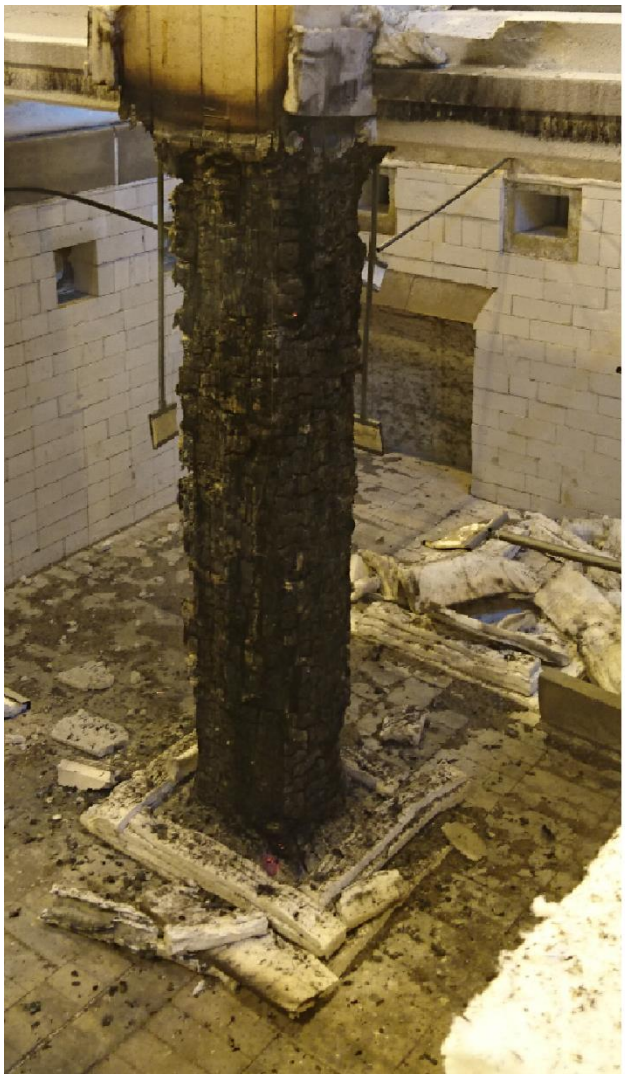
RAPPORT

Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner

Vurdering av resultater fra branntest



Kunde:	Norske Limtreprodusenters forening
Prosjekt:	FOU – Trekonstruksjoner
Prosjektnummer:	640670
Dokumentnummer:	RIBr01
Rev.:	00

Sammendrag:

Denne rapporten vurderer resultater fra en branntest av limtrekonstruksjoner opp mot et fullstendig brannforløp. Testen ble utført av SP Fire Research etter anvisning fra Sweco. Sweco vurderer resultatene fra testen opp mot et fullstendig brannforløp. Rapporten er utarbeidet i samarbeid med Norske Limtreprodusenters Forening, som også finansierte testen.

Tre limtresøyler ble påkjent en standard brann (standard tid/temperaturkurve iht. NS-EN 1363-1) i 90 minutter, tilsvarende ytelseskrav til fullstendig brannforløp for ubrennbare konstruksjoner i VTEK. Temperaturforløpet, også i avkjølingsfasen, ble målt for å undersøke hvordan store limtrekonstruksjoner forkuller ved synkende temperaturer.

Det totale testforløpet var på 5,5 timer, og viste at forkullingen i all hovedsak stanser. Bortsett fra i hjørnene var det ingen målepunkter i søylene innenfor 70 mm inn i treverket som viste temperaturer over 300 °C.

Det ble også testet et knutepunkt, med og uten tetting av dybelhull med spuns. Det ble ikke observert temperaturer som medfører signifikant svekkelse i stålets bæreevne. Maksimal temperatur i stålet var under 200 °C for stålplatene og 270 °C for ytterkant av dybler. Tetting med spuns førte ikke til noen synlig endring i temperaturforløpet i stålet.

Testen viser at forkullingen stanser. Limtrekonstruksjoner kan dermed dimensjoneres til å opprettholde sin bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp.

Funksjonskrav til hovedbæresystem i brannklasse 3 og 4 i Teknisk forskrift kan derfor tilfredsstilles ved riktig dimensjonering av et bæresystem i limtre.

Rapportstatus:

☒ Endelig
☐ Oversendelse for kommentarer
☐ Utkast/internt

Utarbeidet av:	Sign.:
Even Andersen	
Kontrollert av:	Sign.:
Leif Tore Isaksen	
Oppdragsleder:	Oppdragsansvarlig:
Even Andersen	Cato Eigeland

Revisjonshistorikk:

00	03.04.17	Originalversjon	NOEVAN	NOLEIF
Rev.	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet av	Kontrollert av

Sweco
Drammensveien 260

NO-0212 Oslo, Norge
Telefon +47 67 12 80 00

www.sweco.no

Sweco Norge AS
Org.nr: 967032271
Hovedkontor: Oslo

Even Andersen
Sivilingeniør
Brann og sikkerhet

Mobil +47 991 52 925
even.andersen@sweco.no

Innholdsfortegnelse

1 Innledning 4
2 Bakgrunn 5
2.1 Limtre 5
2.2 Forkulling/Forbrenning av tre 6
2.3 Brannforløp 7
3 Testoppsett 10
3.1 Valg av testforløp 11
3.2 Beskrivelse prøvestykker 12
4 Testresultater og tolkninger 15
4.1 Tidslinje 15
4.2 Temperaturforløp i søyler 19
4.3 Temperaturforløp i ovn 23
4.4 Forkullingsforløp i søyler 24
5 Konklusjon 26
6 Referanser 27
7 Vedlegg 27

1 Innledning

Denne rapporten vurderer resultater fra en branntest opp mot fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner. Rapporten er utarbeidet i samarbeid med Norske Limtreprodusenters Forening[1]. Rapporten er utarbeidet etter en branntest der limtresøyler ble utsatt for 90 minutters standardbrann (standard tid/temperaturkurve iht. NS-EN 1363-1) og påfølgende avkjøling. Testen ble utført av SP Fire Research etter anvisning fra Sweco. Sweco vurderer resultatene fra testen opp mot et fullstendig brannforløp.

Rapporten er i hovedsak utarbeidet på bakgrunn av *Prøverapport 150060-05 brannteknisk prøvning av limtresøyler basert på NS-EN 1363-1,* men inneholder i tillegg informasjon om bakgrunnen for testen, egne observasjoner under testforløpet, samt vurdering av resultater opp mot aktuelle funksjonskrav til brannmotstand for bæresystem i bygg iht. Byggteknisk forskrift (TEK).

Følgende dokumenter danner underlag for vurderinger og dokumentasjon i denne rapporten:

Dokument	Datert	Innhold	Utført av
SPFR rapport 150060-05	*26.08.2016*	Brannteknisk prøvning av limtresøyler basert på NS-EN 1361-1	SP Fire Research
Limtreboka	*Juni 2015*		Limtreforeningen
Bruk av massivtre i høyere byggverk	*30.11.2010*	FoU prosjekt om bruk av bærende konstruksjoner i tre i bygg i BKL 3.	Sweco Norge AS, tidligere NBC
TEK10/VTEK	*15.07.2016*	Teknisk forskrift m/veiledning	DiBK

[1] Norske Limtreprodusenters Forening består av Vestlandske Limtre industri AS, Sørlaminering AS og Moelven Limtre AS

