

# Vurdering av ulike beregningsmetoder for forkulling av krysslaminert massivtre ved branneksponering

Assessment of Different Calculation Methods for  
Charring of Cross Laminated Timber During Fire  
Exposure

**Trondheim Mai 2021**

Navn studenter:

Tommy Brattebø

Bendik Horn Hjørtland

Intern veileder:

Anne Elise Steen-Hansen

Ekstern veileder:

Kathinka Leikanger Friquin

Prosjektnr:

2021 -13

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Innovasjon og ny teknologi drevet av et større fokus mot miljøvennlige løsninger, har de siste 10-årene revolusjonert materialbruken og bruksområdene til tre. Hvor stål- og betongmaterialer tidligere dominerte, har nå tre-konstruksjons-produkter som massivtre og limtre i stor grad gjort det mulig å minimalisere bruken av disse, også i store kompliserte konstruksjoner. Med implementering av nye materialer, kommer også behovet for nye standardiserte løsninger for beregning og utførelse.

I vår oppgave ønsker vi å sette oss inn i prosessen med, og behovet for standardiserte brann-tekniske løsninger. Se på sammenhengen mellom den teoretiske og den praktiske tilnærmingen til opparbeidelsen av ny standard, samt sammenligne ulike beregningsmetoder for brannteknisk-dimensjonering av bærende massivtre-konstruksjoner.

Planlagte aktiviteter ut fra forprosjekt:

- En sammenligning av ulike beregningsmetoder innen branndimensjonering, med hovedfokus på forkulling, og tverrsnitts-reduksjon ved brann i krysslaminerte massivtrekonstruksjoner. Med tilhørende drøfting og analyse av resultater.
- Undersøke om det finnes kulturelle, ikke faglig begrunnede forskjeller i måten tre-materialer brukes på i Norge kontra andre land, og om dette eventuelt kommer fram i branndimensjonerings/beregnings-metodene som anvendes.
- Befaring på et eksisterende bygg, hvor massivtre er brukt som hovedbæresystem, og da gjerne også delvis eksponert. En befaring som dette er viktig for å få en forståelse for hvordan materialet brukes i praksis, og vil gi oss kunnskap om hvordan teoretiske krav tilfredsstilles i praksis. Et kapittel i rapporten fra denne befaringen vil da også inngå som en del av det innleverte arbeidet.
- En generell redegjøring om massivtre som byggemateriale, og brannteknikk som fagområde, da vi anser dette som en naturlig del av oppgaven.
- Ett kapittel dedikert til innovasjon, utvikling, forskning, og entreprenørskap. Her vil vi se på motivasjonen bak den senere utviklingen innen tre-konstruksjons-materialer, med hovedfokus på klima, miljø og FNs bærekraftmål.

## Forord

Bacheloroppgaven er avsluttende hovedoppgave for bachelorprogrammet, "bygg- og miljøteknikk" ved NTNU Trondheim. Oppgaven gjennomføres i 6. semester og oppgavens omfang er satt til 20 studiepoeng, dette tilsvarer 500 timer arbeid per deltaker. Oppgaven skal i hovedsak gjennomføres i gruppeformat på 2-3 personer. For denne oppgaven har forfatterne valg å holde gruppestørrelsen til 2 personer.

Forfatterne av denne oppgaven har fullført fem semester på bachelorprogrammet, og har valgt fordypning i husbyggingsteknikk. Bakgrunnen for valgt oppgavetema har vært en kombinasjon av fordypningsretning, og forfatternes egne faginterreser. Faget husbyggingsteknikk introdusert studentene for konstruksjonsmaterialet massivtre, samt at studentene fikk en innføring i grunnleggende branndimensjonering. Studentene ønsket en oppgave som kunne kombinere disse to, hvor man fikk belyst problemstillinger knyttet til bruk av brennbare materialer i bærekonstruksjoner, og da spesielt i høye brannklasser, hvor bærende bygningsdeler i utgangspunktet skal oppføres i ubrennbare materialer. Når studentene fikk vite via faglærer i husbyggingsteknikk om mulig bacheloroppgave innenfor fagområdet i regi av Sintef, var studentene tidlig ute med å ta kontakt. Forfatterne har begge håndverkerbakgrunn, og har vært med på å utføre brannsikrende tiltak i praksis, uten å vite så mye om teorien bak, og studentene ville derfor bruke bacheloroppgaven som en mulighet til få mer innsikt innenfor dette fagområdet.

I løpet av oppgaveprosessen har vi fått hjelp av noen aktører som vi vil rette en spesiell takk til:

- Anne Elise Steen-Hansen, intern veileder v/NTNU
- Kathinka Leikanger Friquin, ekstern veileder v/Sintef community
- Arve Lyng v/Sit bolig og utvikling

Trondheim, 20. mai 2021



Tommy Brattebø



Bendik Horn Hjartland

## **Abstract**

This thesis deals with an assessments of various standardised calculation methods for charring of unprotected cross laminated timber.

Cross laminated timber also called CLT, has in recent years increased its popularity in the construction industry as a result of material technology and climate policy. The challenges with wood based materials used in construction, are that the material is defined as combustible, which means that fire safety must be documented to a greater extent. European Standard NS-EN 1995 1-2: 2004 has so far not contained a sufficiently standardized method for calculating charring depth in CLT. The standard is now being revised, where separate methods will be implemented for calculating charring in various solid wood elements.

The main purpose of this report is to compare standardized calculation methods for charring in unprotected CLT, with charring depths from a fire test where unprotected CLT has been used. The calculations in the thesis are based on European, American and Canadian standards for fire dimensioning of wooden structures. The fire test used as a basis for comparison, is a fire test of a student dormitory from the project Moholt 50 | 50, located in Trondheim. The purpose of these comparisons is to see if the standardized calculation methods will provide a realistic value for the charring depth, compared to the charring depth that occurs under a real fire situation. The report contains a theoretical part that is the result of a literature study, that has been carried out in connection with the thesis. Fire dimensioning of wood materials is a subject area consisting of many variables that must be taken into account, a broad understanding of subject areas is a success factor in order to be able to make good assessments and conclusions.

The theory chapter of the report sheds light on relevant underlying knowledge in basic fire dynamics, fire standards, material knowledge, previous research, and CLT properties under fire load. Based on available theory and the calculations that have been carried out, it has been concluded that various standardized calculation methods for charring unprotected CLT, give different and uncertain results. In the vast majority of cases, calculations give lower charring depth compared to the charring depths given by the fire test of unprotected CLT. The thesis also points to improvements that can be made to achieve more realistic results when calculating.

## Tabell og figurliste

<i>Figur 1: Stigeledning i trapperom Moholt 50/50 .....</i>	<i>5</i>
<i>Figur 2: Grafisk illustrasjon av pyrolyse.....</i>	<i>12</i>
<i>Figur 3: Sprekker i KLT fra trapperom Moholt 50/50 .....</i>	<i>24</i>
<i>Figur 4: Illustrasjon av endimensjonal forkullingsdybde .....</i>	<i>24</i>
<i>Figur 5:Temperaturer i KLT ved forskjellige dybder Moholt .....</i>	<i>30</i>
<i>Figur 6: Forkullingsdybde i massivtre-veggelementer gjennom en 90 minutters branneksporing .....</i>	<i>31</i>
<i>Figur 7: Beregnet forkullingsdybde etter 20 minutter målt i mm.....</i>	<i>33</i>
<i>Figur 8: Beregnet forkullingsdybde etter 47 minutter målt i mm.....</i>	<i>33</i>
<i>Figur 9: Beregnet forkullingsdybde etter 82 minutter.....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 10:beregnet forkullingsdybde etter 24 minutter.....</i>	<i>34</i>
<i>Figur 11: Beregnet forkullingsdybde etter 84 minutter.....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 12:Sammenligning av lamelltykkelser etter 20 minutter. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figur 13: Sammenligning av lamelltykkelser etter 47 minutter. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figur 14: Sammenligning av lamelltykkelser etter 82 minutter. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figur 15: Sammenligning av standard brannkurve og brannkurve Moholt 50/50.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabell 1: Forskjellige faktorer for utregninger av parametrisk brannkurve. ....</i>	<i>21</i>
<i>Tabell 2: Forkullingshastigheter i forskjellig trematerialer. Tabell er gjengitt med tillatelse fra opphaver (25).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabell 3: Beregnet forkullingsdybder etter gitte tidspunkt .....</i>	<i>32</i>

## **Formelliste**

- (3.1) NS-EN 1991 1-2:2002 (A.1)
- (3.2) NS-EN 1991 1-2:2002 (A. 12)
- (3.3) NS-EN 1991 1-2:2002 (A. 11a)
- (3.4) NS-EN 1991 1-2:2002 (A. 11b)
- (3.5) NS-EN 1991 1-2:2002 (A. 11c)
- (3.6) NS-EN 1991 1-2:2002 (3.4)
- (3.7) NS-EN 1995 1-2:2004 (tabell 3.1)
- (3.8) NS-EN 1995 1-2:2004 (tabell 3.1)
- (3.9) NS-EN 1995 1-2:2004 (3.3)
- (3.10) NS-EN 1995 1-2:2004 (3.1)
- (3.11) NS-EN 1995 1-2:2004 (A.1)
- (3.12) NS-EN 1995 1-2:2004 (A.7)
- (3.13) NS-EN 1991 1-2:2002 (F.1)
- (3.14) NS-EN 1991 1-2:2002 (E.1)
- (3.15) NS-EN 1995 1-2:2020 (A.6)
- (3.16) NS-EN 1995 1-2:2020 (5.2)
- (3.17) NS-EN 1995 1-2:2020 (5.4.2.2(4))
- (3.18) NS-EN 1995 1-2:2020 (7.2.3(2))
- (3.19) NS-EN 1995 1-2:2020 (5.4.2.2(13))
- (3.20) NS-EN 1995 1-2:2020 (7.10)
- (3.21) NS-EN 1995 1-2:2020 (7.12)
- (3.22) NS-EN 1995 1-2:2020 (7.13)
- (3.23) NS-EN 1995 1-2:2020 (7.12)
- (3.24) CLT Handbook US Edition 2013 [1]

- (3.25) CLT Handbook US Edition 2013 [2]
- (3.26) CLT Handbook US Edition 2013 [6]
- (3.27) Canadian CLT handbook 2019 edition [1]
- (3.28) Canadian CLT handbook 2019 edition [2]
- (3.29) Canadian CLT handbook 2019 edition [1]

Formler, figurer og tabeller fra NS-EN 1991 og NS-EN 1995 er gjengitt av [Brattebø T, Hjørtland BH] til bruk i oppgaven [Vurdering av forskjellige beregningsmetoder for forkulling av krysslaminert massivtre] med tillatelse fra Standard Online AS mai 2021. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale.

Tall og figurer fra branntest Moholt 50|50 er gjengitt av [Brattebø T, Hjørtland B] til bruk i oppgaven [Vurdering av forskjellige beregningsmetoder for forkulling av krysslaminert massivtre] med tillatelse fra Anne Elise Steen-Hansen ved Rise fire research.

## Terminologi

- $\Theta_g$  = *Gasstemperaturen i branncellen målt i °C*
- $\Theta_{max}$  = *Høyeste oppnåelige gasstemperatur i branncelle målt i °C*
- $t^*$  = *Tiden målt i timer multiplisert med faktor for temiske egenskaper*
- $t^*_{max}$  = *Maks temepratur under et brannforløp med parametrisk brannkurve*
- $q_{t,d}$  = *dimensjonerende spesifikk brannenergi av flateareal*
- $O$  = *Åpningfaktor*
- $t_{lim}$  = *tid til høyeste temperatur ved brenselsregulert brann*
- $t$  = *Tid målt i minutter (i noen tilfeller målt timer)*
- $\beta_0$  = *Referasneverdi for forkullingshastighet*
- $\beta_n$  = *Nominell/teoretisk forkullingshastighet*
- $b_{min}$  = *Minimum tverrsnittsbredde*
- $d_{char,0}$  = *Forkullingsdybde basert på  $\beta_0$*
- $\beta_{par}$  = *Parametrisert forkullingshastighet*
- $t_0$  = *Tid med antatt konstant forkullingshastighet ved parametrisk beregning*
- $q_{f,d}$  = *Dimensjonerende spesifikk brannenergi av flateareal*
- $q_{f,k}$  = *Karakteristisk spesifikk brannenergi per flate gulvareal*
- $m$  = *Forbrenningsfaktor*
- $\delta_1$  = *Faktor for brannaktiveringsrisiko, leses av tabell E. 1  
etter branncellens areal*
- $\delta_2$  = *Faktor for brannaktiveringsrisiko, leses av tabell E. 1  
etter branncellens bruk*
- $\delta_n$  = *Faktor for aktive brannbekjempelsestiltak*
- $d_{char}$  = *Forkullingsdybde*
- $k_{gd}$  = *Faktor for fiberretning*



$k_g$  = Mellomsromsfaktor

$k_3$  = Pre – beskyttelsesfaktor

$d_{char,n}$  = Nominell forkullingsdybde

$\beta_{eff}$  = Effektiv forkullingshastighet

$a_{char}$  = Forkullingsdybde

$n_{lam}$  = Antall lameller som kan delaminere

$h_{lam}$  = Lamelltykkelse

$t_{gi}$  = Tid til forkulling til limlag

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Abstract.....	ii
Tabell og figurliste.....	iii
Formelliste .....	iv
Terminologi.....	vi
Innholdsfortegnelse.....	viii
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Formål .....	2
1.3 Omfang og avgrensninger .....	3
1.4 Problemstilling .....	3
1.5 Massivtre .....	4
1.5.1 Definisjon.....	4
1.5.2 Utvikling .....	4
1.5.3 Befaring av boligprosjekt i massivtre .....	5
1.6 Standardiseringsprosess .....	6
2 FNs bærekraftmål.....	7
2.1 Bakgrunn .....	7
2.2 Bærekraftmål.....	7
2.3 Parisavtalen .....	7
2.4 Bærekraftmål i bygg- og anleggsvirksomhet .....	8
2.4.1 Avfallshåndtering.....	8
2.4.2 Energieffektivitet .....	9
2.4.3 Livsløpsanalyse.....	9
2.5 Miljøresultat av trevirke i konstruksjoner .....	9
3 Teori.....	11
3.1 Brannteknikk .....	11
3.1.1 Brann i trevirke .....	11
3.1.2 Brannutvikling i bygninger .....	12
3.1.3 Branndimensjonering .....	13
3.1.4 Brannegenskaper i KLT .....	14
3.1.5 Delaminering.....	15
3.1.6 Branntest av Hybelenhet Moholt 50 50 .....	16
3.1.7 Temperatur-tidskurver .....	17
3.2 NS-EN 1995-1-2:2004 .....	20

3.2.1	Standard branneksponeering.....	20
3.2.2	Parametrisk brannkurve .....	20
3.3	NS-EN 1995-1-2:2020 .....	22
3.3.1	Grunnleggende verdi for forkullingshastighet:.....	23
3.3.2	Modifikasjonsfaktorer .....	23
3.3.3	Forkullingsfaser: .....	25
3.3.4	Utregning av forkullingshastighet i KLT.....	25
3.4	NDS:2015.....	26
3.5	CSA O86:2016 .....	28
4	Metode .....	29
4.1	Verdier fra branntest av Moholt 50 50 .....	30
5	Resultater .....	31
5.1	Beregnete forkullingsdybder sammenlignet med Moholt 50 50 målinger.....	31
5.1.1	Veggelement .....	31
5.1.2	Takelement.....	34
5.2	Sammenligning med utprøving av forskjellige lamelltykkelser .....	35
6	Diskusjon .....	37
6.1	NS-EN 1995-1-2:2004 .....	37
6.1.1	Standard branneksponeering.....	37
6.1.2	Parametrisk brannkurve .....	37
6.2	NS-EN 1995-1-2:2020 .....	38
6.2.1	Standard branneksponeering.....	38
6.2.2	Parametrisk brannkurve .....	39
6.3	National Design Specification.....	39
6.4	CSA 086: 2016.....	39
6.5	Sammenligning av forkulling ved bruk av ulike lamelltykkelser .....	40
6.6	Vurdering av temperatur-tidskurver.....	40
6.7	Vurdering av Metoden .....	41
7	Konklusjon.....	42
7.1	Oppsummering av funn og konklusjoner .....	43
7.2	Forlag til videre arbeid .....	43
8	Etterord .....	44
	Litteraturliste.....	45
	Vedlegg.....	48

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

I senere tid har bruken av massivtre som konstruksjonsmateriale økt betraktelig som et resultat av innovasjon og et større fokus på klimavennlige løsninger i bygg- og anleggsbransjen.

Materialitet skiller seg ut fra tradisjonelle bærende konstruksjonsmaterialer som stål og betong med sitt positive klimaregnskap, noe som gjør det svært aktuelt i dag og i tiden fremover.

