:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,i} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{1,3 \frac{N}{mm^2}}{1,0 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} + \frac{0,63 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} = 0,097 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til knekking

9,7%

8.1.3 Undergurt

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

BØYNING

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

BRANN (NS-EN 1995-1-2:2004)

3.4.2

$$d_{char,0} = \beta_0 * t \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow d_{char,0} = 0,7 * 30 \text{ min} = 21 \text{ mm}$$

Hvor

$d_{char,0}$ - Nominell forkullingsdybde

β_0 - Nominell forkullingshastighet

t - Spesifisert branntid

Tabell 3.1

Vedlegg

Table 3.1 – Design charring rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood panelling and wood-based panels

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Hardwood Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of 290 kg/m^3 Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels Wood panelling Plywood Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –
^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.		

Figur 61 – Table 3.1 – Design charring rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood paneling and woodbased panels

4.2.2

$$d_{ef} = d_{char,0} + K_0 * d_0 \quad (4.1)$$

$$\Rightarrow d_{ef} = 21 \text{ mm} + 1,0 * 7 \text{ mm} = \mathbf{28 \text{ mm}}$$

Hvor

d_{ef} - Effektiv forkullingsdybde

$d_{char,0}$ - Nominell forkullingsdybde

Table 4.1 — Determination of k_0 for unprotected surfaces with t in minutes (see figure 4.2a)

	k_0
$t < 20$ minutes	$t/20$
$t \geq 20$ minutes	1,0

Figur 62 – Determination of K_0 for unprotected surfaces with t in minutes

$K_0 * d_0$ - Tar høyde for hjørneeffekten (Tabell 4.1)

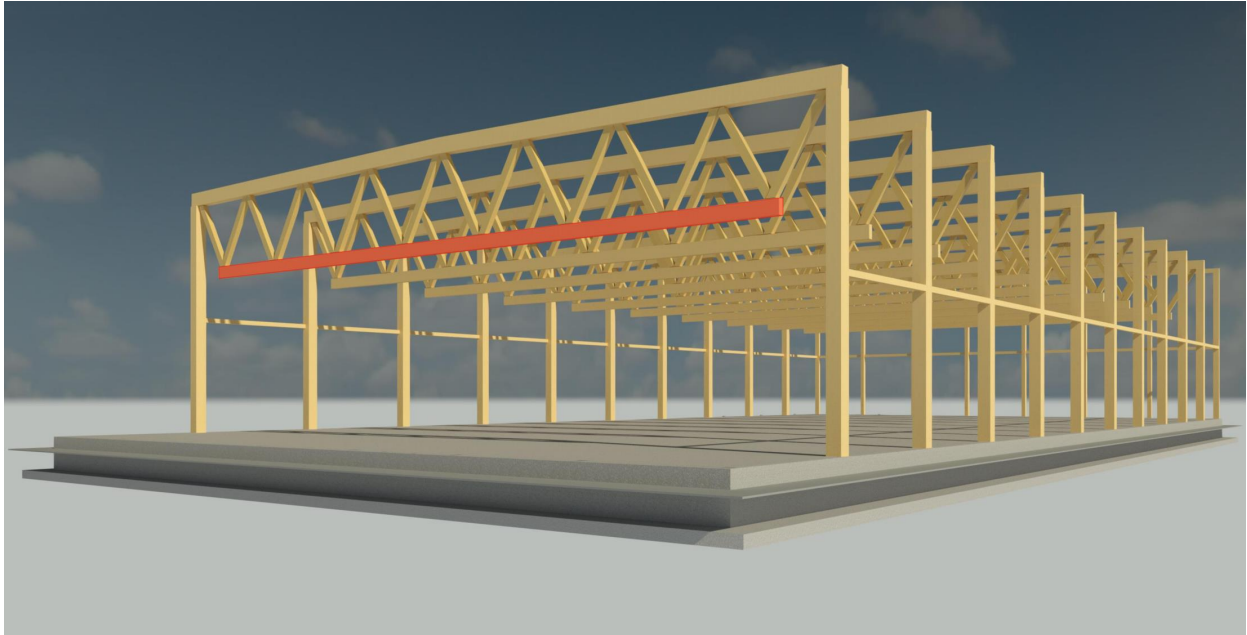
Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 200 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 144 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 500 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 444 \text{ mm}$$

Vedlegg

$$A_{ef} = 144 * 444 \text{ mm} = 63,9 * 10^3 \text{ mm}$$



Figur 63 – Undergurt (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 500$ mm

Lengde $l = 4313$ mm

$N_d = 1236,3$ kN

$M_y = 12,8$ kNm

Strekkspenning

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 14,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opp tredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{1236,3 \text{ kN}}{200\text{mm} * 500\text{mm}} = 12,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 12,4 \leq 14,9 \Rightarrow OK$$

