

Braastad, Karsten

Strukturelle integritet til massivtrekonstruksjoner i brann

Structural integrity of CLT-structures exposed to
fire

Masteroppgave i Bygg- og Miljøteknikk

Veileder: Aalberg, Arne

Medveileder: Opstad, Kristen

Juni 2023

Braastad, Karsten

Strukturelle integritet til massivtrekonstruksjoner i brann

Structural integrity of CLT-structures exposed to fire

Masteroppgave i Bygg- og Miljøteknikk
Veileder: Aalberg, Arne
Medveileder: Opstad, Kristen
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Abstract

This thesis springs out from new research on fire safety regarding the growing use of CLT (Cross laminated Timber), especially exposed CLT. The thesis is written as a crossover between fire safety and structural safety. The problem statement is as follows: what happens to a building if a part of the structure loses its ability to carry the load because of a fire. How will the remaining part of the structure behave and what does the fire safety have to say for the structural safety.

This thesis is a continuation of the project report *Etasjeskillere i eksponert massivtre utsatt for brann* which looked at the rest capacity of CLT slabs which loses its strength because of a fire. This thesis continues by investigating how a collapse could affect a bigger system.

How does fire safety affect structural safety? Fire is unfortunately a phenomenon which is hard to prevent, therefore, a lot of measures are put into place not only to prevent a fire but to prevent it from spreading. This restriction of spreading is important not just for personal safety but also structural safety. In the case of a fire, what is required of the structure for it to be able to carry the fire load but also restrict further spread. If the fire is kept local, the situation can more easily be controlled.

In this thesis a model is created to simulate an office building in CLT, and a section of the building in 2d which looks at the stress and strain in the 2d frame. The model tells us how the rest of the structure reacts to this stress and strain, if a fire cell loses its strength, and the structure will stand if the joints are able to distribute the forces over to parts of the structure which still has its load bearing capacity. In that regard, a middle way between hinged and fixed connection is created, a so-called spring stiffness which gives the joints some moment capacity even though it is hinged, this stiffness can help distribute the forces.

Through hand calculations for fire damage to the structure and reduction of the cross sections due to this fire, the structure is divided into fire cells where 3 scenarios are tested in the analytical program Focus konstruksjon. There, the calculated reduced cross section is used over several time intervals during a fire to see how the rest of the structure reacts when a part of the frame loses its stiffness and load bearing capability.

The results show that the structure needs to be able to distribute the powers, such that a local collapse doesn't force the whole building down. This is dependent on the fire cell's ability to prevent spreading and the connections is the joints' ability to distribute the forces present. There are several parts of the structure who has not fully used its load bearing capacity and can take on some redistributed powers in order to ensure that the structure stands.

Sammendrag

Denne oppgaven har bakgrunn i brannforskning knyttet til økt bruk av massivtre og da spesielt eksponerte overflater. Oppgaven er skrevet som en krysning mellom brannsikkerhet og konstruksjonssikkerhet. Oppgaven tar for seg problemstillingen; hva skjer med et bygg hvis en del av konstruksjonen mister sin bæreevne som følge av brann. Hvordan vil resten av bygget oppføre seg, og hva har brannsikkerhet å si for konstruksjonssikkerheten.

Denne oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven *Etasjeskillere i eksponert massivtre utsatt for brann* som så på restkapasiteten til massivtre som gradvis mistet bæreevne på grunn av brann. Denne oppgaven bygger videre og ser på hva en eventuell kollaps vil si for et større system.

Hvordan påvirker brannsikkerheten konstruksjonssikkerheten? Brann er dessverre et fenomen som er vanskelig å forhindre, derfor gjøres det mange tiltak for å ikke bare forhindre at en brann starter, men også forhindre at den sprer seg. Denne begrensningen av spredning er viktig både for personsikkerhet, men også konstruksjonssikkerhet. Hvis en brann skulle oppstå, hva må til for at konstruksjonen er i stand til å tåle påkjenningen, men også hindre videre spredning. Hvis brannen holdes lokal så kan situasjonen lettere kontrolleres.

I denne oppgaven lages det en modell som skal simulere et kontorbygg i massivtre, det tas et utsnitt i 2d som ser på påkjenningen på den enkelte rammen. Modellen forteller noe om hvordan resten av bygget reagerer hvis en brann skal oppstå og hvordan konstruksjonen svarer på denne påkjenningen, hvis en branncelle mister sin bæreevne, så vil konstruksjonen stå hvis rammen er i stand til å distribuere kreftene over til konstruksjonsdeler som har bedre kapasitet og ikke er påvirket av brann. Derfor etableres det en mellomting mellom ledd-forbindelser og momentstiveforbindelser ved hjelp av en fjærmotstand som tilsier at selv om en forbindelse er leddet så vil den i praksis ha en stivhet som kan bidra til å omfordele kreftene.

Gjennom håndberegning for brannpåkjenning og reduksjon av tverrsnitt så deles konstruksjonen inn i brannceller der 3 scenarioer testes i analyseprogrammet Focus konstruksjon. Der brukes den beregnede tverrsnittsreduksjonen over flere tidsintervaller, i Focus for å se hvordan resten av konstruksjonen oppfører seg når en del av rammen plutselig mister stadig mer stivhet og bæreevne.

Resultatene viser at konstruksjonen må være i stand til å fordele krefter og hindre spredning, slik at ved loka kollaps så kan bygget stå, det avhenger av den begrensende evnen til branncellene og knutepunktene evne til å omfordele krefter. Det er flere deler av konstruksjonen som har lavere utnyttelse av sin bæreevne som er i stand til å ta ekstra last for å sørge for at konstruksjonen står støtt.

Forord

Denne oppgaven er skrevet på våren 2023 ved konstruksjonsteknisk institutt ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet (NTNU).

Det rettes en stor takk til alle som har hjulpet til med oppgaven og støttet opp i denne perioden. Det skal nevnes at til tross for mye snakk om Brann i denne oppgaven, så er det Rosenborg som gjelder.

Oppgaven er gjennomført i samarbeid med forskningssenteret Fire Research and Innovation Centre (FRIC) (www.fric.no). FRIC er finansiert via partnere og Norges forskningsråd, program BRANNSIKKERHET, prosjektnummer 294649.

Innholdsfortegnelse

1	Generelt	8
1.1	Introduksjon	8
1.2	Bakgrunn	8
1.3	Omfang	9
1.3.1	Generelt	9
1.3.2	Teori	9
1.3.3	Metode	9
1.3.4	Resultater	9
1.3.5	Diskusjon	9
1.3.6	Konklusjoner	9
2	Teori	10
2.1	Generelt	10
2.2	Byggteknisk forskrift (TEK17)	10
2.3	Standarder	11
2.4	Generelt om massivtre i brann	11
2.5	Overflatebehandling	12
2.6	Overtenning	13
2.7	Brannceller	14
2.8	Beskyttelse mot brann og spredning av brann	16
2.9	Forbindelser	17
2.10	Statikk og beregningsmetoder	17
2.11	Annen litteratur	19
3	Model	21
3.1	Generelt	21
3.2	Model	22
4	Metode	25
4.1	Generelt	25
4.2	Utført arbeid	25
4.3	Programvare	25
4.4	Forutsetninger	26
4.5	Beregninger	26
4.5.1	Generelt	26

4.5.2	Redusert tverrsnitt	27
4.5.3	Kapasitetssjekk håndberegninger	28
4.5.4	Focus	28
5	Resultater	30
5.1	Generelt	30
5.2	Tanker før resultater	30
5.3	Resultater fra håndberegninger.....	31
5.3.1	Forkulling og redusert tverrsnitt	31
5.3.2	Redusert Stivhet	31
5.3.3	Kapasitetssjekk mot TEK17	31
5.4	Resultater fra Focus konstruksjon	32
5.4.1	Generelt	32
5.4.2	Brancelle 1	34
5.4.3	Brancelle 2	38
5.4.4	Brancelle 3	42
6	Diskusjon	46
6.1	Generelt	46
6.2	Resultat.....	46
6.2.1	Forkulling og redusert tverrsnitt	46
6.2.2	Redusert stivhet	46
6.2.3	Kapasitetssjekk opp mot TEK17	47
6.2.4	Resultater ifra Focus konstruksjon	47
6.3	Feilkilder.....	48
6.3.1	Focus konstruksjon	48
6.3.2	Håndberegninger	49
6.4	Videre arbeid.....	49
7	Konklusjon	50
7.1	Generelt	50
7.2	Konklusjoner	50
8	Referanser	51

Figurliste

Figur 1 Branntrekanten, by Mobæk, T. (https://ndla.no/article/1776). CC BY-SA 4.0.	13
Figur 2 Illustrasjon av dørkrav	14
Figur 3 Illustrasjon av forskjellige branncelle veggelementer, illustrasjon hentet ifra https://snl.no/brannklassifisering , rettighet David Keeping/Norsk brannvernforening.....	15
Figur 4 Forskjellige forbindelser	17
Figur 5 Forkullingsdybde på takelementet, eierskap Andreas Sæter Bø.....	19
Figur 6 Bilder ifra forsøk, brent element til venstre og ubrent til høyre, foto: Karsten Braastad	20
Figur 7 3D Konstruksjon hele bygget	22
Figur 8 2D Rammekonstruksjon	23
Figur 9 Materialdata fra Focus.....	24
Figur 10 Kantstilt massivtre, illustrasjon av Sintef (Sintef ved Hans Boye Skogstad, 2020)	26
Figur 11 Nullstyrkelaget etter ny standard (prEN 1995-1-2, 7.2.2 (8))	27
Figur 12 Momentdiagram uten fjærstivheter	32
Figur 13 Momentdiagram med fjærstivhet	33
Figur 14 Branncelle 1	34
Figur 15 90 Minutter	34
Figur 16 Skjærkrefter 90 min.....	35
Figur 17 Aksialkrefter 90 min.....	35
Figur 19 Branncelle 2.....	38
Figur 20 Momentkrefter 10 min.....	38
Figur 21 Skjærkrefter 10 min.....	39
Figur 22 Aksialkrefter 10 min.....	39
Figur 23 Kapasitetssjekk 10 min	40
Figur 24 Branncelle 3.....	42
Figur 25 Momentkrefter 60 min.....	42
Figur 26Skjærkrefter 60 min.....	43
Figur 27 Aksialkrefter 60 min.....	43
Figur 28Kapasitetssjekk 60 min	44
Figur 29 Endring i stivhet over tid	47
Figur 30 Knutepunkt leddforbindelse.....	48

Tabelliste

Tabell 1 Krav til konstruksjonsdeler	22
Tabell 2 Oversikt over redusert tverrsnitt og forkullingsdybde.....	31
Tabell 3 2. Arealmoment og stivheten til bjelker og søyler ved redusert tverrsnitt	31
Tabell 4 Tabelldata branncelle 1	37
Tabell 5 Tabelldata branncelle 2	40
Tabell 6 Tabelldata branncelle 3	44

Forkortelser

CLT	Cross Laminated Timber, massivtre på norsk
DiBK	Direktoratet for byggkvalitet
NTNU	Norges teknisk- vitenskapelige universitet
FRIC	Fire research and innovation center
TEK 17	Byggteknisk forskrift

1 Generelt

1.1 Introduksjon

En verden i stadig utvikling med økende priser og nye utfordringer gjør at verden trenger ingeniører mer enn noen gang. Folk som er i stand til å utfordre normene og utvikle nye ideer og ta for seg temaer som ikke er utforsket enda. I byggebransjen er det stort fokus på miljøvennlige løsninger, bygg som skal være klimanøytrale, gamle løsninger som oppgraderes. I en periode der det å bygge er dyrt, er det ekstra fokus på å holde kostnadene nede, så lenge det ikke går på bekostning av sikkerhet og til dels estetikk. Kortreiste materialer, ombruk og gjenbruk av materialer og elementer fra bygg som skal rives er en del av denne utviklingen. I den prosessen så ser det norske markedet en økt bruk av massivtre. Et tungt, massivt tremateriale som åpner opp nye løsninger med prefabrikkerte element og nye konstruksjoner som kan både spare tid, men også gi gunstige mekaniske egenskaper. Denne økte bruken påvirker enkeltpersoner også, fordi, med innovasjon kommer også nye utfordringer, utfordringer som brannsikkerhet.

1.2 Bakgrunn

Denne oppgaven er skrevet fra et perspektiv som fremtidig rådgivende branningeniør, og tar utgangspunkt i det økte behovet for kunnskap som kommer med innovasjon. Det utføres i skrivende stund mange forsøk knyttet til brannsikkerhet i massivtrebygg både på NTNU, men også på RISE (Brannforskningslabben i Trondheim) i samarbeid med FRIC (Fire research and innovation center). Og i utgangspunkt av denne forskningen ble denne oppgaven utformet som et krysningspunkt mellom konstruksjonsteknikk og brannsikkerhet. Målet er å øke kunnskapsnivået og bidra til at markedet får mer kjennskap til massivtre og dens egenskaper, både mekanisk og brannteknisk.

1.3 Problemstilling

Denne oppgaven skal forsøke å svare på hvordan den strukturelle integriteten til et bygg reagerer på en lokal brann. Hva slags egenskaper har en brann og hvordan vil det påvirke personsikkerhet og konstruksjonssikkerhet. Hva vil skje hvis en konstruksjonsdel kollapser, vil resten rase som et korthus og hva skal til for at dette ikke skjer.

1.4 Omfang

1.4.1 Generelt

Dette kapitlet vil gi en kort oversikt over innholdet i alle hovedkapitlene i denne oppgaven, hovedkapitlene er:

- Teori
- Modell
- Metode
- Resultater
- Diskusjon
- Konklusjon
- Referanser

1.4.2 Teori

Teoridelen legger grunnlaget for innholdet i oppgaven, og informerer leseren om noen sentrale begrep som er nødvendig for å gjøre seg forstått med resten av innholdet. Teoridelen inneholder totalt 11 underkapitler.

1.4.3 Modell

Modellen er et eget kapittel fordi den legger grunnlaget for beregningene utført i denne oppgaven, her presenteres modellen som brukes og hvordan den er bygd opp

1.4.4 Metode

Metode forklarer tankegangen og framgangsmåten brukt for å komme frem til svarene i oppgaven, dette kapitlet dokumenterer også hvilke verktøy som er brukt og hvordan de anvendes.

1.4.5 Resultater

Resultatdelene presenterer resultatene ifra beregninger og analyser, selve gjennomgangen av funn gjøres i neste kapittel

1.4.6 Diskusjon

Diskusjonen tar for seg resultatdelen og betrakter resultatene opp mot hverandre og hvilke sammenhenger de har, det belyses mulige feilkilder og legger veien videre

1.4.7 Konklusjoner

Konklusjonskapitlet setter et punktum ved oppgaven.

2 Teori

2.1 Generelt

Dette kapitlet inneholder teori som er relevant for oppgaven, teoridelen vil dekke disse emnene:

- Byggteknisk forskrift (TEK 17)
- Standarder
- Generelt om massivtre
- Overflatebehandling
- Overtenning
- Brannceller
- Beskyttelse mot antennelse og spredning av brann
- Forbindelser
- Statikk og beregningsmetoder
- Annen litteratur

Det refereres til flere kilder i dette hovedkapitlet, kildekritikk er utført basert på TONE-prinsippet: Troverdighet, Objektivitet, Nøyaktig og Egnat. (Overland, 2018)

2.2 Byggteknisk forskrift (TEK17)

Byggteknisk forskrift er en forskrift som gir minimumskravene til et byggs egenskaper som må oppfylles for at det lovlig skal kunne oppføres i Norge (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Forskriften er forkortet TEK17 og veiledningen til forskriften er forkortet VTEK. Veiledningen til forskriften forklarer kravene i forskriften og gir preaksepterte ytelser eller videre refererer til standarder, mer om standarder i neste kapittel. Forskriften består av 18 kapitler som eksempelvis kapittel 10, konstruksjonssikkerhet og kapittel 11, Sikkerhet ved brann. Det er også de kapitlene som er mest relevant for en prosjekterende branningeniør.