2 Bakgrunn

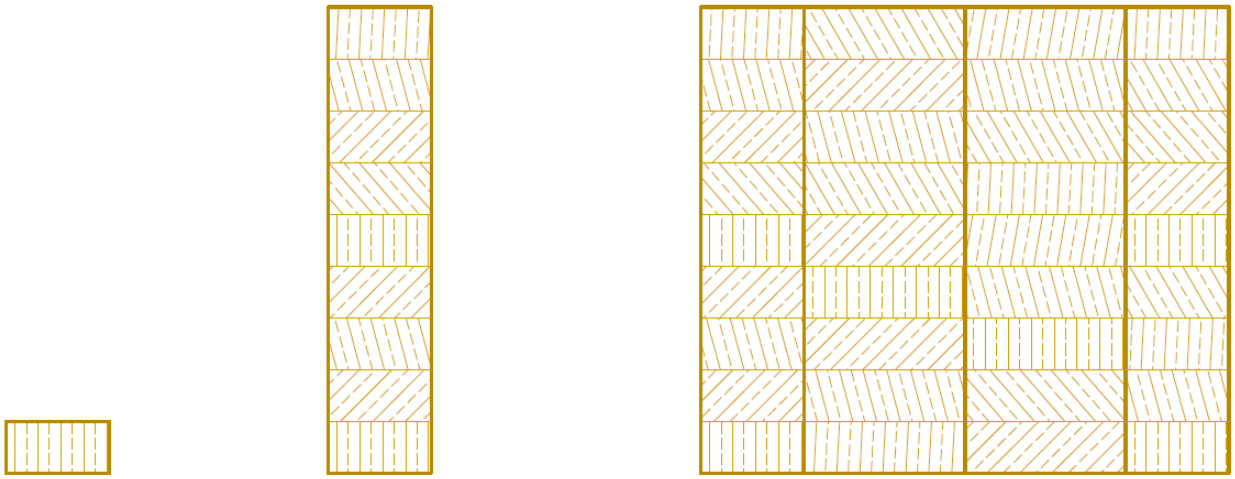
2.1 Limtre

Limtre er et bearbeidet treprodukt. Lameller av styrkesortert konstruksjonsvirke kombineres og limes til konstruksjoner av varierende form og størrelse.

Limtre har egenskaper på både styrke og stivhet som er markant bedre enn for konstruksjonsvirke av tilsvarende dimensjon. På grunn av stor styrke i forhold til vekt kan det brukes i praktisk talt alle typer bærende konstruksjoner, fra eneboliger til fleretasjes bygg, haller, sportsarealer og vegbruer.

Limtre er ofte et førstevalg i prosjekter med høy arkitektonisk verdi og har gode egenskaper i et miljøperspektiv med hensyn til CO_2-lagring, samt at det er en fornybar ressurs.

Limtre produseres ved å lime lameller av konstruksjonsvirke sammen til en bjelke. Lamelltykkelsen i limtre er normalt mellom 33-45 mm og fiberretningen er sammenfallende med komponentens lengderetning. Bjelker kan deretter limes sammen til å danne større tverrsnitt - blokker.

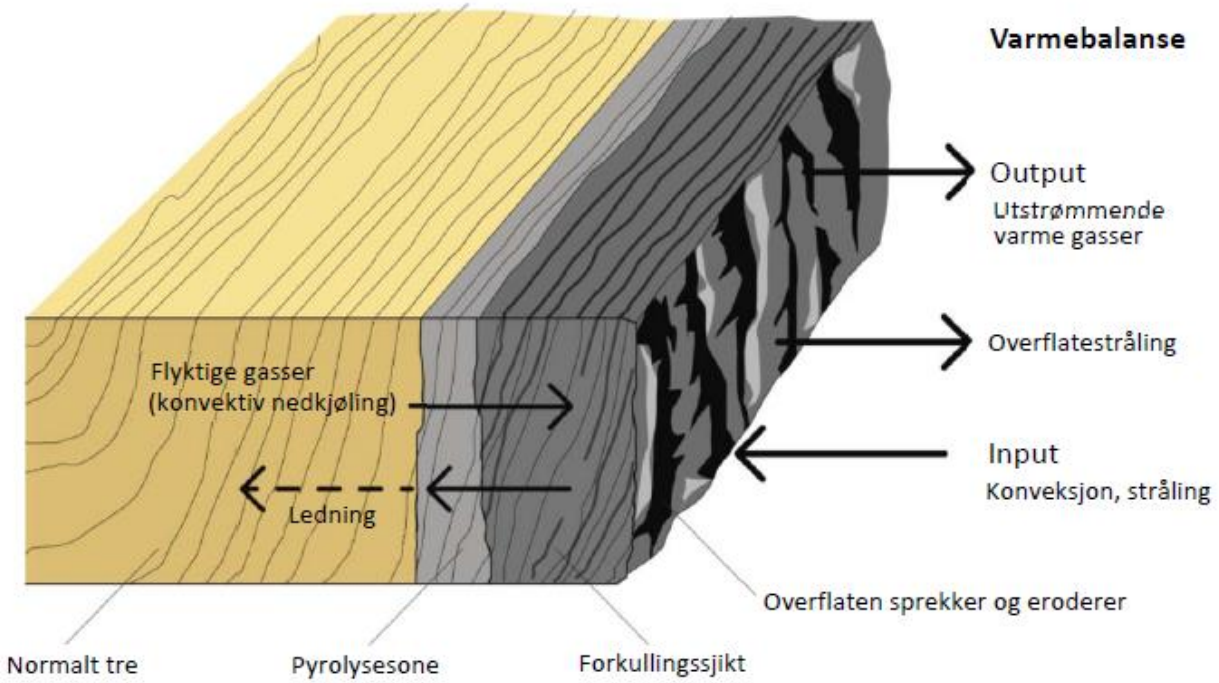


Figur 1: Konstruksjonsvirke (lamell), bjelke og blokklimt tverrsnitt.

Limtre må ikke forveksles med massivtre (CLT), som er større elementer med lameller som limes med fiberretning rotert 90° mellom lagene av lamellene. Denne rapporten omhandler brannmotstand og avkjølingsfase i limtre og kan ikke uten videre overføres til massivtrekonstruksjoner.

2.2 Forkulling/Forbrenning av tre

Tre er et brennbart materiale, men det brenner på en forutsigbar måte som er godt beskrevet gjennom årtier med forskning og erfaring. Når friskt trevirke varmes opp blir komponentene i treet (primært cellulose, hemicellulose og lignin) brutt ned til flyktige brennbare gasser og kull. Denne prosessen kalles pyrolyse. Kullaget som dannes fra pyrolysen har høy isolerende effekt og beskytter bakenforliggende friskt tre mot videre nedbrytning.



Figur 2: Forkulling av treverk (illustrasjon: Limtreboka).

Kullaget dannes ved ca. 300 °C. Om forkullingstemperaturen er 280, 300 eller 320 °C har ikke vært av stor betydning, da temperaturstigningen rundt forkullingstidspunktet er rask under en fullt utviklet brann.

Hastigheten på forkullingen er relativt jevn på mellom 0,5-1,0 mm/min. Dette kan benyttes til å dimensjonere treverk til å opprettholde bæreevnen ved brann. Nominell forkullingshastighet for limtre av norsk gran er 0,7 mm/min iht. Eurokode 5.

Oppvarming og nedbryting av friskt tre krever energi, og forbrenning av de flyktige komponentene frigjør energi. Forbrenningen frigir mer energi enn nedbrytningen, det er derfor tre har blitt benyttet som brensel og energikilde i tusener av år. Dersom forholdene ligger til rette for det vil reaksjonen fortsette til det ikke er mer trevirke igjen. Dersom det upåvirkede treet ikke tilføres nok energi vil forbrenningen stoppe opp. Dette kan observeres i det daglige ved at den siste store kubben i peisen ikke brenner opp, selv om peisen er designet spesifikt for å tilrettelegge for forbrenning.

2.3 Brannforløp

En brann som får utvikle seg uten at den slokkes aktivt kalles ofte for et naturlig brannforløp. Formuleringen er upresis da det det er enorm variasjon i hvordan forskjellige brannforløp utvikler seg. Et typisk brannforløp kan likevel deles opp i flere faser som har ulike kjennetegn:

Antennelse → Vekst → Fullt utviklet brann → Avkjøling

Brannen kan være mulig å slokke i alle faser ved hjelp av egnede aktive tiltak.

Antennelse
Branner oppstår på forskjellige måter og antennelsesfasen kan være svært varierende for ulike brannforløp. Alt fra langsom ulming til åpne flammer. Dersom det er tilstrekkelig temperaturutvikling og brennbart materiale vil brannen vokse seg større og nå vekstfasen.

Hvorvidt et bæresystem er utført i limtre eller i ubrennbare materialer har liten betydning i antennelsesfasen. Det kreves relativt stor varmepåkjenning for å antenne treverk, spesielt for store tverrsnitt i limtre.

Vekst
Varmeavgivelsen til brannen fortsetter å vokse så lenge det er tilstrekkelig mengde oksygen og brennbare materialer tilgjengelig. En vanlig måte å modellere brannvekst på er å anta en såkalt αt^2-utvikling, der α er en konstant som er avhengig av hvor raskt brannforløpet er og t er tiden fra antennelse. Hastigheten på brannveksten er avhengig av hva som brenner, hvor mye oksygen som tilføres brannen og de termiske egenskapene til omkringliggende materialer. Dersom tilgangen på brennbart materiale ikke er tilstrekkelig vil ikke brannforløpet kunne nå neste fase.