NS-EN 1995-1-2 er nå under revisjon, og det er utformet et tredje utkast til ny revidert standard. Ny standard forventes å være ferdig revidert, vedtatt og gyldig fra år 2022 (12). Den skal da være bedre tilpasset beregninger knyttet opp mot massivtre enn nåværende standard, som er ansett som å være noe mangelfull. Massivtre som byggemateriale har hatt en rask utvikling, og man har sett behovet for å tilpasse beregningsmetodene opp mot denne utviklingen. Per dags dato er det ikke utformet preaksepterte løsninger/ytelser for byggverk oppført med bæresystem av massivtre, som er klassifisert til brannklasse 3. Noe som gjør at tiltak som faller inn under dette, må dokumentere de gjeldende funksjonskravene gitt av TEK17 ved bruk av testing og analyse. Nøyaktige og pålitelige beregningsmetoder for blant annet forkulling er en forutsetning for å kunne utføre slike analyser, det er derfor interessant å studere ulike beregningsmetoder og fremgangsmåter for å se på ulikheter i beregning, og undersøke hvilke metoder som i realiteten er best tilpasset de faktiske forhold.

## 1.2 Formål

Vi ønsker å rette fokus på massivtre, som vi anser som morgendagens foretrukne konstruksjonsmateriale. Massivtre har etter studentenes oppfattelse en ufortjent skepsis knyttet til seg med tanke på branntekniske egenskaper. Formålet med oppgaven er å belyse de faktiske problemstillingene knyttet til bruk av massivtre i bærende elementer, samt sette søkelys på usikkerheten som kan ligge i beregningsgrunnlaget av de branntekniske egenskapene til tre-baserte materialer. Oppgaven vil være spisset mot utregning av forkullingsdybde og -hastighet for ubeskyttet krysslaminert massivtre. Dette ved hjelp av nåværende NS-EN 1995-1-2, opp mot foreløpig revidert NS-EN 1995-1-2, samt amerikanske og canadiske beregningsmetoder, for videre å sammenlikne og vurdere resultater.

En viktig faktor for satsningen, utviklingen og innovasjonen vi nå ser innenfor tre-baserte materialer, er det positive klimaavtrykket materialet gir sammenlignet med andre byggematerialer. Derfor vil oppgaven også inneholde ett kapittel som omhandler utvikling og innovasjon, som tar for seg bakgrunnen til denne utviklingen, sett opp mot FNs bærekraftsmål og klima. Klima og miljø kan anses for å være viktige faktorer for at materialet har opplevd en økt popularitet i bygg- og anleggsbransje, og er faktorer som også fremover vil være med å påvirke bransjen i stor grad.

Ved å benytte nye materialer i bransjen er det også behov for kunnskap om disse materialene, for å bruke de på en mest hensiktsmessig måte. En kan anta at kunnskapsnivået på massivtre i Norge ikke er bra nok som situasjonen er i dag, da man ikke har en felles enighet om materialet. Det er publisert store mengder litteratur innenfor emnet og forskere har ulike syn, hypoteser og tilnærminger til de branntekniske egenskapene til massivtre. De fleste brannforsøk har konkludert med at massivtre har god motstandsevne mot gjennombrenning, men det påpekes likevel flere problemområder ved massivtre. Problemområdene baserer seg i stor grad på usikkerheten knyttet til limets delamineringsevne, bidrag av brannenergi fra massivtre, og kritiske områder som gjennomføringer og skjøter. Noen rapporter går så langt at de fraråder bruk av massivtre som hovedbæresystem i bygninger over to etasjer (31), mens andre viser at høyden på massivtre-konstruksjoner med korrekt prosjektering ikke vil bli begrenset av de branntekniske egenskapene, men heller av materialets stivhet, og faren for vibrasjoner på grunn av materialets relativt lave vekt, i kombinasjon med sterk vindlast (32). Forskningsrapporter kan ofte være finansiert og utformet av aktører som har en økonomisk interesse av hvilke funn som blir belyst, noe som er et relativt kjent fenomen. Det er derfor viktig med rapporter utformet av upartiske aktører, hvor eneste formål er å belyse faktisk opplysninger, og trekke

konklusjoner uten noen form for agenda, det er dette vi som studenter ønsker å oppnå i denne oppgaven.

### **1.3 Omfang og avgrensninger**

Oppgaven omhandler bruk av standardene NS-EN 1995-1-2, National Design Specification og CSA O86 for beregning av forkullingshastigheter i ubeskyttet krysslaminert massivtre.

Rapporten vil ta for seg utregninger beskrevet i ny revidert standard, og sammenligne resultater med dagens standard. I tillegg til dette vil utregningene settes opp mot et reelt branntilfelle, for å se om utregningene er realistiske. Oppgaven vil ikke fokusere på de mekaniske egenskapene i krysslaminert tre, da fokuset er forkulling av materialet. Beregningene vil heller ikke da hensyn til effektivt tverrsnitt, da vi ser bort fra treverk som får reduserte egenskaper før forkulling oppstår.

Tematikken og omfanget av oppgaven, har gjort at studentene parallelt med oppgaveskrivingen har gjennomført emnet "TBA4175 Brannteknikk", dette for å oppnå tilstrekkelig kompetanse innenfor fagområdet, noe studenten anså som nødvendig for å kunne gjennomføre oppgaven på en tilfredsstillende måte. For å skape større innsikt i massivtre som konstruksjonsmateriale, ble det også gjennomført en befaring av Moholt 50|50, som er et boligprosjekt hvor bærekonstruksjon og store deler av konstruksjonen er oppført i eksponert massivtre. I sammenheng med prosjekteringen av dette prosjektet ble det gjennomført en fullskala branntest, med tilhørende rapport, som studentene har brukt som referanse for forventet forkullingsdybde under beregning.

### **1.4 Problemstilling**

*"Er standardiserte beregningsmetoder for forkulling og forkullingshastighet realistiske sammenlignet med reelle verdier fra en fysisk brannmotstandstest i konstruksjoner oppført i ubeskyttet krysslaminert massivtre?"*

## **1.5 Massivtre**

### **1.5.1 Definisjon**

Massivtre er en fellesnevner for pre-fabrikkproduserte bygningselementer bestående av tre som er limt, eller på annen måte festet sammen i flere lag. Det finnes flere måter å lime sammen elementene, men den vanligste måten er å lime de sammen til elementtypen KLT (krysslaminert trevirke) hvor hver lamell står 90 grader mot hverandre. Trematerialene som blir mest vanlig i produksjonen av massivtre-elementer er gran og furu, selv om andre typer også kan benyttes. Elementene må ha et minimum antall på 3 lameller for å oppnå ønsket funksjonalitet i elementet, hvor vært sjikt kan variere fra 12mm til 51mm (16). Elementene produseres i oddetalls lag bestående av 3 til 7 lag, med elementtykkelser fra 60mm til 240mm. fordelene med å legge lagene i kryss er at stivheten til materialet fungerer i flere retninger slik at det er sterkere mot nedbøyninger og utbøyinger (16). Krav og spesifikasjoner til krysslimt massivtre er beskrevet i NS-EN 16351:2021, hvor også lim-egenskaper opp mot delaminering er beskrevet i annex A.

Elementene kan brukes som vegg, etasjeskiller og tak. Fordelene med massivtre ovenfor tradisjonelt bindingsverk er at det har mye større styrke, slik at det kan brukes til bærekonstruksjon i høye bygninger på lik linje med betong og stål. I tillegg til høy styrke har elementene generelt lavere vekt enn betong som kan være en fordel, men også en ulempe. Lavere vekt kan brukes som en fordel om det ønskes et lavere marktrykk på byggetomten. Ulempen med lavere vekt er at i bygninger over en viss høyde krever et høyt marktrykk for å holde sin stabilitet. Massivtreelement kan bestilles etter ønskede størrelser fra fabrikk slik at de ankommer byggeplassen som et byggesett, som kan være med på å kutte ned byggetiden ved god prosjektering. Ved at elementene består hovedsakelig av tremateriale, er det relativt lette å tilpasse på byggeplass med kapping og hulltaking for gjennomføringer.

### **1.5.2 Utvikling**

Massivtre teknologien har sin opprinnelse fra brobygging på 70-tallet Canada. Elementene ble brukt som brodekker hvor plankene ble satt på høykant etter hverandre og avspent av spennarmering. Konseptet ble overført til husbygging i Europa på 90-tallet som resultat av et utviklingsprosjekt ved en høyskole i Sveits (13).

Fra Sveits har bruken av massivtre spredd seg videre utover i Europa. I Norge ble det første høyhus i massivtre oppsatt på Lademoen i Trondheim. Bygget ble oppført i 2005 med 5 tellende etasjer, og kan anses som massivtrematerialets fødsel i Norge. Høyhuset har vunnet

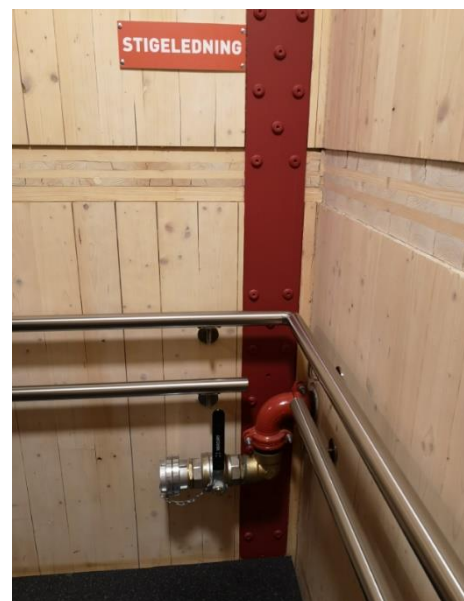
arkitektprisen *Norsk forms pris* for nyskapende arkitektur som har gitt bygget lokal og internasjonal oppmerksomhet (14). Etter høyhuset på Lademoen ble oppsatt har bruken av massivtre blomstret med flere store prosjekter som blant annet Moholt 50|50, Valle Wood, Mjøstårnet og Maskinparken Tre. Mjøstårnet i Brumunddal er i dag verdens høyeste trekonstruksjon på 85,4 meter (15) som gjør det til en grensebryter for materialet.

I løpet av 50 år har massivtre gått fra å være et lite utbredt konstruksjonsmateriale innenfor enkel brobygging, til å være et utbredt konkurransedyktig materiale som utfordrer tradisjonelle byggematerialer som betong og stål. I dag brukes massivtre som konstruksjonsmateriale i de fleste typer byggverk, fra eneboliger, næringsbygg, og høyhus, til svalganger og balkonger.

### 1.5.3 Befaring av boligprosjekt i massivtre

8. april 2021 ble det foretatt en befaring av boligprosjektet Moholt 50|50. Bakgrunnen for dette var å skape mer innsikt i bygg av massivtre, se om det var noen synlige branniltak på stedet og observere hvordan materialet er brukt praksis. Befaringen ble holdt av Arve Lyng som er ansvarlig for Sit boligprosjekt og utvikling. Før befaring ble vi informert at det ikke ville være mulig å se inne i boenhetene grunnet Covid-restriksjonene som var gjeldene for perioden befaring fant sted, men det ville være mulig å få se på utenomhusområder og trapperom.

Det første område som ble sett på var utenomhusområdene og fasader. Fasaden er kledd med stående trepanel fra første etasje til tak, dette har i senere tid vist seg å skape noen problemer for vedlikehold av bygningen. Ifølge befarringsleder har Trondheim de siste årene hatt problemer med antennele av søppelbeholdere slik at det ble ansett som en risikofaktor å ha brennbar kledning i første etasje på høyhus. Første løsning på dette var å påføre brannhemmende impregnering, problemet med dette var at impregneringen flasket av over tid slik at det ville skape store vedlikeholdsutgifter. Endelig løsning på problemet ble varmevarslere punktvis langs første etasje av fasaden. Videre fikk vi se på trapperommet i en av blokkene hvor både trapp og heissjakt består av KLT-materiale. Det umiddelbare inntrykket av konstruksjonen var lunt inn klima og en mer livlig konstruksjon enn ved bruk av stål og



Figur 1: Stigeledning i trapperom Moholt 50|50



betong. Samtidig ble studentene litt overasket over hvor røfte og grove overflatene av KLT var. Det forutinntatte inntrykket av materialet var et utseende tilsvarende stående panel av tre. Her var tilslutningspunktene godt synlig slik at endestykker av for eksempel etasjeskiller kan ses i overflatene. Det var her studenten begynte å få mer forståelse for mellomromfaktoren som må medregnes for forkullingshastighet ved sprekker i materialet. De synlige branntiltak i trapperom var brannvarslere i alle etasjer samt sprinkler og stigeledning for brannmannskap i vær mellometasje.

## **1.6 Standardiseringsprosess**

Standard Norge, som Norges representant i den europeiske standardiseringsorganisasjonen (CEN), og den internasjonale standardorganisasjonen (ISO), har som oppgave å sikre norske interesser, og norsk deltagelse under opparbeidelsen av nye internasjonale standarder. Ved nye behov, eller ved mangler vedrørende eksisterende standarder, kan en eller flere medlemmer av ISO starte et nytt standardiseringsprosjekt. Når forslaget er utarbeidet, sendes dette ut for godkjenning til alle medlemslands standardiserings-organ. Først ved godkjenning av forslag, kan arbeidet med utformingen av standarden iverksettes. En ekspertgruppe blir tildelt ansvaret med utarbeidelsen av standarden, og det ferdige produktet sendes videre til en internasjonal komite, som så utfører en ekstern kontroll av arbeidet. Først nå i prosessen kan de enkelte land komme med innvendinger vedrørende innholdet av standarden, dette gjøres ved at forslaget blir lagt ut på nasjonal høring, hvor alle kan komme med innvendinger og synspunkter. Når høringsfristen er ute blir alle innvendinger vurdert, og et nytt revidert forslag til standard bli så sendt ut til alle medlemsland for votering, hvert medlemsland har en stemme, og for at standarden skal bli vedtatt, må det være flertall. Innenfor europeisk standardisering er det et krav om at standarder som blir vedtatt, også utgis som nasjonal standard. Den felles standardiseringen innad i Europa har som mål å forenkle samarbeid på tvers av landegrensler, det er likevel gitt rom for nasjonale særregler i standardiseringsprosessen, som skal ta høyde for klimatiske, geografiske, og kulturelle forhold innad i vært enkelt land. Disse særreglene er beskrevet i nasjonale tillegg (NA) under vær enkelt standard.

## 2 FNs bærekraftmål

Bacheloroppgaven har i tillegg til hovedoppgaven et mål om å dedikere et kapittel til innovasjon, utvikling, forskning eller entreprenørskap. I dette kapittelet skal vi se nærmere på sammenhengen mellom økt bruk av massivtre i konstruksjoner og FNs bærekraftmål.

### 2.1 Bakgrunn

I 1983 samlet FNs generalsekretær en gruppe politikere fra hele verden for å utarbeide mål for miljø og utvikling på et globalt nivå. Denne gruppen ble kjent som World Commission on Environment and Development, i Norge kjent som Brundtland-kommisjonen oppkalt etter gruppes leder Gro Harlem Brundtland. Resultatet av gruppearbeidet ble rapporten *Vår Felles Framtid* som ble framstilt for offentligheten i 1987. Rapporten oppfordrer verdensland til å sette miljø og klima som primær-interesse ovenfor sekundærinteresse, og det er her bærekraftbegrepet blir introdusert for første gang. I rapporten blir bærekraft beskrevet som «Utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge muligheten for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov» (2). Rapporten har som formål å informere og belyse verden om fattigdom og klimaproblematikken som er i utvikling, og anbefalinger til løsninger på disse problemene. *Vår felles framtid* kan i ettertid ses på som fundamentet for å starte et globalt samarbeid for en mer klimavennlig og bærekraftig verden.

### 2.2 Bærekraftmål

Siden rapporten *Vår felles framtid* ble publisert har FN jobbet kontinuerlig med Bærekraftmål. I årsskiftet mot 2016 ble det framlagt FNs bærekraftmål som er en samarbeidsavtale mellom FNs medlemsland. Avtalen inneholder 17 hovedmål med 169 delmål for hvordan det skal jobbes globalt mot en bærekraftig verden fram mot 2030. Landene som inngår i avtalen forplikter seg til å utarbeide handlingsplaner for hvordan bærekraftmålene skal oppnås. Selv om Norge allerede har nådd mange av målene til avtalen kan det ses at det er mye å gjøre innenfor matsvinn, klimagassutslipp og energibehov. Om hele verden skulle ha like stort forbruk som Norge per innbygger ville det vært behov for 3,6 jordkloder (1), med et slik forbruk må Norge finne måter å kutte forbruk og benytte mer energieffektive løsninger.

### 2.3 Parisavtalen

Parisavtalen som ble vedtatt i 2015, og som ble ratifisert av Norge i 2016 er en internasjonal klimaavtale i regi av FN, som majoriteten av verdens land har signert. Avtalen har som hovedmål å forhindre at temperaturøkningen på verdensbasis overstiger to grader i løpet av dette århundret. Alle land er forpliktet til å utarbeide en bindende nasjonal plan, som skal inneholde konkrete mål, med konkrete tidsfrister som skal oppfylles, som fornyes vert femte år

(27). I 2020 forpliktet Norge seg, som det første vestlige landet til et forsterket mål, dette målet innebærer at vi i 2030 skal ha minst 50% mindre klimagassutslipp sammenlignet med 1990-nivå (28).