Vedlegg

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{12,4}{14,9} = \mathbf{83\%}$$

Bøyespenning

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende bøyespenning

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{12,8 \text{ kNm}}{8,3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 1,54 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{350 \text{ mm} \cdot 600^2 \text{ mm}}{6} = 21 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 1,54 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{1,54}{23,0} = \mathbf{7\%}$$

6.2.3 Kombinert bøyning og aksial strekk

Følgende krav må være oppfylt

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke opptrer noe moment om svak akse Z sitter vi igjen med to ledd:

Vedlegg

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

$$\Rightarrow \frac{12,4}{14,9} + \frac{1,54}{23,0} = 0,895 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse

89,5 %

BRANN

Strekkspenning (i ulykkestilstand)

INFO

$$b_{ef} = 144 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 444 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 63,9 * 10^3 \text{ mm}^2$$

$$N_d = 223,6 \text{ kN}$$

$$M_y = 2,1 \text{ kNm}$$

Strekkspenning

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = 14,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende strekkspenning i fiberretning

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{223,6 \text{ kN}}{63,9 * 10^3 \text{ mm}^2} = 3,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow 3,5 \leq 14,9 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

Vedlegg

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{3,5}{14,9} = 23\%$$

Bøyespenning

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende bøyespenning

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{2,1 \text{ kNm}}{4,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 0,44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{144 \text{ mm} \cdot 444^2 \text{ mm}}{6} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 0,44 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{0,44}{23,0} = 2\%$$

6.2.3 Kombinert bøyning og aksial strekk

Følgende krav må være oppfylt

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Siden det ikke opptrer noe moment om svak akse Z sitter vi igjen med to ledd:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

$$\Rightarrow \frac{3,5}{14,9} + \frac{0,44}{23,0} = 0,254 \leq 1,0$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse

25,4 %

Søyler

8.1.4 Hovedsøylen

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

BØYNING

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

KNEKKING

Reduksjonsfaktor for knekking $K_{c,i}$:

Knekkning om sterk akse Y

Hvor:

$$K_{c,i} = \frac{1}{K_i + \sqrt{K_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (6.25) / (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,y} = \frac{1}{0,98 + \sqrt{0,98^2 - 0,95^2}} = 0,81$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1,0 - 0,81 = 19\%$

Vedlegg

hvor:

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/ (6.28)$$

$$\Rightarrow K_y = 0,5(1 + 0,1 * (0,95 - 0,3) + 0,95^2) = 0,98$$

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)/ (6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{62 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,95$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{8145 \text{ mm}}{131 \text{ mm}^2} = 62 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 8145 \text{ mm}$$

$$i_y = 0,29 * h = 0,29 * 450 = 131 \text{ mm}$$

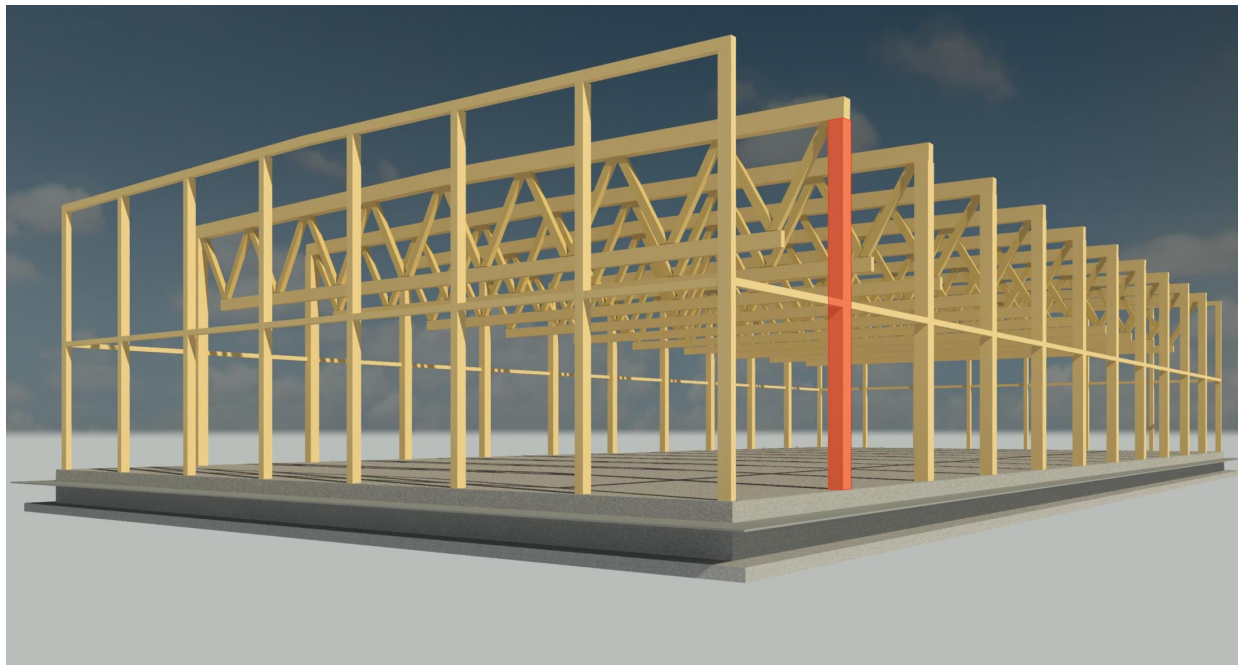
Knekking om svak akse Z vil ikke være relevant da

Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 450 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 394 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 450 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 394 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 394 * 444 \text{ mm} = 174,9 * 10^3 \text{ mm}$$



Figur 64 – Hovedsøyle (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 450 mm

Høyde $h = 450$ mm

Lengde $l = 8145$ mm

$N_d = 550,1$ kN (Trykk)

$V_y = 1,94$ kN

$M_y = 107,9$ kNm

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{550,1 \text{ kN}}{450 \text{ mm} * 450 \text{ mm}} = 2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 2,7 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2,7}{18,7} = \mathbf{14\%}$$

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende bøyespenning

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{107,9 \text{ kNm}}{15,2 * 10^6 \text{ mm}^3} = 7,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{450 \text{ mm} * 450^2 \text{ mm}}{6} = 15,2 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 7,1 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til bøyespenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{7,1}{23,0} = \mathbf{31\%}$$

Vedlegg

6.1.7 SKJÆR

Følgende betingelse må være oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \quad 6.13$$

Skjærfasthet

$$f_{v,d} = 2,7 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende skjærspenning

$$\tau_d = \frac{V * S}{I * b}$$

For maksverdien av τ kan vi sette V_{maks} og S_{NA} (dette gir størst spenning), da andre arealmoment I er konstant. Forenklet blir den følgende:

$$\tau_{Ed,v}^{max} = \frac{3 * V_{Ed}}{2 * h * b_{eff}}$$
$$\Rightarrow \tau_{Ed,v}^{max} = \frac{3 * 1,94 \text{ kN}}{2 * 450 \text{ mm} * 450 * 0,8 \text{ mm}} = 0,02 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

$$b_{eff} = K_{cr} * b = 0,8 * b \quad 6.13a$$

$$K_{cr} = 0,8 \text{ (for limtre, i følge rettelsen i 2013)}$$

Krav er oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \Rightarrow 0,02 < 2,7 \text{ Ok}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn på skjær

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{0,02}{2,7} = 1 \%$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING

Da søylen er avstivet mot knekking om svak akse z og det ikke opptrer noe moment om denne aksene sjekker vi for knekking om sterk akse Y.

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{2,7 \frac{N}{mm^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} + \frac{7,1 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} = 0,49 < 1,0 \text{ OK}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning

49%

BRANN

$$b_{ef} = 394 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 394 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 155,2 * 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\text{Lengde } l = 8145 \text{ mm}$$

$$N_d = 103,4 \text{ kN (Trykk)}$$

$$V_y = 0 \text{ kN}$$

$$M_y = 0 \text{ kNm}$$

Vedlegg

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{103,4 \text{ kN}}{155,2} = 0,7 \frac{N}{mm^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,7 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,7}{18,7} = 4\%$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING (ulykkestilstand)

Da søylen er avstivet mot knekking om svak akse z og det ikke opptrer noe moment om denne aksene sjekker vi for knekking om sterk akse Y.

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{0,7 \frac{N}{mm^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} = 0,044 < 1,0 \text{ OK}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning i ulykkestilstand

Vedlegg

4,4%

Vedlegg

8.1.5 Gavlsøylen

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

BØYNING

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

KNEKKING

Reduksjonsfaktor for knekking $K_{c,i}$:

Utregning viser knekking om sterk akse Y da svak akse z er avstivet på midten

Hvor:

$$K_{c,i} = \frac{1}{K_i + \sqrt{K_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (6.25)/ (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,y} = \frac{1}{2,73 + \sqrt{2,73^2 - 1,89^2}} = 0,26$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1,0 - 0,26 = 73,6\%$

hvor:

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/ (6.28)$$

$$\Rightarrow K_y = 0,5(1 + 0,1 * (1,89 - 0,3) + 1,89^2) = 2,73$$

Vedlegg

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21) / (6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{125 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 1,89$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{10845 \text{ mm}}{87 \text{ mm}^2} = 125 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 10845 \text{ mm}$$

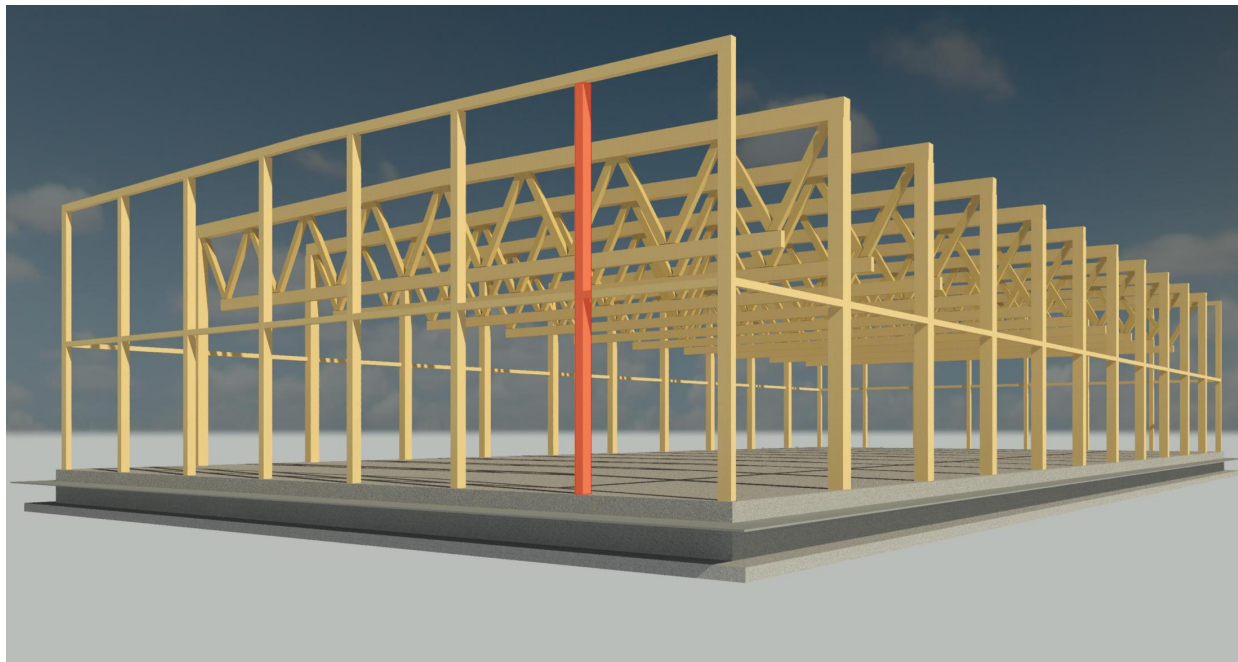
$$i_y = 0,29 * h = 0,29 * 300 = 87 \text{ mm}$$

Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 300 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 244 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 300 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 244 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 244 * 244 \text{ mm} = 59,5 * 10^3 \text{ mm}$$



Figur 65 – Gavlsøyle (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 300 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 10\,845$ mm

$N_d = 73,7$ kN (Trykk)

$V_y = 32,5$ kN

$M_y = 92,6$ kNm

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

Vedlegg

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{73,7 \text{ kN}}{300\text{mm} * 300\text{mm}} = \mathbf{0,8} \frac{N}{mm^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,8 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,8}{18,7} = \mathbf{4\%}$$

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyepening

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende bøyepening om Y-aksen

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{92,6 \text{ kNm}}{4,5 * 10^6 \text{ mm}^3} = 20,6 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{300 \text{ mm} * 300^2 \text{ mm}}{6} = 4,5 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 20,6 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til bøyepening

Vedlegg

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{20,6}{23,0} = \mathbf{90\%}$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{0,8 \frac{N}{mm^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} + \frac{20,6 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} = \mathbf{0,950 < 1,0 OK}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning

95%

BRANN

$$b_{ef} = 244 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 244 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 59,5 * 10^3 \text{ mm}$$

$$\text{Lengde } l = 10\,845 \text{ mm}$$

$$N_d = 26,1 \text{ kN (Trykk)}$$

Vedlegg

$$V_y = 4,3 \text{ kN}$$

$$M_y = 12,4 \text{ kNm}$$

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Oppredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{26,1 \text{ kN}}{59,5} = 0,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,4 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,4}{18,7} = 2\%$$

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Oppredende bøyespenning om Y-aksen

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{12,4 \text{ kNm}}{2,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 5,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

Vedlegg

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{244 \text{ mm} * 244^2 \text{ mm}}{6} = 2,4 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 5,1 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til bøyespenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{5,1}{23,0} = \mathbf{22\%}$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING (ulykkestilstand)

Da søylen er avstivet mot knekking om svak akse z og det ikke opptrer noe moment om denne aksene sjekker vi for knekking om sterk akse Y.