Bæresystem i limtre har relativt liten påvirkning i vekstfasen. Helt i starten av vekstfasen har konfigurasjonen av materialene det tas fyr i større betydning og senere i forløpet er overflatematerialet på vegger og himling av større betydning.

Fullt utviklet ventilasjons- eller brenselskontrollert brann
Brannen vil på et tidspunkt ikke vokse lenger. Dette kan være på grunn av at brannen ikke kan spre seg til andre materialer, at alt materialet i rommet allerede brenner, eller fordi brannen har begrenset med tilgang på oksygen. Når brannen har nådd sin maksimale effekt vil den opprettholde det nivået med mindre det skjer endringer i tilgang til luft eller brensel. Når mengde brennbart materiale begynner å minke vil brannen starte på avkjølingsfasen.

Bæresystem i limtre vil ha en effekt på lengden på brannforløpet i en fullt utviklet brann. Forbrenningen av limtreet vil øke mengden brennbart materiale som vil bidra til å forlenge brannforløpet.

Avkjøling
Varmeutviklingen i avkjølingsfasen vil også være avhengig av gjenværende brennbart materiale, mengde varme som transporteres bort fra brannen i form av utlufting eller varmeledning avhengig av de termiske egenskapene til de omkringliggende materialer. Alt brennbart materiale må ikke nødvendigvis brenne opp for at brannen skal slokke.

Et bæresystem i limtre kan ha en betydning for brannforløpets avkjølingsfase. Dersom det er tilstrekkelig mengde eksponert treverk vil brannen ikke nå avkjølingsfasen før konstruksjonen har mistet all restbæreevne.

Tid-temperaturkurver

Parametriske temperatur-tidkurver har blitt utviklet for å kunne si noe om forventet temperaturutvikling i brannceller med forskjellige brannlaster, åpningsfaktorer og termiske egenskaper. Dersom alle parameterne i en spesifikk branncelle er kjent kan parametriske temperatur-tidkurver utarbeides for den spesifikke branncellen.

Det er ikke gjennomførbart i praksis å teste alle bygningsdeler og materialer for alle mulige ulike brannforløp. Det ville blitt et utall tester, og systemene for å finne ut hvilke produkter som kan benyttes i hvilke typer brannceller ville blitt for komplisert. Derfor tester man bygningsdeler ut i fra en standardisert tid-temperaturkurve. Det finnes forskjellige variasjoner av kurven, men i Europa brukes ISO 834. Denne tid-temperaturkurven har ikke en avkjølingsfase, og stiger kontinuerlig til testen avbrytes. Hvordan bygningsdeler oppfører seg i avkjølingsfasen av en brann testes derfor normalt ikke.

TEK/VTEK - Krav i Teknisk Forskrift (TEK10)

Brannklasse 3 og 4 skal benyttes når konsekvensen ved brann mtp. hensynet til liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø vurderes som stor, eller særlig stor. Forskriften har definert 4 nivåer for konsekvens: liten, middels, stor, særlig stor.

Brannklasse 3 er definert som det nest høyeste nivå som kan stilles vedrørende konsekvens av brann i et bygg. Beregning av stabilitet og bæreevne skal medregnes den totale belastning som kan forventes i byggverket, inklusiv bidrag fra bærende konstruksjoner. Bærende hovedsystem i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.

Et byggverk vil normalt måtte oppføres i brannklasse 3 når det har 5 eller flere etasjer.

Swecos vurdering av intensjonen bak kravene i TEK

Krav til brannmotstand i et bygg baserer seg på sikkerhet for personer i og på bygget, sikkerhet til slokkemannskap og restverdi av bygget. Dette er definert som liv, helse, samfunnsmessige verdier og miljø.

Personsikkerhet

Dersom man legger personsikkerhet til grunn for kravet om at hovedbæresystemet i byggverket skal bevare sin bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp tolkes dette kravet basert på følgende:

1. Man skal kunne oppholde seg sikkert i alle deler av bygget som ikke er direkte eksponert for flammer (varme) eller røyk.
2. Slokkemannskaper skal kunne utføre en slokkeinnsats hvor som helst i bygget, uten at det er fare for kollaps av hovedbærende bygningsdeler.
3. Arbeidere skal kunne gjøre en reparasjon/gjenoppbygging i etterkant av en brann, uten at det er fare for kollaps av hovedbærende bygningsdeler.

Verdisikkerhet

Når det kreves at et bygg skal beholde sin stabilitet og bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp, tolkes dette som at bygget skal ha en restverdi, altså at bygget skal kunne rehabiliteres etter en brann heller enn å rives for å sette det opp på nytt. Videre må verdien av deler av hovedbæresystemet som ikke er eksponert for brannen være opprettholdt, tilsvarende som før brannen.

Veiledning til Teknisk Forskrift
Iht. preaksepterte ytelser gitt i VTEK skal byggverk i brannklasse 3 oppføres med bæresystem i R 90 A2-s1,d0 [A 90].

Enkelt forklart betyr R 90 at bæresystemet skal opprettholde sin bæreevne i minimum 90 minutter med påkjenning av en standardbrann. A2 betyr en ubrennbar konstruksjon, s1 betyr lav røykproduksjon og d0 betyr liten fare for brennende dråper fra materialet.

Kort oppsummert fordrer preakseptert ytelse for et bygg i brannklasse 3, et ubrennbart bæresystem som skal beholde sin stabilitet og bæreevne i minst 90 minutter ved en ISO-brann.

Sammenligner man kravet i TEK opp mot ytelsen i VTEK vil man kunne konkludere med at Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK) har definert at belastningen fra et fullstendig brannforløp ikke vil overstige 90 minutter ved påkjenning av en ISO brann. Denne løsningen forutsetter at bæresystemet ikke tilfører brannen energi, og at brannenergien i bygget ikke er unormalt høy.

Fullstendig brannforløp
Teknisk Forskrift forutsetter at hovedbæresystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal motstå et fullstendig brannforløp. Det vil altså si at et bygg skal beholde sin stabilitet og bæreevne når brannen er utbrent. Ved bruk av brennbare konstruksjoner i bæresystemet, vil selve bæresystemet bidra til et forlenget brannforløp og vil kunne tilføre brannen energi frem til det oppstår kollaps i bæresystemet.

For at et bygg med brennbart bæresystem skal motstå et fullstendig brannforløp uten kollaps må følgende forutsetning være tilfredsstilt:

Forkulling eller kjemisk behandling av det brennbare materialet stopper forbrenningen av de bærende konstruksjonene, slik at brannen dør ut etter at brennbare konstruksjoner/materialer inne i branncellene er utbrent. Resterende konstruksjonstverrsnitt og forbindelser må inneha tilstrekkelig bæreevne til at konstruksjonen ikke kollapser.

Automatiske slokkeanlegg og brennbart bæresystem
TEK krever nå automatisk slokkeanlegg i alle byggverk i risikoklasse 6 (sykehjem, sykehus, fengsel o.l.) og byggverk i risikoklasse 4 (boliger) med krav om heis. Dette fører til at man vanskelig kan argumentere for at slokkeanlegg kan benyttes som et kompenserende tiltak for brennbart bæresystem i disse byggene.

For andre typer byggverk kan automatisk slokkeanlegg angis som et direkte kompenserende tiltak, men funksjonskrav til bæresystem er angitt uten hensyn til aktive tiltak. Aktive tiltak kan generelt sett ikke vektlegges for bygg i risikoklasse 4 og 6, da det her allerede er krav om automatisk slokkeanlegg iht. TEK §11-12. I praksis tas det hensyn til at det er installert automatisk slokkeanlegg ved at det benyttes en reduksjonsfaktor i dimensjonerende brannenergi iht. NS-EN 1991-1-2 *Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann*. [4] Dette blir likevel ikke regnet som et direkte kompenserende tiltak, men et gunstig forhold ved bygget, i likhet med f.eks. gunstig geometri, størrelse på brannceller eller materialbruk i branncellen.