I forskriften finner man funksjonskrav, funksjonskrav er overordnede krav for ulike bestemmelser, et eksempel på et funksjonskrav i brann, kapittel 11 er: *Det skal være tilfredsstillende mulighet for å redde personer og husdyr og for effektiv slokkeinnsats* (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Videre, så vil funksjonskravene være supplert med ytelseskrav, som gir mer konkret veiledning i form av for eksempel en konkret verdi. I mange tilfeller vil ytelseskravene være en del av forskriften, men ytelseskrav er også en del av VTEK som også gir preaksepterte løsninger og/eller konkrete verdier knyttet til et funksjonskrav. Et eksempel på et ytelseskrav som er beskrevet i forskriften er: *Mellom lave byggverk skal det være minimum 8,0 m innbyrdes avstand, med mindre det er truffet tiltak for å hindre spredning av brann mellom byggverkene i løpet av den tiden som kreves for rømning og redning i det andre byggverket. Bestemmelsen kommer ikke til anvendelse for lave byggverk som samlet utgjør én bruksenhet.* (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Det er flere funksjonskrav som er relevant til senere bruk i denne oppgaven, og når man jobber som brannrådgiver så sjekkes hele kapittel 11 og sørger for at alle relevante funksjonskrav er ivarettatt.

2.3 Standarder

En standard er i seg selv en slags fasit på hvordan noe skal lages eller gjennomføres, og uten standardisering ville hverdagen kunne by på diverse utfordringer. Det mest brukte eksempelet på noe som er standardisert, er bankkort. Uten standardiserte størrelser og teknologi ville ikke ditt bankkort ifra din bank, fungert på alle terminaler. (Standard Norge, n.d.).

Standarder brukes overalt i byggebransjen, og de fleste har et forhold til Eurokodene, som er en serie med standarder som omfatter de forskjellige materialene. Eksempelvis, Eurokode 5, som er trestandarden, der hoveddelen som har navnet NS-EN 1995-1-1. Den dekker det meste knyttet til beregningsmetoder for forskjellige typer treverk. Det som menes med hoveddel er at alle Eurokodene har flere deler, der 1-1 er hoveddelen og eksempelvis 1-2 som med få unntak er brann-delen.

Det å bruke standarder i prosjektering er ikke lovpålagt, men ved å prosjektere etter norske standarder så er det å anses som konstruksjonssikkert. Hvis du ønsker å bruke noe annet enn en standard, eller en ikke enda utgitt standard krever det noe mer dokumentasjon for å dokumentere at den valgte metoden er konstruksjonssikkert på samme eller høyere nivå enn standarden.

Senere i denne oppgaven vil det refereres til brann delen av Eurokode 5 (prEN 1995-1-2), hvor pr betyr at dette er et uferdig dokument under arbeid og ikke en offisiell standard enda, men kommer til å være en del av et nytt sett med Eurokoder som kommer i løpet av noen år.

2.4 Generelt om massivtre i brann

Massivtre er et tremateriale som ser økt bruk ettersom massivtre har gode egenskaper knyttet til både statikk og naturlig mekanisk brannresistens, som betyr at materialet bevarer sine mekaniske egenskaper godt ved brann. En annen ting som gjøre massivtre gunstig det kan brukes norsk tre som gjør dette til et miljøvennlig alternativ. (Trefokus, n.d.).

Massivtre har en naturlig brannresistens ved at det er kompakt, med relativt lav innbrenningshastighet, men er til tross for det relativt bidragsytende til brannspredning fordi overflaten er så lettantennelig.. De lamellene som ikke er utsatt for brann vil heller ikke miste sine mekaniske egenskaper som fører til at massivtreelementer kan bevare kapasitet over lengre tid i brann. Til tross for generelt god resistens, så vil restkapasitet være avhengig av elementets oppbygning, lamell-tykkelse og ekstern temperatur påvirkning. Hvis det er flere lag med lameller, vil elementets totale stivhet minskes ved eventuelt tap av én lamell. Mer om dette kan leses i prosjektoppgaven. (Braastad, 2022)

Massivtre i brann kan være utsatt for delaminering som betyr at lamellene faller av før de er oppbrent som følge av at limet i sjiktet svikter. Delaminering fører til at friskt treverk blir eksponert for høye temperaturer og flammer, som gjør at brannen får mere brensel og brannen fortsetter å utvikle seg.

Til tross for god resistens vil eksponert tre være et faremoment med tanke på spredning av brann. Tiltak som brukes for å forhindre spredningsfare kan være å minske eksponerte overflater ved å dekke til overflater med gips eller branngips som er et svært brannresistent materiale. Et annet tiltak kan være overflatebehandling.

På engelsk, og også brukt på norsk er begrepet CLT som står for *Cross laminated Timber*. En viktig avklaring i forbindelse med Norsk-Engelsk terminologi er at man ofte sier CLT på engelsk, men det dekker eksklusivt krysslimt massivtre. Men, på Norsk bruker vi begrepet massivtre, som også kantstilte lameller, altså ikke eksklusivt krysslimte lameller.

2.5 Overflatebehandling

Overflatebehandling er et tiltak som brukes for å endre overflatens estetikk eller mekaniske egenskaper. Overflatebehandlinger som brukes oftest i forbindelse med treverk er lakk/maling eller impregnering. Det finnes både transparente og dekkende typer maling og lakk, mens impregnering er en metode som vakuumentrykker en veske på overflaten. (Moelven, 2023).

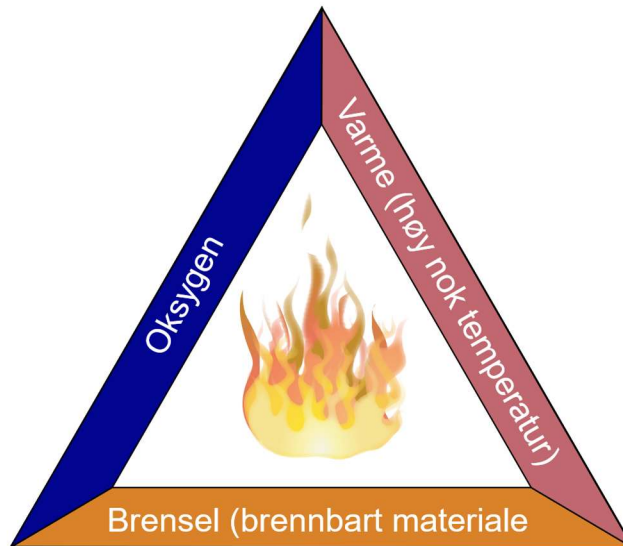
Grunnen til at man ønsker å bruke brannhemmende overflatebehandling er at TEK17 stiller krav til materialenes reaksjon mot brann (§11-9 Materialer og produkters egenskaper ved brann), denne reaksjon mot brann er beskrevet og dokumentert i standarden *EN 13501-1 Fire classification of building products*.

Materialets reaksjon mot brann blir dokumentert og testet og får en klassifisering på formatet A2-s1-d0. Der A2 er materialets et av flere Euroklasser (A1, A2, B, C, D, E og F, med ytterligere klassifisering for tak og gulvelement (D_{floor})) som beskriver materialets antenlighet, varmeavgivning og spredning. Klassen s1 sier noe om materialets røykproduksjon der s1 er ingen røykproduksjon og s3 er stor røykproduksjon. Til slutt så beskriver d0 materialets produksjon av såkalte brennende dråper, der d0 er ingen dråper og d2 er svært ugunstig mengde brennende dråper. (Steen-Hansen, 2022)

Så for å oppfylle kravene til materialets brannreaksjon så må ofte tre overflatebehandles hvis det skal brukes i områder som setter krav til det, eksempelvis i brannceller eller trapperom.

2.6 Overtenning

Overtenning skjer når alle brennbare stoffer i et brannrom står i flammer og brannen kan spre seg ut av brannrommet, dette skjer ved rundt 600 grader celsius. (Hadler-Olsen, 2022). Tiden det tar før en overtenning tar sted kan være alt ifra 5 minutter til aldri. For at en overtenning skal ta sted må brannen ha tilgang på både oksygen, høy nok temperatur og brensel. Hvis en av disse elementene fjernes så vil brannen dø ut. Det samme gjelder hvis brannen skulle gå til overtenning, den vil fortsette å være en fullt utviklet brann så lenge den har tilgang på alle 3 elementene ifra branntrekanten, se figur under.

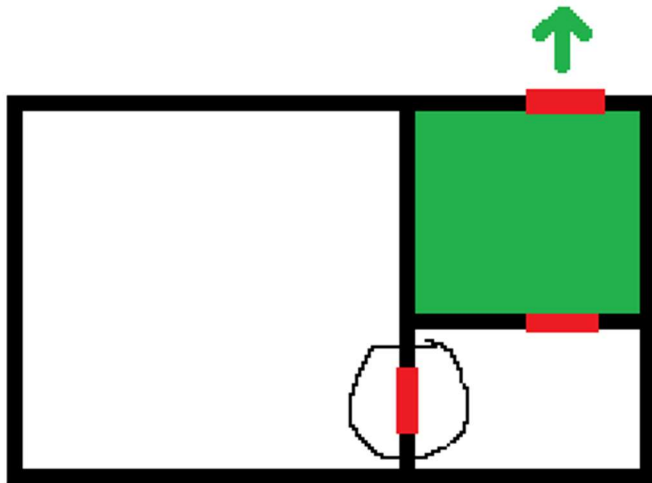


Figur 1 Branntrekanten, by Mobæk, T. (<https://ndla.no/article/1776>). CC BY-SA 4.0.

Fjernes ett av disse 3 elementene vil brannen slokkes. Mer om tiltak som sørger for at dette skjer i neste kapittel.

2.7 Brannceller

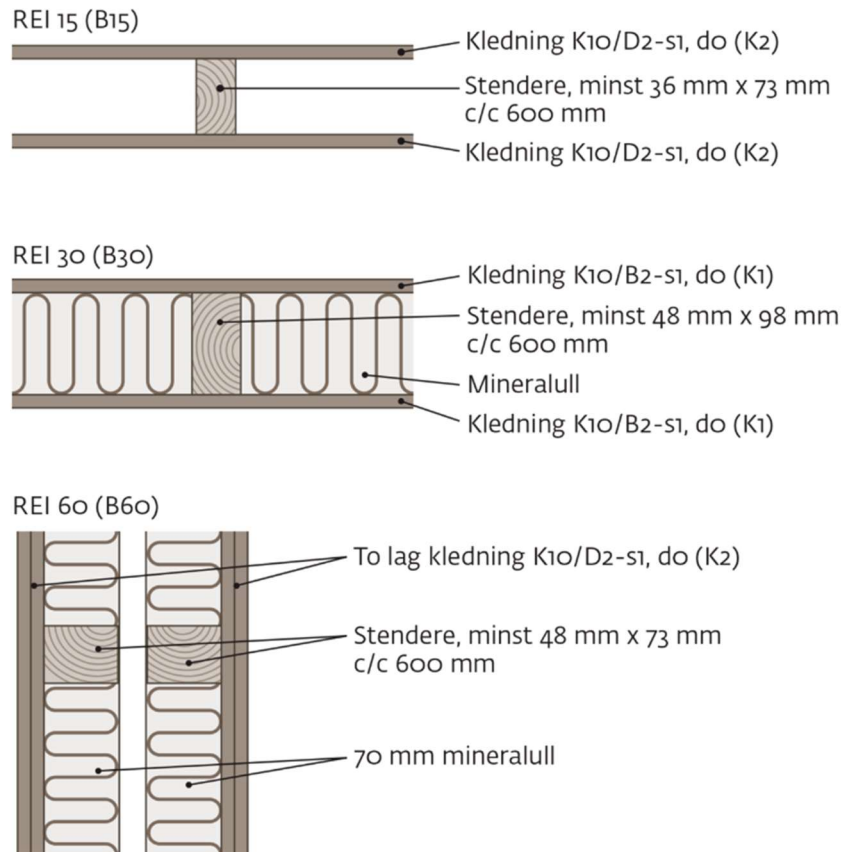
Brannceller er en måte å dele inn bygg i seksjoner som har spesielle egenskaper for å forhindre spredning av brann. En branncelle skal være i stand til å begrense og hindre spredning i en viss tidsperiode. Det vanligste kravet er 30 eller 60 minutters motstand, avhengig av risikoklasse og brannklasse. En branncelle kan variere i størrelse og kan gå over flere etasjer, det er også krav til at alle innganger til brannceller har samme brannmotstand, det vil si at dører og skillevegger har samme krav til brannmotstand. Det finnes svært få unntak fra dette kravet, men et eksempel er parkeringskjellere som har et krav til å holde 90 minutter, men 90-kravs dører er ofte dyre og tunge og TEK17 tillater bruk av 60 dører hvis det er en branncelle som fungerer som en sluse mellom døra og nærmeste rømningsvei. Se figuren under for illustrasjon. §11-8 Tabell 2.



Figur 2 Illustrasjon av dørkrav

At vegger og dører har såkalte 60-krav er en kort måte å beskrive at de har krav til å hindre spredning uavhengig av om det er liten brann eller full overtenning i cellen. Kravet er at før det har gått 60 minutter, skal ikke brannen spre seg ut av branncellen. Det er 3 deler til et slikt krav, REI. R står for bæreevnen, det betyr at konstruksjonsdelen skal være i stand til å tåle lastpåkjenningen i 60 minutter. E står for integritet, det handler om at elementet ikke skal la brannen smitte over til den ueksponeerte siden av elementet. I er Isolasjon og handler om at elementet ikke skal la varme gå igjennom over til ueksponeert side.

På figuren under er det noen eksempler på oppbygging av forskjellige branncellevegger.



Figur 3 Illustrasjon av forskjellige branncelle veggelementer, illustrasjon hentet ifra <https://snl.no/brannklassifisering>, rettighet David Keeping/Norsk brannvernforening.

Eksempler på kledning som kan brukes er gips, som er et svært brannresistent materiale, da vil det oftest være nok med to ganger 13mm gips eller en gang 13mm branngips. Det er også krav til at isolasjonsmaterialet skal være av et brannresistent materiale, som for eksempel vanlig steinull.

Det eksisterer også seksjoneringsvegger, som er forsterkede branncellevegger som skal tåle enda mer, fra 120 til 180 minutters brannmotstand. Det er derimot ikke krav til skesjonering med mindre arealet er stort eller hvis det er hensiktsmessig å skille en sammenhengende konstruksjon som for eksempel sykehus. Disse seksjoneringsveggene har også et krav til å kunne motstå mekanisk påkjenning som fallende bygningsdeler og i ytterste konsekvens, eksplosjoner. (Liebe, 2023)

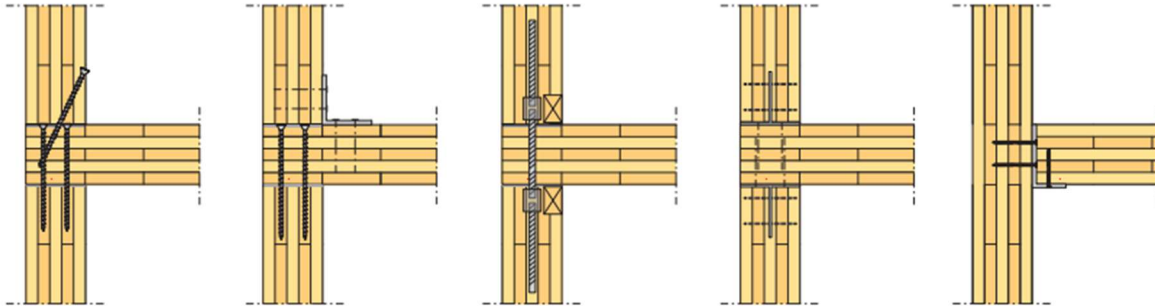
2.8 Beskyttelse mot brann og spredning av brann

En brann har 3 faser, antenningsfasen der brannen antennes et sted, det kan være mange ulike årsaker til at en brann starter, men feil i elektriske anlegg eller enheter er en av de vanligste årsakene. (Hadler-Olsen, 2022). Det finnes mange tiltak for å forhindre at en brann starter, men det er en vanskelig på grunn av at det kan være mange årsaker til at en brann starter. Det er derfor svært viktig å ha fokus på noe som er lettere å kontrollere, at brannen ikke sprer seg. For å forhindre dette, er det to faktorer, menneskelig involvering og mekaniske slokkemethoder. I antennesfasen er det mulig for mennesker å hindre at en brann både oppstår, men også at den sprer seg. Det aller vanligste er brannslukkere eller branntepper. Dette er utstyr som finnes mange steder spesielt i boliger og andre steder der konsekvensen ved brann er høy. Hvis brannen når overtenning, så vil brannen være for kraftig til at den kan slukkes med vanlige slukkemidler tilgjengelig for vanlige sivile, og brannen vil kreve andre slukkemethoder eller brannvesen for å slukkes før den gjør for mye skade. Et rom som er overtent, vil også være dødelig å oppholde seg i.