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{0,4 \frac{N}{\text{mm}^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{\text{mm}^2}} + \frac{5,1 \frac{N}{\text{mm}^2}}{23 \frac{N}{\text{mm}^2}} = \mathbf{0,251 < 1,0 OK}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning i ulykkestilstand

25,1%

Vedlegg

8.1.6 Hjørnesøylen

TRYKK

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 24,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

STREKK

Dimensjonerende strekkfasthet i fiberretning

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 19,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

BØYNING

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

KNEKKING

Reduksjonsfaktor for knekking $K_{c,i}$:

Knekkning om svak akse Z da dette gir størst reduksjon

Hvor:

$$K_{c,i} = \frac{1}{K_i + \sqrt{K_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (6.25) / (6.26)$$

$$\Rightarrow K_{c,y} = \frac{1}{1,56 + \sqrt{1,56^2 - 1,42^2}} = 0,45$$

Reduksjon på grunn av knekking = $1,0 - 0,45 = 54,8\%$

hvor:

Vedlegg

$$K_i = 0,5(1 + \beta_c * (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (6.27)/ (6.28)$$

$$\Rightarrow K_y = 0,5(1 + 0,1 * (1,42 - 0,3) + 1,42^2) = 1,56$$

der:

$$\beta_c = 0,1 \text{ (for limtre)}$$

og

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)/ (6.22)$$

$$\Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{93 \frac{mm}{mm^2}}{\pi} \sqrt{\frac{24,5 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 1,42$$

og

$$\lambda_i = \frac{L_k}{i_i}$$

$$\Rightarrow \lambda_y = \frac{5422 \text{ mm}}{58 \text{ mm}^2} = 93 \frac{mm}{mm^2}$$

der:

$$L_k = L = 8145 \text{ mm (En avstiver på midten)}$$

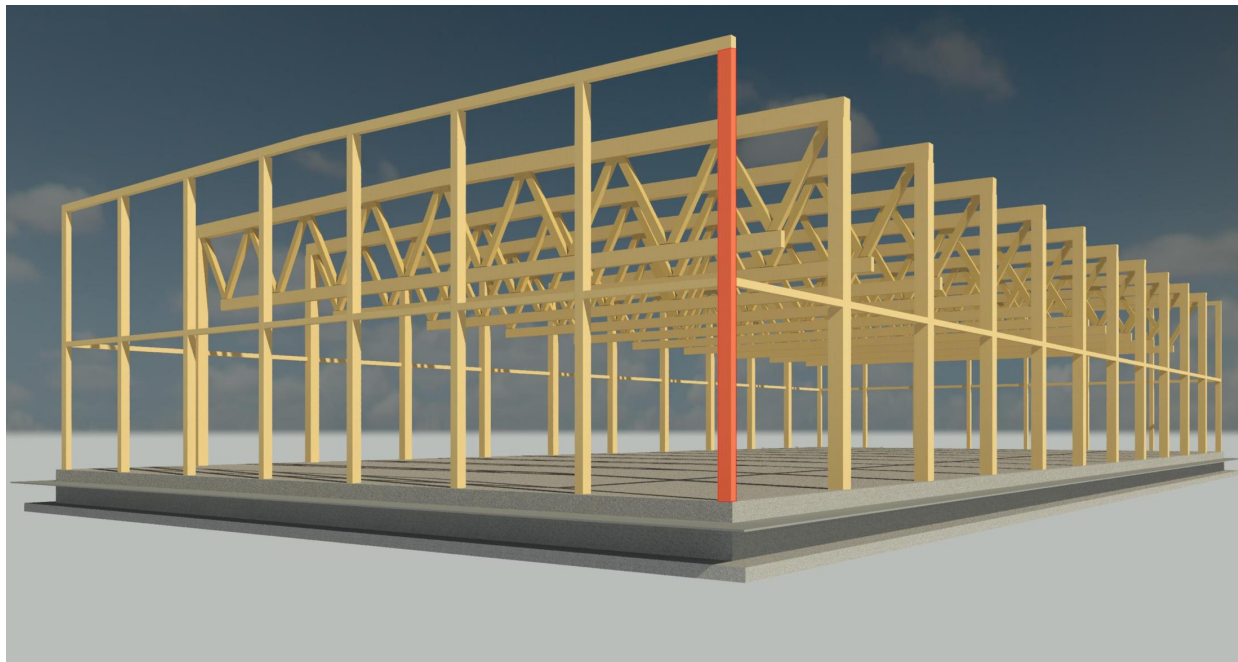
$$i_y = 0,29 * b = 0,29 * 200 = 58 \text{ mm}$$