Bæresystemet i byggverk der det kreves automatisk slokkeanlegg må derfor dimensjoneres til å motstå et fullstendig brannforløp uten å ta hensyn til at byggets slokkesystem aktivt vil bidra til slokking eller kontrollering av brannen utover benyttelse av reduksjonsfaktor som angitt i NS-EN 1991-1-2, også dersom bæresystemet er brennbart.

3 Testoppsett

Formålet med testen var primært å undersøke hvordan limtrekonstruksjoner oppfører seg i avkjølingsfasen av en brann og se om forkullingen stanser opp, eller om ulmende forbrenning fortsetter i treverket når brennerne i ovnen skrus av. I tillegg skulle det undersøkes hvorvidt det hadde betydning for temperaturforløpet i stålet i knutepunktet om hull til dybler ble tettet med spuns (treplugger) eller ikke.

Som beskrevet tidligere er det vanskelig å verifisere brannmotstand ved testing for alle mulige variasjoner av et brannforløp og forløpet på avkjølingsfasen i branner er dårlig dokumentert.

Testoppsettet måtte så bestemmes ut i fra formålet og ønske om å oppnå størst mulige gyldighetsområde for resultatene. Testoppsettet ble i sin helhet bestemt av Sweco for å kunne sammenligne resultatene opp mot et fullstendig brannforløp. For detaljert beskrivelse av testoppsett vises det til vedlagte testrapport [1].

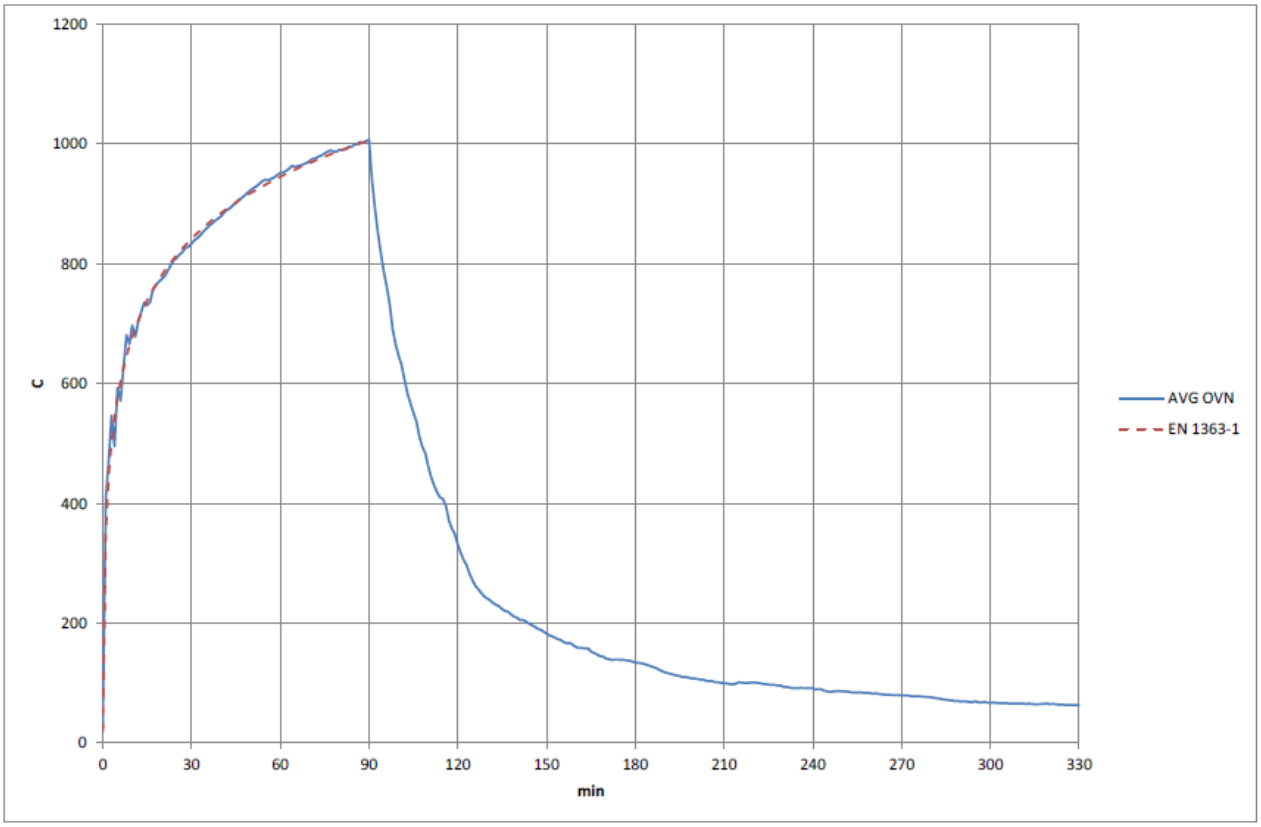
3.1 Valg av testforløp

Som beskrevet tidligere er preakseptert ytelse i VTEK for brannmotstand på bærende hovedsystem i bygg i BKL 3 R 90 A2-s1,d0. Det ble derfor bestemt at testforløpet minimum måtte være tilsvarende R 90 før avkjølingsfasen begynte.

Avkjølingsforløpet i en brann er vanskelig å fastsette nøyaktig og temperaturene i forbrenningsovnen er vanskelig å kontrollere. Dersom en parametrisk tid-temperaturkurve skulle velges ville testens gyldighetsområde vært tvilsomt med høyere brannenergi eller andre åpningsfaktorer. Med bakgrunn i dette ble testforløpet som følger:

- Prøvestykkene utsettes for brann tilsvarende ISO 834-kurven i 90 minutter (NS-EN 1363-1).
- Ett prøvestykke løftes ut og avkjøles utenfor ovnen.
- Ett prøvestykke med knutepunkt løftes ut og avkjøles utenfor ovnen.
- Ett prøvestykke står igjen og avkjøles i ovnen.

Da tester generelt avsluttes etter ett visst antall minutter, uten å inkludere målinger fra avkjølingsfasen, var det lite data om hvordan temperaturen i testovnen utviklet seg etter at brennerne skrus av. Testovnen er konstruert i tunge konstruksjoner med høy spesifikk varmekapasitet. For å ikke få et for konservativt forløp på avkjølingen av overflatene i testovnen ble det derfor bestemt at samtlige takelementer i ovnen skulle løftes av. Dette med unntak av ett element som var nødvendig for å stabilisere prøvestykket. Med dette var det kun den oppmagasinerte varmen fra testovnens gulv og vegger som forhøyet temperaturen søylen ble utsatt for i avkjølingsfasen.



Figur 3: Faktisk testforløp ovn, ISO-brann og avkjølingsfase. Avkjølingsfasen var ikke kjent på forhånd (fra [1]).

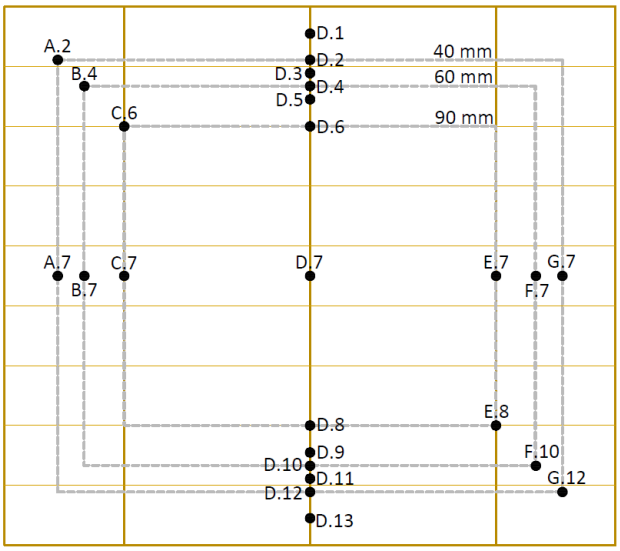
3.2 Beskrivelse prøvestykker

Prøvestykkene bestod av limtresøyler med nominell dimensjon 405 x 460 mm. De bestod av 4 limtreprofiler hvorav to var 90 x 405 mm og to var 140 x 405 mm. Limtresøylene ble instrumentert med termoelementer i forkant av sammenlimingen. Sett bort i fra dette var søylene produsert iht. EN 14080 og Norske Limtreprodusenters forenings vanlige fabrikasjonsmetoder.