Problemet med disse ambisiøse målene er at de fleste tiltakene man har iverksatt er langsiktige, og derfor ikke kan vise til et positivt klimaregnskap før etter en gitt tid. Klimaeffektive bygg, elektrifisering av bilpark og infrastruktur, utbygging av fornybar energi, er alle tiltak som krever ekstremt mye energi i utbyggingsfasen, hvor man ikke kan vise til positive klimatall før mange år med bruk. En løsning som på kort sikt vil slå godt ut på klimaregnestykket er derimot karbonfangst og -lagring, og den mest effektive måten vi i dag klarer å lagre karbon, er naturens egen fotosyntese. Planter og trær omdanner CO<sub>2</sub> til karbohydrater som lagres i fast form, frem til treet råtner og igjen slipper ut like mye karbon som det opprinnelig fanget. Når vi bruker trebaserte byggematerialer, forlenger vi karbon-lagringstiden til treverket, samtidig som vi frigjør plass til ny skog som kan binde mer CO<sub>2</sub>. Man kan derfor konkludere med at en økt bruk av massivtrekonstruksjoner, som ikke bare minimerer bruken av klimafiendtlige materialer som stål og betong, men som også er kapable til å lagre store mengder karbon, vil spille en viktig rolle i å nå de nåværende, og fremtidige klimamålene.

## **2.4 Bærekraftsmål i bygg- og anleggsvirksomhet**

Bygg- og anleggsbransjen sammen med eiendom står i dag for 40% av all energibruk, materialforbruk og avfallsproduksjon (4). Det vil derfor være nødvendig å fatte tiltak innenfor denne bransjen for å kunne nå verdens klimamål. Bransjen i Norge har de siste 10-årene gjort en rekke tiltak for å minske CO<sub>2</sub> avtrykket den avsetter, ved å innføre strengere krav til resirkulering, energieffektivitet og livsløpsanalyser.

### **2.4.1 Avfallshåndtering**

I TEK17 kapitel 9 stilles det en rekke minimumskrav til en byggeprosess som at enhver byggeplass skal ha tilstrekkelige kildesortering hvor minimum 60% av avfallsvekten skal være kildesortert for prosjekter av et visst omfang fra §9-6 (5). I tillegg til krav i TEK17 har det kommet en rekke miljøsertifiseringer for anlegg som blant annet Breeam, Ceequal og Svanemerke. Med økende fokus på klima og miljø har det blitt større press fra byggherrer om å nå disse sertifiseringene på grunn av statusen de gir.

## 2.4.2 Energieffektivitet

Innenfor energieffektivitet kan det ses at kravene i teknisk forskrift for u-verdier har blitt strengere. Dette fører til at bygningene som blir oppført i dag, ikke trenger like stort behov for oppvarmingsenergi. Det stilles også krav til energimerking av boliger over 50 kvadratmeter som skal selges, eller leies ut. Dette for å gi forbruker og/eller kjøper informasjon om hvor energieffektiv boligen er (5). Energiskalaen går fra G til A, med farge rødt til grønn hvor bokstavene sier hvor mye energi boligen trenger til oppvarming, og fargen forteller hvilke energikilder som brukes til oppvarming.

## 2.4.3 Livsløpsanalyse

for å kunne evaluere hvilke materialer og løsninger det vil være mest hensiktsmessig å bruke i en byggeprosess på bakgrunn av klimaavtrykk, må det gjennomføres en livsløpsanalyse for byggets livsløp. En slik analyse kan bygges opp ved å sette sammen alle produkter og prosesser som er involvert i livet til et bygg. En livsløpsanalyse av et byggeprosjekt skal inneholde et klimaregnskap på materialer, transport, byggefase, driftsfase og rivningsfase. TEK17 har foreløpig ikke noen formelle krav til en fullstendig livsløpsanalyse, men arbeider mot å skape standardiserte krav i nye forskrifter (7). Med strengere krav til energieffektive boliger i samsvar med bruk av grønne energikilder, som varmepumper og solcellepaneler, ser vi at det i dag er mulig å konstruere bygninger med positivt energiregnskap som produserer mer energi enn de bruker gjennom sitt livsløp.

## 2.5 Miljøresultat av trevirke i konstruksjoner

Bruken av trevirke som byggemateriale er godt utbredd i Norge med lange tradisjoner, men for resten av verden er ikke bruken av tre like normalt. Det store argumentet for å ikke bruke trevirke i høye bygg eller urbane området kommer av materialets fundamentale brannmotstand. Trevirke stiller seg generelt dårligere mot en brannsituasjon enn materialer som for eksempel betong og stål om det ikke blir brukt på riktig måte. En av de store fordelene med å bruke trevirke i konstruksjoner er at det er et mer klimavennlig materiale.

Grunnen til at tre er det mer miljøvennlig alternativ enn betong og stål kommer frem i materialelets egenskaper, hvordan materialet blir framstilt og at materialitet er fornybart. I betong og stålproduksjon kreves det store deler med varme for å fremstille produktet som fører til store CO<sub>2</sub> utslipp. I produksjon trevirke er det tørkeprosessen av materialet som er mest energikrevende, men den har som hovedregel å utføres ved hjelp av miljøvennlig bioenergi (4).

Ved produksjon av trevirke kan det oppnås en reversering av CO<sub>2</sub> avtrykk ved å bruke fotosyntesen og utnytte hele materialitet. Det vil derfor være hensiktsmessig å drive med systematisk forvaltning skog for å øke effektiviteten til skogens evne til å ta opp CO<sub>2</sub>. I Norge er årlig tilvekst av skog 22 millioner m<sup>3</sup> og årlig hogst ca 7,7 millioner m<sup>3</sup> slik at det ikke er noe problem med høyere avskoging. Når trevirke brukes som byggemateriale vil karbon som tidligere har blitt opptatt i trevirket bli lagret i bygget. Ved å bruke 1m<sup>3</sup> tre som byggemateriale binder man opp 0,8 tonn CO<sub>2</sub> i bygget slik at om et trehus består av 20m<sup>3</sup> trevirke vil det kunne binde på 16 tonn med CO<sub>2</sub> (6).

For å lage mer klimavennlige bygginger er et viktig grep å gjøre de energieffektive ved å redusere behovet for oppvarmingsenergi. Når vi ser på trevirke og betong har trevirke en betydelig lavere varmekonduktivitet verdi. Varmekonduktivitet hos trevirke ligger på 0,13 og betong ligger på 2,5 (8). Det vil si at trevirke isolerer nesten 20 ganger bedre enn betong slik at det kreves mindre isolasjon for å nå kravene til u-verdi.

## 3 Teori

I teorikapittelet vil vi introdusere ulike anerkjente standardiserte beregningsmetoder for forkulling av ubeskyttet krysslaminert massivtre, som vi vurderer som relevante for sammenligning. Vi vil forklare ulike relevante faktorer som berører brann i massivtrekonstruksjoner, og hva beregningene er basert på.

### 3.1 Brannteknikk

#### 3.1.1 Brann i trevirke

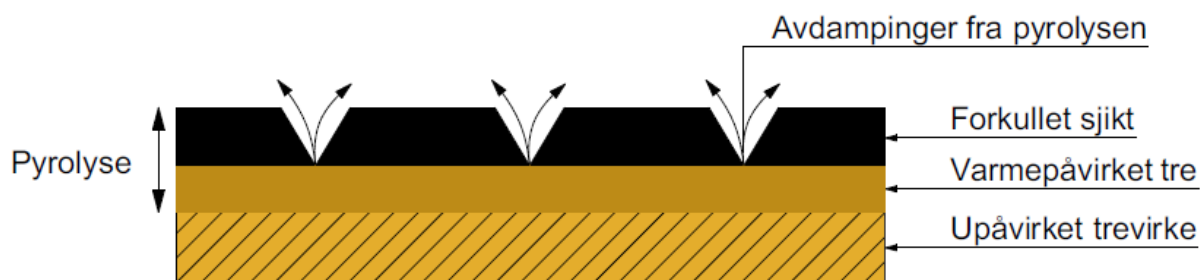
Brann er en kjemisk reaksjon hvor oksygen reagerer med et brannbart materiale og avgir energi i form av varme. For at en brann skal oppstå og vedvare er den avhengig av tilstrekkelig tilgang på oksygen, brensel, og tilstrekkelig tilført energi avhengig av brenselets tennpunkt. For å kunne betegne et materiale som brennbart må det kunne antenne og brenne i ordinær luft.

Tre er et heterogent brennbart materiale som starter sin termiske nedbrytning allerede ved 110-230°C. Før termisk nedbrytning inntreffer må vann fordampes ut av treet, denne prosessen starte ved omtrent 100°C. Tre består av en kompleks sammensetning av cellulose (50%), hemicellulose (25%) og lignin (25%), disse brytes ned ved forskjellige temperaturer (9).

Termisk nedbrytning at forskjellige bindinger:

- Hemicellulose 200-260°C
- Cellulose 240-360°C
- Lignin 280-500°C

Ved termisk nedbrytning av tre skilles brennbare gasser ut av treverket. Misfarging og forkulling av tre starter normalt ved temperaturer over 200-250°C. Denne prosessen kalles pyrolyse som sier at forbindelsene i materialet begynner å brytes opp. Når temperaturen stiger over 300°C vil den fysiske strukturen brytes ned drastisk og forkullingsfasen starter for fullt. At den kritiske forbrenningstemperaturen til tre ligger på 300°C kan ses i sammenheng med nedbrytningstemperaturen til cellulose som utgjør 50% av forbindelsene i tre. Ved temperaturer over 300°C kan selvantennning oppstå, og forkullingsprosessen danner sprekker som trenger seg ned i materialet. Forkulling av treoverflaten virker brannisolerende under brannforløpet, men avdampingen av brennbare gasser fra sprekker gjør at forkullingsprosessen kan fortsette. Uten en ekstern varmekilde vil temperaturen synke, noe som kan gjøre at sprekke ned til friskt tre vil forkulles og brannen kan selvslokke.



Figur 2: Grafisk Illustrasjon av pyrolyse (9)

Selv om det er mulig å forutse den termiske nedbrytningen av trevirke er det en rekke variabler som kan påvirke brannforløpet, og som gjør det vanskelig å forutse brannforløpet med sikkerhet. Variabler som kan påvirke brannforløpet:

- fuktighet i materialet
- densitet
- ekstern varmekilde
- tilgang på oksygen

### 3.1.2 Brannutvikling i bygninger

Når det er snakk om brannforløp i bygninger menes det hele brannens livsløp. En brann kan etter antennelse, deles opp 4 hovedfaser (29).

- Utviklingsfase
- Overtening
- Fullt utviklet brann
- Avkjølingsfasen

Utviklingsfasen også kalt antennelsesfase, er tiden det tar for flammene å spre seg ut i hele rommet. Fasen kan vare fra noen få minutter til flere timer, avhengig av tilgjengeligheten av brennbart materiale, temperaturutvikling, og tilgang på oksygen. Når flammene har fått godt nok feste i rommet og branngassene når en temperatur på 500-600°C oppstår overtening. Kjennetegn ved denne fasen er at hele rommet står i brann og flammer står ut fra rommets åpninger. Videre går brannen inn i fasen for fullt utviklet brann, hvor temperaturen vanligvis ligger litt i underkant av 1000°C (10). Brannen vil da fortsette så lenge den har tilgang på oksygen og brennbart materiale. Etter hvert som temperaturen avtar går brannen inn i avkjølingsfasen. I denne fasen avtar flammene og går over til gløding, selv om flammene ikke

er til stede kan det oppstå en re-antennning, dette på grunn av avgassing fra materialer, eller tilførsel av oksygen. Det er derfor viktig at avkjølingsfasen overvåkes nøye slik at brannen ikke re-antenner.

I massivtrekonstruksjoner anses brannfaren betraktelig mindre enn ved bruk av tradisjonelt bindingsverk. Massivtrekonstruksjoner er mye tettere slik at tilførsel av oksygen gjennom luftlommer ikke oppstår på samme måte som ved tradisjonelt bindingsverk, hvor det er hulrom med isolasjon mellom stenderverket (11).

### **3.1.3 Branndimensjonering**

Overordnet er det lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven) § 29-5 som stiller krav til at byggverk skal prosjekteres og utføres på en slik måte at brannsikkerhet blir tilstrekkelig ivaretatt (26). Videre er minimumskrav til brannsikkerhet beskrevet i byggteknisk forskrift (TEK17) kapittel 11. TEK17 er utarbeidet av direktoratet for byggekvalitet og baserer seg på funksjonskrav som skal oppfylles, dette for skape handlingsrom for å velge de løsningene som er best tilpasset det aktuelle prosjektet, samt at funksjonsbaserte krav stimulerer utvikling og innovasjon. Funksjonskrav som gjelder brannsikkerhet gitt av TEK17 er i stor grad også beskrevet som ytelseskrav, og veiledningen til forskriften beskriver også preaksepterte løsninger/ytelser. Norsk standard beskriver hvordan ytelseskrav skal dokumenteres og gjennomføres. Anbefalte preaksepterte løsninger som er veldokumenterte og tilfredsstillende funksjonskravene gitt av TEK17, blir utformet av Sintef.

I TEK17 §11-1 stilles det overordnede krav om at byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet ved brann for personer og verdier som befinner seg i byggverket (5). Byggets egenskaper under brannpåkjenning bestemmes av hva bygget skal brukes til og konsekvenser en eventuell brannsituasjon vil medføre. §11-2 inneholder tabell for forskjellige risikoklasser som bestemmes av om bygget er beregnet for overnatting, om rømningsveier er kjent, om bygget brukes sporadisk, og om normal bruk av bygget medfører brannfare. I tabell 1 §11-3 bestemmes brannklasse for gjeldene bygg, på bakgrunn av risikoklasse og antall gjeldene etasjer.

Når risikoklasse og brannklasse for et bygg er bestemt, kan brannmotstand av det enkelte konstruksjonsdelene bestemmes ut fra tabell 1 for eurokoder i §11-4. Denne og andre tabeller innefor branndimensjonering opererer med forskjellige bokstavkoder og tall for å beskrive hvilke klasiteter bygningsdelene skal inneha.



- Bæreevne – R
- Integritet – E
- Isolasjonsevne – I
- Mekanisk motstandsevne -M

Det vil si at for eksempel en REI90 vegg skal i løpet av 90 minutter opprettholde sin bæreevne, ikke ha gjennomgående sprekker og isolere varme fra varm side mot kald side.

Ved bruk av massivtre som konstruksjonsmateriale i bærende bygningsdeler, kan preaksepterte løsninger brukes innenfor brannklasse 1 og 2. Disse brannklassene tilsvarer bygninger opp til 4 etasjer. For bygninger på 5 etasjer eller mer oppnås brannklasse 3, som krever at bærende konstruksjonsdeler skal være av ubrennbare materialer, og ikke bidra vesentlig til brannenergi (euroklasse A2). Dette medfører at ytelseskrav må dokumenteres ved analyse.

### **3.1.4 Brannegenskaper i KLT**

KLT er plateelementer som er gjennomgående for hele dekker, etasjeskiller og vegger. Dette gjør at KLT oppfører seg ulikt fra tradisjonelt bindingsverk under en brann. Når konstruksjonen er gjennomgående i alle overflater oppstår det kun endimensjonal forkulling med unntak av utvendige hjørner. I tradisjonelt bindingsverk brenner stenderne fra flere retninger når beskyttelseslaget har mistet sin funksjon. En konstruksjon av KLT er også en tettere konstruksjon på grunn av at KLT-sjiktet er homogent, og korrekt prosjektering fører til mindre gjennomstrømning av luft konstruksjonen.

Forkullingshastighet av KLT kan variere ut fra forskjellige faktorer som (16):

- Temperatur
- Antall lameller
- Tykkelse på lameller
- Limtype brukt i materialet
- Tilslutningspunkter

En av utfordringene med å bruke ubeskyttet KLT som konstruksjonsmateriale er at materialet i seg selv kan bidra til brannutviklingen. Derfor kan det antas at temperaturen under overtenningsstadiet vil overstige temperaturene beskrevet av standard brannkurve. Derfor vil det være nødvendig med løsninger som holder temperaturen nede for kunne begrense skadeomfanget ved brann. Forskning på temperaturer for beskyttet og ubeskyttet KLT har gitt forskjellige resultater. En masteroppgave fra Canada med brannforsøk av KLT viser at

ubeskyttede KLT-elementer gir et stort bidrag til brannutviklingen. Temperaturen steg raskt innen 5 minutter og vedvarte gjennom hele testen (18). En liknende branntest gjennomført i Finland viser at ubeskyttet KLT i de første 20 minuttene av brannforløpet vil ha en lavere temperatur før den stiger (19). I branntest av Moholt 50|50 hvor KLT var både beskyttet og ubeskyttet vises det at temperaturen stiger markant etter 5 minutter (17). Med slike funn kan det antas at det er usikkerheter rundt hvordan et brannforløp vil utvikle seg med KLT som materiale, og at det fortsatt er nødvendig med flere branntester av materialet for å oppnå mer kunnskap.