De mekaniske slukkemethodene er eksterne system som for eksempel sprinkleranlegg. Et sprinkleranlegg brukes i bygninger der den planlagte virksomhet er slik at redning og rømning kan ta lang tid (Direktoratet for byggkvalitet, 2021). TEK17 gir veiledning og bestemmelser på største tillatte areal i forhånd til brannklasse. Et sprinklersystem skal være til for å begrense brannen og hindre spredning eller eventuelt slukke den. I verste tilfeller skal sprinklere begrense brannen til slukkemanskap er på plass. Sprinklersystem kan også brukes som et kompenserende tiltak i områder der det normalt ikke er krav til sprinkleranlegg, men overflatene til materialet i bransellen ikke oppfyller kravene i TEK17.

2.9 Forbindelser

Forbindelser utføres gjerne med bruk av bolter eller spiker ofte i tillegg til vinkelplate på undersiden, dette er for å sørge for at knutepunktene ikke blir svakere enn resten av konstruksjonen. Det finnes også løsninger med skjulte forbindelser der bjelkene føres inn i en veggskive eller søyle og festes med skruer som ikke synes når alt er montert ferdig. På figurene under, hentet ifra *CLT-handbook* (Fröbel, 2019), er det eksempler på forskjellige forbindelser mellom vegg og gulv.



Figur 4 Forskjellige forbindelser

Skjulte forbindelser har større motstand i tilfelle av brann grunnet at det ikke er noen eksponerte deler som påvirkes med det første, og forbindelsene blir først utsatt når krefter fordeles over til forbindelsen som følge av tap i stivhet i en annen del av konstruksjonen eller brannen når forbindelsen.

I denne oppgaven vil ikke disse forbindelsesknutepunktene bli vurdert som dimensjonerende og det tas utgangspunkt i at konstruksjonen henger sammen ved brann, altså ingen utrivning eller brudd i for eksempel bolter eller skruer.

Mer om knutepunktforbindelsenes mekaniske egenskaper i neste kapittel.

2.10 Statikk og beregningsmetoder

For å kunne se på den strukturelle integriteten til et bygg må en ha kjennskap til statikken. Hvis et bygg skulle bli utsatt for en brann, vil bransellen gjøre sitt ytterste for å begrense brannen, men konstruksjonen må også være i stand til å omfordele kreften over til konstruksjonsdeler som ikke er svekket som følge av en brann.

Det er derfor viktig at forbindelsene i knutepunktene mellom bjelker og søyler er riktig dimensjonert slik at kreftene kan fordele seg, og på den måten hindre full kollaps. Hvis et dekke i en branncelle skulle miste all sin styrke så vil en god konstruert konstruksjon stå, og en dårlig vil kollapse som følge av en lokal kollaps.

Denne fordelingen av krefter avhenger av at forbindelsene er i stand til det, det er derfor nødvendig og også realistisk at knutepunktene har en stivhet til tross for at de i

utgangspunktet er leddet. Hvis hele konstruksjonen er leddet, vil alt kollapse hvis noe svikter eller et lokalt moment blir for stort. Denne stivheten i knutepunktene brukes ofte i stål fagverk, og det finnes verdier i standarden, men i mye mindre grad dokumentert for trevirke. I stål så regnes et knutepunkt som bøyestivt hvis det overgår verdien $K = 25 * (EI_b)/L_b$ som er fjærstivheten uttrykt som [kNm/rad]. Hvis verdien er under $K = 8 * (EI_b)/L_b$ vil forbindelsen regnes som leddet, så det er i området imellom som er interessant, såkalt delvis bøyestivt. (CEN/TC 250, 2005).

Det er en pågående doktorgradsstipendiat ved navn Osama Abdelfattah Hegeir fra konstruksjonsteknisk institutt på NTNU, som forsker på nettopp denne momentfjærstivheten til forbindelser mellom tre, men det er ikke noe data som er publisert enda. (Hegeir, 2023)

2.11 Annen litteratur

Det har blitt utført tester på dekker i massivtre som er brent som en annen masteroppgave ved konstruksjonsteknisk institutt på NTNU denne våren. De testene gikk ut på å se hvordan massivtreelementer, etasjeskillere i dette tilfelle, sin stivhet hadde blitt påvirket av brann. Elementene kom ifra et allerede utført brannforsøk utført av doktorgradsstipendiat ved NTNU Andreas Sæter Bøe. (Seehusen, 2022). Bøes doktorgradsforskning handler om brannsikkerhet i massivtrebygg, der han i forskningen sin har utført to storskala forsøk der et lite bygg på 18,8 x 5,0 x 2,5 meter i lengde, bredde og høyde, ble påtrent for å se hvordan massivtreet reagerte på en full utviklet brann, se figuren under.

Det er hentet ut data ifra storskala forsøkene til Andreas Sæter Bøe. Det er hentet inn forkullingsdybde over hele takelementet og temperatur over hele brannperioden for begge forsøkene. Forkullingsdybden gir et innblikk i hvor god motstandsdyktig massivtre er mot brann. Se figuren under for resultat ifra det første forsøket der kun takelementet var av massivtre.

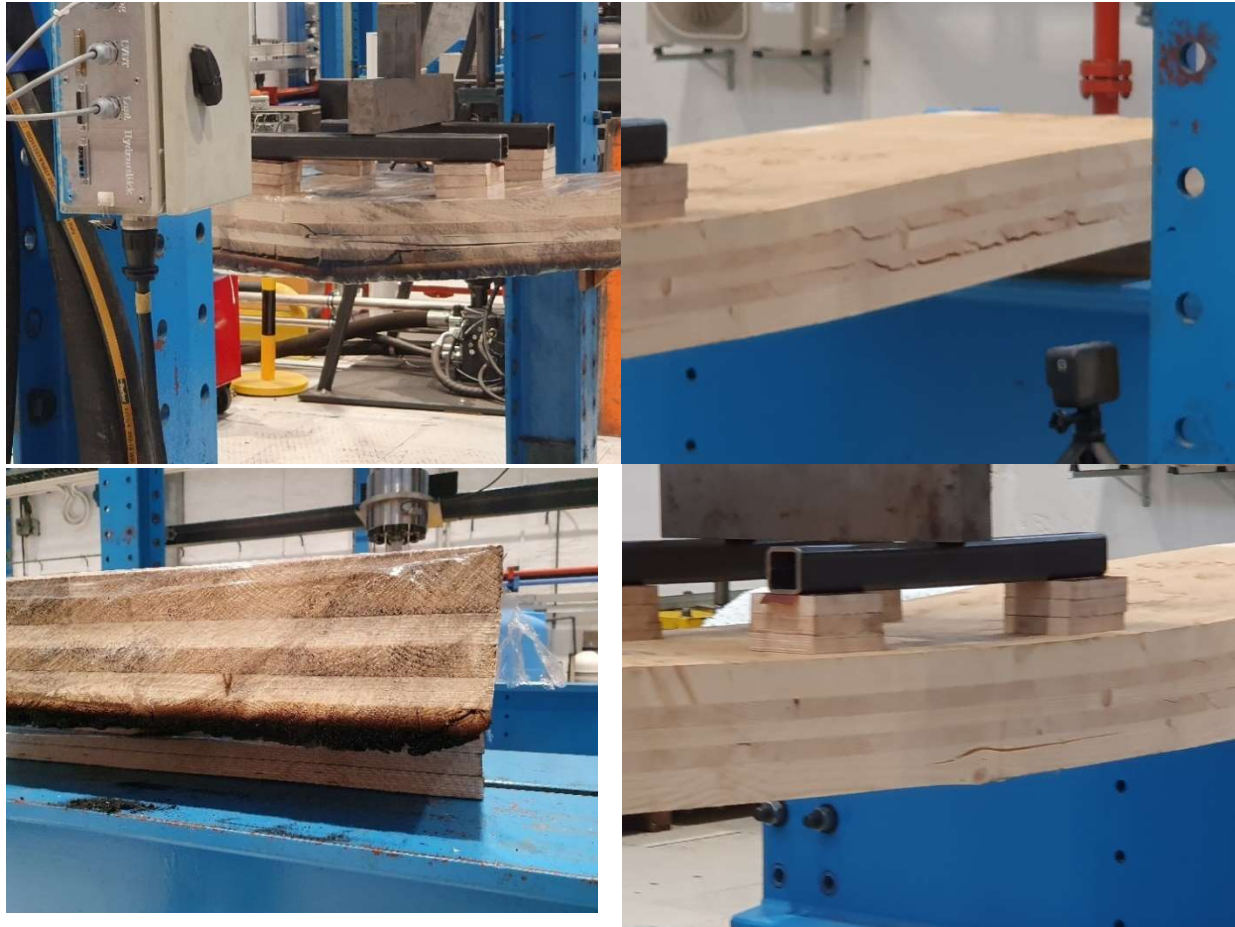


Figur 5 Forkullingsdybde på takelementet, eierskap Andreas Sæter Bøe

Resultatene viser at den gjennomsnittlige forkullingsdybden er relativt lav og er mest kritisk i områdene på midten. Grunnen til at disse områdene er kritisk er fordi ved 40 millimeter vil forkullingsdybden være gjennom den første lamellen, noe som fører til at dekke kan miste opp til 50% av bæreevnen i lengderetningen (x-retning). (Braastad, 2022)

Massivtreelementene hentet ut ifra dette storskala-forsøket som studentene testet var bygget opp av 5 lameller med dimensjoner 40-20-20-20-40 millimeter. Elementene ble testet på labben ved NTNU, ved at en last ble satt midt i spennet på elementene for å se hvordan og når elementet gikk til brudd, enten ved rulleskjærbrudd eller bøyeknekking. Det ble gjort referansetester, der element med samme dimensjon og lamelloppbygning ble testet på samme måte.

Figurene under viser bilder ifra forsøket.



Figur 6 Bilder ifra forsøk, brent element til venstre og ubrent til høyre, foto: Karsten Braastad

Resultatene ifra forsøkene viste at elementene hadde en reduksjonsfaktor i strykekapasitet på rundt 3, som vil si at det brente elementet var rundt 3 ganger svakere. Denne store reduksjonen kan komme av at nederste lamell var så godt som oppbrent, noe som førte til at elementet kun hadde 2 lameller på henholdsvis 20 og 40 millimeter som hadde et stivhetsbidrag i lengderetningen. (Oppheim & Heggheim, 2023).

Grunnen til at man opplever typisk rulleskjærbrudd i massivtre er på grunn av lav skjærmotstand i treverk.

3 Model

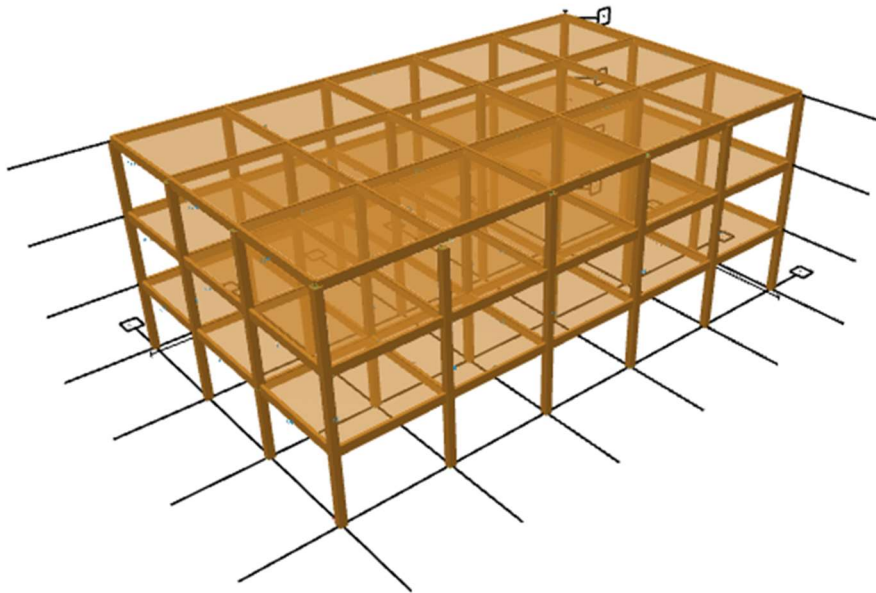
3.1 Generelt

Dette kapitlet presenterer modellen som brukes i denne oppgaven. Modellen brukes til å gjøre kapasitetssjekk og gir innsikt i hvordan kreftene fordeler seg i konstruksjonen når tverrsnitt endrer seg som følge av brann. Materialvalget på massivtre kommer både på bakgrunn av økt bruk i markedet der tre og massivtre spesielt er et mindre etablert fagområde enn det for eksempel stål og betong er, spesielt når det kommer til brann. Det er også på bakgrunn av et samarbeid med Andreas Sæter Bøes og hans forskning på sikkerhet i massivtrebygg, der han ønsker å fülle det han mener er kunnskapshull på temaet massivtre i brann. (Seehusen, 2022). Men, brannforsøket tok for seg et bygg som var urepresentativt for et reelt bygg da det var for lite i areal. Modellen i denne oppgaven baseres på et kontorbygg med enkel geometri for å kunne belyse byggets strukturelle endring ved brann i en branncelle.

Modellen representerer et kontorbygg med trevirke som konstruksjonsmateriale, bygget er konstruert som en rammekonstruksjon med fjærstivhet i knutepunktene

3.2 Model

Denne oppgaven ser på et bestemt fagverksystem i 2d som er et utsnitt ifra et større bygg, se figuren under.



Figur 7 3D Konstruksjon hele bygget

Byggets dimensjoner er: $x = 18$ meter, $y = 30$ meter og $z = 12$ meter

Bygget representerer et kontorbygg med vanlig kontorvirksomhet. Dette vil gi følgende krav ifra TEK17:

- §11-2: Risikoklasse 2, dette stiller krav til at alle ansatte får opplæring i rømningsstrategi og hver etasje må ha en brannvernansvarlig som sørger for at bygget er tomt ved en eventuell brann.
- §11-3: Brannklasse 2, valgt ut ifra tabell 1 i VTEK §11-3. (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)
- §11-4 og §11-8:

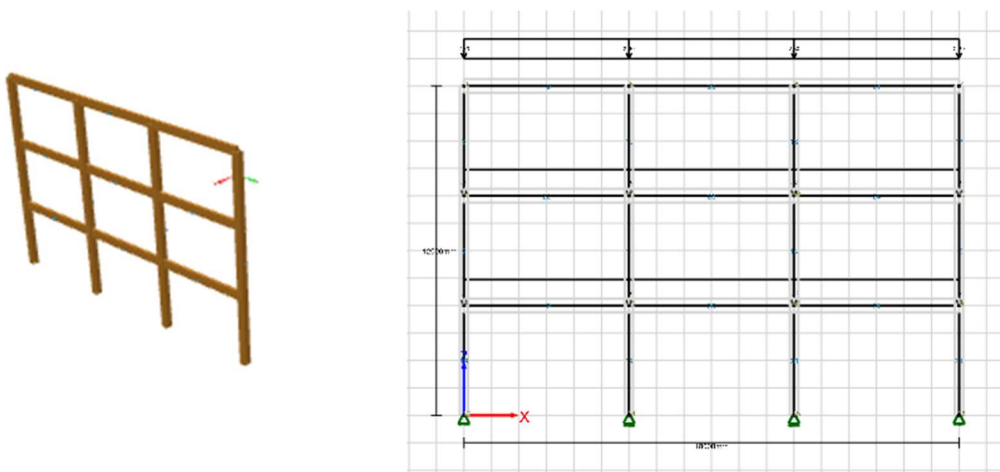
Konstruksjonsdel	Krav
Hovedbæresystem	R60
Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende	R60
Brannceller	EI 60

Tabell 1 Krav til konstruksjonsdeler

- §11-9: Største overflateareal i branncelle er under 200m^2 , Dette resulterer i et overflatekrav på D-s2,d0 med mindre branncellen er en del av rømningsvei, som gir krav til B-s1,d0. (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Eksponert massivtre oppfyller D-s2,d0 og ved brannimpregnering kan det også oppnå B-s1,d0. (Norsk Treteknisk institutt, 2006). Resten av kravene i TEK17 er ikke relevante foruten at bygget anses som usprinklet for videre beregninger.

