

Vedlegg A, Beregninger

I dette vedlegget vil vi vise fremgangsmåte for beregninger gjennomført i hovedoppgaven. Alle beregninger som er gjort, er gjennomført med samme fremgangsmåte som vist her. Da beregninger i stor grad er gjort ved hjelp av kalkulator, vil vi her kun vise fremgangsmåten ved 20minutter branneksporing av 5*20mm lameller. Noe av innholdet av vedlegget fremkommer også frem i hovedrapporten. Kilder som kun er bruk i vedlegg, finnes på siste side av vedlegg. Henvisninger til formler finnes i hovedrapport.

Innhold

Forkullingshastighet og -dybde med standard branneksporing etter NS-EN 1995-1-2:2004.....	1
Forkullingshastighet og -dybde med parametrisk branneksporing etter NS-EN 1995-1-2:2004	2
Forkullingshastighet og -dybde med standard branneksporing etter NS-EN 1995-1-2:2020.....	7
Forkullingshastighet og -dybde med parametrisk branneksporing etter NS-EN 1995-1-2:2020	9
Forkullingshastighet og -dybde etter NDS (National Design Specification) 2015	10
Forkullingshastighet og -dybde etter CSA O86: 2016 Annex B.....	13
Kilder	15

Forkullingshastighet og -dybde med standard branneksporing etter NS-EN 1995-1-2:2004

$$\beta_0 \text{ for massivtre} = 0,65 \frac{mm}{min}$$

$$\beta_n \text{ for massivtre} = 0,70 \frac{mm}{min}$$

β_0 kan brukes så fremst tverrsnittets opprinnelige bredde oppfyller krav til minimum tykkelse, hvis bredden er mindre må β_n benyttes. Dette er beskrevet av likning 3.3.

Vedlegg A

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

$$\text{Hvor: } d_{char,0} = \beta_o * t$$

$$d_{char,0,20min} = 0,65 \frac{mm}{min} * 20 \text{ min} = 13mm$$

$$b_{min} = 2 * d_{char,0,20min} + 80$$

$$= 2 * 13mm + 80mm$$

$$= 106mm$$

Siden $100mm < 106mm$ må β_n benyttes.

$$d_{char,n,20min} = \beta_n * t$$

$$= 0,70 \frac{mm}{min} * 20min$$

$$= 14mm$$

Forkullingshastighet og -dybde med parametrisk branneksponeering etter NS-EN 1995-1-2:2004

For å ha en referanse for beregnings-resultater bruker vi «Branntest massivtre» utført av SP fire reserch for prosjektet Moholt 50|50. På denne måten har vi ikke bare en forventet forkulling som basis for sammenligning, men vi har også alle nødvendig opplysninger knyttet til arealer, overflater, og åpninger som er nødvendige opplysninger ved beregning med bruk av parametrisk brannkurve. Vi bruker Spitkons tekniske godkjenning for krysslimt tre (1), som bakgrunn for verdier for densitet, spesifikk varmekapasitet, og varmekonduktivitet, disse er også forenelige med byggforsk sine oppgitte verdier for materialet (2).

Hybelleiligheten som ble testet hadde en grunnflate på $2300mm * 5750mm = 13,2$

kvadratmeter. Leiligheten hadde en innvendig takhøyde på 2750mm, en dør med modulmål 900mm*2000mm, og ett vindu på 1200mm*1600mm. Tak, samt en langvegg og en kortvegg bestående av ubeskyttet massivtre, bestående av 5 lamellsjikt på 20mm vær, noe som gir en

Vedlegg A

total veggtykkelse på 100mm. De resterende veggene besto av samme type massivtreelementer, men var kledd med gips. Gulvet besto av linoleum.

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.

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

Hvor:

Symbol	Navn	Gitt av	Benevning
Γ	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
ρ	omsluttende bygningsdelers massetetthet	—	$\frac{Kg}{m^3}$
c	omsluttende bygningsdelers spesifikke varmekapasitet	—	$\frac{J}{Kg * K}$
λ	omsluttende bygningsdelers varmekonduktivitet	—	$\frac{W}{m * K}$

Under testen ble døren satt i åpen stilling, da dette fører til mer oksygen og skaper et verre scenario for brannutvikling, denne stillingen ble derfor vurdert til mest ugunstige situasjonen under en eventuell brann. Døren regnes derfor som en åpning i beregning.