Positive egenskaper ved å bruke KLT som konstruksjonsmateriale, er de mekaniske egenskapene til tre under branneksponeering. Sett opp mot stål som mister sin bæreevne drastisk ved temperaturer rundt 600°C, mister trematerialer hovedsakelig sin bæreevne som følge av redusert tverrsnitt. Forkulling ved branneksponeering reduserer tverrsnittet til treverk, slik at forkullingen av treverk blir grunnlaget for branndimensjoneringen av KLT (29).

### **3.1.5 Delaminering**

Når lamellene i massivtre-elementer løsner fra hverandre, oppstår det som kalles delaminering. Dette oppstår når limet mellom lamellene blir oppvarmet til det punktet hvor limets festeegenskaper opphører. Under et brannforløp viser det seg at delaminering er en viktig faktor for forkullingshastigheten av materialet. Et intakt forkullingslag virker isolerende, og forhindrer derfor videre forkulling. Beregningsmessig vil forkullingshastigheten avta om det forkullede laget er større en 25mm. Om elementet delaminerer vil den forkullede lamellen falle av, og friskt trevirke vil bli eksponert, slik at brannen får tilført ubeskyttet brensel. Ett annet problem med delaminering er at det kan oppstå en sekundær overtenning. Dette hvis delamineringen skjer tidlig i avkjølingsfasen av brannforløpet, og hvis temperaturene er høy nok til at en re-antennelse kan oppstå.

Om delaminering oppstår, eller hvordan den oppstår er avheng av hvilken limtype som er brukt i materialet. Ved å benytte varmfølsomme limtyper som brytes ned ved temperaturer under 300°C, kan en delaminering oppstå før forkullingen har nådd neste lamell, dette kalles en tidlig delaminering, som vil resultere i en markant akselerasjon i forkullingshastigheten. I 2009 utførte Institute of Structural Engineering i Sveits 11 branntester av massivtre-elementer med forskjellige limtyper (20). Limtypene som ble brukt var PU (polyurethan) og MUF (melamin-urea-formaldehyd). Resultatene fra testene viste at delaminering oppsto ved bruk av PU-lim, men ikke for MUF-lim. Resultatene viste stor variasjon i forkullingshastighet for identiske

elementer med forskjellig limtype. Forkullingshastighet for MUF-limte element var 0,58 mm/min og forkullingshastighet for PU-limte element var 0,94 mm/min. Med slike resultater kommer det klart frem at delaminering er en høyst viktig faktor å ta hensyn til ved branndimensjonering av massivtre.

### **3.1.6 Branntest av Hybelenhet Moholt 50|50**

Moholt 50|50 er et boligprosjekt bestående av fem boligblokker med 632 studenthybler. Blokkene har ni etasjer og en gesimshøyde på 27,11 meter (21). Blokkene består hovedsakelig av byggematerialet massivtre, med unntak av kjeller og 1. etasje som er støpt i betong. Byggeprosjektet ble utført av Veidekke på oppdrag fra studentsamskipnaden i Trondheim, og ble ferdigstilt i 2016.

Blokkene innehar ni gjeldede etasjer og er beregnet for overnatting for fastboende. Dette medfører at risikoklassen for bygget havner innenfor risikoklasse 4. Prosjektets brannrådgivere har satt byggets brannklasse til klasse 3, dette på grunn av at brann i ville kunne medføre stor konsekvens for helse, liv, miljø og samfunnsmessige interesser. Bæresystemet i brannklasse 3 har krav om å være intakt i 90 minutter under branneksposering, og skal bestå av ubrennbart materiale. Ved bruk av brennbart materiale kreves grundig dokumentasjon, eller uttesting av materialets egenskaper ved brann, for å dokumentere at løsningen er vel så sikker som ved bruk av ubrennbart materiale. I og med at byggingene skulle bestå i materialet massivtre var det derfor nødvendig med en branntest av materialet.

Branntest ble utført av SP Fire Research hvor det ble bygget opp en identisk modul av en studenthybel med tilhørende korridor. Massivtreelementene som ble brukt besto av fem krysslagte lameller med tykkelse på 20mm, veggoverflatene besto i en kombinasjon av beskyttet og ubeskyttet massivtre, Himling besto utelukkende av ubeskyttet massivtre. Det ble i alt gjennomført to branntester av studenthyblene. Test 1 med aktivert sprinkleranlegg og test 2 med deaktivert sprinkleranlegg. Dør mellom hybel og korridor ble holdt åpen for å skape det verste brannscenarioet for brannutvikling. Brannlasten i testen besto av trekrybber, diverse trematerialer, heptan og en skumgummimadrass som skulle tilsvare brennbart inventar i en hybelenhet. For å kunne dokumentere forskjellige stadier av brannforløpet ble det montert inn termoelement i forskjellige dybder inne i vegg og himling, samt overflater. Antenningskilde i rommet var en bønne med heptan som ble antent under skrivepulten på hybelen, dette skulle beskrive et brannscenario hvor antennelsen oppsto i søppelkurv.

I branntest 1 ble sprinkleranlegget aktivert ca 2 minutter etter antennelsestidspunkt, når temperaturen i rommet hadde nådd 131°C. Etter sprinkleranlegget hadde virket i syv minutter hadde temperaturen sunket til 21°C, men brannen var fortsatt ikke slokket av sprinkleren. Dette kan være på grunn av at varmekilden var tildekket under skrivepulten slik at varmekilden ble skjermet for vannet. Etter ni minutter og 30 sekunder ble varmekilden slukket og testen avsluttet. Resultatene fra testen viste at ved fungerende sprinkleranlegg vil brannen mest sannsynlig aldri nå overtenningsstadiet.

I branntest 2 med deaktivert sprinkler gikk brannen til overtenning i løpet av fire minutter og ti sekunder, med temperatur på 822°C. Vinduet knuste i underkant av seks minutter ut i testen, noe som resulterte i en liten reduksjon av temperatur ned til 770°C, før temperaturen igjen steg opp mot 1000°C. Etter en time og ti minutter ble det sett tegn til gjennombrenning i deler av den ubeskyttede massivtreveggen. Taket kollapser etter en time og 36 minutter, ved en romtemperatur på 1070°C, hvor på slokkemannskap kort tid etter startet slokking og avsluttet testen. Under branntesten ble det observert lag av kull som falt av, noe som indikerer at delaminering har oppstått i testperioden (17). Resultatet fra branntest 2 viser ingen tegn til at brannen skulle avta eller gå mot selvslukking, før alt brennbart materiale i konstruksjonen var konsumert av brannen.

### **3.1.7 Temperatur-tidskurver**

For å oppnå et felles standardisert beregningsgrunnlag under prosjektering og testing, har man utviklet matematiske metoder som beskriver en forventet/ønsket temperaturutvikling under standardiserte brannforløp. Disse metodene kalles temperatur-tidskurver, og beskriver forventet gasstemperatur innfor et avgrenset område som en funksjon av tid, og kan regnes ut ved hjelp av formler, eller leses av grafisk. Ulike brann-scenarier har ulike kurver, med ulike forutsetninger og parametere som grunnlag, dette for å oppnå en mest mulig realistisk/ønsket temperatur utfra hva, hvor og hvordan det brenner.

Man kan dele kurvene inn i to hovedkategorier:

- Nominelle kurver
- Parametriske kurver

En nominell kurve er som navnet tilsier en teoretisk modell, som kun er riktig under visse forhold, og som derfor ikke nødvendigvis beskriver virkeligheten slik den er i praksis. NS-EN

1991-1-2 beskriver flere forskjellige nominelle kurver, blant annet standard brannkurve, og HC-kurven (hydrokarbonbrann-kurve).

En parametrisk kurve er utviklet etter brannmodeller, og har spesifikke fysiske parametere, som er knyttet til forhold som kan påvirke brannen på ulike måter. Disse parametrene omfatter geometri, opptredende materialeegenskaper og åpninger. Denne modellen vil derfor kunne gi en mer nøyaktig beregning av forventet temperatur, enn en nominell kurve. Den parametriske kurven som brukes i NS-EN 1995-1-2, og som er beskrevet i NS-EN 1991-1-2, deler brannforløpet inn i 3 deler: oppvarmingsfasen, maks temperatur, og nedkjølingsfasen. Hver fase har sin egen likning, med tilhørende kurve/temperatur.

Gasstemperatur under oppvarmingsfasen er gitt av:

$$\Theta_g = 20 + 1235 * (1 - 0,324e^{(-0,2t^*)} - 0,204e^{(-1,7t^*)} - 0,472e^{(-19t^*)}) \quad (3.1)$$

Hvor:

$\Theta_g$  = gasstemperaturen i branncellen målt i °C

$t^*$  = Tiden målt i timer multiplisert med faktor for temiske egenskaper, beskrevet i tabell 2.

Maksimumstemperatur inntreffer når:

$$t^* = t^*_{max}$$

Hvor:

$$t^*_{max} = 0,2 * 10^{(-3)} * \frac{q_{t,d}}{O} * \Gamma \quad (3.2)$$

Hvor:

$q_{t,d}$  = Dimensjonerende spesifikk brannenergi, beskrevet i (3.13).

$O$  = Åpningfaktor, beskrevet i tabell 2.

Gasstemperatur i nedkjølingsfasen er gitt av:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625(t^* - t^*_{max} * x) \quad \text{for} \quad t^*_{max} \leq 0,5 \quad (3.3)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*(t^* - t_{max}^* * x)) \quad \text{for} \quad 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (3.4)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* * x) \quad \text{for} \quad t_{max}^* \geq 2 \quad (3.5)$$

Hvor:

$$x = 1 \text{ for } t_{max} > t_{lim}, x = t_{lim} * \frac{\Gamma}{t_{max}^*} \text{ for } t_{max} = t_{lim}$$

Med  $t_{lim}$  som tid til høyeste temperatur ved brenselsregulert brann.

De fleste beregningene i NS-EN 1995-1-2 er gyldig for standard brann-klasse/standard brann eksponering. Denne kurven som er beskrevet i ISO 834 er en nominell brannkurve som beskriver brannfasen etter overtenning, og brukes ved klassifisering og påvisning av brannmotstand ved de fleste typer bygninger og materialer. Kurven består kun av en fase og tar ikke hensyn til nedkjølingsfasen eller oppvarming før overtenning. Formålet med kurven er ikke nødvendigvis å oppnå en mest mulig realistisk temperatur, men at man heller får en felles beregningsmåte som gjør at sammenligning og etterprøving kan gjennomføres på en enkel måte.

Gasstemperatur ved standard temperatur- tidskurve er gitt ved:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3.6)$$

Hvor:

$\Theta_g$  = gasstemperaturen i branncellen målt i °C

$t$  =  $t_i$  målt i minutter

NS-EN 1995-1-2 beskriver beregningsmetoder for forkullingsdybde, og forkullingshastighet basert både på standard brannkurve, og parametrisk brannkurve. Metoden for beregning av forkullingshastighet med parametrisk brannkurve har ikke endret seg i ny revidert versjon av standarden, men siden metoden er avhengig av verdier hentet fra beregningen av nominell forkullingshastighet, vil resultatene ved parametrisk beregning indirekte påvirkes av endringer gjort ved denne beregningen.

## 3.2 NS-EN 1995-1-2:2004

### 3.2.1 Standard branneksponeering

NS-EN-1995-1-2:2004 baserer seg på faste oppgitte verdier for forkullingshastighet av ubeskyttet massivtre, den tar ikke hensyn til delaminering, mellomrom, eller ulike faser i forkullingsprosessen. Verdiene hentes fra tabell 3.1 i standarden.

$$\beta_0 \text{ for massivtre} = 0,65 \frac{mm}{min} \quad (3.7)$$

$$\beta_n \text{ for massivtre} = 0,70 \frac{mm}{min} \quad (3.8)$$

$\beta_0$  kan brukes så fremst tverrsnittets opprinnelige bredde oppfyller krav til minimum tykkelse, hvis bredden er smalere må  $\beta_n$  benyttes. Dette er beskrevet av likningen:

$$b_{min} \begin{cases} 2 * d_{char,0} + 80 & \text{for } d_{char,0} \geq 13mm \\ 8,15 * d_{char,0} & \text{for } d_{char,0} < 13mm \end{cases} \quad (3.9)$$

Hvor Forkullingsdybde er gitt av:

$$d_{char,0} = \beta_0 * t \quad (3.10)$$

### 3.2.2 Parametrisk brannkurve

Beregningsmetoden for forkullingshastighet er gitt av NS-EN 1995-1-2 annex A, og er beskrevet i NS-EN 1991-1-2 tillegg A. Denne beregningsmetoden forutsetter at branncellen har et gulvareal opptil 500 kvadratmeter, branncellehøyde på under 4 meter, og at det ikke er åpninger i vertikal retning oppover.

Metoden omhandler utregning av  $\beta_{par}$  på bakgrunn av materialers varmegenskaper, arealflater og ventilasjonsåpninger.

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma}-0,04}{0,16\sqrt{\Gamma}+0,08} \quad (3.11)$$

Tabell 1: Forskjellige faktorer for utregninger av parametriske brannkurve.

Symbol	Navn	Gitt av	Benevning
$\Gamma$	Faktor for termiske egenskaper	$\frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2}$	–
$O$	Åpningsfaktor	$\frac{A_v}{A_t} * \sqrt{h_{eq}}$	$m^{\frac{1}{2}}$
$b$	Varmeegenskaper	$\sqrt{\rho * c * \lambda}$	$\frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}$
$h_{eq}$	Gjennomsnitt av åpningshøyder	$\sum \frac{A_{v,i} * h_{v,i}}{A_v}$	$m$
$A_v$	Areal vertikale åpninger	–	$m^2$
$A_t$	Totalt areal overflater	–	$m^2$
$\rho$	omsluttende bygningsdelers massetetthet	–	$\frac{Kg}{m^3}$
$c$	omsluttende bygningsdelers spesifikke varmekapasitet	–	$\frac{J}{Kg * K}$
$\lambda$	omsluttende bygningsdelers varmekonduktivitet	–	$\frac{W}{m * K}$

Videre avhenger metoden av  $t_0$  som er den tiden forkullingshastigheten antas å være konstant, før den avtar.

$$t_0 = 0,009 * \frac{q_{t,d}}{O} \quad (3.12)$$

Hvor  $q_{t,d}$  er dimensjonerende spesifikk brannenergi gitt av flatearealet, gitt av NS-EN 1991-1-2 tillegg F.

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} \quad (3.13)$$

Hvor  $q_{f,d}$  er dimensjonerende spesifikk brannenergi av flatearealet gitt av NS-EN 1991-1-2 tillegg E.



$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_1 * \delta_2 * \delta_n \quad (3.14)$$

Hvor:

$q_{f,k}$  = karakteristisk spesifikk brannenergi per flate gulvareal, bestemmes av tabell E. 4.

$m$  = forbrenningsfaktor. 0,8 ved materialer bestående hovedsakelig av cellulose

$\delta_1$  = faktor for brannaktiveringsrisiko, leses av tabell E. 1 etter branncellens areal

$\delta_2$  = faktor for brannaktiveringsrisiko, leses av tabell E. 1 etter branncellens bruk

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} =$  faktor for aktive brannbekjempelsestiltak, bestemmes av tabell E. 2.

Settes vanligvis til = 1.

Beregning av forkullingsdybde kommer fram ved å velge likning etter hvor i brannforløpet man befinner seg. Valg av likning bestemmes av verdi for  $t_0$ .

$$d_{char} \begin{cases} \beta_{par} * t & \text{For } t \leq t_0 \\ \beta_{par} \left( 1,5 * t - \frac{t^2}{4*t_0} - \frac{t_0}{4} \right) & \text{For } t_0 < t \leq 3t_0 \\ 2 * \beta_{par} * t_0 & \text{For } 3t_0 < t \leq 5t_0 \end{cases} \quad (3.15)$$

### 3.3 NS-EN 1995-1-2:2020

Nominell forkullingshastighet omhandler utregning av forventet forkulling i forskjellig trematerialer. Selv om det er mange variabler som påvirker forkullingshastigheten i et reelt branntilfelle, kan det ses at treverk brenner med en relativ forutsigbar hastighet under et standardisert brannforsøk. Dette kapitlet vil omhandle teoretisk utregning av forkulling av ubeskyttet KLT.

### 3.3.1 Grunnleggende verdi for forkullingshastighet:

Som et utgangspunkt til forkullingshastighet i NS-EN 1995-1-2 brukes  $\beta_0$ . Den varierer ut fra forskjellige karakteristiske egenskaper i forskjellige trearter og treprodukter. Typiske eksempler på bartre (softwood) er trearter som gran og furu. Løvtré (hardwood) vokser som regel i områder det er mer krevende værforhold slik at de vokser tregere og oppnår en høyere densitet. Dette gjør av treet brenner saktere som kan ses i tabell for  $\beta_0$ -verdier. Av trematerialer er det mest utbredt med bruk av bartrearter som gran og furu, dette på grunn av større tilvekst av trearten.