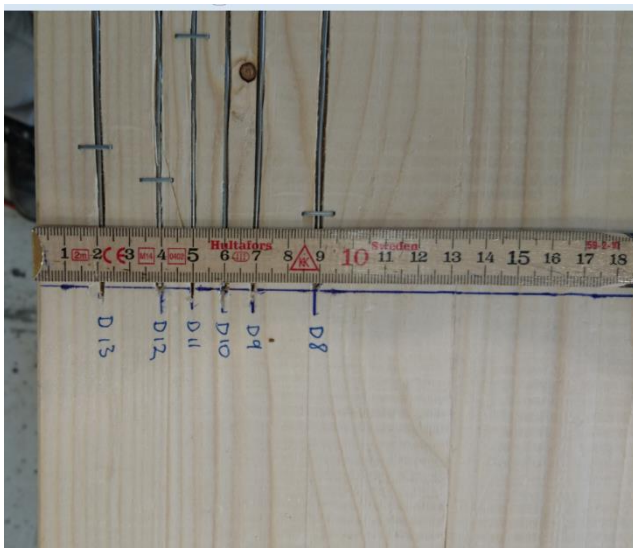
Hver av profilene bestod av 9 lameller som er limt sammen med Melamin Urea Formaldehyd (MUF) og profilene ble limt sammen til de ferdige søylene med Fenol Resorcinol Formaldehyd (PRF).

Søyle A og B

Søyle A og Søyle B var for testens formål identiske og var instrumentert som vist i Figur 4. Termoelementene var hovedsakelig plassert i skjøten mellom de midterste profilene langs Akse D. A2, A7, B4, B7, F7, F10, G7 og G12 ble boret til en bestemt dybde fra innsiden av profilskjøten. Det var ikke mulig å kontrollere den nøyaktige dybden på disse elementene og målingene derfra er av den grunn forbundet med noe usikkerhet. Ved å montere termoelementene fra innsiden var målet at termoelementene ikke skulle endre måledataene ved at kullet ble fastholdt rundt elementene. Instrumenteringen var utført slik at målepunktene var plassert tettere rundt kote 60 mm, der forkullingen var forventet å skulle ha nådd etter ca. 90 minutter iht. dimensjoneringsmetoder gitt i eurokoden [2].



Figur 4: Instrumentering av søyle A og B (illustrasjon: Sweco).



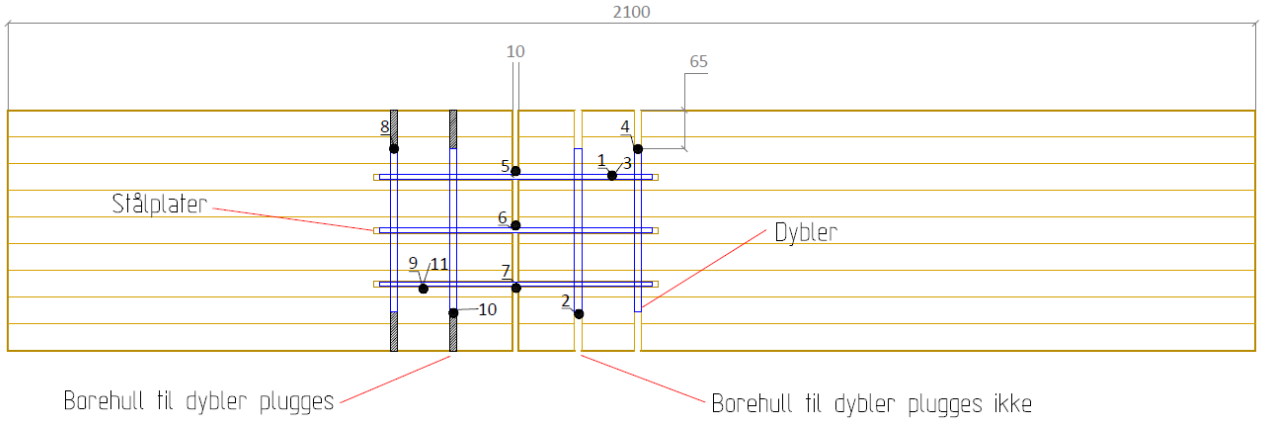
Figur 5: Montering av termoelementer (foto: Sweco).

Søyle C

Søyle C bestod av de samme fire limtreprofilene som de andre søylene, men inneholdt i tillegg en skjøt. De to søylestykkene var skjøtet ved hjelp av plater og dybler i stål. Stålplatene og –dyblene var instrumentert med termoelementer. På den ene siden av skjøten var borehullene til dyblene tettet med spuns (plugger). Slisser til stålplatene og mellomrom mellom søylestykkene var tettet med remser av intumiserende materiale type Intumex L. Materialet tetter hulrom ved at det ekspanderer ved ca. 150 °C.

Figur 6: Montering Søyle C (foto: Moelven Limtre).

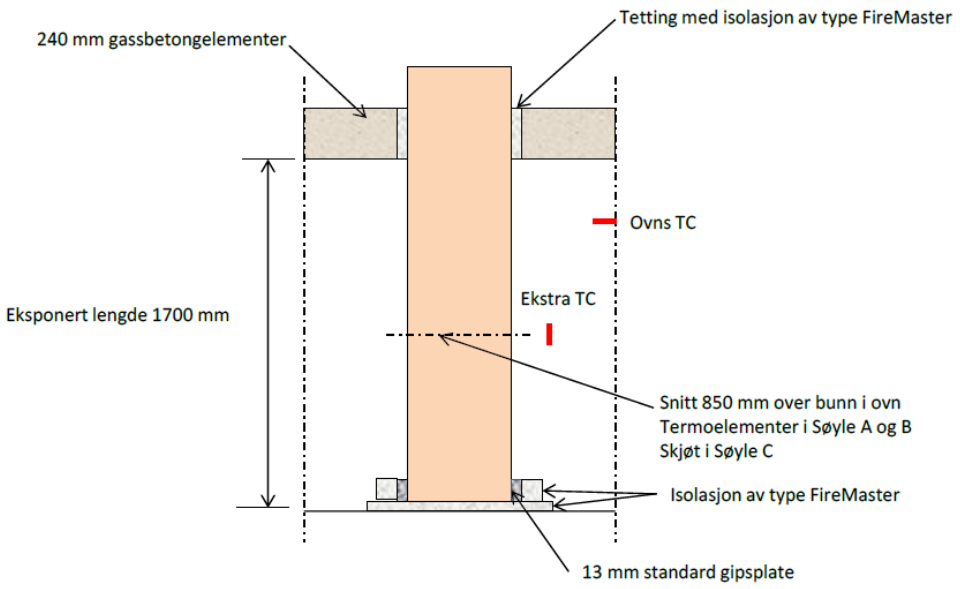
Figur 7: Montering søyle C (foto: Moelven Limtre).



Figur 8: Lengdesnitt Søyle C med plassering av termoelementer (illustrasjon: Moelven Limtre/Sweco).

Montering i testovn

Testovnen har en dimensjon på 3x4 m. Søylene ble montert stående i testovnen som vist i Figur 9. toppen av søylene var ueksponert og var utstyrt med stålringer for utløfting og montering av søylene. Søylefoten var isolert med gips og brannisolasjon for å lette måling av forkullingsdybder ved testslutt.



Figur 9: Montering i testovn, SP Fire [1].

4 Testresultater og tolkninger

I de kommende punktene presenteres tidslinje fra testrapport [1] med Swecos egne observasjoner, tolkninger og bilder, samt utdrag av særlig interessante termoelementer. Grafene som vises her er aggregater fra flere termoelementer for å forenkle den grafiske fremstillingen. Testrapporten [1] viser temperaturforløp for samtlige enkeltelementer.

4.1 Tidslinje

Tid [min]	Beskrivelse fra testrapport [1]	Forkullings-dybde[2]	Kommentar
00	Branntesten starter	0 mm	
35	-	20 mm	Beregnet forkullingsdybde iht. standarden [2] ville vært ca. 23 mm
71	-	40 mm	Tiden til 300 °C isotermen når 40 mm spriker fra 64 min (B-A.7) til 102 min (B-G.7) Etter 71 minutter ville forkullingsdybde beregnet iht.[2] vært ca. 46 mm.
90	Brennerne i ovnen slukkes og avløfting av gassbetongdekke starter.		
95	-	50 mm	Kun målepunkter i akse D. Etter 95 minutter ville forkullingsdybden beregnet iht. [2] vært ca. 62 mm.