Vedlegg A

$$h_{eq} = \sum \frac{A_i * h_i}{A_v} = \frac{(1,2m * 1,6m) * (1,6m)}{(1,2m * 1,6m) + (0,9m * 2m)} + \frac{(0,9m * 2m) * (2m)}{(1,2m * 1,6m) + (0,9m * 2m)} = 1,79m$$

Siden branncellen har overflater av forskjellige materialer, må man regne ut en vektet sum av varmeegenskapene med hensyn til areal. Verdiene til gips er hentet fra betongelementboka (3), og Norgips produktdatablad for 13mm standard gips (4). Verdiene til linoleum er hentet fra byggforsk (2), og teknisk informasjonsblad Mormoleum (5).

$$b_{mt} = \sqrt{\rho_{mt} * c_{mt} * \lambda_{mt}} = \sqrt{420 \frac{Kg}{m^3} * 1600 \frac{J}{Kg * K} * 0,12 \frac{W}{m * K}} \approx 284 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}$$

$$b_{gips} = \sqrt{\rho_{gips} * c_{gips} * \lambda_{gips}} = \sqrt{720 \frac{Kg}{m^3} * 800 \frac{J}{Kg * K} * 0,25 \frac{W}{m * K}} \approx 379 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}$$

$$b_{lin} = \sqrt{\rho_{lin} * c_{lin} * \lambda_{lin}} = \sqrt{120 \frac{Kg}{m^3} * 2000 \frac{J}{Kg * K} * 0,17 \frac{W}{m * K}} \approx 202 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}$$

$$A_{mt} = ((5,75m + 2,3m) * 2,75m) + (2,3m * 5,75m) - (0,9m * 2m) = 33,6m^2$$

$$A_{gips} = ((5,75m + 2,3m) * 2,75m) - (1,2m * 1,6m) = 20,2m^2$$

$$A_{linoleum} = (2,3m * 5,75m) = 13,2m^2$$

$$b = \frac{\sum(b_j * A_j)}{(A_t - A_v)}$$

Vedlegg A

$$= \frac{\left(284 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K} * 33,6m^2\right) + \left(379 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K} * 20,2m^2\right) + \left(202 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K} * 13,2m^2\right)}{33,6m^2 + 20,2m^2 + 13,2m^2}$$

$$= 296 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}$$

$$O = \frac{A_v}{A_t} * \sqrt{h_{eq}} = \frac{3,72m^2}{70,7m^2} * \sqrt{1,79m} = 0,0703m^{\frac{1}{2}}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = \frac{\left(\frac{0,0703m^{\frac{1}{2}}}{296 \frac{J}{m^2 * s^{\frac{1}{2}} * K}}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = 47,4$$

Med $\beta_n = 0,7 \frac{mm}{min}$ fra tabell 3.1 i NS – EN 1995 – 1 – 2

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 * 0,7 \frac{mm}{min} * \frac{(0,2 * \sqrt{47,4}) - 0,04}{(0,16 * \sqrt{47,4}) + 0,08} = 1,19 \frac{mm}{min}$$

For videre å kunne beregne forventet forkullingsdybde må man vite t_0 , som er tiden med antatt konstant forkullingshastighet.

$$t_0 = 0,009 * \frac{q_{t,d}}{O}$$

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

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t}$$

Vedlegg A

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

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_1 * \delta_2 * \delta_n$$

Hvor:

Symbol	Navn	Gitt av	Benevning
$q_{f,k}$	Karakteristisk spesifikk brannenergi	Tabell E.4	$\frac{Mj}{m^2}$
m	Forbrennings-faktor	E.3	—
δ_1	Areal-faktor	Tabell E.1	—
δ_2	Bruks-faktor	Tabell E.1	—
$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$	Faktor for aktive brannsikrings-tiltak	Tabell E.2	—

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_1 * \delta_2 * \delta_n$$

$$= 780 \frac{Mj}{m^2} * 0,8 * 1,1 * 1 * 1$$

$$= 686 \frac{Mj}{m^2}$$

Brannlasten som branncellen i testen ble utsatt for var $658 \frac{Mj}{m^2}$, dette tilsvarer tilnærmet

samme last som under utregning, vi velger å bruke brannlasten oppgitt fra testen, da denne vil gi best grunnlag for sammenligning.

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t}$$

$$= 658 \frac{Mj}{m^2} * \frac{13,2m^2}{70,7m^2}$$

Vedlegg A

$$= 123 \frac{Mj}{m^2}$$

$$t_0 = 0,009 * \frac{q_{t,d}}{O}$$

$$= 0,009 * \frac{128 \frac{Mj}{m^2}}{0,0703 m^{\frac{1}{2}}}$$

$$= 15,7 \text{min}$$

For videre å beregne forkullingsdybde, må vi velge likning etter hvilken fase/tid brannen befinner seg i.