Tabell 2: Forkullingshastigheter i forskjellig trematerialer. Tabell er gjengitt med tillatelse fra opphaver (25)

	$\beta_0$ [mm/min]
<b>a) Timber members made of softwood</b> <sup>(1) (3) (4)</sup>	0,65
<b>b) Timber members made of hardwood</b> <sup>(1) (3)</sup>	
Beech <sup>(5)</sup>	0,65
Oak <sup>(6)</sup>	0,50
<b>c) Panels</b> <sup>(2)</sup>	
Solid wood panelling and cladding, solid wood panel with only one layer	0,65
LVL panel <sup>(3)</sup> , particleboard, fibreboard	0,65
OSB, solid wood panel with multiple layers	0,9
Plywood	1,0

Teoretisk verdi for forkullingshastighet angir hastigheten i forkulling medregnet modifikasjonsfaktorer for en forkullingsfase. Formelen multipliserer  $\beta_0$  med produktet av alle de gjeldene modifikasjonsfaktorene.

$$\beta_n = \prod_{k_i} k_i \cdot \beta_0 \left( \frac{mm}{min} \right) \quad (3.16)$$

### 3.3.2 Modifikasjonsfaktorer

I revidert utgave av NS-EN 1995-1-2 er det lagt til en rekke modifikasjonsfaktorer som påvirker forkullingshastigheten av trematerialer av forskjellige varianter. I denne delen vil vi beskrive de modifikasjonsfaktorer som er relevante ved utregninger av ubeskyttet KLT.

Fiberretningsfaktor  $k_{gd}$ :

fiberretningsfaktoren tar hensyn til om den eksterne varmekilden står vinkelrett på trefibrene, eller i trefiberretning.

$$k_{gd} = \begin{cases} 1 & \text{varmefluks vinkelrett på trefiberretning} \\ 2 & \text{varmefluks med trefiberretning} \end{cases} \quad (3.17)$$

Mellomroms-faktor  $k_g$ :

Mellomroms-faktor (gap factor) tar hensyn til eventuelle sprekker i materialets overflate.

Dette kan oppstå i skjøter mellom elementer eller i selve elementet som et resultat av krymp og uttørking.



Figur 3: Sprekker i KLT fra trapperom Moholt 50/50

$$k_g = \begin{cases} 1 & \text{mellomrom} \leq 2 \text{ mm} & \text{endimensjonal forkulling} \\ 1,2 & \text{mellomrom} > 2 \text{ mm og } \leq 5 \text{ mm} & \text{endimensjonal forkulling} \\ 1,2 & \text{mellomrom} > 5 \text{ mm} & \text{todimensjonal forkulling} \end{cases} \quad (3.18)$$

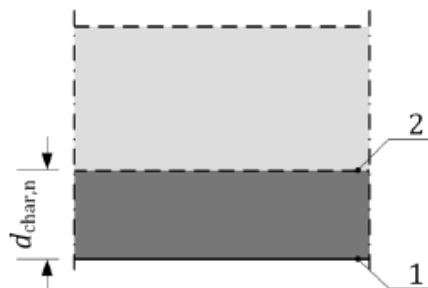
Etter-beskyttelsesfaktor  $k_3$ :

Modifikasjonsfaktor  $k_3$  brukes under forkullingsfase 3. denne fasen oppstår om KLT elementene delaminerer. I ett slikt tilfelle vil brannen få et tilskudd av ferskt trevirke under høy temperatur slik at brannen vil få en oppblussing. Anbefalt verdi for  $k_3$  når limet i KTL ikke er testet i en fullskaletest er 2.

$$k_3 = 2 \quad (3.19)$$

Forkullingsdybden er et resultat av forkullingshastighet multiplisert med gjeldene tid for brannpåkjenning.

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \text{ (mm)} \quad (3.20)$$



Figur 4: Illustrasjon av endimensjonal forkullingsdybde. Figur er gjengitt med tillatelse fra opphaver (25)

### 3.3.3 Forkullingsfaser:

KLT forkulles i forskjellige hastigheter ut fra hvordan materialet er behandlet eller framstilt. NS-EN 1995-1-2 har delt opp forkullingen i forskjellige faser for å kunne bestemme hastighet på forkulling i hvert enkelt tilfelle.

Fase 0: Innkapslet fase hvor ingen forkulling skjer på grunn av beskyttelseslag på treverket.

Fase 1: Normal forkullingshastighet av treverket.

Fase 2: Beskyttelsesfase hvor forkullingshastigheten bremses av et beskyttelseslag.

Fase 3: Hastighetskalering som resultat av at beskyttelseslag brenner opp eller løsner. Denne fasen inntreffer også ved delaminering.

Fase 4: Konsolideringsfase hvor forkullingshastigheten stabiliserer seg etter fase 3, denne fasen inntreffer når kulldybden oppnår 25mm.

### 3.3.4 Utregning av forkullingshastighet i KLT

For ubeskyttet KLT kommer det fram av NS-EN 1995 revidert utgave, at flere av modifikasjonsfaktorene ikke er relevant å bruke for KLT. Likning fra kapittel 7.2.3 viser at mellomroms faktoren er den eneste medregnede faktoren for horisontale elementer i fase 1. For vertikale elementer hvor delaminering kan oppstå er det i tillegg medregnet en sikkerhetsfaktor på 1,2. For fase 3 er det medregnet en sikkerhetsfaktor på 2 som antas å være modifikasjonsfaktor  $k_3$ .

Horisontale eller vertikale elementer hvor delaminering er utelukket:

$$\text{Fase 1 og 4} \quad \beta_n = k_g \cdot \beta_0 \quad (3.20)$$

$$\text{Fase 3} \quad \beta_n = 2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (3.21)$$

Vertikale elementer hvor delaminering kan oppstå:

$$\text{Fase 1 og 4} \quad \beta_n = 1,2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (3.22)$$

$$\text{Fase 3} \quad \beta_n = 2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (3.23)$$

### 3.4 NDS:2015

Den Amerikanske beregningsmetoden for forkullingshastighet og -dybde er hentet fra CLT handbook US edition, og er en del av "National Design Specification:2015 (NDS)". NDS blir publisert av "American wood council (AWC)", som er en bransjeorganisasjon som representerer over 80% av Nordamerikanske treprodukt-produsenter. NDS er godkjent som en Amerikansk nasjonal standard av "The American National Standards Institute (ANSI)" (22).

Den Amerikanske beregningsmetoden for forkullingshastighet og -dybde, skiller seg noe fra den Europeiske, da denne ikke baserer seg på lineære formler, men heller en ikke-lineær potensfunksjon. Dette gjør at forkullingshastigheten endrer seg konstant som en funksjon av tiden. Som bakgrunn for utregningene ligger ASTM E119-kurven, som kan sammenlignes med ISO-kurven. Disse kurvene er ikke identiske, men sammenfaller noenlunde (23). Den Amerikanske standarden bruker også tommer og timer som benevning, i stedet for millimeter og minutter, så dette må konverteres om for å kunne gjennomføre en sammenligning.

$$\beta_{eff} = \frac{1,2 * \beta_n}{t^{0,187}} \quad (3.24)$$

Hvor:

$\beta_{eff}$  = Effektiv forkullingshastighet, som tar hensyn til reduserte egenskaper i uforkullet trevirke

1,2 = Faktor som tar høyde for reduserte egenskaper i uforkullet trevirke

$\beta_n$  = Nominell forkullingshastighet, satt til  $1,5 \frac{in.}{hr} = 0,635 \frac{mm}{min}$

$t$  = Tiden i timer

Fjerner man faktoren "1,2" fra likningen, ender man opp med forkullingshastighet knyttet opp mot der man visuelt kan se forkulling, synonymt med der tverrsnittet har en forventet temperatur på 300°C

$$a_{char} = \frac{\beta_n}{t^{0,187}} * t \quad (3.25)$$

Hvor:

$a_{char}$  = Forkullingsdybde

Denne likningen gjelder kun for elementer der delaminering ikke forekommer, hvis man forventer delaminering vil forkullingshastigheten omstilles for vær delaminering, dette er beskrevet av formelen:

$$a_{char} = n_{lam} * h_{lam} + \beta_n \left( t - (n_{lam} * t_{gi}) \right)^{0,813} \quad (3.26)$$

Hvor:

$a_{char}$  = Forkullingsdybde

$n_{lam}$  = Antall lameller som kan delaminere

$h_{lam}$  = Lamelltykkelse

$t_{gi}$  = Tid for forkulling til limlag

$$n_{lam} = INT \left( \frac{t}{t_{gi}} \right)$$

$$t_{gi} = \left( \frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1,23}$$

Delaminering kan forventes når  $INT \left( \frac{t}{t_{gi}} \right) \geq 1$

### 3.5 CSA O86:2016

Den kanadiske beregningsmetoden for forkullingshastighet og -dybde er hentet fra Canadian CLT handbook 2019 edition (16), og er utviklet av "Canadian Standards Association", som er Canadas ekvivalent til Norges "Standard Norge".

Beregningsmetoden kan minne om metoden beskrevet i NS-EN 1995-1-2:2004, hvor faste verdier for forkullingshastigheter er oppgitt. Hovedforskjellen er at i den kanadiske beregningsmetoden blir den faste forkullingshastigheten bestemt ut fra hvor dyp forkulling det forventes å få under et gitt tidsforløp, dette tidsforløpet avhenger av klassifiseringen av bygningsdelen. Forkullingshastigheten variere mellom to verdier avhengig av om den første lamellen er fullstendig forkullet i løpet av tidsrommet, eller ikke.

$$\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad \text{når } x_{c,0} \leq \text{Tykkelse første lamell} \quad (3.27)$$

$$\beta_n = 0,80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad \text{når } x_{c,0} > \text{Tykkelse første lamell} \quad (3.28)$$

Hvor  $x_{c,0}$  bestemmes av:

$$x_{c,0} = \beta_0 * t \quad (3.29)$$

Hvor  $t$  er tiden bygningsdelen er klassifisert til å skulle kunne motstå brannekspnering.

## 4 Metode

Oppgaven består av teoretiske beregninger som blir sammenlignet med verdier fra en kassustudie. Beregninger som er gjort baseres på ulike standarder for forkullingshastighet i trematerialer fra Europa, Canada og USA. Den europeiske standarden som har blitt brukt er gjeldende NS-EN 1995-1-2:2004, samt utkast til ny revidert utgave NS-EN 1995-1-2:2020. Den nye reviderte utgaven har blitt gjort tilgjengelig for oss via ekstern veileder. Den Canadiske standarden som er brukt er hentet fra Canadian CLT handbook. Den amerikanske standarden som har blitt brukt er hentet fra National Design Specification. For å ha muligheten til å dra noen konklusjon på om det teoretiske beregningene er realistiske sett opp mot et reelt branntilfelle, har vi valgt å bruke tall fra branntest av hybelenhet fra boligprosjektet Moholt 50|50. Rapporten fra branntest av Moholt 50|50 inneholder data på romstørrelser, materialbruk, temperaturer og forkulling ved forskjellige dybder i materialet (17). Disse dataene har vært nødvendige for å kunne regne med parametrisk branneksposering hvor areal, åpninger, overflatematerialer og dimensjonerende brannbelastning i rommet må brukes i utregningene.

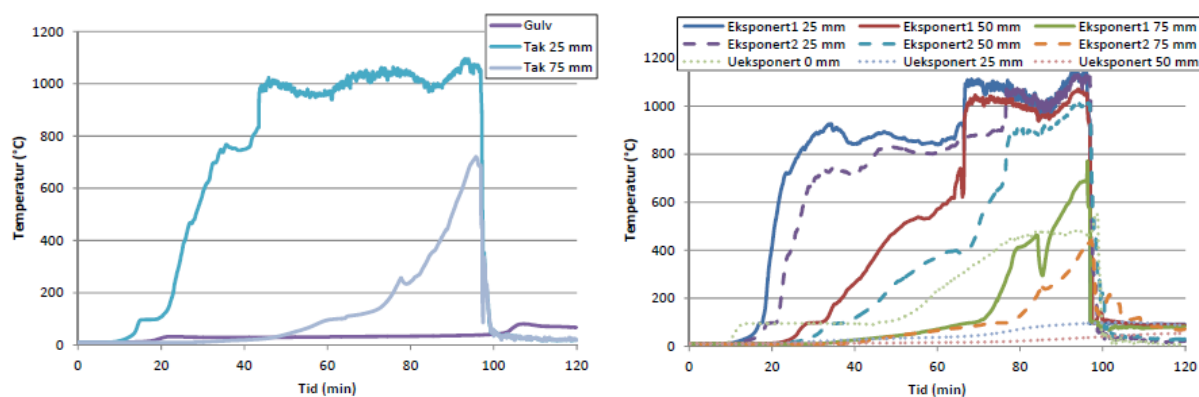
Vi har valgt å bruke og publisere resultater som ikke nødvendigvis er godkjente etter kriterier gitt av standardene. Parametrisk beregningsmetoder begrenses til en forkullingsdybde mindre eller lik en fjerdedel av opprinnelig tverrsnitt, noe som med en opprinnelig total elementtykkelse på 100mm, vil si 25mm. Vi har likevel valgt å bruke denne metoden igjennom hele tverrsnittet, for å sammenligne denne med andre beregningsmetoder og referanseverdier. Beregningene som er gjort er løst rent objektivt hvor det ikke har vært noe formål å regne seg imot resultatene fra branntesten. I tillegg til dette har vi sett hvilke forskjeller som oppstår i forkulling ved forskjellige antall og tykkelser på lamellene, i KLT-elementer med en totaltykkelse på 100mm.



## 4.1 Verdier fra branntest av Moholt 50|50

I branntesten av hybelenhet på Moholt 50|50 ble det montert flere temperaturmålere på ulike dybder av den ubeskyttede massivtreveggen, og -taket. Det ble montert temperaturmålere i veggene på tre forskjellige dybder: 25mm, 50mm og 75mm. Det ble etablert to uavhengige målepunkter for hver dybde. I taket ble det kun montert ett sett temperaturmålere på dybde: 25mm, og 75mm, disse var lokalisert i takets midtpunkt.

For å kunne sammenligne forkullingen av massivtreet ved utregninger opp mot branntest av Moholt 50|50, har vi antatt at forkulling i veggens tverrsnitt oppstår der temperaturen er større eller lik 300°C. I tilfellet der temperaturmålerne er montert på to uavhengige plasser i vegg, har vi tatt ett grafisk gjennomsnitt av målingene. Grafisk gjennomsnitt for forkulling av vegg er satt til 20 minutter for 25mm, 47 minutter for 50mm og 82 minutter for 75mm. Grafisk forkulling for tak er satt til 24 minutter for 25mm og 84 minutter for 75mm.



Figur 5:Temperaturer i KLT ved forskjellige dybder Moholt. Figur er gjengitt med tillatelse fra opphaver (17)

## 5 Resultater

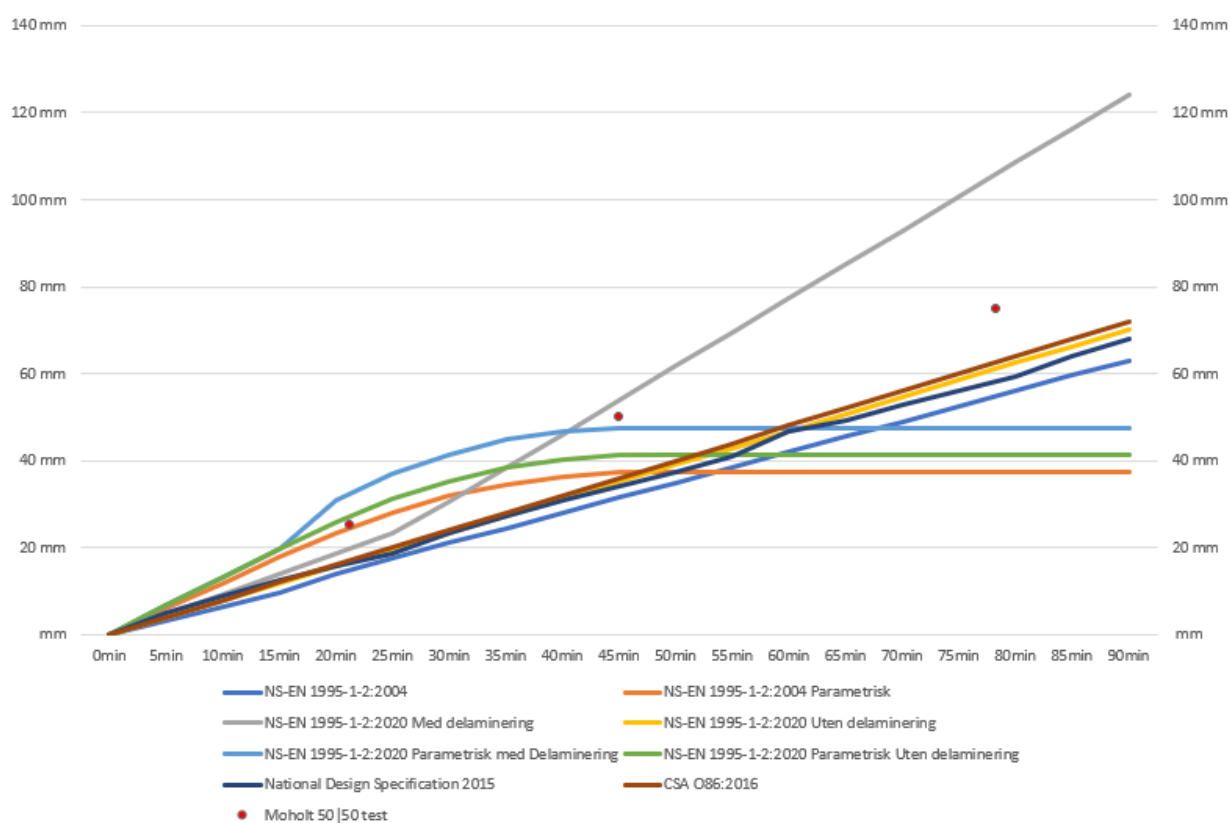
I dette kapittelet vil vi legge frem resultatene fra beregningene utført av forkullingsdybder. Resultatene blir fremvist i form av tabeller, grafer og diagrammer, alt etter hva vi anser som mest hensiktsmessig med tanke på formidlingsverdi.