[2] Median søyle A og B uten hjørnepunkter. Dybde på forkulling er beregnet ut ifra 300 °C isoterm.

102	Søyle B er løftet ut av ovnen		Foto: Sweco
109	Søyle C er løftet ut av ovnen		Foto: Sweco

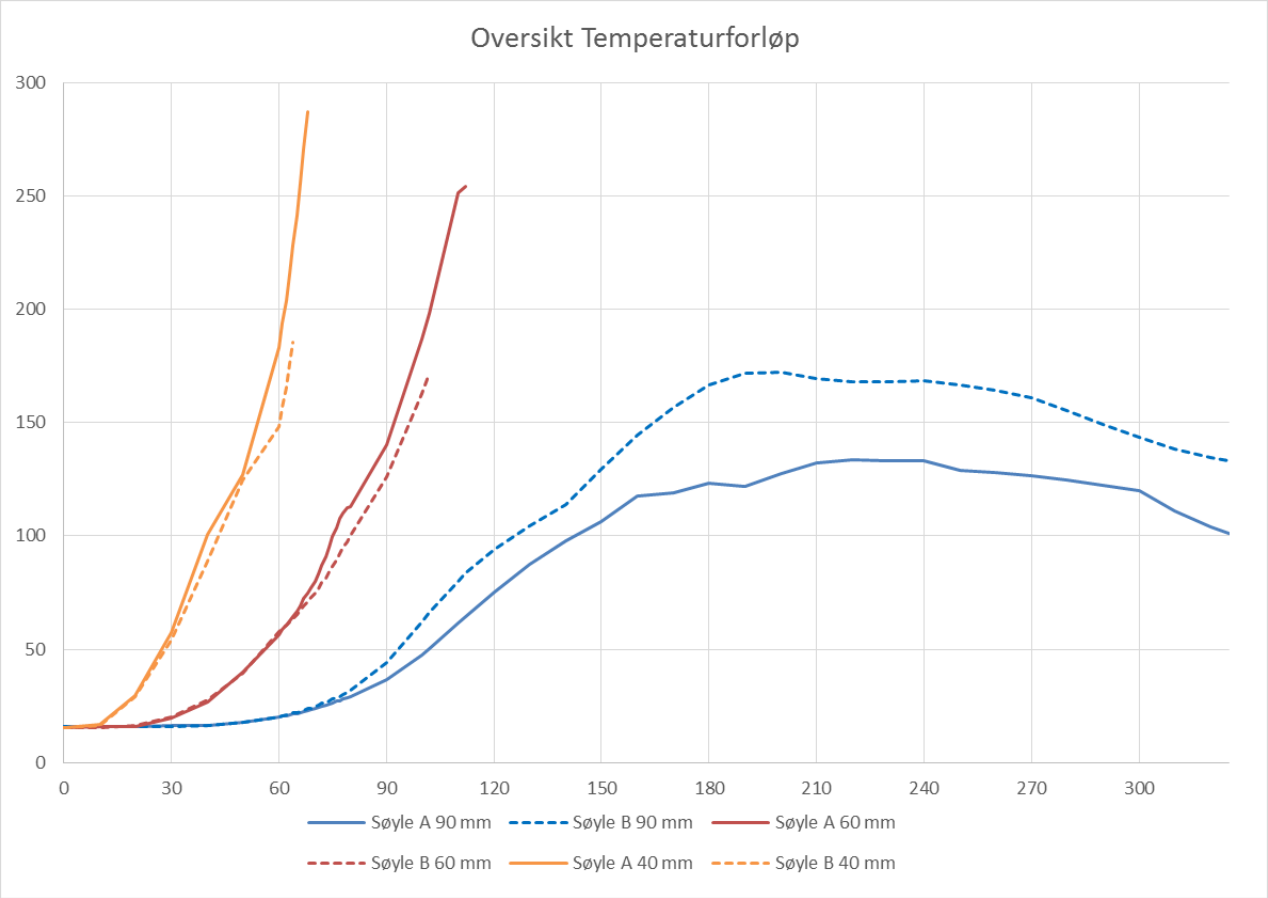
114	Tilluft- og avtrekksvifte i ovnen stanses		
123	Kun ett gassbetongelement ligger igjen på ovnen som støtte for søyle A		Foto: Sweco
143	-	60 mm[3]	Det er vanskelig å fastsette nøyaktig tidspunkt fordi temperaturen i målepunktene spriker. Målingene går fra ingen forkulling (SB-F.7) gjennom hele forløpet til 300 °C etter 102 min (SB-B.7). Målepunktet uten forkulling er ikke tatt med i beregningen.
172	-	-	Maks temperatur (268 °C) i dybel i søyle C (C.10)
193	-	-	Temperaturen er nedadgående i alle målepunkter i Søyle C.
253	-	-	Temperaturen er nedadgående i alle målepunkter i Søyle A, med unntak av temperaturen i målepunktet i senter av søylen, der er det 25 °C.

[3] Median søyle A og B uten hjørnepunkter. Dybde på forkulling er beregnet ut ifra 300 °C isoterm.

271	-	-	 Foto: Sweco To punkter i Søyle B har fremdeles synlig glødende forbrenning i skjøter mellom profilene. Særlig godt synlig ved søylefot der kullaget blir fastholdt av isolasjonen/gipsen.
289	-	-	Temperaturen er nedadgående i alle målepunkter i Søyle B, bortsett fra SB-E.7 som når sitt toppunkt på 135 °C. Temperaturen i kjernen av søylen er 31 °C.
306	-	-	Temperaturen er nedgående i alle målepunkter i søyle B, også SB-E.7 Temperaturen i kjernen av søylen er 35 °C.
326	Temperaturregistreringene i Søyle C stanses. Målingene er nedadgående.	-	Sweco observerte ikke røykutvikling eller glødende forbrenning i noen punkter i søyle C.
330	Temperaturregistreringene i Søyle A og B stanses. Målingene i samtlige punkter 90 mm fra søyleoverflaten er nedadgående. Søyle A løftes ut av ovnen.		Det er fremdeles røykutvikling og synlig glødende forbrenning i et par punkter pr. søyle. Alle punktene som er observert av Sweco er plassert mellom bjelker (limt med PRF). Temperaturen i kjernen er hhv. 45 og 41 °C for søyle A og B.
341	Alle tre søylene avkjøles ved vannspyling	Søyle A: 74 mm Søyle B: 71 mm	Gjennomsnitt av manuelt målte verdier for forkulling på søylenes sider, se [1]