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

For $t = 20 \text{min}$ og $t_0 = 15,7 \text{min}$ blir dette da:

$$\begin{aligned} d_{char} &= \beta_{par} \left(1,5 * t - \frac{t^2}{4 * t_0} - \frac{t_0}{4} \right) \\ &= \beta_{par} \left(1,5 * 20 \text{min} - \frac{(20 \text{min})^2}{4 * 15,7 \text{min}} - \frac{15,7 \text{min}}{4} \right) \\ &= 1,19 \frac{mm}{min} \left(1,5 * 20 \text{min} - \frac{(20 \text{min})^2}{4 * 15,7 \text{min}} - \frac{15,7 \text{min}}{4} \right) \\ &= 23,4 \text{mm} \end{aligned}$$

Forkullingshastighet og -dybde med standard brannekspnering etter NS-EN 1995-1-2:2020

For vertikale ubeskyttete massivtre-veggelementer hvor lamellene har en tykkelse på mindre en 25mm og delaminering kan forventes, vil forkullingshastigheten variere igjennom

Vedlegg A

brannforløpet. Den vil da gå fra fase 1 til fase 3, og på grunn av at lamellen er under 25mm vil det aldri oppnås en fase 4. Dette beskrives i NS-EN 1995-1-2:2020 formel 7.13 og 7.12.

$$\beta_n = \prod_{k_i} k_i * \beta_0 \rightarrow 1,2 * k_g * \beta_0$$

Hvor:

β_0 er gitt av tabell 5.2

k_g = Faktor for mellomrom. Gitt av formel 7.2.3(2)

$$\beta_n = 1,2 * k_g * \beta_0$$

$$= 1,2 * 1,2 * 0,65 \frac{mm}{min}$$

$$= 0,936 \frac{mm}{min}$$

$$d_{char,n,20min} = \beta_n * t$$

$$= 0,936 \frac{mm}{min} * 20min$$

$$= 18,72mm$$

Siden man ikke oppnår en forkullingsdybde større en tykkelsen på første lamell, vil man ikke oppleve en fase 3 under dette tidsintervallet.

For vertikale eksponerte massivtre-veggelementer hvor lamellene har en tykkelse på mindre en 25mm, og delaminering ikke er forventet, er forkullingshastigheten konstant igjennom hele brannforløpet, dette da fase 1 og 4 vurderes til å være identiske under beregning. Dette beskrives i NS-EN 1995-1-2:2020 formel 7.10.

$$\beta_n = \prod_{k_i} k_i * \beta_0 \rightarrow k_g * \beta_0$$

Vedlegg A

Hvor:

β_0 er gitt av tabell 5.2

k_g = Faktor for mellomrom. Gitt av formel 7.2.3(2)

$$\beta_n = k_g * \beta_0$$

$$= 1,2 * 0,65 \frac{mm}{min}$$

$$= 0,78 \frac{mm}{min}$$

$$d_{char,n,20min} = \beta_n * t$$

$$= 0,78 \frac{mm}{min} * 20min$$

$$= 15,6mm$$

Forkullingshastighet og -dybde med parametrisk brannekspnering etter NS-EN 1995-1-2:2020

Fremgangsmetoden for beregning av forkullingshastighet og -dybde med bruk av parametrisk brannekspnering er identisk i begge versjoner av NS-EN 1995-1-2, men man vil få en annen β_{par} , da β_n vil få en annen verdi etter beregning, som beskrevet under «Forkullingshastighet og -dybde med standard brannekspnering etter NS-EN 1995-1-2:2020».

.

For massivtre som delaminerer:

$$\beta_n = 0,936 \frac{mm}{min}$$

For massivtre som ikke delaminerer:

$$\beta_n = 0,78 \frac{mm}{min}$$

Vedlegg A

Forkullingshastighet ved delaminering:

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 * 0,936 \frac{mm}{min} * \frac{(0,2 * \sqrt{47,4}) - 0,04}{(0,16 * \sqrt{47,4}) + 0,08} = 1,58 \frac{mm}{min}$$

Forkullingshastighet uten delaminering:

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 * 0,78 \frac{mm}{min} * \frac{(0,2 * \sqrt{47,4}) - 0,04}{(0,16 * \sqrt{47,4}) + 0,08} = 1,32 \frac{mm}{min}$$

Forkullingsdybde ved delaminering:

$$\begin{aligned} d_{char} &= \beta_{par} \left(1,5 * t - \frac{t^2}{4 * t_0} - \frac{t_0}{4} \right) \\ &= 1,58 \frac{mm}{min} \left(1,5 * 20min - \frac{(20min)^2}{4 * 15,7min} - \frac{15,7min}{4} \right) \\ &= 31,13mm \end{aligned}$$

Forkullingsdybde uten delaminering:

$$\begin{aligned} d_{char} &= \beta_{par} \left(1,5 * t - \frac{t^2}{4 * t_0} - \frac{t_0}{4} \right) \\ &= 1,32 \frac{mm}{min} \left(1,5 * 20min - \frac{(20min)^2}{4 * 15,7min} - \frac{15,7min}{4} \right) \\ &= 26,01mm \end{aligned}$$