Effektivt tverrsnitt etter 30 min

$$b_{ef} = 200 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 144 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 350 \text{ mm} - 2 * 28 \text{ mm} = 294 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 394 * 444 \text{ mm} = 42,3 * 10^3 \text{ mm}$$



Figur 66 – Hjørnesøyle (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 350$ mm

Lengde $l = 10\,845$ mm

$N_d = 29,5$ kN (Trykk)

$V_y = 0,56$ kN

$M_y = 58,7$ kNm

$M_z = 34,7$ kNm

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

Vedlegg

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{29,5 \text{ kN}}{200\text{mm} * 350\text{mm}} = 0,4 \frac{N}{mm^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,4 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,4}{18,7} = 14\%$$

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyepening

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

Opptredende bøyepening om Y-aksen

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{58,7 \text{ kNm}}{4,1 * 10^6 \text{ mm}^3} = 14,4 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{200 \text{ mm} * 350^2 \text{ mm}}{6} = 4,1 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Opptredende bøyepening om Z-aksen

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,z}}{W_z} = \frac{34,7 \text{ kNm}}{2,3 * 10^6 \text{ mm}^3} = 14,9 \frac{N}{mm^2}$$

Hvor:

$$W_y = \frac{h * b^2}{6} = \frac{350 \text{ mm} * 200^2 \text{ mm}}{6} = 2,3 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Vedlegg

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 14,9 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til bøyespenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{14,9}{23,0} = 65\%$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{2,7 \frac{N}{mm^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} + \frac{7,1 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} + 0,7 * \frac{2,3 \frac{N}{mm^2}}{23 \frac{N}{mm^2}} = 0,56 < 1,0 OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning

56%

BRANN

$$b_{ef} = 394 \text{ mm}$$

Vedlegg

$$h_{ef} = 394 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = 155,2 * 10^3 \text{ mm}$$

$$\text{Lengde } l = 8145 \text{ mm}$$

$$N_d = 103,4 \text{ kN (Trykk)}$$

$$V_y = 0 \text{ kN}$$

$$M_y = 0 \text{ kNm}$$

TRYKKSPENNING

Følgende krav må være oppfylt 6.1.4

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

Dimensjonerende fasthet i fiberretning

$$f_{c,0,d} = 18,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende trykkspenning i fiberretning

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Rd}}{A} = \frac{103,4 \text{ kN}}{155,2} = 0,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 0,7 \leq 18,7 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til trykkspenning

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{0,7}{18,7} = 4\%$$

6.3.2 SØYLER UTSATT TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING (ulykkestilstand)

Vedlegg

Da søylen er avstivet mot knekking om svak akse z og det ikke opptrer noe moment om denne aksene sjekker vi for knekking om sterk akse Y.

Følgende betingelser må være oppfylt:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1,0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \frac{0,7 \frac{N}{mm^2}}{0,81 * 18,7 \frac{N}{mm^2}} = \mathbf{0,044} < \mathbf{1,0 OK}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med kombinasjon av trykk og bøyning i ulykkestilstand

4,4%

SKJÆRFASSTHET

$$\int_{v,d} = \int_{v,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 3,5 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 2,7 \frac{N}{mm^2}$$

BØYEFASSTHET

$$f_{m,d} = f_{m,k} * \frac{K_{mod}}{\gamma_m} * K_{sys} = 30 \frac{N}{mm^2} * \frac{0,8}{1,15} * 1,1 = 23,0 \frac{N}{mm^2}$$

VIPPING

Bjelker

8.1.7 Randbjelken

Tabell 6.1 Forholdet mellom effektiv lengde og spennvidde

Tabell 6.1 – Forholdet mellom effektiv lengde og spennvidden

Bjelketype	Belastningstype	ℓ_{ef}/ℓ^a
Fritt opplagt	Konstant moment	1,0
	Jevnt fordelt last	0,9
	Konsentrert kraft i midtspennet	0,8
Utkraging	Jevnt fordelt last	0,5
	Konsentrert kraft på den frie enden	0,8

^a Forholdet mellom den effektive lengden ℓ_{ef} og spennvidden ℓ gjelder for en bjelke med torsjonsinnspenning som er belastet i tyngdepunktet. Hvis lasten påføres på toppkanten på bjelken, bør ℓ_{ef} økes med $2h$, og kan reduseres med $0,5h$ for en last ved underkanten på bjelken.