Beregningsverdiene er i tilfeller hvor det er hensiktsmessig sammenlignet med verdier hentet fra branntest Moholt 50|50.

### 5.1 Beregnete forkullingsdybder sammenlignet med Moholt 50|50 målinger

#### 5.1.1 Veggelement

Graf 6 viser beregnet forkullingsdybde, og endring av forkullingshastighet over tid for alle de aktuelle beregningsmetodene. Referanseverdier hentet fra Moholt 50|50 er vist som punkter i grafen.



Figur 6: Forkullingsdybde i massivtre-veggelementer gjennom en 90 minutters branneksponeing

NS-EN 1995-1-2:2020 med delaminering skiller seg noe ut da den gir langt høyere verdier enn de andre utregningene. Etter beregningene ville vi her opplevd gjennombrenning etter 75 minutter, da total tykkelse på elementet er 100mm.

Metodene som beregningsmessig treffer den første referanseverdien på 20 minutter best, er NS-EN 1995-1-2:2004 med parametrisk kurve, og NS-EN 1995-1-2:2020 med parametrisk kurve uten delaminering.. Vi ser også at de parametriske forkullingshastighetene flater ut etter 45 minutter.

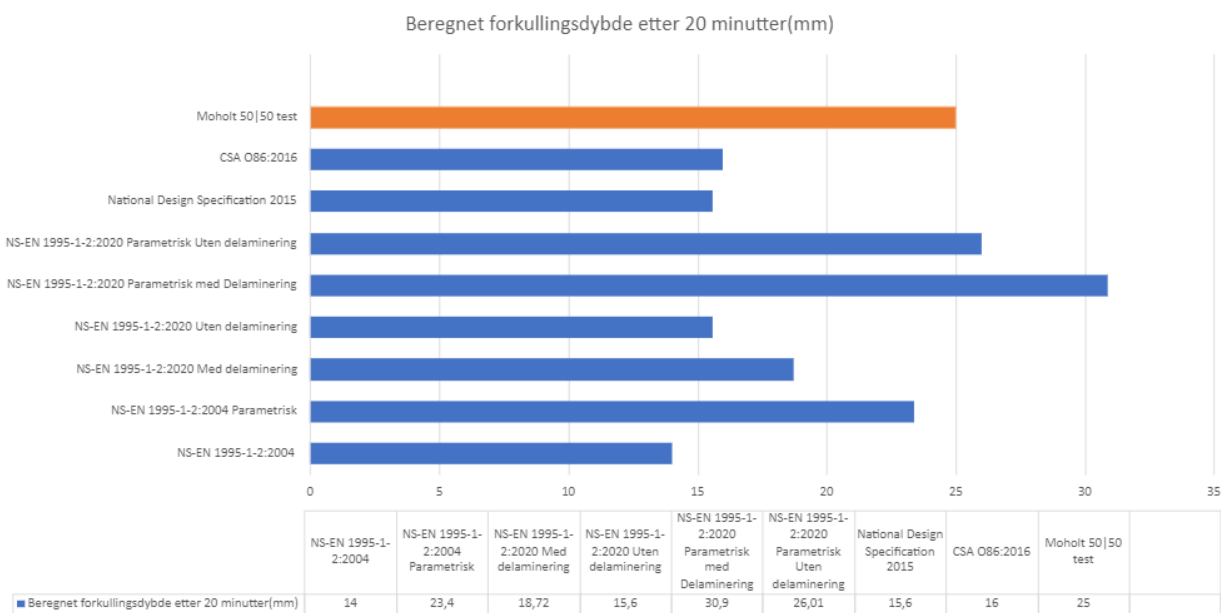
NS-EN 1995-1-2:2020 parametrisk med delaminering er den som treffer best på det andre referansepunktet.

De resterende grafene basert på nominelle forkullingshastigheter er noenlunde sammenfallende. Selv om National design specifications tar hensyn til delaminering, gjør ikke dette nevneverdige utslag.

Tabell 4 viser samme beregning som graf 1, bare i form av tallverdier. Skiftende farge i tabellen indikerer at beregningsmetoden her endrer seg, noe som ved de parametriske metodene betyr at tiden med konstant forkullingshastighet går over i en fase med avtagende hastighet, som igjen stagnerer ved beregnet endt brannekspønering som er markert med lys rød. Mørke røde felt ved NS-EN 1995-1-2:2020 indikerer umulige verdier, hvor forkullingsdybden er større enn det opprinnelige tverrsnittet. De nominelle forkullingshastighetene endres etter en innledende brannfase, etterfulgt av delaminering, og/eller faseendring.

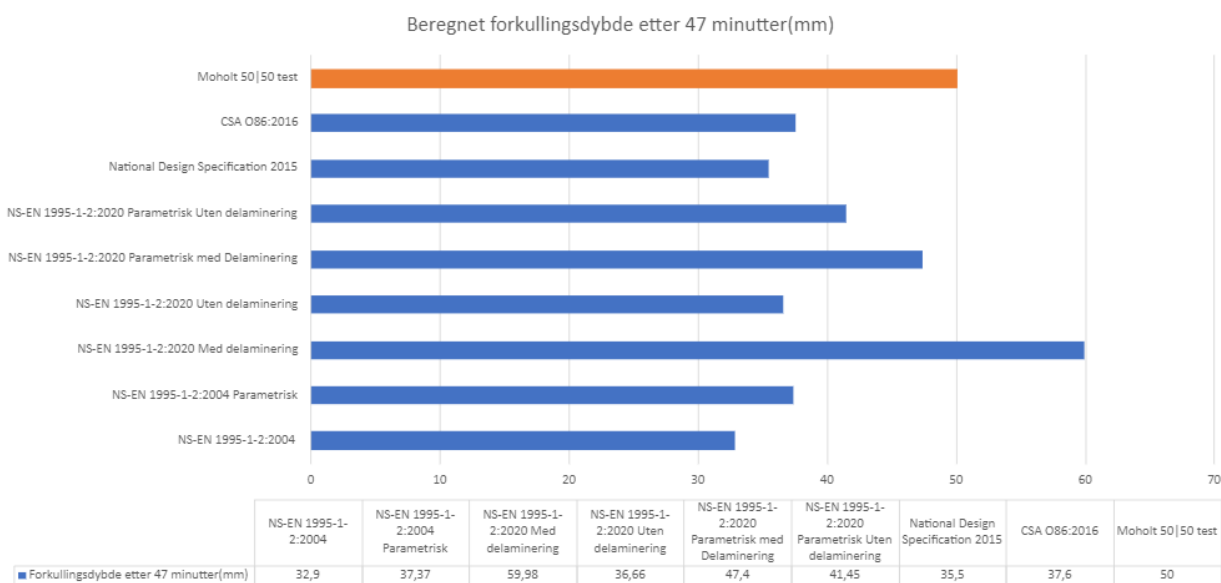
Tabell 3: Beregnet forkullingsdybder etter gitte tidspunkt

5x20mm lameller	0min	5min	10min	15min	20min	25min	30min	35min	40min	45min	50min	55min	60min	65min	70min	75min	80min	85min	90min
NS-EN 1995-1-2:2004	0	3,25	6,5	9,75	14	17,5	21	24,5	28	31,5	35	38,5	42	45,5	49	52,5	56	59,5	63
NS-EN 1995-1-2:2004 Parametrisk	0	5,95	11,9	17,85	23,4	28,11	31,82	34,59	36,41	37,28	37,37	37,37	37,37	37,37	37,37	37,37	37,37	37,37	37,37
NS-EN 1995-1-2:2020 Med delaminering	0	4,68	9,36	14,04	18,72	23,4	30,53	38,33	46,13	53,93	61,73	69,53	77,33	85,13	92,93	100,7	108,5	116,3	124,1
NS-EN 1995-1-2:2020 Uten delaminering	0	3,9	7,8	11,7	15,6	19,5	23,4	27,3	31,2	35,1	39	42,9	46,8	50,7	54,6	58,5	62,4	66,3	70,2
NS-EN 1995-1-2:2020 Parametrisk med Delaminering	0	6,6	13,2	19,8	30,9	36,86	41,47	44,76	46,71	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
NS-EN 1995-1-2:2020 Parametrisk Uten delaminering	0	6,6	13,2	19,8	26,01	31,18	35,3	38,37	40,38	41,35	41,44	41,44	41,44	41,44	41,44	41,44	41,44	41,44	41,44
National Design Specification 2015	0	5,05	8,87	12,34	15,6	18,69	23,21	27,17	30,91	34,24	37,4	41,07	46,66	49,41	52,84	56,07	59,15	63,88	67,86
CSA O86:2016	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72



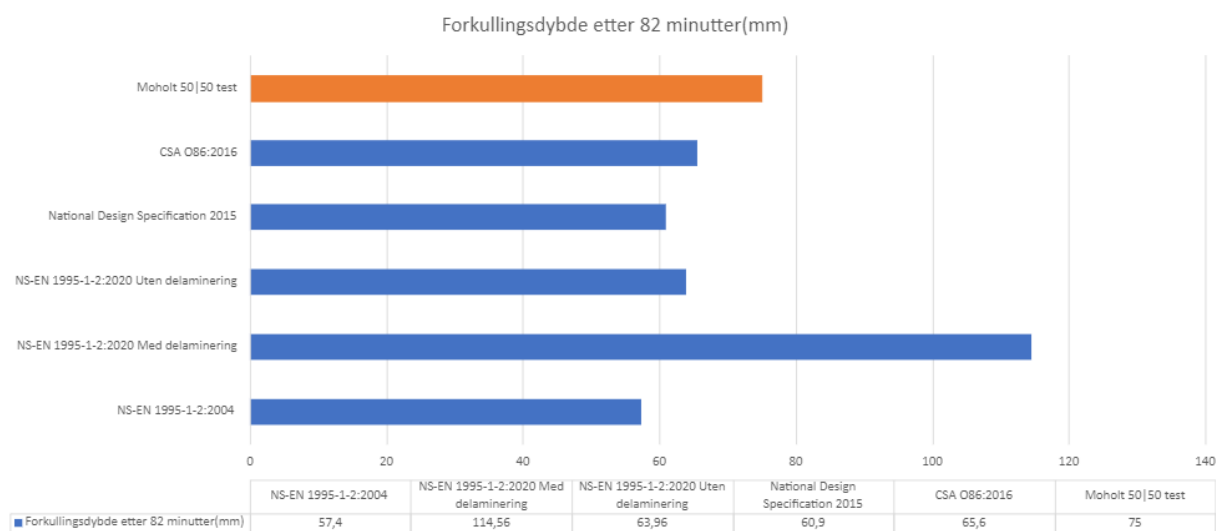
Figur 7: Beregnet forkullingsdybde etter 20 minutter målt i mm.

Figur 7 viser forkullingsdybde etter 20minutter branneksporing, mot referanseverdi fra branntest Moholt 50|50 vist i rødt.



Figur 8: Beregnet forkullingsdybde etter 47 minutter målt i mm.

Figur 8 viser forkullingsdybde etter 47minutter branneksporing, mot referanseverdi fra branntest Moholt 50|50 vist i rødt.

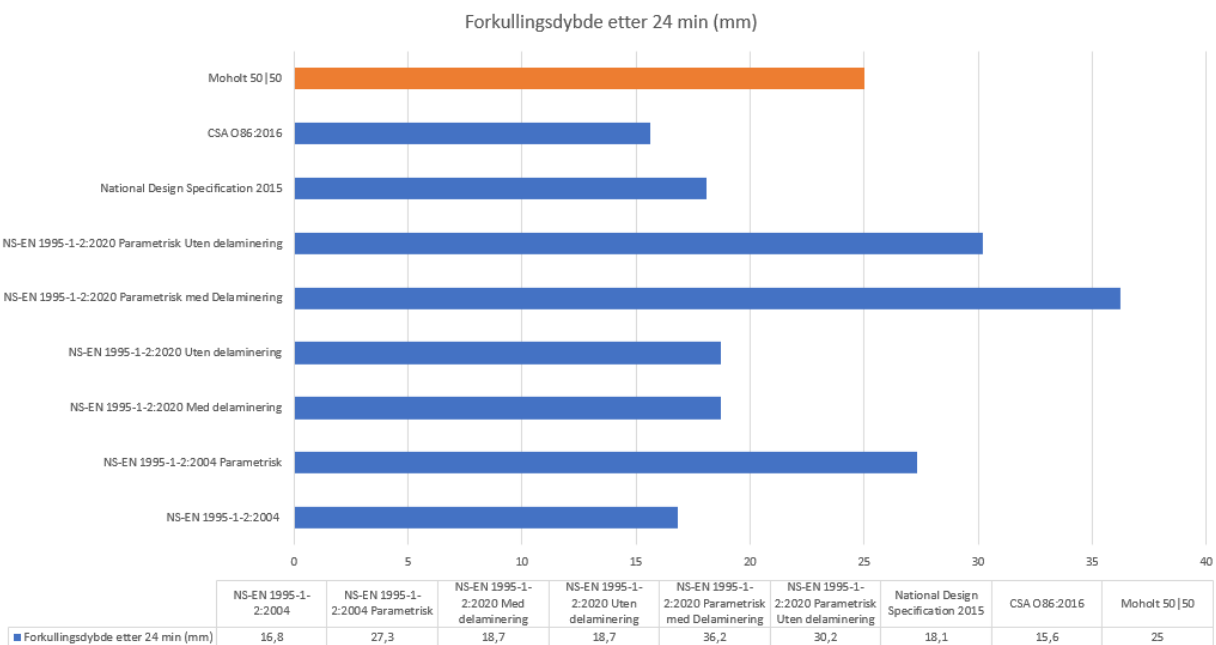


Figur 9: Beregnet forkullingsdybde etter 82 minutter.

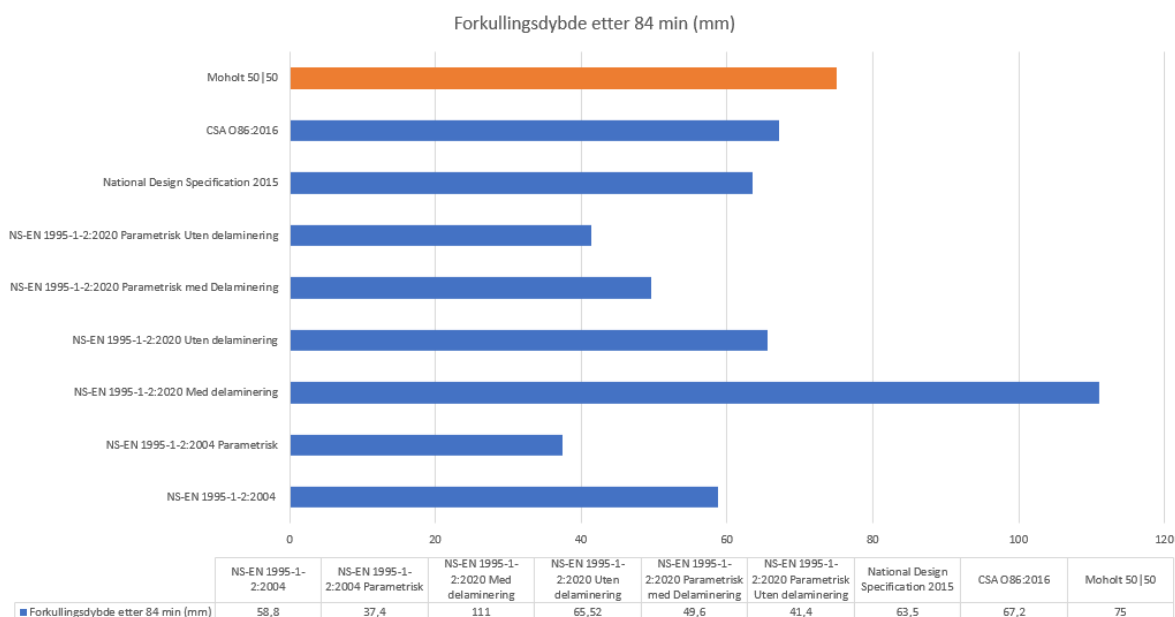
Figur 9 viser forkullingsdybde etter 82 minutter branneksporing, mot referanseverdi fra branntest Moholt 50|50 vist i rødt.