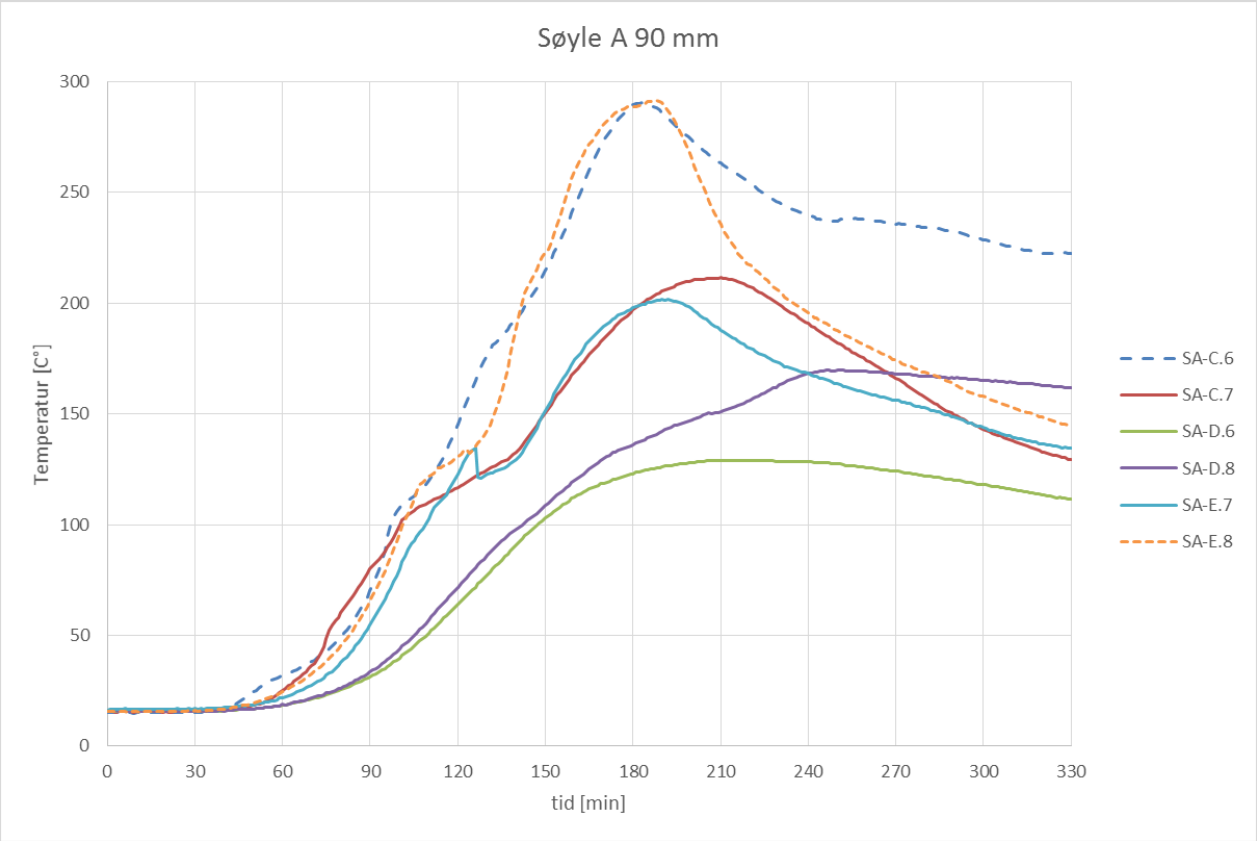
4.2 Temperaturforløp i søyler

Her følger utdrag for enkelte særlig relevante termoelementer.



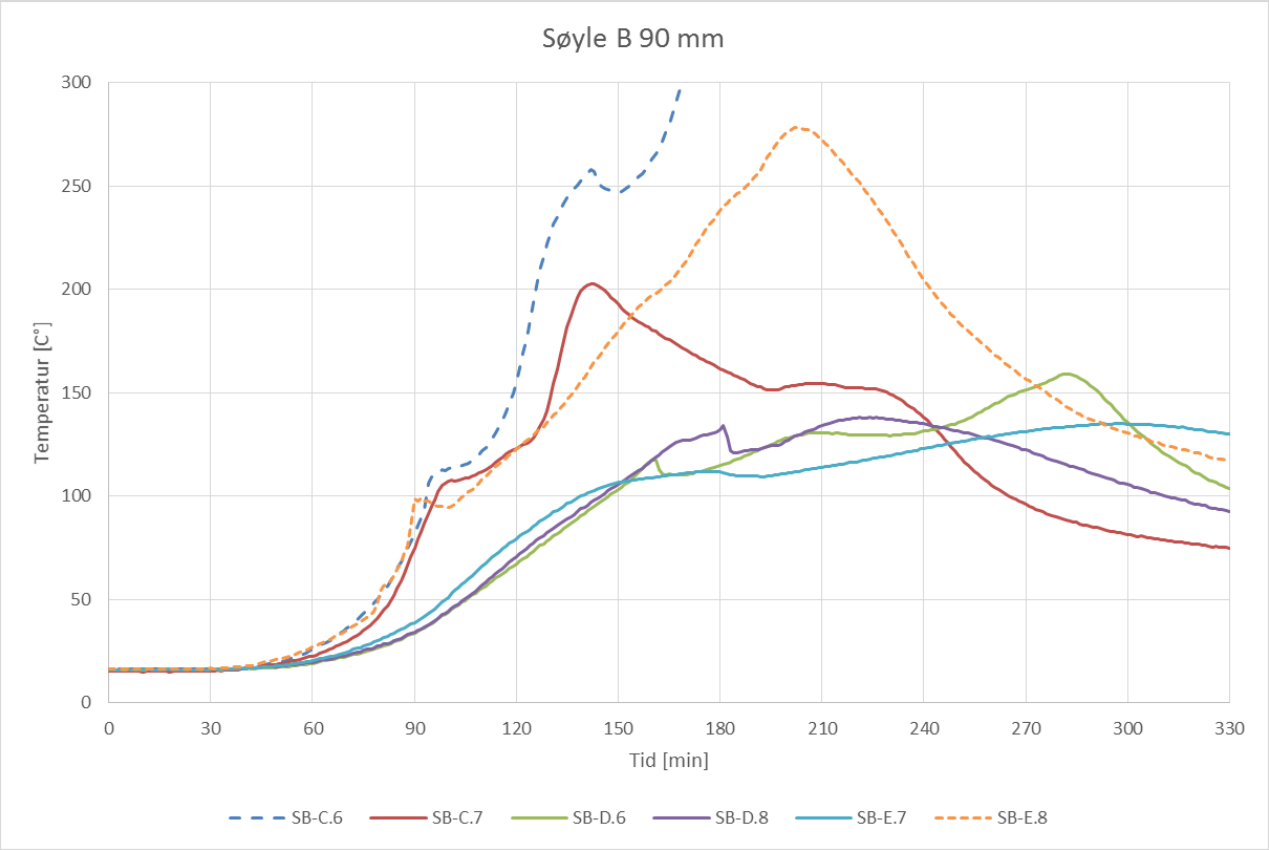
Figur 10: Mediantemperatur der det er 4 målepunkter per søyle i kote 90, 60 og 40 mm (ikke hjørnepunkter), se figur 4.

Plottet er avsluttet når første målepunkt i de respektive kotene når 300 °C. Dette er fordi temperaturene over 300 °C ikke er relevante når man snakker om mediantemperaturer og skal videreføre dette til forkullingsdybder. Det er generelt ikke utført usikkerhetsanalyser på tallmaterialet. Resultatene må derfor ikke benyttes til dimensjonering av forkulling.



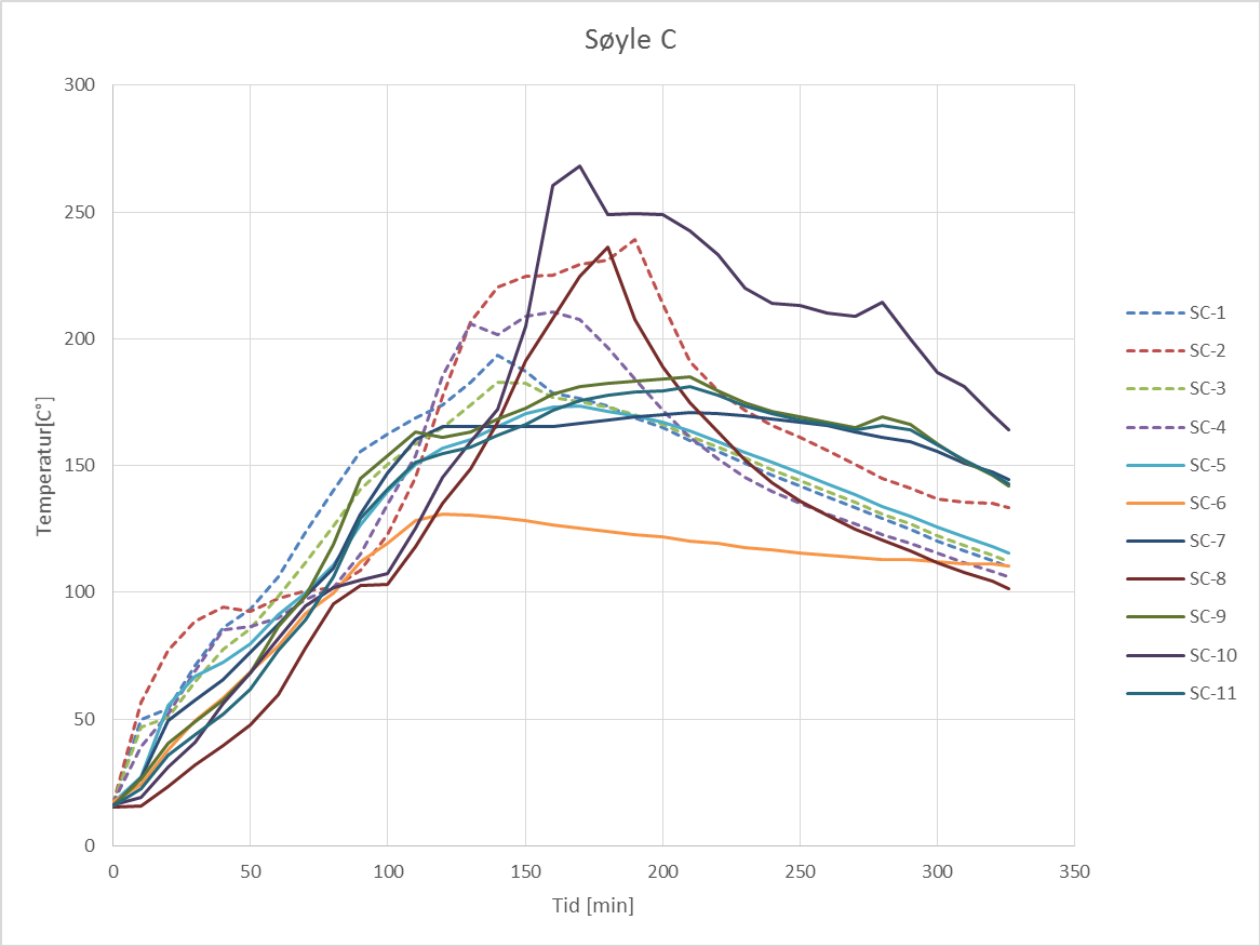
Figur 11: Temperatur-tid forløp, målepunkter i søyle A kote 90 mm.