Figur 67 – Tabell 6.1 Forholdet mellom effektiv lengde og spennvidde

*Bruker

c/c 600 mm \Rightarrow 58 avstivere

$$l_{ef} = \frac{0,9 * l}{(\text{antall avstivere} + 1)} + 2 * h = \frac{0,9 * 0,6 \text{ m}}{(59)} + 2 * 0,3 \text{ m} = 0,609 \text{ m}$$

$$K_{crit} = \begin{cases} 1,0 & \text{for } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 * \lambda_{rel,m} & \text{for } 0,74 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1,0}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{for } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (6.34)$$

 $\Rightarrow K_{crit} = 1,0$ (Ingen reduksjon på grunn av vipping)

og

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{30 \frac{N}{mm^2}}{0,17 \frac{N}{mm^2}}} = 13,3 \quad (6.30)$$

og

Vedlegg

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}} * E_{0,05} = \frac{0,78 \cdot 200^2 \text{ mm}}{300 \text{ mm} \cdot 609 \text{ mm}} = 0,17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6.32)$$

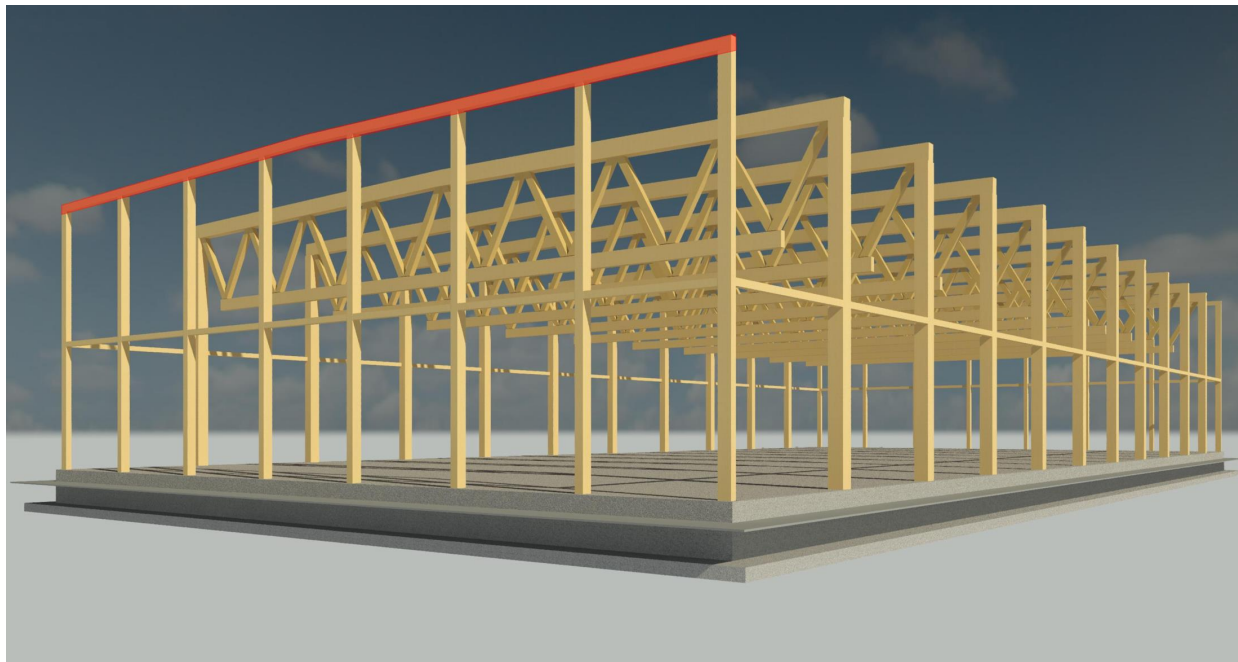
BRANN

$$b_{eff} = 200 \text{ mm} - 28 * 2 \text{ mm} = 144 \text{ mm}$$

$$h_{eff} = 300 \text{ mm} - 28 \text{ mm} = 272 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = 144 \text{ mm} * 272 \text{ mm} = 39,2 * 10^3 \text{ mm}^2$$

$$w_{eff} = \frac{144 \text{ mm} * 272^2 \text{ mm}}{6} = 1,77 * 10^6 \text{ mm}^3$$



Figur 68 – Randbjelke (Privat, 2020)

INFO

Bredde = 200 mm

Høyde $h = 300$ mm

Lengde $l = 5000$ mm

$N_d = 4,68$ kN (Strekk)

$V_y = 41,1$ kN

$M_y = 38,4$ kNm

BØYESPENNING

Dimensjonerende bøyespenning

$$f_{t,0,d} = 23,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Opptredende bøyespenning