Forkullingshastighet og -dybde etter NDS (National Design Specification) 2015

Den Amerikanske beregningsmetoden for forkulling og forkullingshastighet, 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 834-kurven. Disse kurvene er ikke identiske, men sammenfaller noenlunde. Den

Vedlegg A

Amerikanske standarden bruker også tommer og timer som benevning, i stedet for millimeter og minutter, så dette må konverteres om, for å lettere kunne gjennomføre en sammenligning. Metoden er beskrevet i både National Design Specification, og CLT Handbook, USA edition.

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

Hvor:

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

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

β_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, eventuelt der tverrsnittet har en forventet temperatur på 300°C.

$$\begin{aligned}\beta_{n.1} &= \frac{1,5 \frac{in.}{hr}}{t^{0,187}} \\ &= \frac{1,5 \frac{in.}{hr}}{\left(\frac{1}{3} timer\right)^{0,187}} \\ &= 1,84 \frac{in.}{hr} = 0,78 \frac{mm}{min}\end{aligned}$$

$$a_{char} = 0,78 \frac{mm}{min} * 20min = 15,6mm$$

Vedlegg A

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

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

Hvor:

n_{lam} = Antall lameller som kan delaminere

h_{lam} = Lamelltykkelse

t_{gi} = Tid for forkulling til limlag

$$\begin{aligned} t_{gi} &= \left(\frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1,23} \\ &= \left(\frac{0.787 in.}{1,5 \frac{in.}{hr}} \right)^{1,23} \\ &= 0,452 hr \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{lam} &= INT \left(\frac{t}{t_{gi}} \right) \\ &= INT \left(\frac{\frac{1}{3} hr}{0,452 hr} \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Siden $0,452 hr > 0,33 hr$, og $n_{lam} = 0$, vil ikke den første lamellen kunne delaminere de første 20 minuttene, og man kan derfor ikke bruke denne formelen for utregninger de første 0,452 timene av brannforløpet.

Vedlegg A

Forkullingshastighet og -dybde etter CSA O86: 2016 Annex B

Den kanadiske beregningsmetoden for forkullingshastighet og-dybde minner mye om metoden beskrevet i NS-EN 1995-1-2:2004. Faste verdier for forkullingshastigheter er oppgitt, men hvor man i NS-EN 1995-1-2:2004 bestemmer disse ut fra en minimum opprinnelig tverrsnittsbredde, bestemmes disse her ut fra hvor dyp forkulling man forventer å få under ett gitt tidsforløp som bestemmes ut fra hvilken klassifisering veggen har. Denne metoden er gjengitt i «Canadian CLT handbook 2019 edition».

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

Hvor:

$$x_{c,0} = \beta_0 * t$$

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

Hvor:

$$x_{c,0} = \beta_n * t$$

Tar utgangspunkt i Moholt 50/50. Siden dette bygget er i brannklasse 3 på bakgrunn av risikoklasse og antall tellende etasjer, skal hovedbæresystemet bestå av REI90 vegger.

$$\begin{aligned} x_{c,0} &= \beta_n * t \\ &= 0,80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} * 90 \text{min} \\ &= 72 \text{mm} \end{aligned}$$

$72 \text{mm} > 20 \text{mm} \rightarrow$ Må da bruke β_n

Vedlegg A

For 20 minutter:

$$x_{c,0} = \beta_n * t$$

$$= 0,80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} * 20 \text{min} = 16 \text{mm}$$

Vedlegg A

Kilder

1. Spitcon, teknisk godkjenning Nr. 20712. Norge: Sintef; xxxx [hentet 20.03.2021].
Tilgjengelig fra: <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/10184>
2. Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer. Norge: Byggforsk; 2020 [hentet 20.03.2021]. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer
3. E2 Varmelagring. Norge: Betongelement-foreningen; 2008 [hentet 20.03.2021].
Tilgjengelig fra:
https://betongelementboka.betongelement.no/betongapp/BindE/Del_1/E2/2_1_Termisk_masse_som_energiresservoator.pdf
4. Produktdatablad standard 13mm. Norge: Norgips; 2017 [hentet 21.03.2021].
Tilgjengelig fra: <https://export.byggjeneste.no/api/media/432b1e42-3bc7-443e-a84a-31aa6ebee7f?download=false>
5. Teknisk informasjon marmoleum. Norge: Forbo; xxxx [hentet 21.03.2021].
Tilgjengelig fra:
<https://forbo.blob.core.windows.net/forbodocuments/26182/Teknisk%20informasjon%20Marmoleum.pdf>