For å kunne se nærmere på hvordan en slik konstruksjon oppfører seg ved tap av bæreevne tas det et utsnitt ifra 3d-modellen for å se på en 2d rammekonstruksjon. Figurene under viser hvordan utsnittet ifra 3d konstruksjonen ser ut.



Figur 8 2D Rammekonstruksjon

Dimensjonene er $x = 18\text{ meter}$ og $z = 12\text{ meter}$

Bjerkene i konstruksjonen har en dimensjon på $320 \times 160\text{ mm}$. Med 8 ganger 40 mm lameller. Søylene har en dimensjon på $320 \times 320\text{ mm}$. Materialkvalitet i trevirke C24. Materialdata ifra analyseprogrammet Focus i figuren under:

Strength class	C24
Lamella thickness [mm]	40,0
Crack factor k_{cr}	0,80
f_{mk} [N/mm ²]	24,00
f_{t0k} [N/mm ²]	14,50
f_{t90k} [N/mm ²]	0,40
f_{c0k} [N/mm ²]	21,00
f_{c90k} [N/mm ²]	2,50
f_{vk} [N/mm ²]	4,00
$E_{0,05}$ [N/mm ²]	7,4000e+003
$G_{0,05}$ [N/mm ²]	4,6400e+002
$E_{0,mean}$ [N/mm ²]	1,1000e+004
$E_{90,mean}$ [N/mm ²]	3,7000e+002
G_{mean} [N/mm ²]	6,9000e+002
Rho_k [kN/m ³]	3,43
Rho_{mean} [kN/m ³]	4,12
Show old strength classes?	<input type="checkbox"/>

Figur 9 Materialdata fra Focus

4 Metode

4.1 Generelt

Dette kapitlet beskriver metoden brukt for å komme fram til resultatene i oppgaven. Metoden eller framgangsmåten beskriver hvilke verktøy som har blitt brukt, hvordan disse verktøyene er anvendt og hvilke forutsetninger som er gjort i forbindelse med beregningene.

I dette kapitlet om metode er underkapitlene:

- Utført arbeid
- Programvare
- Forutsetninger

4.2 Utført arbeid

Alle deler av konstruksjonen må oppfylle krav til 60 minutters brannmotstand, som håndberegnes ut ifra CLT-handbook (Fröbel, 2019), og ved bruk av både eksisterende NS-EN 1995-1-2 og NS-EN 1995-1-1 men også informasjon ifra prEN 1995-1-2. Håndberegningene gir svar på hvordan tverrsnittet til de bærende bjelkene reduseres og om det er tilstrekkelig brannmotstand i henhold til TEK17.

For å se på hvordan resten av rammekonstruksjonen oppfører seg så brukes analyseprogrammet Focus konstruksjon. Der vil de reduserte tverrsnittene legges inn i forskjellige områder som viser ulike brannscenarier.

4.3 Programvare

Programvaren som brukes i denne oppgaven er:

- Excel 2023
- Focus Konstruksjon 2023

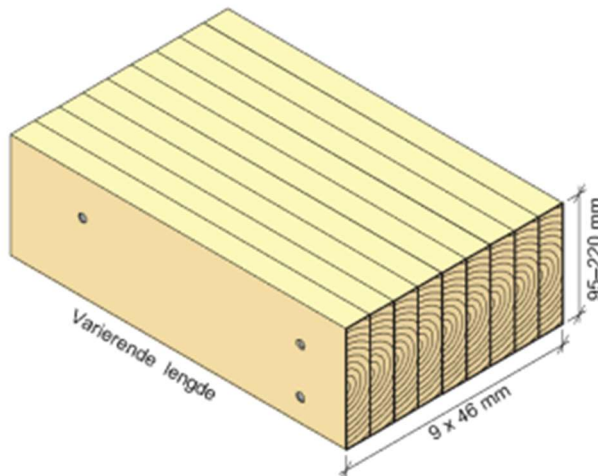
Focus er et FEM (*Finite Element Method*) analyseprogram som brukes i denne oppgaven både for å illustrere modellen, men også gjøre kapasitetssjekk opp mot Trestandarden for hele konstruksjonen med momentstivheten i knutepunktene. Programmet lar også brukeren modellere i mange forskjellige materialer og en kan se deformasjoner og diverse diagrammer for moment, skjær og aksialkraft. Programmet har både lineær og ikke-lineær analyse, men i denne oppgaven brukes det kun lineær analyse. (Focus Software, n.d.)

Excel brukes til å utføre håndberegninger, slik at det enkelt kan endres på parametere uten at alt må oppdateres.

4.4 Forutsetninger

I denne oppgaven er det gjort følgende forutsetninger. For håndberegninger:

- Bjelkene er bygget opp av massivtre men lamellene er ikke krysslågt i som i CLT med kantstilte slik som på figuren under. Materialverdier for CLT brukes, relevante verdier er hentet fra Sintef's tekniske godkjenning for materialet massivtre (Sintef ved Hans Boye Skogstad, 2020).



Figur 10 Kantstilt massivtre, illustrasjon av Sintef (Sintef ved Hans Boye Skogstad, 2020)

- I Focus brukes det lastsituasjon for brann, med reduserte faktorer i henhold til NS-EN 1990, NS-EN 1991-1-1 og NS-EN 1991-1-2.
- Bjelkene er dekket på sidene slik at det kun er reduksjon av tverrsnittet fra undersiden i det aktuelle brannrommet.
- Forutsetter konstant innbrenningshastighet, lineær forkullingsdybde.
- Oppgaven tar ikke hensyn til delaminering og det forutsettes bruk av limtyper som er brannresistente.
- Endimensjonal forkulling

4.5 Beregninger

4.5.1 Generelt

Dette kapittelet gir en mer detaljert oversikt over framgangsmåten brukt for å komme frem til resultatene.

De ulike formlene og utregninger er hentet ifra:

- Standarder (1995-1-1, 1995-1-2, 1990, 1991-1-1 og 1991-1-2) (LEGG INN REF)
- Beregningsmetoder for massivtrekonstruksjoner i brann, *The CLT handbook*. (Fröbel, 2019)
- Focus konstruksjon

4.5.2 Redusert tverrsnitt

Først så beregnes den nominelle forkullingsdybden basert på formelen

$$d_{char,n} = \beta_n * t [mm].$$

Den nye trestandardens sin branndel heretter kalt prEN 1995-1-2 har oppdaterte formler og nye formler som kan brukes for å regne ut den nominelle forkullingshastigheten

$$\beta_n = \beta_0 * k_n \left[\frac{mm}{min} \right].$$

Det finnes også standard verdier, men ikke for spesifikt massivtre enda. Den spesifikke forkullingshastigheten vil være på den lavere siden for store dekker slik som forsøket beskrevet i kapittel **Error! Reference source not found.** viser, men den vil basert på standarden være noe høyere. For å unngå et resultat som er for lite så brukes standarden i dette tilfellet. I prEN 1995-1-2 så deles forkulling av massivtre inn i flere faser. Dette er på bakgrunn av at elementet kan være isolert eller den isolerende effekten forkullingslaget i seg selv har. Forskjellige faser kan gi en ikkelineær forkullingshastighet, men fasen for ubeskyttet og fasen for isolerende forkullingslag er den samme, altså samme forkullingshastighet. Videre, så vil det for ubeskyttede treelement bety lineær forkullingshastighet i henhold til Figur 5.1a i prEN 1995-1-2.

Videre, så brukes den nominelle forkullingsdybden til å regne ut det reduserte tverrsnittet i henhold til (EN 1995-1-2, kapittel 4.2.2(1), eq. (4.1)). Men d_0 verdien er hentet ifra prEN

$$d_{eff} = d_{char,n} + d_0 [mm]$$

(8) <RCM> Unless rules are given in this standard, the value of zero-strength layer depth d_0 for the design of linear timber members should be assumed as follows:

$$d_0 = 14 mm$$

Figur 11 Nullstyrkelaget etter ny standard (prEN 1995-1-2, 7.2.2 (8))

Dette reduserte tverrsnittet deles opp i fornuftige tidsintervaller, det er valgt 10, 20, 30, 45, 60 og 90 minutter.

4.5.3 Kapasitetssjekk håndberegninger

De formlene som er brukt er hentet ifra *CLT-handbook* som igjen har hentet informasjon ifra standardene, innholdet er kontrollert slik at det er det samme som brukes i norsk standard. Se vedlegg A for beregninger, og figurene under for oversikt over formler som er brukt.

$f_{m,k} = 24 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$f_{c,0,k} = 21 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	
$f_{v,k} = 4 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$		
M = 20,56		Data fra focus
V = 13,78		Data fra focus
N = -60,91		Data fra focus
k _{mod,fi} = 1		NS-EN 1995-1-2 §4.2.2(5)
k _{fi} = 1,15		NS-EN 1995-1-2 Tabell 2.1
Y _{M,fi} = 1		NS-EN 1995-1-2 NA2.3
$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} * f_{m,20} / Y_{M,fi}$		NS-EN1995-1-2, §2.3
$f_{v,d,fi} = k_{mod,fi} * f_{v,20} / Y_{M,fi}$		NS-EN1995-1-2, §2.3
$f_{c,0,d,fi} = k_{mod,fi} * f_{c,0,20} / Y_{M,fi}$		NS-EN1995-1-2, §2.3
$f_{20} = k_{fi} * f_k$		
k _{cr} = 0,8		
$\sigma_{c,0,d,fi} = N_{d,fi} / A_{fi}$		
$\sigma_{c,0,d,fi} < k_{c,z,fi} * f_{c,0,d,fi}$	$\sigma_{c,0,d,fi} < 22,02$	
$\lambda_{z,fi} = l / \sqrt{\frac{I_{yy}}{A_{fi}}} = 43,30$		
$\lambda_{rel,z,fi} = \frac{\lambda_{z,fi}}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,20,fi}}{1,15 * E_{0,05}}} = 0,73$		
k _{c,z,fi} = 0,9		NS-EN1995-1-1 eq. 6.26
k _y = 0,79		NS-EN1995-1-1 eq. 6.28

Figur 12 Formler og verdier brukt i håndberegninger

$f_{m,20,fi} = 1,0 * 1,15 * \frac{24}{1,0} = 27,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	NS-EN 1995-1-1 §6.1.6 og §6.1.7
$f_{v,20,fi} = 1,0 * 1,15 * \frac{4}{1,0} = 4,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	
$f_{c,0,20,fi} = 1,0 * 1,15 * \frac{21}{1,0} = 24,15 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	NS-EN 1995-1-1 §6.1.6 og §6.1.7
$\sigma_{m,d,fi} = \frac{M_{d,fi}}{W_{fi}}$	NS-EN 1995-1-1 §6.1.6 og §6.1.7
$\tau_{d,fi} = 1,5 * \frac{V_{d,fi}}{k_{cr} * w * h_{eff}}$	
$\sigma_{m,d,fi} < f_{m,d,fi}$	

Figur 13 Formler og beregninger brukt til kapasitetssjekk

4.5.4 Focus

Modellen ble modellert i Focus der alle knutepunkt ble gjort om til leddede forbindelser for å så bruke fjær-funksjonen i Focus til å legge inn ønsket fjærstivhet. Fjærstivheten kommer av formelen $K = x * (EI_b) / L_b$ der x-verdien velges mellom 8 og 25 som er grenseverdiene ifra 2.10. For denne oppgaven er det ønskelig med en relativt stiv forbindelse så velger

verdien $K = 15\,000$ kNm/rad. Tiltros for at tverrsnittet reduseres, antas knutepunktet sin stivhet som uendret på bakgrunn av at konstruksjonsdeler knyttet til knutepunktet som ikke er påvirket av brann vil bidra til at forbindelsen er tilsvarende stiv som initialverdien.

Går videre ved å konstruere modellen i Focus konstruksjon der laster som snø og vindlast blir lagt inn som standard basert på disse parameterne for snølast:

- Trondheim, 50 meter over bakken, karakteristisk snølast $3,5$ kN/m²
- Flatt tak
- Lasten er satt til å være 1 meter inn i planet

Og vindlast:

- Trondheim, Referansevindhastighet 26 m/s
- 50 meter over havet
- 50 år returperiode
- Terrengkategori IV
- Taket ligger 12 meter over bakkeplan
- Ingen ortografisk innflytelse
- Flatt tak
- Påkjenning på vegg

Det legges inn linjelast basert på krefter fra dekkene som representerer vanlig nyttebelastning på kontorlandskap i henhold til NS-EN 1991-1-1 Tabell 6.2. Det gir $q_k = 3,0$ [$\frac{kN}{m^2}$], det regnes da med at 9 kvadratmeter av dekkene fra hver side av bjelken bidrar til last på bjelken. Dekkene er 36 kvadratmeter mellom hvert spenn som overfører krefter til 4 bjelker, derfor tar hver bjelke konservativt 9 kvadratmeter med last. Dette gir en linjelast på bjelkene på $q_k = 4,5$ [$\frac{kN}{m}$].

Focus konstruksjon har en funksjon som kontrollerer om kapasiteten er i orden med gitt lastsituasjon, der lastkombinasjonen er i henhold til NS-EN 1990 for brann, men har ikke noe forhold til å beregne kapasitet mot brann. Derfor brukes Focus her til å se hvordan konstruksjonen oppfører seg og hvordan kreftene fordeler seg, så vil det utføres håndberegninger som kontrollerer opp mot TEK17 krav som regnes ut ifra *CLT-Handbook*.

5 Resultater

5.1 Generelt

I dette kapitlet er alt av resultater samlet og presentert, Resultatene vil bli vurdert og diskutert i neste kapittel.

5.2 Tanker før resultater

Dette kapitlet skal gi et lite innblikk i hva studenten selv tenker før resultatene ble funnet. Først og fremst så viser nyere forskning at massivtre er et relativt brannresistent materiale til tross for at det er lettantennelig og har dårlige egenskaper som forårsaker videre spredning. Rammekonstruksjoner har ofte god evne til å fordele krefter og hvis man er i stand til å begrense en brann til den enkelte bransellen vil mye være gjort for å være sikker på at konstruksjonen står. Når et eventuelt dekke svikter er det ikke dermed sakt at dekke faller ned. Hvis knutepunktene holder og har en viss momentstivhet så vil resten av konstruksjonen holde det sviktende dekke oppe. Dette er også gunstig med tanke på rednings- og rømningssituasjonen.

Slike bygg vil ofte være sprinklet, men det er ingen garanti for at det vil være nok, har en brann nok brensel, oksygen og varme vil vann kun begrense til en viss grad somtidig som det tilføres mer oksygen, som er negativt. Det er viktig at konstruksjonen er konstruert på en måte som tåler denne påkjeningen av en brann, hindrer videre spredning og sørger for at de som rømmer og senere de som skal gjøre en slukkeinnsats har trygge arbeidsforhold.

Resultatene kommer nok til å vise at det skal brenne relativt lenge før en eventuell kollaps finner sted. I 2023 er det fortsatt boligbranner som topper dødsstatistikken (Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap, n.d.), ofte grunnet at i andre bygninger som for eksempel kontorbygg så blir eventuelle farer avverget før det blir for ille, men i bolighus er det en viss sannsynlighet for at alle beboere sover.

5.3 Resultater fra håndberegninger

5.3.1 Forkulling og redusert tverrsnitt

Beregningene viser som følger:

Tid [min]	d_{eff} [mm]	Effektiv bredde på søyler [mm]	Effektiv høyde på bjelker [mm]
0	0	320	320
10	22	298	298
20	30	290	290
30	38	282	282
45	50	270	270
60	62	258	258
90	86	234	234

Tabell 2 Oversikt over redusert tverrsnitt og forkullingsdybde

Det reduserte tverrsnittet øker i takt med forkullingsdybden. Ut ifra resultatene viser det at det tar litt over 30 minutter før første lamell har mistet sin styrke og bæreevne.

5.3.2 Redusert Stivhet

Stivhet til bjelkene og søylene reduseres ettersom tverrsnittet reduseres, men det vil få en parabolisk utvikling.