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y} = \frac{38,4 \text{ kNm}}{3 \cdot 10^6 \text{ mm}^3} = 12,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vedlegg

Hvor:

$$W_y = \frac{b * h^2}{6} = \frac{200 \text{ mm} * 300^2 \text{ mm}}{6} = 3,0 * 10^6 \text{ mm}^3$$

Krav er oppfylt:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \Rightarrow 12,8 \leq 23,0 \Rightarrow OK$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn til bøyespenning

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{12,8}{23,0} = \mathbf{55,8\%}$$

6.3.3 BJELKER UTSATT FOR TRYKK ELLER KOMBINASJON AV TRYKK OG BØYNING (Vipping)

Randbjelken er avstivet mot bøyning om svak akse z, og fyller derfor betingelsene i punkt 6.3.3 (3): *Der det bare opptrer et moment M_y om den sterke Y-aksen, må spenningene oppfylle følgende betingelse:*

$$\sigma_{m,d} \leq K_{crit} * f_{m,d} \quad (6.33)$$

K_{crit} vil ikke gi noen reduksjon da takoverbygget har senter avstand på c/c 600 mm og vil dermed gi $L_{ef} = 609$ mm.

6.1.7 SKJÆR

Følgende betingelse må være oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \quad 6.13$$

Skjærfasthet

$$f_{v,d} = 2,7 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Opptredende skjærspenning

Vedlegg

$$\tau_d = \frac{V * S}{I * b}$$

For maksverdien av τ kan vi sette V_{maks} og S_{NA} (dette gir størst spenning), da andre arealmoment I er konstant. Forenklet blir den følgende:

$$\tau_{Ed,v}^{\text{max}} = \frac{3 * V_{Ed}}{2 * h * b_{eff}}$$

$$\Rightarrow \tau_{Ed,v}^{\text{max}} = \frac{3 * 41,1 \text{ kN}}{2 * 300 \text{ mm} * 160 \text{ mm}} = 1,28 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hvor:

$$b_{eff} = K_{cr} * b = 0,8 * 200 = 160 \text{ mm} \quad 6.13a$$

$$K_{cr} = 0,8 \text{ (for limtre, i følge rettelsen i 2013)}$$

Krav er oppfylt

$$\tau_d < f_{v,d} \Rightarrow 1,28 < 2,7 \text{ Ok}$$

Tverrsnittets kapasitetsutnyttelse med hensyn på skjær

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{1,28}{2,7} = 47,4 \%$$

NEDBØYNING

Info

$$E_{0,\text{mean}} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,05} = 10\,800 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{g,\text{mean}} = 650 \text{ N/mm}^2$$

$$\psi_{1,\text{snø}} = 0,7$$

Vedlegg

$$\psi_{1,snø} = 0,5$$

$$\psi_{2,snø} = 0,2$$

Opptredende nedbøyning

$$\delta_m = \frac{5 * q_{def} * l^4}{384 * E_{0,mean} * I} \left[1 + 0,96 * \left(\frac{h}{l} \right)^2 * \frac{E_{0,mean}}{G_{0,mean}} \right]$$

$$\delta_m = \frac{5 * 12,4 \frac{kN}{m} * 5000^4 mm}{384 * 13000 \frac{N}{mm^2} * 450 * 10^6 mm^3} \left[1 + 0,96 * \left(\frac{300 mm}{5000 mm} \right)^2 * \frac{13 000 N/mm^2}{650 N/mm^2} \right] = 13,0 mm$$

Hvor:

Andre arealmoment I er

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{200 * 300^3}{12} = 450 * 10^6 mm^3$$

q_d (ofte forekommende)

$$q_{def} = 12,4 kN/m$$

Nedbøyningskrav

NA 7.2 Grenseverdier for nedbøyning i bjelker.

Tabell 7.2

Bruker $\delta_{maks} = l/300$

$$\delta_{maks} = \frac{l}{300} = \frac{5000 mm}{300} = 16,7 mm$$

Krav er oppfylt

$$\delta_{maks} > \delta_m \Rightarrow 16,7 > 13,0 \quad OK$$

Vedlegg

Kapasitetsutnyttelse med hensyn på nedbøyning

$$\frac{\delta_m}{\delta_{maks}} = \frac{13,0}{16,7} = 77,8\%$$

BRANN

$$b_{eff} = 144 \text{ mm}$$

$$h_{eff} = 272 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = 39,2 * 10^3 \text{ mm}^2$$

$$w_{eff} = 1,77 * 10^6 \text{ mm}^3$$

$$N_d = 0 \text{ kN (Strekk)}$$

$$V_y = 13,7 \text{ kN}$$

$$M_y = 12,8 \text{ kNme}$$