### 5.1.2 Takelement

Figur 10 og 11 innehar verdier for forkullingsdybde av KLT i tak hvor det ble gjort utregninger av forkullingsdybden på 25mm og 50mm markert i blåe søyler. Søyلة markert i farge oransje er målinger fra forkullingsdybde i branntest av Moholt 50|50.



Figur 10: beregnet forkullingsdybde etter 24 minutter

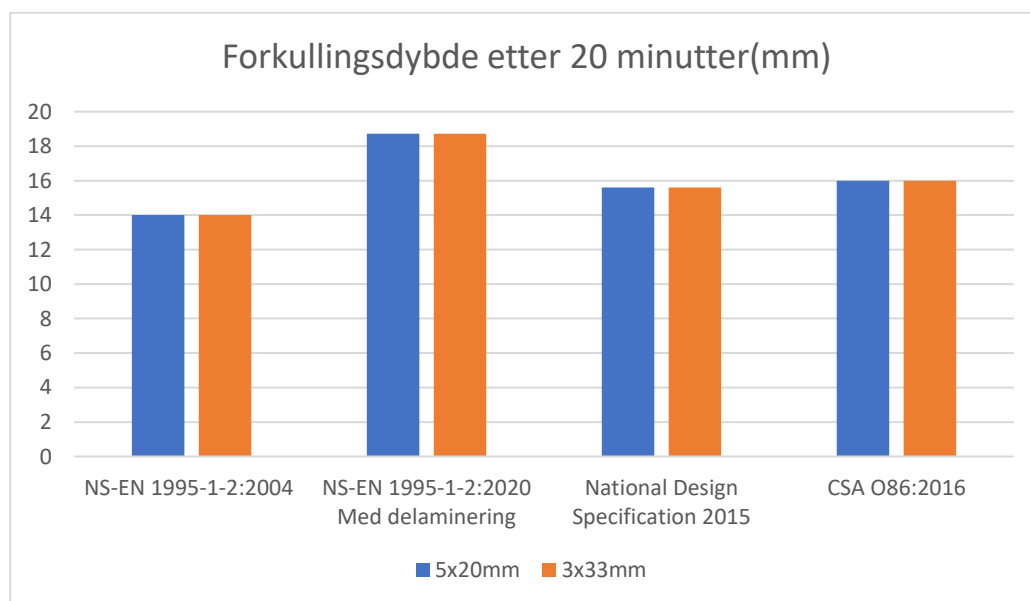


Figur 11: Beregnet forkullingsdybde etter 84 minutter.

## 5.2 Sammenligning med utprøving av forskjellige lamelltykkelser

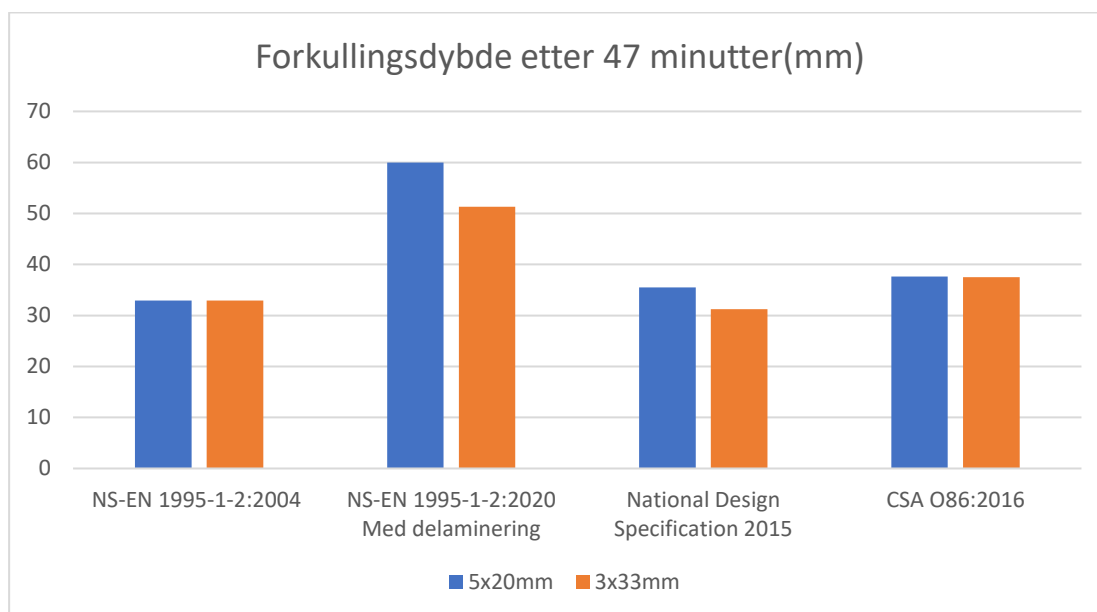
På grunn av at konsolideringsfasen for forkullet lag er 25mm eller større, skal det i tilfeller hvor det kan oppstå delaminering være mer gunstig for forkullingsdybden å bruke tykkere lameller. Vi ønsket å se hvordan dette påvirket utregningene ved å sette et 5x20mm KLT-element opp mot et 3x33mm KLT-element.

I figur 12 kan det ses at forkullingsdybden er lik, dette grunnet at forkullingen ikke har brutt gjennom første lamell i noen av tilfellene, og delaminering derfor ikke enda har kunnet finne sted beregningsmessig.



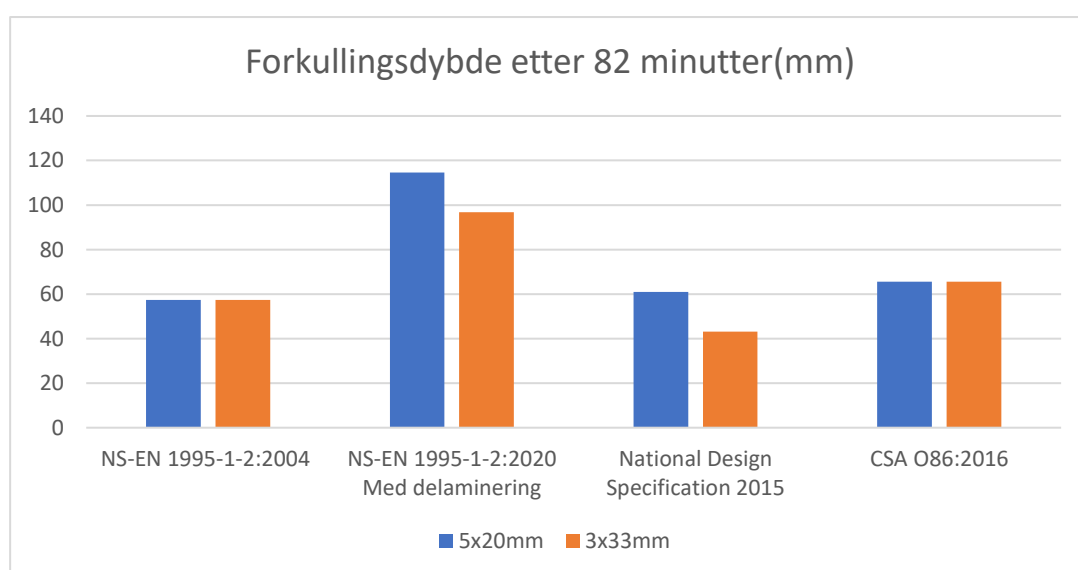
Figur 12: Sammenligning av lamelltykkelser etter 20 minutter.

I figur 13 kan det ses at det er forskjellig forkullingsdybde ved de ulike elementene ved bruk av NS-EN 1995-1-2:2020 og National Design specification 2015. Elementet med tykkere lameller har en lavere forkullingsdybde i begge utregningene. Forskjellene er størst ved bruk av NS-EN 1995-1-2:2020.



Figur 13: Sammenligning av lamelltykkelser etter 47 minutter.

Figur 14 viser en fortsettelse av observasjonene i figur x2. Samtidig kan vi se at utregninger ved bruk av National Design Specification har en reduksjon i forkullingshastighet. Ved å benytte NS-EN 1995-1-2:2020 ser vi at 5x20mm elementet allerede har opplevd gjennombrenning før 82 minutter, mens 3x33mm elementet fortsatt har et gjenværende tverrsnitt.



Figur 14: Sammenligning av lamelltykkelser etter 82 minutter.

## 6 Diskusjon

### 6.1 NS-EN 1995-1-2:2004

#### 6.1.1 Standard branneksponeering

Ved bruk av standard branneksponeering vil forkullingsdybden øke linjert med en konstant forkullingshastighet. Denne metoden kan fungere i tilfeller hvor den gjennomsnittlige forkullingshastigheten i KLT-elementene er på enten 0,65 mm/min eller 0,7 mm/min. Som vist tidligere i rapportens teoridel er det flere faktorer som påvirker forkullingshastigheten av KLT, derfor kan bruk av denne metoden gi for lave verdier for forkullingsdybde i reelle tilfeller, som vist i Figur 6 for forkullingsdybder i branntest av Moholt 50|50. Sett i sammenheng med branntesten fra Sveits ved utprøving av forskjellige limtyper ble utført, der forkullingshastigheten var på gjennomsnitt 0,57 mm/min for elementer limt med MUF-lim hvor delaminering ikke oppsto (20). Kunne utregninger med standard branneksponeering etter NS-EN 1995-1-2:2004 gitt noenlunde realistiske verdier medregnet sikkerhetsmargin.

#### 6.1.2 Parametrisk brannkurve

Beregningsmetoden med parametrisk brannkurve var den utregningsmetoden som hadde mest nøyaktig resultat, sammenlignet opp mot branntest av Moholt 50|50 ved forkullingsdybde 25mm, men den har gitt dårligere resultater lengre ut i testen. Dette var som forventet da metodene etter kriteriene gitt i standarden, i utgangspunktet ikke er gyldig etter at 25% av tverrsnittet er forkullet. Metoden sier også at forkullingsprosessen stopper etter tiden er lik  $3t_0 \approx 45 \text{ minutter}$ , som heller ikke stemmer med det reelle tilfellet i branntesten. En forutsetning for å bruke denne beregningsmetoden opp mot branntest av Moholt 50|50, var at rapporten fra branntesten inneholdt data på romstørrelse, brannkilde og åpningsmål. Ved bruk av beregningsmetoden kreves det slik data for å kunne regne seg fram til forkullingshastighet. Vi mener at beregnet  $t_0$  skulle vært høyere, dette ville ført til at man beregningsmessig ville fått et lengre brannforløp, og en riktigere forkullingskurve utover i brannforløpet. Faktorene som inngår i beregningen av er åpningsfaktor, dimensjonerende spesifikk brannenergi, og konstanten 0,009. Åpningsfaktoren er bestemt av åpningsareal, så denne er fast. Brannenergien er ikke medregnet bidraget fra massivtrekonstruksjonen, da denne er hentet fra NS-EN 1991-1-2. Et bidrag fra massivtreet ville likevel ikke vært tilstrekkelig for å ha påvirket forkullingsdybden nevneverdig, vi mener derfor at konstanten i dette tilfellet burde vært høyere, dette ville ført til et lengre brannforløp, og en riktigere forkullingsdybde fra 47 minutter og utover i brannforløpet. Vi stiller også spørsmålsteget til hvorfor verdier av forkullingsdybde



bare er gyldig når denne er mindre en/eller lik en fjerdedel av opprinnelig tverrsnittsbredde, vi ser ingen grunn til at disse verdien ikke skal kunne benyttes videre i forkullingsprosessen.

## **6.2 NS-EN 1995-1-2:2020**

### **6.2.1 Standard brannekspnering**

Foreløpig revidert utgave av NS-EN 1995-1-2 inneholder flere metoder å regne forkullingshastigheter av ubeskyttet KLT ut fra hvilke faktorer det skal tas hensyn til. Standarden tar høyde for at forkullingen ikke har en konstant hastighet gjennom hele brannforløpet, men flere forskjellige hastigheter som varierer ut ifra hvilken forkullingsfase materialet befinner seg i. Fordelen med denne utregningsmetoden er nettopp det at det er mulig å bygge opp en forkullingshastighet ut av de forskjellige modifikasjonsfaktorene. Selv om denne metoden inneholder beskrivelser om hvilke modifikasjonsfaktorer som skal brukes, bør brukeren av standarden ha forkunnskap om hvordan materialet oppfører seg ved brannekspnering. De høye beregnede verdiene skyldes lamellenes tykkelse, da disse beregningsmessig ikke er tykke nok til at det oppnås et beskyttende forkullingslag, som av standarden er satt til 25mm. Studentene stiller spørsmålsteget ved denne faste verdien, da vi antar at forkullingslaget i realiteten vil ha en beskyttende effekt fra første millimeter, som videre vil ha en beskyttende effekt som øker linjert med forkullingsdybden.

I tilfellet hvor utregning av forkullingsdybde ble sammenlignet med branntest av Moholt 50|50, ble utregningene av forkullingsdybde med delaminering langt høyere enn det reelle tilfellet. Fra rapportens teori ble det belyst viktigheten av limtyper i forhold til delaminering. Ved delaminering skal  $k_3$  faktor for forkullingsfase 3 være lik 2 for tilfeller hvor lim ikke er branntestet. Dette resulterer i en dobling av forkullingshastigheten ved delaminering. Når lamellene var under 25mm tykke vil det i teorien si at forkullingen vil holde seg på forkullingsfase 3 etter første delaminering. Rent teoretisk regnes da lamellen som ikkeeksisterende etter den har delaminert i utregningene, og brannen har helt friskt trevirke å fortsette forkullingen gjennom. I et reelt tilfelle vil delaminering skje på en mer komplisert måte slik av det kan antas at det ikke vil være like mye delaminering i et reelt tilfelle. Ved utregning av forkullingshastighet uten delaminering ble forkullingshastigheten 0,78 mm/min, denne verdien skapte lavere forkullingsdybde igjennom hele brannforløpet sett opp mot branntest av Moholt 50|50.

## 6.2.2 Parametrisk brannkurve

Ved bruk av parametrisk brannkurve i foreløpig ny revidert utgave av NS-EN 1995-1-2 er resultatene meget lik bruk av gammel standard som gjorde at målingene for 25mm forkullingsdybde ble veldig nøyaktige. I utregningene ble  $\beta_{par}$  noe høyere som resulterte i at forkullingsdybden ble litt høyere, men ikke noe markant. Revidert NS-EN 1995-1-2:2020 er ikke ferdig behandlet, noe som vises i bruk av parametrisk brannkurve. Ved forkullingsdybdeberegninger, er ikke den parametriske metoden tilpasset den nye fase-inndelingen som er beskrevet. Disse fasene gjør at man får forskjellig nominell forkullingshastighet, alt ettersom hvor i forkullingsprosessen man befinner seg, denne oppdelingen av nominell forkullingshastighet lar seg ikke lett kombinere med den parametriske metoden slik standarden er i dag. Forsøket med å innsette forkullingsfaser i parametrisk brannkurve ser vi i ettertid på som kun en utprøving av den nye standarden.

## 6.3 National Design Specification

Den amerikanske metoden for utregning av forkullingsdybde tar høyde for delaminering, men dette gir små utslag under våre beregninger. Metoden er den som treffer referanseverdiene dårligst, med unntak NS-EN-1995-1-2:2004 med standard brannkurve. Beregningsmetoden vi har brukt er hentet fra "CLT handbook US edition" utgitt i 2013. Siden det er utarbeidet reviderte utgaver siden 2013, kan vi ikke utelukke at beregningsmetoden har endret seg siden denne gang, og det er derfor mulig at den reviderte utgaven beskriver beregningsmetoder som villa ha gitt bedre verdier opp mot branntest Moholt 50|50.

## 6.4 CSA 086: 2016

Den kanadiske metoden for utregning av forkullings dybde bruker to forkullingshastigheter avhengig av om forventet forkulling bryter gjennom første lamell eller ikke. Dermed kan det antas at metoden tar hensyn til delaminering ved at forkullingshastigheten er høyere ved forkulling av flere lameller, selv om dette ikke kommer direkte frem i beskrivelsen av metoden (16). Sett opp mot resultater fra branntest Moholt 50|50 ligger verdiene for utregnet forkullingsdybde ca 10mm under reell forkullingsdybde for alle målingsdybdene av vegg. I utregningene for forkulling av tak, minker differansen mellom branntest og utregning. De beregnede verdiene er fortsatt for lave, men forkulling av tak tok litt lengre tid slik at utregningene kunne ganges med flere minutter.