Tid [min]	I_x Bjelke [Nmm ²]	I_z Søyلة [Nmm ²]	EI_x Bjelke [Nmm ²]	EI_z Søyلة [Nmm ²]
0	4,37E+08	8,74E+08	4,81E+12	9,61E+12
10	7,20E+08	7,06E+08	7,92E+12	7,76E+12
20	6,75E+08	6,50E+08	7,43E+12	7,51E+12
30	6,33E+08	5,98E+08	7,31E+12	6,91E+12
45	5,72E+08	5,25E+08	6,60E+12	6,06E+12
60	5,15E+08	4,58E+08	5,95E+12	5,29E+12
90	4,13E+08	3,42E+08	4,77E+12	3,95E+12

Tabell 3 2. Arealmoment og stivheten til bjelker og søyler ved redusert tverrsnitt

5.3.3 Kapasitetsjekk mot TEK17

Se vedlegg A for regneark med referanser.

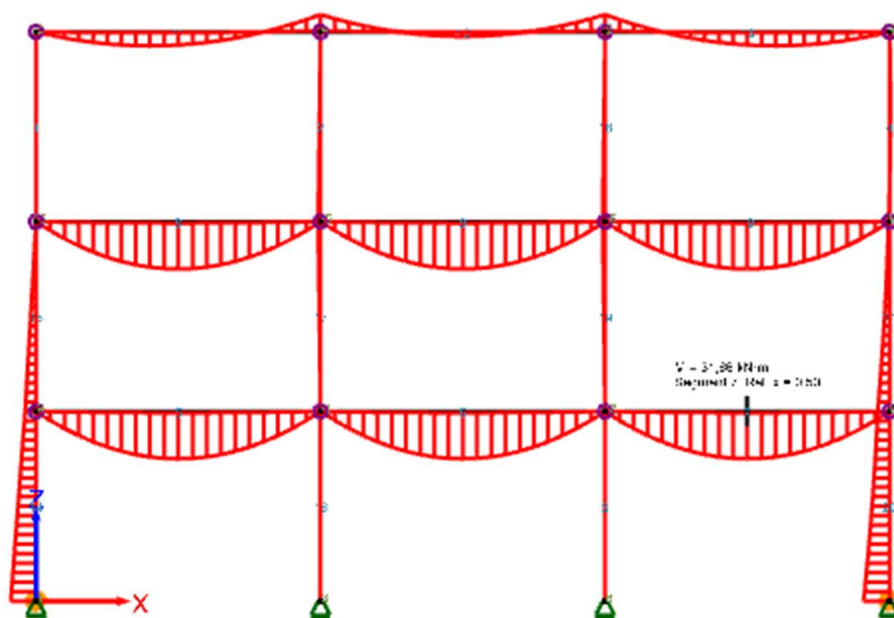
Resultatene viser at konstruksjonen er ok for bøyning og skjær i bjelke samt knekking av søyler. Alt var med stor margin, dette skyldes kraftige søyler og relativ liten reduksjon av tverrsnittet som følge av endimensjonal og langsom innbrenning.

5.4 Resultater fra Focus konstruksjon

5.4.1 Generelt

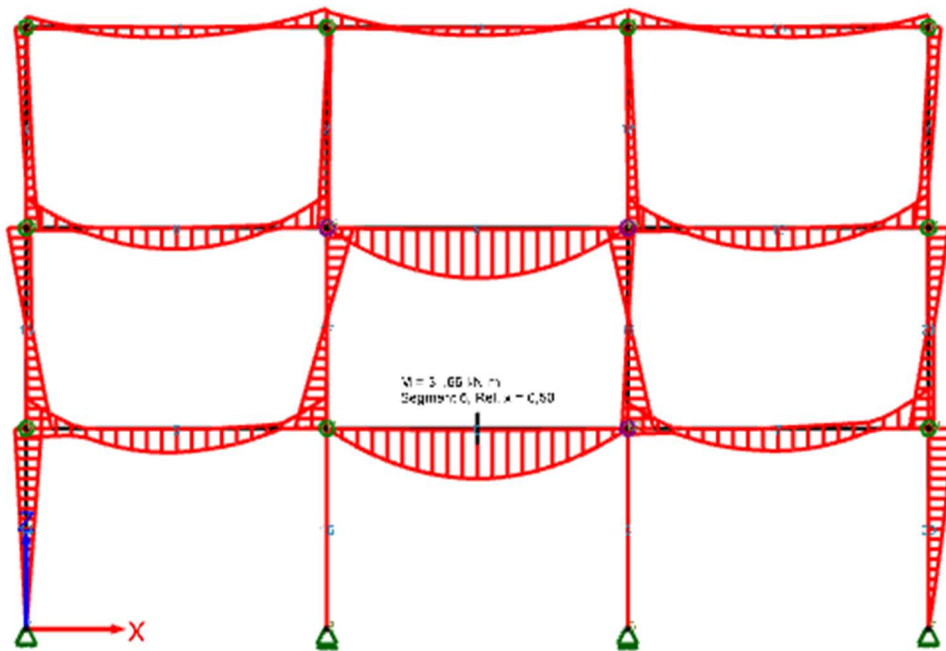
Resultatene ifra Focus konstruksjon er delt opp slik at det er testet for brann i 3 forskjellige brannceller, alle illustrert med figurer under hvert underkapittel. Der presenteres resultatene ifra reduksjonen av tverrsnittet på bjelke-søyle konstruksjonen i en bestemt branncelle og dens påvirkning på resten av systemet.

Når konstruksjonen ble etablert med ledd så momentdiagrammet slik ut:



Figur 14 Momentdiagram uten fjærstivheter

Når momentfjærstivheten ble lagt til i leddene med en verdi på $K = 15000 \text{ kNm/rad}$ ble momentdiagrammet slik:



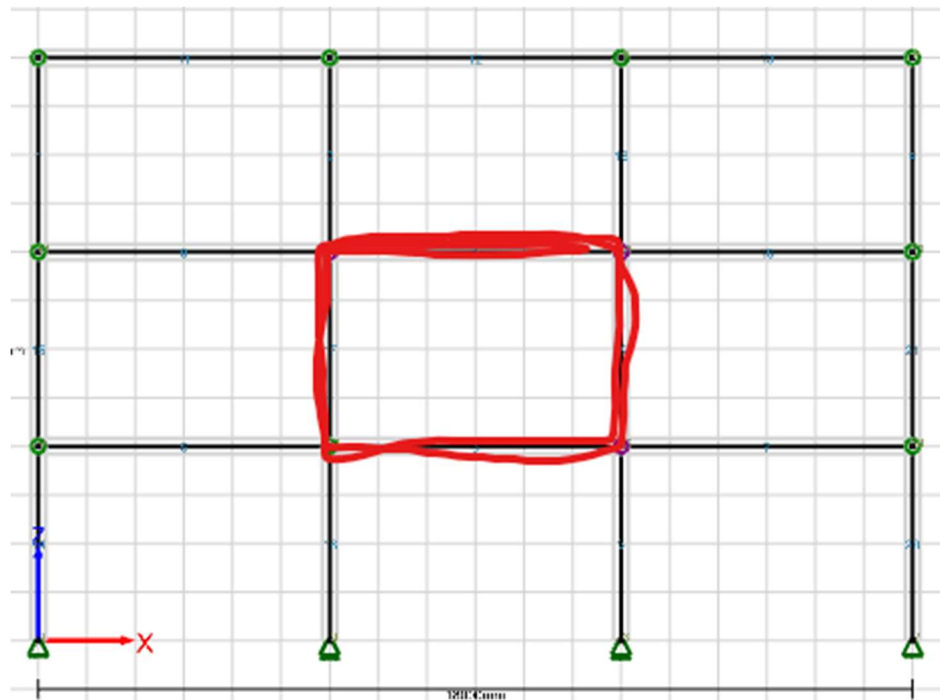
Figur 15 Momentdiagram med fjærstivhet

Dimensjonerende lastkombinasjon fra Focus i ulykkesituasjon:
 $1,0 \cdot \text{Egenvekt} + 1,0 \cdot \text{Nyttelast} + 0,2 \cdot \text{Snølast} + 0,0 \cdot \text{Vindlast}$

5.4.2 Brancelle 1

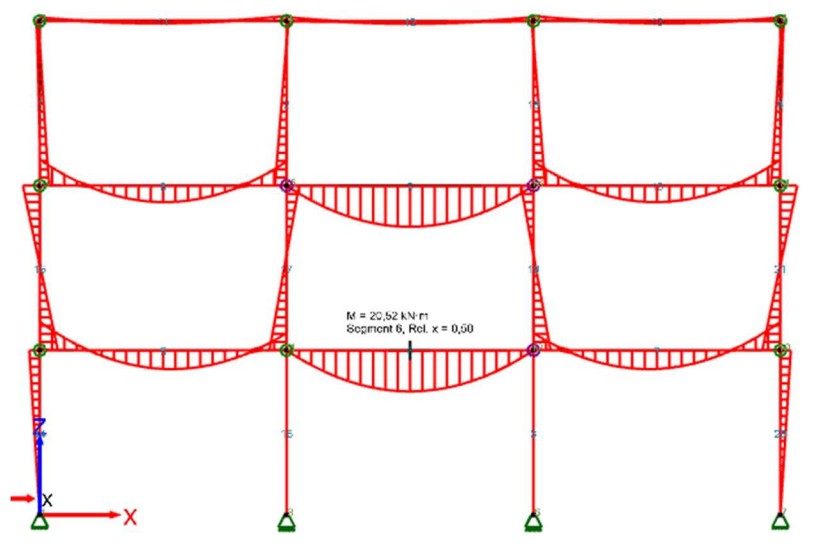
Plassering

Den første branncellen plasseres sentralt i konstruksjonen som vist på figuren under:



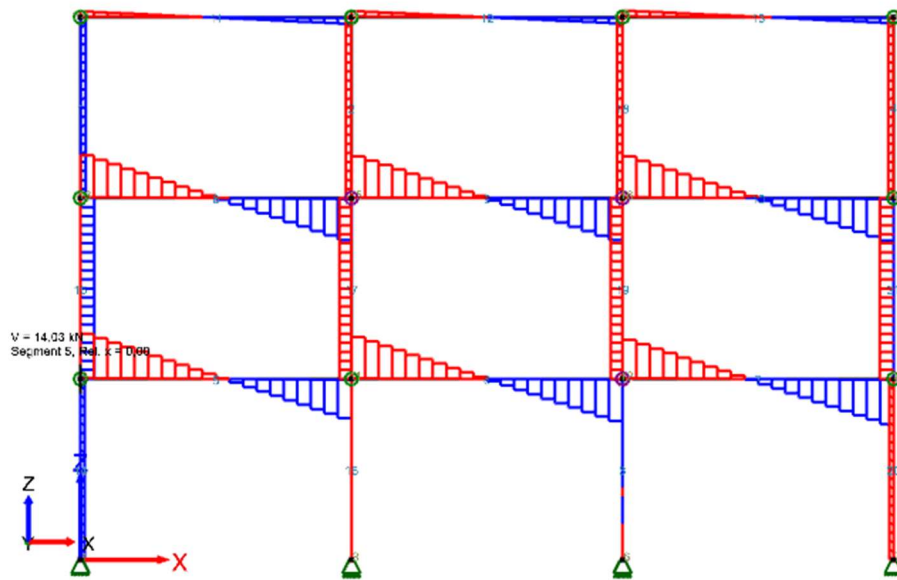
Figur 16 Branncelle 1

Momentkrefter



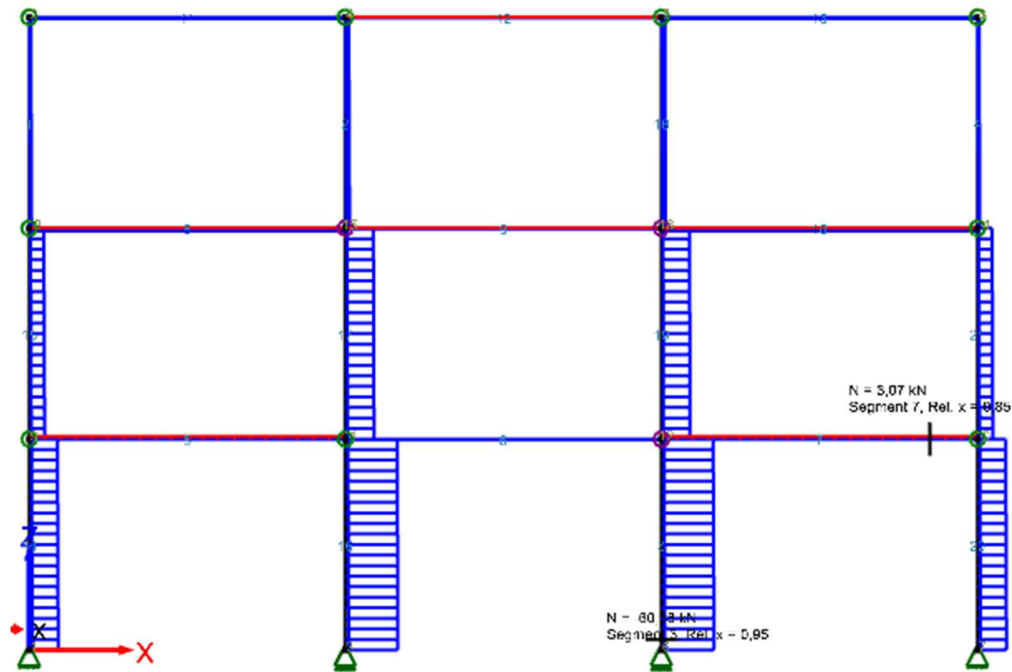
Figur 17 90 Minutter

Skjærkrefter



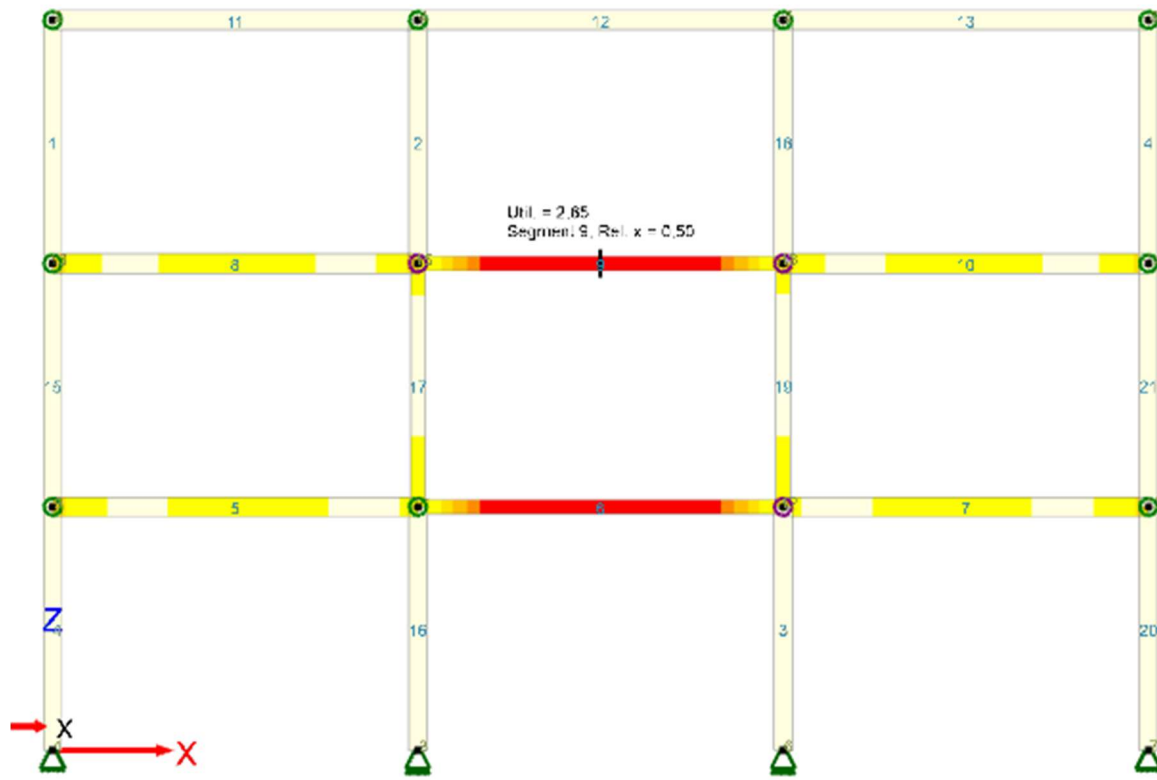
Figur 18 Skjærkrefter 90 min

Aksialkrefter



Figur 19 Aksialkrefter 90 min

Kapasitetssjekk

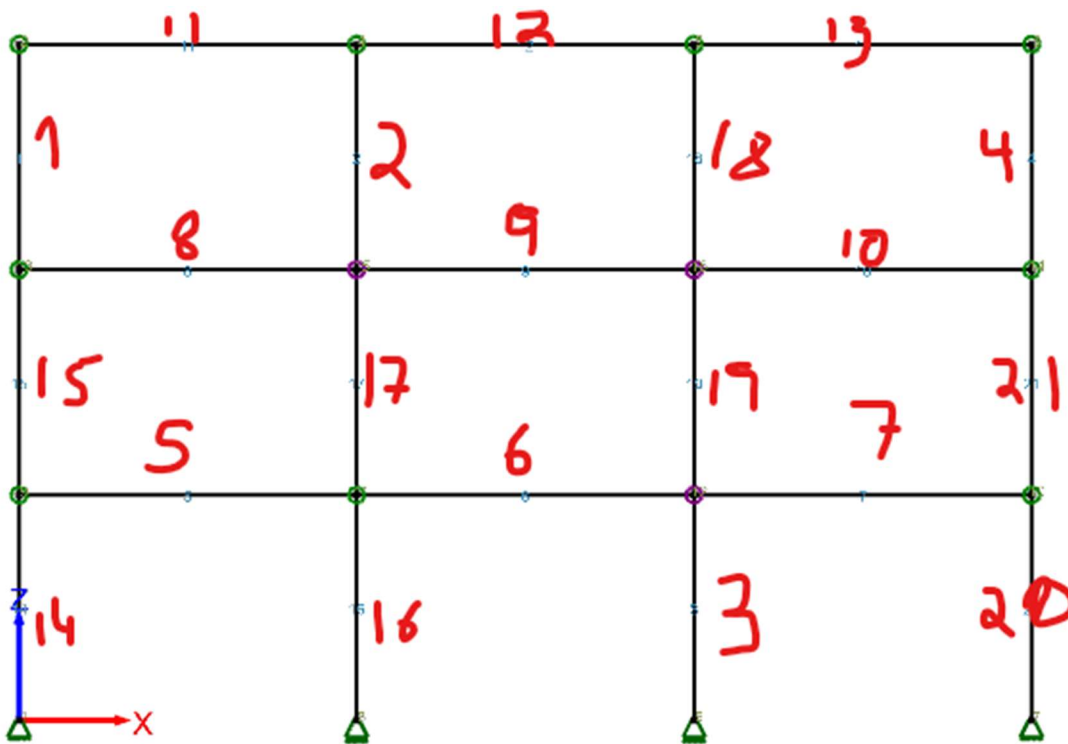


Tabelldata

Tid/Maksverdi	Moment [kNm]	Skjær [kN]	Aksial [kN]	Utnyttelsesgrad
10 minutter	20,63 (6)	13,35 (7)	-61,61 (3)	1,01 (6)
20 minutter	20,62 (9)	13,41 (5)	-61,49 (3)	1,12 (6)
30 minutter	20,60 (9)	13,48 (7)	-61,35 (3)	1,25 (6)
45 minutter	20,58 (9)	13,59 (5)	-61,14 (3)	1,50 (6)
60 minutter	20,56 (6)	13,78 (5)	-60,91 (3)	1,82 (6)
90 minutter	20,52 (6)	14,03 (5)	-60,38 (3)	2,65 (9)

Tabell 4 Tabelldata branncelle 1

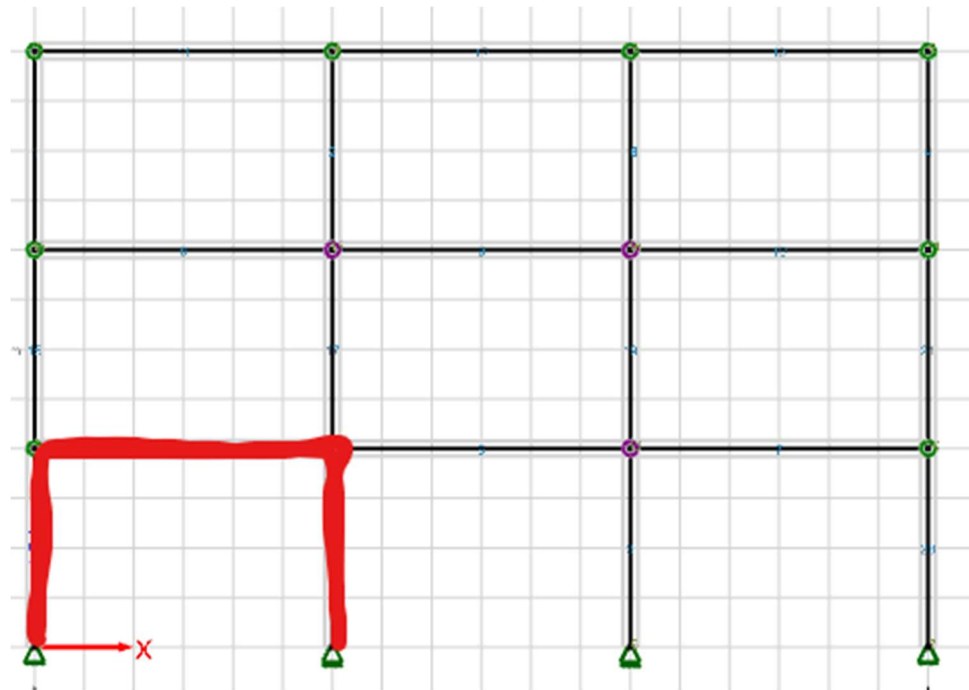
Tallet i parentes viser til hvilket segment verdiene er hentet fra, segmentoversikt i figuren under:



5.4.3 Brancelle 2

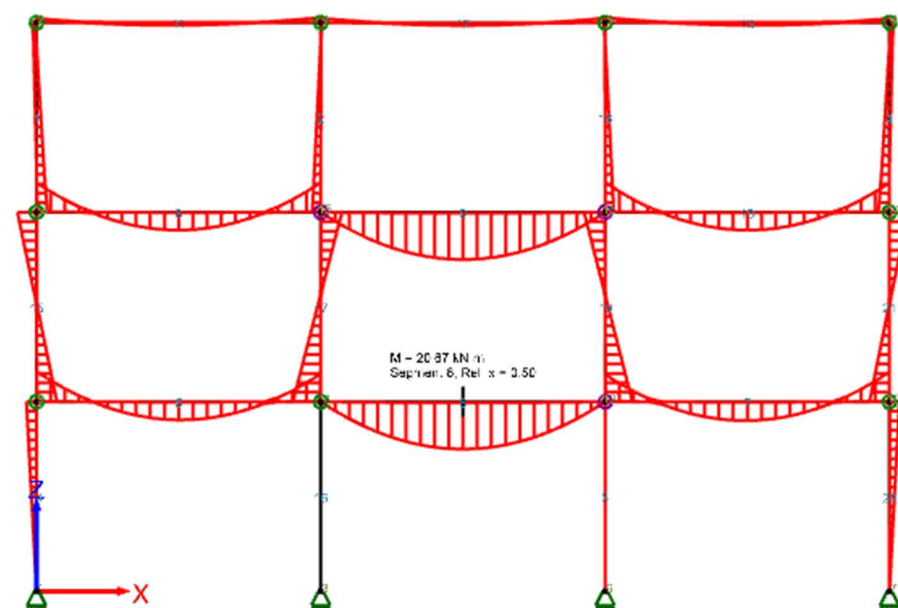
Plassering

Den neste branncellen plasseres nederst til venstre slik som illustrert under:



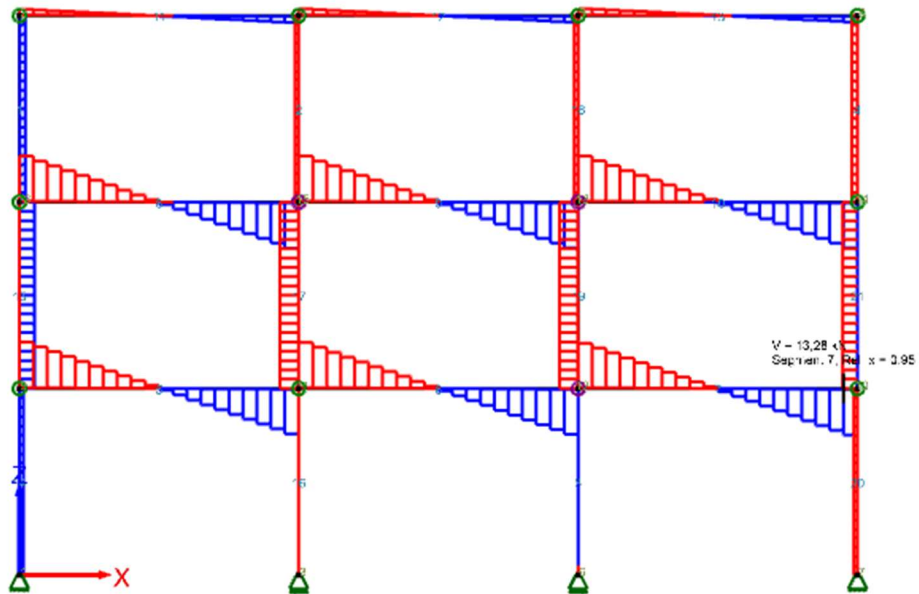
Figur 20 Branncelle 2

Momentkrefter



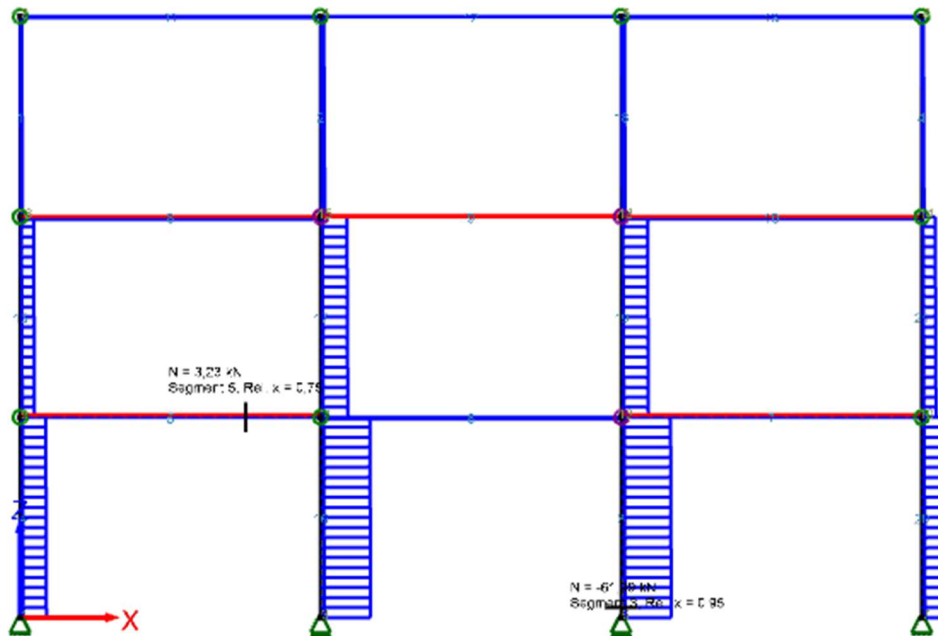
Figur 21 Momentkrefter 10 min

Skjærkrefter



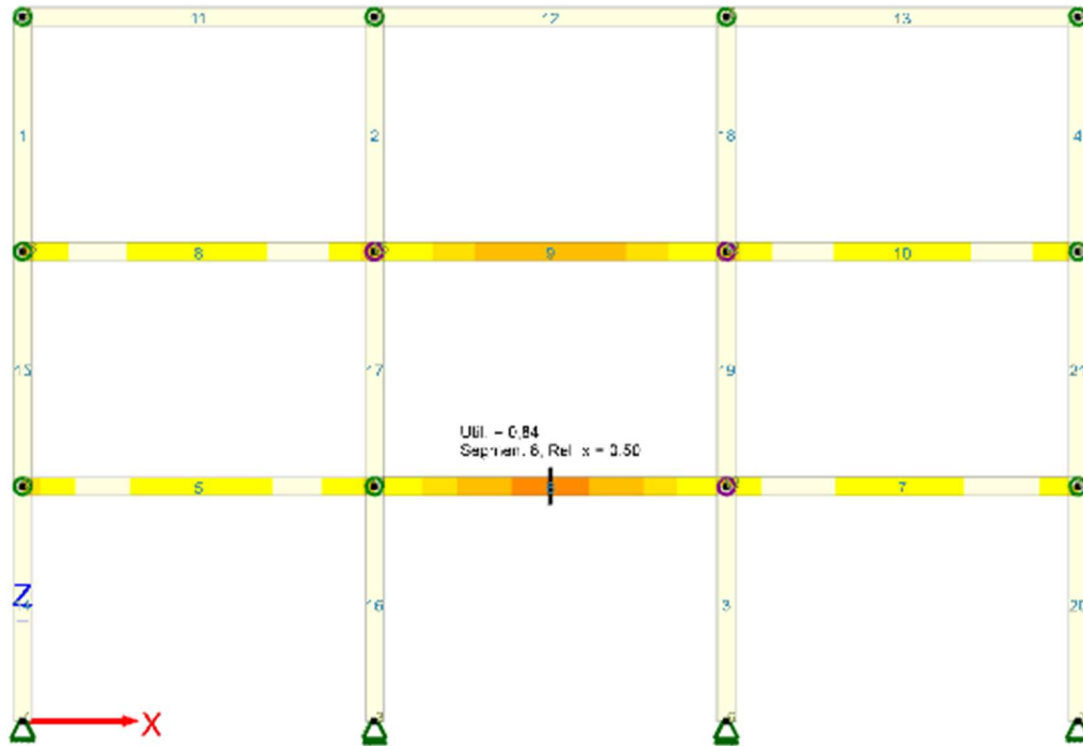
Figur 22 Skjærkrefter 10 min

Aksialkrefter



Figur 23 Aksialkrefter 10 min

Kapasitetssjekk



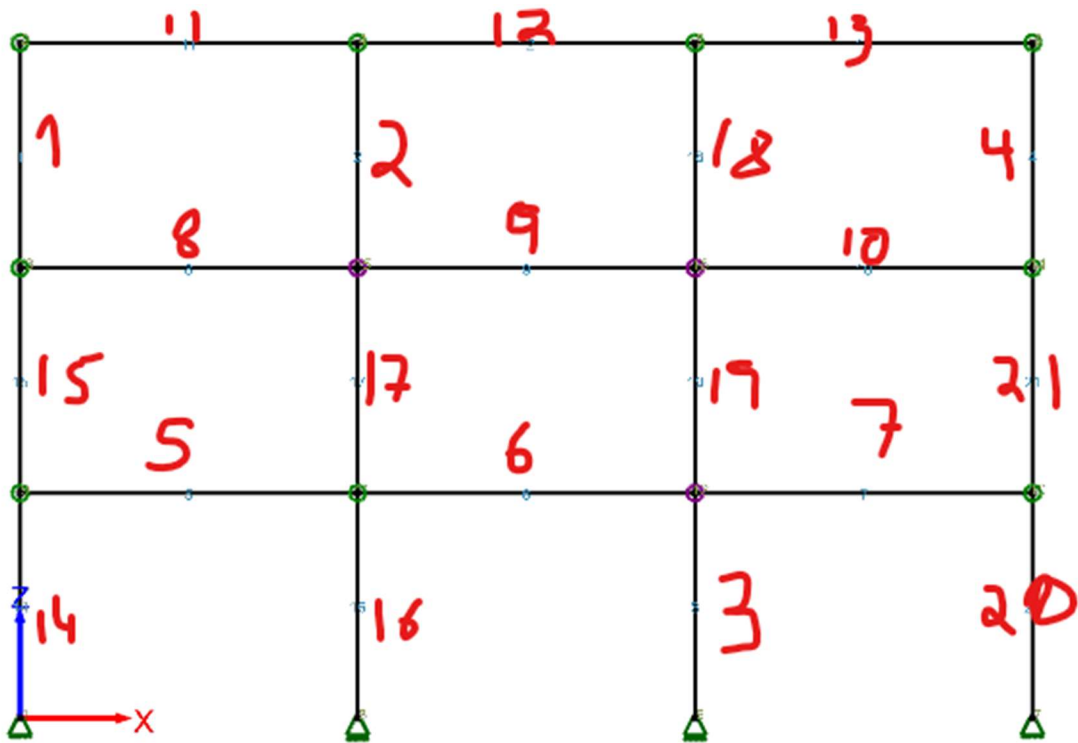
Figur 24 Kapasitetssjekk 10 min

Tabelldata

Tid/Maksverdi	Moment [kNm]	Skjær [kN]	Aksial [kN]	Utnyttelsesgrad
10 minutter	20,67 (6)	13,28 (7)	-61,99 (3)	0,84 (6)
20 minutter	20,67 (6)	13,27 (7)	-62,00 (3)	0,84 (6)
30 minutter	20,67 (6)	13,26 (7)	-62,01 (3)	0,84 (6)
45 minutter	20,67 (6)	13,25 (7)	-62,03 (3)	0,84 (6)
60 minutter	20,67 (6)	13,23 (7)	-62,05 (3)	0,84 (5)
90 minutter	20,67 (6)	13,20 (7)	-62,08 (3)	1,11 (5)

Tabell 5 Tabelldata branncelle 2

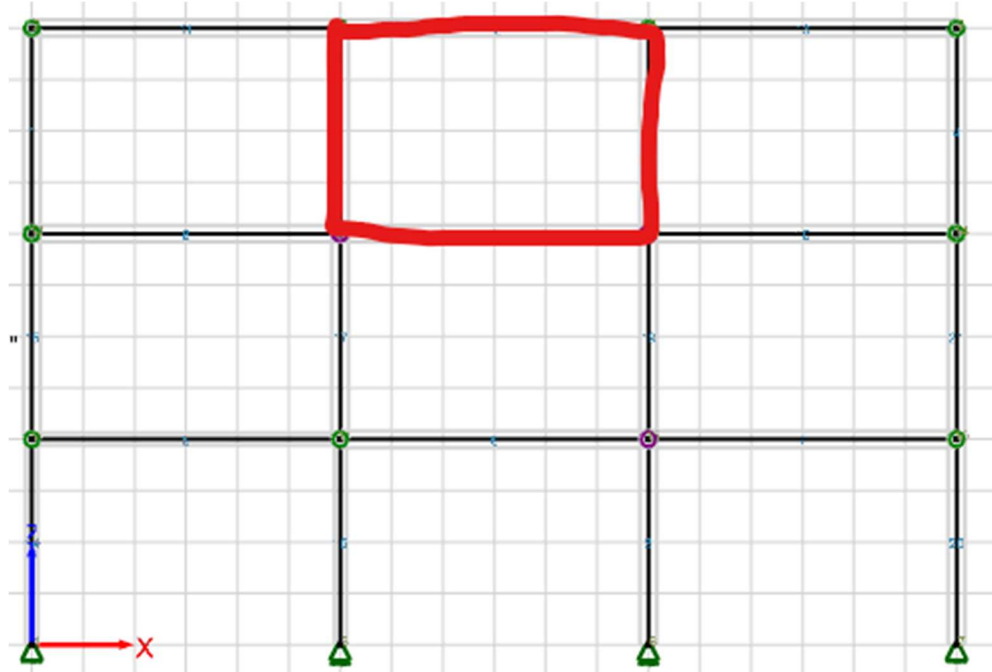
Tallet i parentes viser til hvilket segment verdiene er hentet fra, segmentoversikt i figuren under:



5.4.4 Brancelle 3

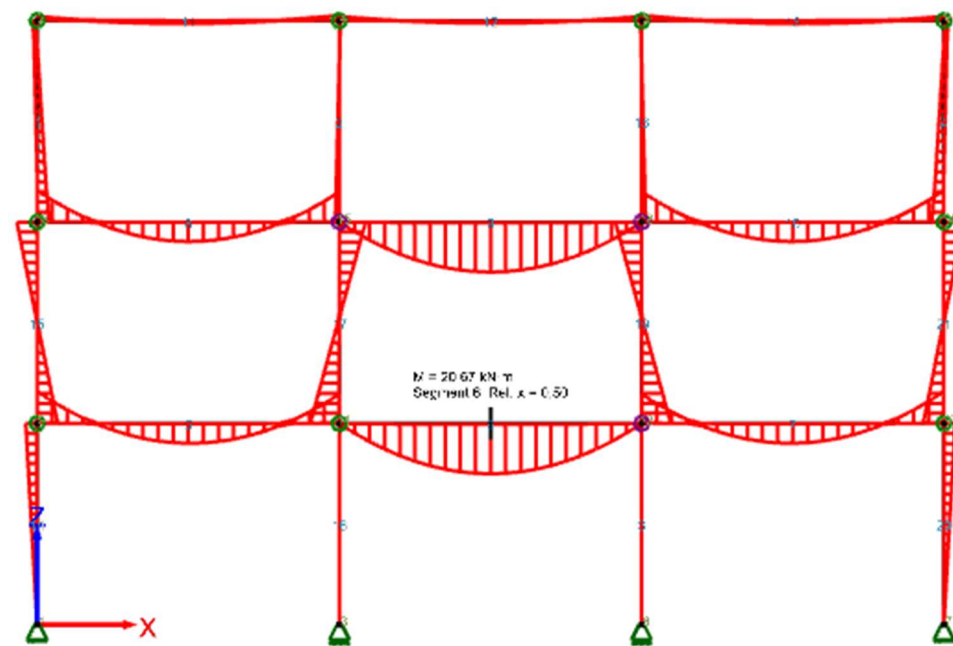
Plassering

Brancelle nummer 3 plasseres i øverste etasje i midten, se illustrasjonen under:



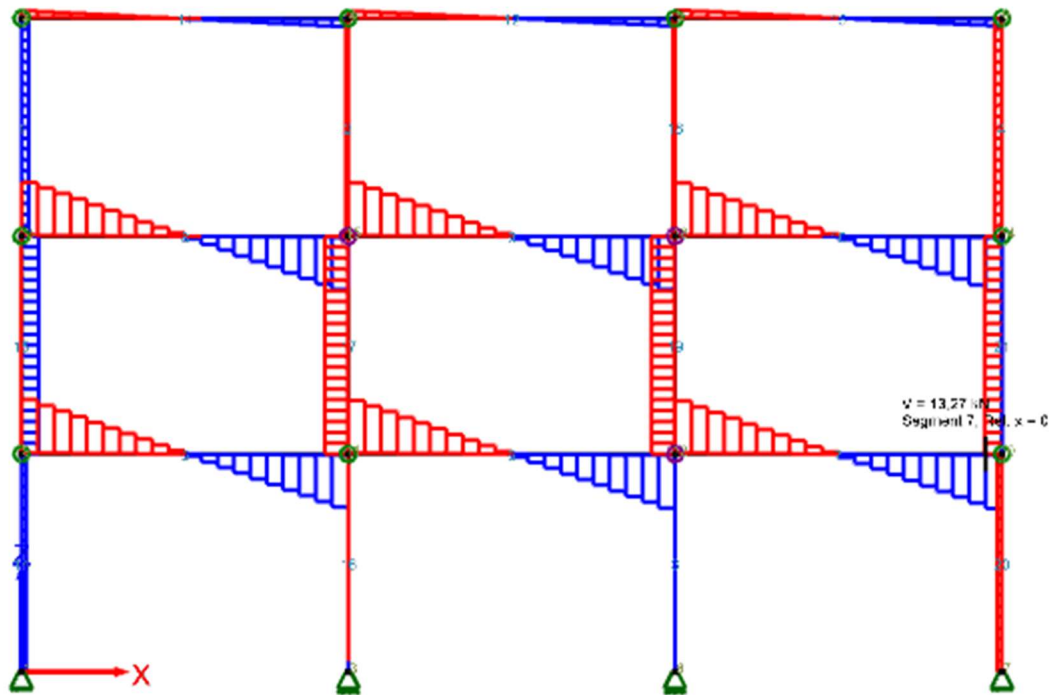
Figur 25 Brancelle 3

Momentkrefter



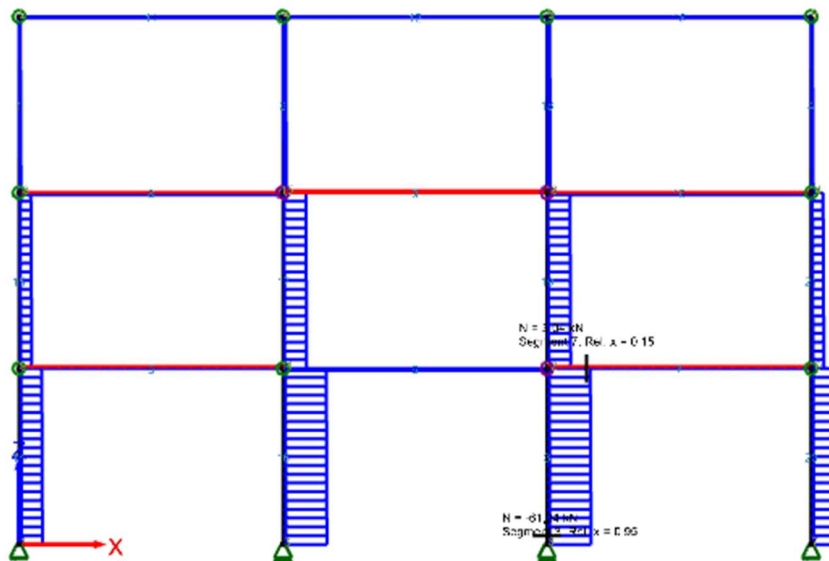
Figur 26 Momentkrefter 60 min

Skjærkrefter



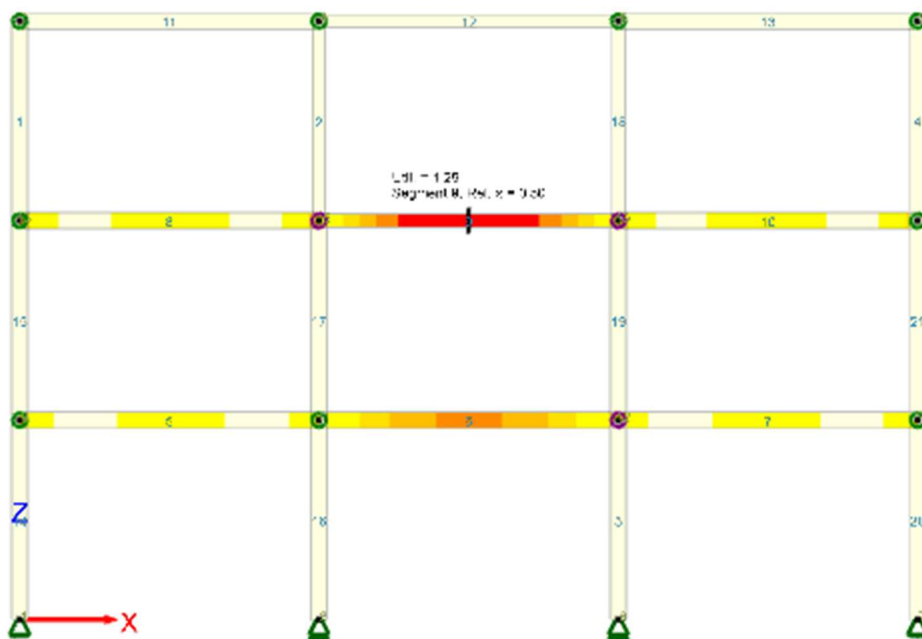
Figur 27 Skjærkrefter 60 min

Aksialkrefter



Figur 28 Aksialkrefter 60 min

Kapasitetssjekk



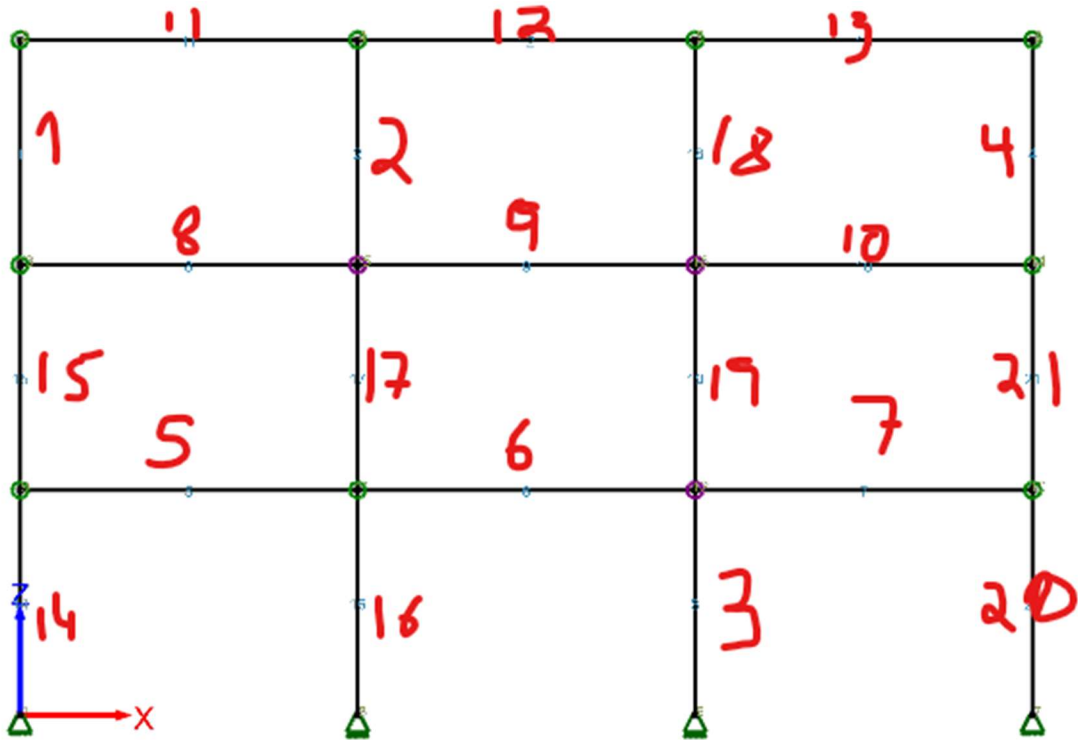
Figur 29 Kapasitetssjekk 60 min

Tabelldata

Tid/Maksverdi	Moment [kNm]	Skjær [kN]	Aksial [kN]	Utnyttelsesgrad
10 minutter	20,67 (6)	13,30 (5)	-61,80 (3)	0,88 (9)
20 minutter	20,67 (6)	13,30 (7)	-61,75 (3)	0,94 (9)
30 minutter	20,67 (6)	13,29 (7)	-61,69 (3)	1,01 (9)
45 minutter	20,67 (6)	13,29 (7)	-61,60 (3)	1,14 (9)
60 minutter	20,67 (6)	13,28 (7)	-61,52 (3)	1,29 (9)
90 minutter	20,67 (6)	13,28 (7)	-61,34 (3)	1,69 (9)

Tabell 6 Tabelldata branncelle 3

Tallet i parentes viser til hvilket segment verdiene er hentet fra, segmentoversikt i figuren under:



6 Diskusjon

6.1 Generelt

Dette kapitlet diskuterer resultatene og sammenlikner svarene opp mot hverandre og gir oversikt over feilkilder og videre arbeid.