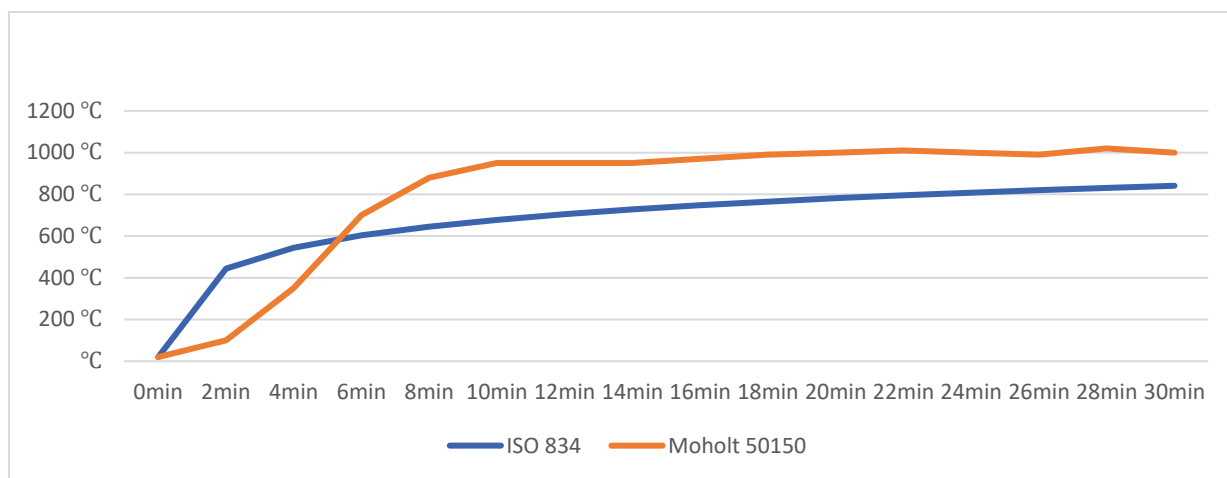
## 6.5 Sammenligning av forkulling ved bruk av ulike lamelltykkelser

Underveis i oppgaveperioden dukke det opp teori som omhandlet hvordan større tykkelse på lameller kunne påvirke forkullingsdybden til materialet som et av mindre delaminering.

Studentene synes dette kunne vært interessant å se om dette blir fanget opp av utregningene i de forskjellige standardene. Det ble gjort funn på at forkullingsdybden ble lavere ved tykkere lameller i standardene NS-EN 1995-1-2:2020 og National Design Specification, mens standard CSA 086: 2016 ikke viste noen tegn til endring. Funnene sier oss at standardene har forskjellige måter å medregne eventuell delaminering ved branneksponeering.

## 6.6 Vurdering av temperatur-tidskurver

Temperaturutviklingen som i stor grad avgjør beregnet forkulling, er ved beregninger basert på Standard brannkurve bestemt av ISO 834. Denne temperaturkurven er ikke forenelig med temperaturmålinger hentet fra Moholt 50|50, noe som gjør at beregningene ikke gjenspeiler den faktiske situasjonen. Dette kan forklare de lave verdiene for forkullingsdybde, ved beregninger utført ved bruk av NS-EN 1995-1-2.



Figur 15: Sammenligning av standard brannkurve og brannkurve Moholt 50|50

## 6.7 Vurdering av Metoden

Metoden vår har vært å regne teoretisk på forkullingsdybder i krysslaminert massivtre ved bruk av forskjellig standarder for branndimensjonering, for å deretter se om de vil være realistiske sett opp mot reelt branntilfelle. Vi har i denne oppgaven valgt å se på kun en branntest av KLT, svakheter ved å bruke kun tall fra en kilde som referanseverdi, er at det nødvendigvis ikke trenger å gi generelt bilde over hvordan en ekte brann vil oppføre seg i de fleste tilfeller. Valg av branntesten Moholt 50|50 ble tatt på grunnlag av tilgjengelighet, og at testen inneholdt gunstige målinger av forkulling på bestemte dybder i materialet. Ved utregning av forkullingsdybder har studentene brukt standarder etter beste evne, kunnskapsnivå, tilgjengelig litteratur og bakenforliggende teori. Studentene har gjennom oppgaven fått en forståelse for at brann i trematerialer er et fagområde med mange variabler hvor det kan være vanskelig å dra konklusjoner fra enkelttilfeller. Dermed er det nødvendig med mange uttestinger av materialet under brannpåkjenning for å videre kunne gjøre gode antagelser av generelt utfall ved brannpåkjenning. For å kunne oppnådd sikrere resultater på forkullingsverdier under en reell brann, ville det vært mer gunstig å bruke flere referanseverdier, men grunnet oppgavens tidsbegrensning ble det kun fokusert på en branntest.

## 7 Konklusjon

Resultatene i våre utregninger har i all hovedsak gitt lavere verdier for forkullingsdybder ved beregningsmetodene som baserer seg på standard brannkurve beskrevet i ISO 834, enn de forventede verdiene hentet fra branntest Moholt 50|50. Ved å kun bruke disse beregningene for branndimensjonering er studentene bekymret for at konstruksjoner oppført med KLT som bæremateriale, vil kunne bli underdimensjonert ved et eventuelt branntilfelle. Våre beregninger viser at standard brannkurve/ISO-kurven, ikke beskriver riktig temperaturutvikling i forhold til branntesten Moholt 50|50, noe som gir utslag ved for lave forkullingsdybder ved beregning, dette problemet har også andre forskningsrapporter belyst (20).

I våre beregninger var det kun en beregningsmetode som målte høyere verdier enn branntesten ved 47 minutter og utover i testen, det var metoden standard branneksponeering med delaminering i NS-EN 1995 1-2:2020. Denne metoden var imidlertid langt over verdier fra branntesten, noe som ville ha resultert i overdimensjonering hvis brukt som dimensjoneringsgrunnlag, dette hadde vært unngått om man i stedet for en fast beskyttende verdi på 25mm forkulling, hadde hatt en lineær tilnærming til beskytting.

Verdiene beregnet ved bruk av parametrisk brannkurve, er de som treffer verdiene fra branntesten best de første 47minuttene, men vi stiller oss kritiske til utregningen av  $t_0$ , som tidligere belyst i diskusjonskapittelet.

Med bakgrunn i diskusjonskapittelet og resultatene, kan vi konkludere med at standardiserte beregningsmetoder for forkullingshastighet, ved bruk av europeiske, amerikanske og kanadiske standarder vil gi ulike og unøyaktige forkullingsdybder, som ikke kan anses som realistiske sett opp mot den reelle situasjon av forkullingen i ubeskyttet krysslaminert massivtre ved branntest Moholt 50|50. Vi kan ikke konkludere med at alle beregningsmetodene alltid vil gi feil resultat på generell basis, da vi kun har sammenlignet med et spesifikt branntilfelle. Under våre beregninger har vi ikke oppdaget forskjeller i beregningsmetodene som kan forklares på bakgrunn av kulturelle forskjeller som ikke er faglig begrunnede, vi kan likevel ikke konkludere med at det ikke finnes kulturelle forskjeller i hvordan massivtre anvendes i praksis.

I standardene er det kun tatt høyde for om materialet delaminerer eller ikke, og hvis delaminering oppstår, skjer dette beregningsmessig når limsjiktet har en eksakt temperatur på 300°C. Limtester har vist at delaminering kan oppstå ved andre temperaturer, noe som ikke er tatt hensyn til ved beregning (20).

## 7.1 Oppsummering av funn og konklusjoner

- Beregninger basert på standard brannkurve, vil ikke gi riktig temperaturutvikling, sammenlignet med reelle branntilfeller i massivtrekonstruksjoner.
- Beregningen av tidsforløpet ved parametrisk beregningsmetode, er ikke forenelig med det faktiske brannforløpet.
- 25mm som fast verdi for når forkullingslaget har en beskyttende verdi, gjør store utslag ved beregninger av elementer med lamelltykkelser under 25mm, hvor delaminering er forventet. Man bør vurdere å omgjøre denne faste verdien til en lineær -beregnet beskyttende verdi.
- Delaminering i praksis er mer komplisert enn den teoretiske beregningsmåten, noe som kan gi unøyaktige resultater ved beregning.
- Parametrisk beregningsmetode i ny revidert NS-EN 1995-1-2, er ikke forenelig med den nye faseinndelingen av nominell forkullingshastighet, noe som gjør beregning vanskelig.
- Forkullingshastigheten og -dybden kan reduseres ved bruk av tykkere lameller på brannekspontert side.
- Gjeldende NS-EN 1995-1-2 annex A, har en feil i formel A.6 (b). Hvor  $t_o$  skal erstattes med  $t$ , denne feilen gir store utslag i beregning. Dette er bekreftet av ekstern veileder.

## 7.2 Forlag til videre arbeid

Underveis i oppgaven har vi gjort observasjoner som har gitt oss forslag til videre arbeid. Ved utregninger av forkullingshastigheter i KLT er delaminering en viktig faktor som må tas hensyn til i større grad. I oppgavens litteraturstudie kom det fram at valg av limtype avgjør hvordan KLT vil delaminere, hvor limtypen som er brukt i materialet er avgjørende for når delaminering vil oppstå. Det ville derfor være hensiktsmessig å innhente mer data på brannmotstand av lim, for så å implementere flere modifikasjonsfaktorer for de forskjellige limtypene det er godkjent å bruke i KLT.

## 8 Etterord

Motivasjonen hos forfatterne for å velge denne bacheloroppgaven har vært å tilegne seg ny kunnskap om krysslaminert massivtre og materialets bygningsfysikk under brannpåkjenning. Kunnskapsnivået før oppgavestart innenfor brann i bygninger har vært begrenset til bruk av preaksepterte løsninger i TEK17. Med andre ord har læringskurven under oppgaveperioden vært bratt og meget interessant. Forfatterne har underveis i oppgaveperioden fått stor respekt for fagområdet brann, og spesielt branndimensjonering av trematerialer. Det har blitt forstått av forfatterne at forkulling av trematerialer krever en bred forståelse av faget da det består av en rekke forskjellige variabler som påvirker brannforløpet. Med vårt utgangspunkt for oppgaven har det vært nødvendig med faglig påfyll underveis og omfattende litteraturstudie. Selv om massivtre-materialet har eksistert i Europa siden 90-tallet er det et relativt ungt konstruksjonsmateriale sett opp mot betong og stål. Det er derfor fortsatt et stort potensial for å kunne gjøre nye funn i forskning som gjør at materialet kan brukes mer effektivt.

Til slutt vil vi igjen takke våre veiledere som innehar høy kompetanse innenfor fagområde. Intern veileder har i tillegg til å være veileder, forlest i faget brannteknikk som forfatterne har tatt parallelt med bacheloroppgaven, uten dette faget hadde det blitt vanskeligere løse denne oppgaven. Ekstern veileder har vært behjelpelig med å svare på eventuelle spørsmål forfatterne har hatt under oppgaveperioden. Begge veilederne har vært svært behjelpelig med å fremlegge relevant litteratur fra egne- og andres publikasjoner, noe som har vært en suksessfaktor for oppgaven.

En stor takk til:

- Anne Elise Steen-Hansen, intern veileder v/NTNU
- Kathinka Leikanger Friquin, ekstern veileder v/Sintef community

## Litteraturliste

1. Bærekraftig utvikling [internett]. Norge: FN; 2019 [hentet 17.03.2021]  
Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>
2. Olerud, K. Verdenskommisjonen for miljø og utvikling: Store Norske Leksikon; 2020 [hentet 17.03.2021].  
Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Verdenskommisjonen\\_for\\_milj%C3%B8\\_og\\_utvikling](https://snl.no/Verdenskommisjonen_for_milj%C3%B8_og_utvikling)
3. Ravdal, EJ. FNs bærekraftsmål: Store Norske Leksikon; 2020 [hentet 17.03.2021]. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/FNs\\_b%C3%A6rekraftsm%C3%A5l](https://snl.no/FNs_b%C3%A6rekraftsm%C3%A5l)
4. Aasheim, E. -bygge med Massivtreelementer [internett]. Oslo: Norsk treteknisk institutt; 2006 [hentet 17.03.2021]. Tilgjengelig fra:  
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-1-Generelt.pdf>
5. Direktoratet for byggkvalitet. TEK17. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet; 2017 [hentet 17.03.2021]. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>
6. Treteknisk. Fokus på tre: Tre og miljø; 2004 [hentet 17.03.2021]. Tilgjengelig fra:  
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-8.pdf>
7. Fuglseth, M. Utredning av livsløpbaserte miljøkrav i TEK. Sandvika Direktoratet for byggkvalitet; 02.02.2018. tilgjengelig fra:  
[https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/utredning\\_av\\_livslopsbaserte\\_miljokrav\\_i\\_tek\\_asplan\\_viak\\_2018.pdf](https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/utredning_av_livslopsbaserte_miljokrav_i_tek_asplan_viak_2018.pdf)
8. Byggforsk S. 471.010. Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer. Sintef: byggforsk; 2020 [hentet 17.03.2021]. Tilgjengelig fra:  
[https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet\\_og\\_varmemotstand\\_for\\_bygningsmaterialer](https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer)
9. Drysdal, D. An Introduction to Fire Dynamics. 3.utg. Storbritannia: John Witley and sons; 2011.
10. Liebe, G. Flammebrann: Store Norske Leksikon; 2020 [hentet 22.03.2021]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/flammebrann>
11. Treteknisk. Fokus på tre: Tre og brann; 2004 [hentet 22.03.2021]. Tilgjengelig fra:  
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-37.pdf>
12. Reitan NK, Friquin KL. Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger. Sted ukjent: Research Institutes of Sweden; 2019 [hentet 13.04.2021].  
Tilgjengelig fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2019/20385brannsikkerhet-ved-bruk-av-klt-rapport-9-2019.pdf>



13. Aarstad, J. Fokus på tre: Massivtre. Oslo: Treteknisk; 2011 [hentet 15.04.2021]  
Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/20-Massivtre.pdf>
14. Rimelige ungdomsboliger i massivtre [internett]. Oslo: Norsk arkitekters landsforbund; 2016 [hentet 15.04.2021]. Tilgjengelig fra: <https://www.arkitektur.no/svartlamoen-barekraftige-ungdomsboliger?nid=216801&ecomea=6228e1e6-2e4b-41e7-95b5-623265d5773c>
15. Mjøstårnet blir enda høyere [internett]. Moelv: Moelven; 2018 [hentet 15.04.2021].  
Tilgjengelig fra: <https://www.moelven.com/no/aktuelt-og-nyheter/nyhetsarkiv/2018/mjostarnet-blir-enda-hoyere/>
16. Karacabeyli E, Gagnon S. Canadian CLT handbook. 2019. Utg. Quebec: FPinnovations; 2019
17. Hox, K. Branntest av massivtre. Trondheim: SP Fire Research AS; 2015.  
Tilgjengelig fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2015/spfr-a15101-branntest-av-massivtre.pdf>
18. McGregor, CJ. Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires. Ottawa: Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering; 2013 [Hentet 27.04.2021].
19. Hakkarainen, T. Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments. Finland: VTT Building and Transport, Fire Research; 2002 [Hentet 27.04.2021].
20. Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jöbstl. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. Sveits: J Fire saf; 2009 [Hentet 01.05.2021]
21. Magnusson, B. MOHOLT 50|50 STUDENTTÅRN BRANNKONSEPT. Trondheim: Rambøll; 2016. Rapport 5.
22. Industry Progress Report [internett]. USA: AWC; 2018 [hentet 19.04.2021] Tilgjengelig fra: <https://awc.org/pdf/awc/AWC-IndustryProgressReport-1901.pdf>
23. Harmathy, T. Z.; Sultan, M. A.; MacLaurin, J. W. Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 fire resistance tests. Canada: National Research Council of Canada; 1987. [Hentet 26.04.2021].  
Tilgjengelig fra: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=4ee2759d-c870-4b91-a182-a017c04c50e9>
24. Norsk standard. NS-EN 1995-1-2:2020. Design of timber structures. Norge: Norsk standard; 2020. [Hentet 10.05.2021]
25. Norsk standard. NS-EN 1995-1-2:2004. Brannteknisk dimensjonering. Norge: Norsk standard; 2004. [hentet 10.05.2021]

26. Lov om planlegging og byggesaksbehandling. Oslo: Kommunal- og moderniseringdepartementet; 2008. Hentet [12.05.2021]. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>
27. Parisavtalen[internett]. Norge: FN-sambandet; 2020. Hentet [29.04.2021]. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>
28. Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent[internett]. Oslo: Regjeringen; 2020 [hentet 29.04.2021]. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/>
29. Buchanan AH, Abu AK. Structural Design for Fire Safety. 3. Utgave. United Kingdom: John Wiley & sons; 2017.
30. Edvardsen KI, Ramstad TØ. Trehus. 10. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag; 2014.
31. Hindklev, J (2020) Advarer mot å bygge høyt med massivtre som hovedbærekonstruksjon, *Bygg.no*. Tilgjengelig fra: <http://www.bygg.no/article/1420345> (Hentet: 01.04.2021).
32. Bovim, NI. 2013. Universitetet for Miljø- og Biovitenskap. *Hvor langt og høyt kan treet strekkes?* Tilgjengelig fra: <https://trearkitektur.files.wordpress.com/2013/02/hvor-langt-og-hc3b8yt-kan-treet-strekkes.pdf>

## Vedlegg

- A) Beregninger Moholt 50|50
- B) Verdier fra beregninger
- C) Artikkel
- D) Plakat