6.2 Resultat

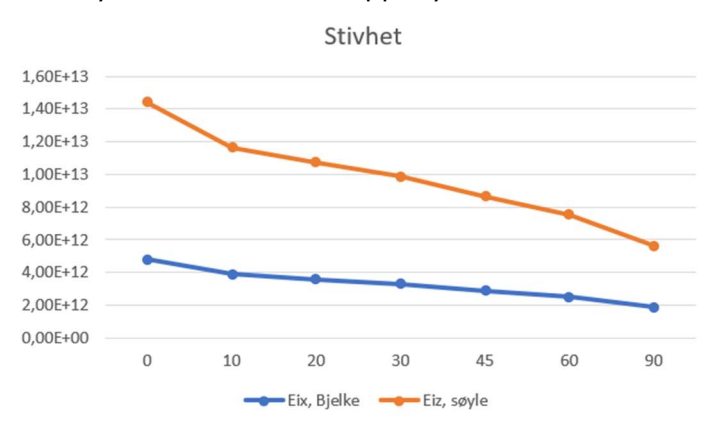
6.2.1 Forkulling og redusert tverrsnitt

Det ble brukt både eksisterende standard og den nye standarden som for øyeblikket kun er et uferdigdokument for internt bruk. Grunnen til at denne nye standarden brukes er fordi den inneholder mer info tilpasset massivtre, blant annet mer nøyaktig innbrenningshastighet. En rapport fra DiBK (Direktoratet for byggteknikk) viser at det er store sprik i innbrenningshastigheten (Daaland Wormdahl, Hox, Steen-Hansen, & Ulfesnes, 2017), og de brukte formlene ser ikke ut til å ha endret seg med unntak av nullstyrkelaget. Der nullstyrkelaget er det laget rett innenfor forkulling som er oppvarmet og derfor regnes med til å ikke ha noe bidrag til styrken. Med denne lille endringen ble det regnet ut redusert tverrsnitt som følge av forkulling. Det var relativt lav forkullingsdybde, dette kunne vært høyere hvis det hadde blitt regnet med forkulling ifra flere sider, hvis for eksempel bransellen hadde vært større så ville annenhver søyle være eksponert, yten veggskiver rundt seg, da vil det reduserte tverrsnittet nesten 4-ganges hvis søylen mister tverrsnitt ifra alle kanter. Det er også noe av grunnen til at man sjelden ser eksponerte tresøyler uten at de er brannimpregnerert eller ellers dekket med isolasjon.

6.2.2 Redusert stivhet

I takt med et mindre tverrsnitt vil også stivheten til elementene synke. Den vil ikke være lineær slik som tverrsnittsreduksjonen er på grunn av at 2. arealmomentet er avhengig av

resthøyden til elementet opphøyd i andre.



Figur 30 Endring i stivhet over tid

6.2.3 Kapasitetsjekk opp mot TEK17

Her er det kun gjort beregninger på bæreevne (R), da isolasjon og integritet er avhengig av oppbygningen til eventuelle branncellebegrensende konstruksjonen, hvor mange lag gips det eventuelt er og hvor tykk isolasjonen er. Det er ikke gjort noen vurderinger på dette i denne omgang. Det er derimot verdt å nevne at for at eksponert treverk skal oppfylle kravet til 60 for E og I, så vil nok brannimpregnering være nødvendig om treverket skal være eksponert.

Når det kommer til bæreevnen så var alle verdiene innenfor for 60 minutters motstand med god margin, det er grunnet lavt tverrsnittstap og tykke konstruksjonselementer til å begynne med. Søylene på 360 mm ganger to vil nok strengt tatt ikke være nødvendig for hele konstruksjonen, men det er prosjektert med det, så da vil konstruksjonsdeler som er mindre påkjent være litt overdimensjonert.

Grunnen til at kapasitetsjekken til Focus ikke er den samme som for håndberegninger er at Focus ikke har innebygd disse korreksjonsfaktorene for dimensjonerende laster (k, mod, fi), men bruker vanlige faktorer ifra hoveddelen til standarden.

6.2.4 Resultater ifra Focus konstruksjon

Oppbygningen av modellen vil diskuteres videre i feilkilder, da resultatene ser ut til å bli påvirket av at fjærstivheten ikke fungerer helt som den skal. Så det disse resultatene forteller oss som vi kan hente ut er at hvilken branncelle som brenner vil ha mye å si. Fordi konstruksjonen var satt opp med like dimensjoner over alle bjelker og søyler, så vil deler med mer påkjenning være nærmere full utnyttelse enn de delene som ikke er det. Det vil si at hvis en overdimensjonert branncelle blir utsatt for brann så vil konstruksjonen kunne bruke mye mer av restkapasitet til gjeldene branncelle uten at den avhenger av resten av konstruksjonen for å "reddes". Vi kan se dette på utnyttelsesgradene. Da lastene ser ut til å ikke fordele seg i noen grad ettersom deler av konstruksjonen svekkes.

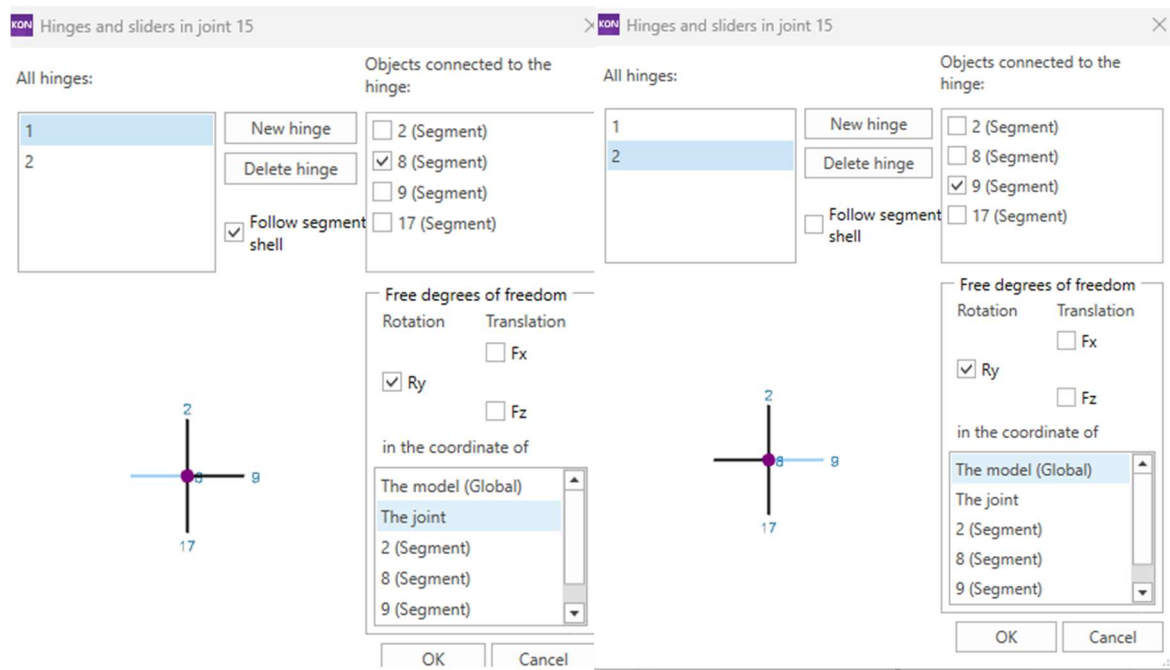
Som vi så i branncelle 1 så vil konstruksjonen nå sinn fulle utnyttelse rask fordi denne bjelken er den mest påkjente bjelken i utgangspunktet. I tilfelle av branncelle 2 så er den bjelken som blir utsatt for brann i mye mindre grad påvirket fordi den har tilstrekkelig med

restkapasitet i forhold til lastpåkjenningen. Det tok opp til 90 minutter før branncellen som var utsatt i branncelle 2 "tok igjen" utnyttelsesgraden til segment 6 som er det midterste bærebjelken. Så hvis konstruksjonen er i stand til å omfordere kreftene i mye større grad enn det disse resultatene viser, så vil kapasiteten bli bedre, hvis de allerede mest utsatte bjelkene kunne "låne" kapasitet ifra naboliggende konstruksjoner gjennom fjærstiveknutepunkt så vil den også holde lenger før det eventuelt hadde gått til kollaps.

6.3 Feilkilder

6.3.1 Focus konstruksjon

Konstruksjonen ble modellert i Focus som har to funksjoner for å legge til fjærstivhet. En som heter boundry condition og en som heter coupling. Det virket som om boundry condition ofte ikke hadde noen påvirkning, da analyseresultatene var de samme før og etter fjærstivheten ble lagt til. Det var derimot en endring da fjærstivheten ble lagt til på den andre måten. Men, denne metoden virket å begrense seg til å kun klase å sette opp denne fjærstivheten på den ene siden av søylen. Det ble etablert to ulike ledd i knutepunktet, se illustrasjon:



Figur 31 Knutepunkt leddforbindelse

Men når funksjonen for å legge til fjærstivheten brukes, kan kun det første knutepunktsleddet velges. I noen tilfeller kunne begge velges men det ga samme resultat,

at den ene bjelken fortsatt var uten moment i knutepunktet. Det ble forsøkt forskjellige varianter av leddoppbyggingen i et forsøk på å få et bedre resultat men resultatet ble enten dårligere eller det samme.

6.3.2 Håndberegninger

Å gå ifra en 3d modell til en 2d modell har ført til at det har blitt gjort noen antagelser om hvordan kreftene fordeler seg, det antas for eksempel at kreftene som står på dekket vil fordele seg jevnt over til bjelkene og kan ansees som en linjelast på bjelken. I realitet vil forbindelsene mellom dekke og bjelkene være viktig for å avgjøre hvordan kreftene fordeler seg. Det finnes løsninger der dekke ligger oppå bjelkene, det vil føre til en mer forutsigbar lastsituasjon, men hvis dekket er festet inn i bjelkene på samme nivå så vil det stille krav til at forbindelsene er i stand til å tåle påkjenningen om den så måtte øke.

Der forskning viser at det er store sprik i forkullingshastigheten til massivtre (Daaland Wormdahl, Hox, Steen-Hansen, & Ulfesnes, 2017) (Bøe, 2023), så er det vanskelig å si hvor riktig den valgte innbrenningshastigheten er. Hvis den er for lav kan det gi et ganske vesentlig utslag på beregningene.

Det at det brukes kantstilte massivtreelementer gir også stor styrke i lengderetning, men bjelkene vil være utsatt for krefter 90 grader på fiberretningen som kan føre til knekking.

6.4 Videre arbeid

Konstruere er modell som er i stand til å fordele kreftene som ønsket ville gjort mye for å lettere kunne si akkurat hvor mye og hvordan kraftfordelingen vil skje. Videre, ville det vært gunstig å etter hvert kunne gjøre 3d-modellering av enda større og kanskje mer komplekse bygg, for å enda bedre kunne simulere et realistisk bygg. I virkeligheten vil det være mer komplekse statiske systemer som også vil være bygget opp av dekker og skiver som kanskje ikke har en enkel geometri å regne på.

7 Konklusjon

7.1 Generelt

Dette kapittelet smaler opp innholdet og gir en konklusjon og oppsummering av oppgaven.

7.2 Konklusjoner

For at en konstruksjon skal være brannsikkert må det deles opp i fornuftige brannceller. Disse branncellene må så være i stand til å reagere på krefter i samråd med resten av konstruksjonen, slik at hele konstruksjonen sin styrke utnyttes. Alle forbindelser vil i teorien ha en form for stivhet, men vil være begrenset av størrelsen og utførelsen av forbindelsen. Det vil være nødvendig at branncellene tilstrekkelig innfrir kravene til TEK17 der for å hindre spredning. Hvis en brann ikke sprer seg, og konstruksjonen er i stand til å ta opp kreftene i fjærmoment og videre ned i konstruksjonen så vil det sørge for et både konstruksjon og brannsikkert byggverk.

Brannsikkerhet fortsetter å være et viktig tema, der personsikkerhet skal komme først, etterfulgt av konstruksjonssikkerhet, der konstruksjonssikkerhet inngår i personsikkerheten. Til tross for at massivtre virker å være et materiale som bevarer sin egen styrke godt under brann, så er overflaten en bidragsyter til at branner sprer seg, så hvis det er mulig bør antallet kvadratmeter eksponert overflate begrenses, eller det må brukes kompenserende tiltak som sprinklersystem og impregnering.

Hvis knutepunktene dimensjoneres og utføres med noe stivhet og branncelle-konstruksjoner er utført med tilstrekkelig kapasitet, så vil en eventuell lokal kollaps ikke være avgjørende for om bygget står. En annen viktig ting å tenke på er hvordan man prosjekterer, ikke bare for estetikk, men også tilrettelegging for slokkemanskap.

8 Referanser

- [2] CEN. (2002). *NS-EN 1990 Eurokode - Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Oslo: Standard Norge.
- [3] CEN. (2008). *NS-EN 1991-1-2: Eurokode 1 - Del 1-2: Allmenne laster - Lasten på konstruksjoner ved brann*. Oslo: Standard Norge.
- [4] CEN. (2010). *NS-EN 1995-1-1: Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Oslo: Standard Norge.
- [5] CEN. (2010). *NS-EN 1995-1-2: Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. Oslo: Standard Norge.
- [6] CEN/ TC250. (2019). *NS-EN 1991-1-1 Eurokode 1 - Lasten på konstruksjoner - Del 1-1: Allmenne laster - Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger*. Oslo: Standard Norge.
- Bøe, A. S. (2023). *Brannsikkerhet i massivtrebygg*. Trondheim : NTNU.
- Braastad, K. (2022). *Etasjeskillere i eksponert massivtre utsatt for brann*. Trondheim: NTNU.
- CEN/TC 250. (2005). *NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015*. Oslo: Standard Norge.
- Daaland Wormdahl, E., Hox, K., Steen-Hansen, A., & Ulfsnes, M. K. (2017). *Brannsikkerhet i bygg med massivtre*. Hentet fra Direktoratet for byggkvalitet: https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/spfr-a16-20229-brannsikkerhet-i-bygg-med-massivtre_spfr_2017.pdf
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017, 09 15). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Hentet fra Direktoratet for byggkvalitet: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17>
- Direktoratet for byggkvalitet. (2021, 10 01). *§ 11-12. Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider*. Hentet fra Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/11/iv/11-12>
- Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap. (u.d.). *Omkomne i brann*. Hentet fra dsb.no: <https://www.dsb.no/menyartikler/statistikk/omkomne-i-brann/>
- Focus Software. (u.d.). *Focus konstruksjon*. Hentet fra Focus.no: <https://www.focus.no/produkter/focus-konstruksjon-2d/>
- Fröbel, E. B. (2019, 05). *The CLT Handbook*. Hentet fra Swedish Wood: https://www.swedishwood.com/publications/list_of_swedish_woods_publications/the-clt-handbook/

- Hadler-Olsen, T. (2022, 04 02). *Brannteori*. Hentet fra ndla.no:
<https://ndla.no/en/subject:1:14fadc31-9799-4e46-ae3b-8294957e4d26/topic:1:b22abf65-8c64-4ab1-9687-62fec92b8e4c/resource:1:119422>
- Hegeir, A. O. (2023, 05 05). Rotational stiffness. (K. Braastad, Intervjuer)
- Liebe, G. (2023, 01 13). *Brannklassifisering*. Hentet fra snl.no:
<https://snl.no/brannklassifisering>
- Moelven. (2023). *Brannbeskyttet tre*. Hentet fra Moelven.no:
<https://www.moelven.com/no/produkter-og-tjenester/brannbeskyttet-tre/>
- Norsk Treteknisk institutt. (2006). *Teknisk håndbok*. Hentet fra Treteknisk:
<https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-4-Brann.pdf>
- Oppheim, B., & Heggheim, T. (2023). *Ukjent*. Trondheim: NTNU.
- Overland, J.-A. (2018, 10 26). *TONE - strategi for kildekritikk*. Hentet fra NDLA - Norwegian digital learning areana: <https://ndla.no/en/subject:d1fe9d0a-a54d-49db-a4c2-fd5463a7c9e7/topic:077a5e01-6bb8-4c0b-b1d4-94b683d91803/topic:9b2a0642-1d1f-4aee-a9f3-8fc2e315bcf3/topic:75d0c8ee-0a66-4f50-af56-ddcbd090e0bf/resource:1:169741>
- Seehusen, J. (2022). Brannen spredte seg raskere enn ventet – kunnskapen om brann i massivtre er mangelfull. *Teknisk Ukeblad*, 1.
- Sintef ved Hans Boye Skogstad. (2020). *SINTEF Teknisk Godkjenning - Norsk*. Trondheim: Sintef.
- Standard Norge. (u.d.). *Hva er en standard?* Hentet fra Standard.no:
<https://standard.no/standardisering/hva-er-en-standard/>
- Steen-Hansen, A. (2022, 9 6). Lecture 04 TBA4177 - Reaction to fire and Estimation of HRR. Trondheim, Trondheim, Norge.
- Trefokus. (u.d.). *Massivtre*. Hentet fra Trefokus:
<https://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/byggesystemer/massivtre>