Hjørnepunktene C.6 og E.8 er markert med stiplede linjer. Ingen av målepunktene viser temperaturer over 300 °C gjennom testforløpet. Elementene som er boret inn før montering av søylene viser noe høyere temperaturer. Dette kan ha sammenheng med unøyaktig plassering av elementene eller uheldig plassering i forhold til oppsprekking av kullaget. Det kunne også hatt sammenheng med at kullaget på utsiden av termoelementene i akse D blir holdt på plass av termoelementene lengre ute i tverrsnittet i akse D. Kullaget på søyle B var dog ved utløfting tilsynelatende intakt, og temperaturforskjellen på målepunktene i de forskjellige målepunktene i søyle A er synlig allerede etter 60 minutter. Dette kan tyde på at temperaturforskjellene kommer som følge av noe annet enn fastholding av kullaget i akse D.



Figur 12: Temperatur-tid forløp, målepunkter i søyle b, kote 90 mm.

Hjørnepunktene C.6 og E.8 er markert med stiplede linjer. C.6 når 300 °C etter 170 min. Makstemperaturen i C.6 er 389 °C etter 230 minutter (ikke synlig på plottet), noe som tilsier at C.6 ligger i kullaget, men at det ikke har vært noe glødende forbrenning i umiddelbar nærhet til termoelementet. Temperaturutviklingen i C.7 ligner tilsvarende punkter i Søyle A, men E.7 følger ikke samme mønster. Generelt sett har målepunktene i Søyle B raskere temperaturforandringer enn i Søyle A i avkjølingsfasen. Dette har trolig sammenheng med at Søyle B stod plassert ute i forsøkshallen og var utsatt for trekk. Trekk i avkjølingsfasen virker avkjølende globalt, men kan føre til at enkelte punkter ulmer lenger og mer intenst enn ellers. Det ble observert nedfall av relativt store kullbiter som eksponerte underliggende delvis forkullet materiale. Dette skjedde i større grad med søyle B enn med Søyle A. Nedfall av store biter av kullaget kan føre til raskere temperaturforandringer både ved at områder med glødende forbrenning detter ned og at kullagets isolerende effekt forsvinner.



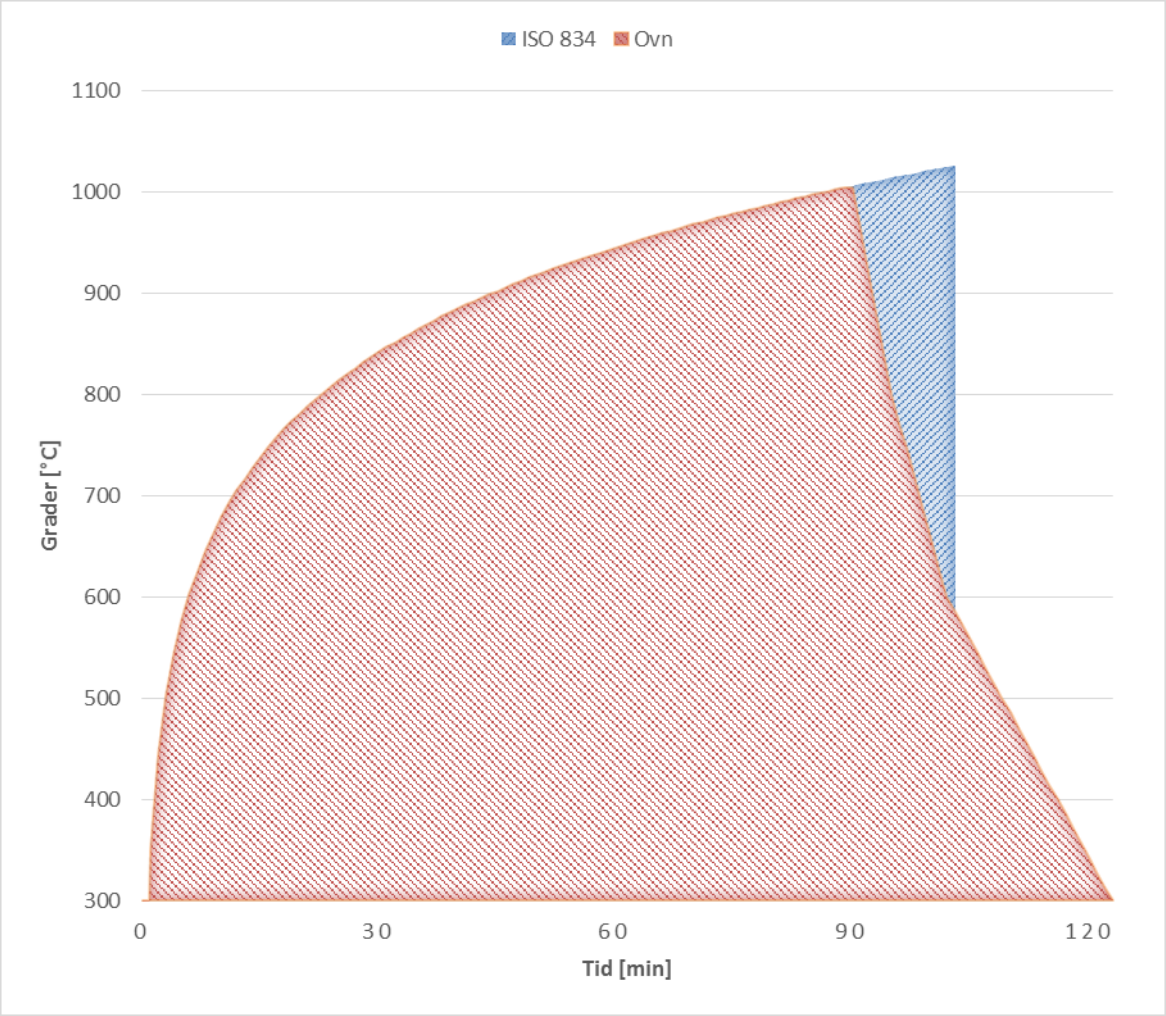
Figur 13: Tid-temperaturplot søyle C, alle termoelementer.

Termoelementer C.1-C.4 (prikkete linje) er plassert på dybler i den delen av søylen som ikke er tettet med spuns. C.1 og C.3 er plassert på stålplate. C.2 og C.4 er plassert i ytterkant av dyblene. Tilsvarende målepunkter er C.9 og C.11 (stålplate) og C.8 og C.10 (dybler) for den delen av søylen som er tettet med spuns. C.5-C.7 er plassert på stålplater i midten av skjøten, se for øvrig figur 8 og testrapport [1].

Målepunktene på den delen av søylen som ikke er tettet med spuns er gjennomgående høyere i starten av testforløpet, men temperaturen stabiliseres etter hvert. Dette er trolig fordi treet ekspanderer når det forkuller og tetter hullet på samme måte som en intumiserende masse.

Temperaturene i målepunktene som ikke er tettet er i avkjølingsfasen tilnærmet lik temperaturene på målepunktene som er tettet og den høyeste temperaturmålingen er i C.10, som er tettet med spuns. Ingen målepunkter passerer 300 °C.

4.3 Temperaturforløp i ovn

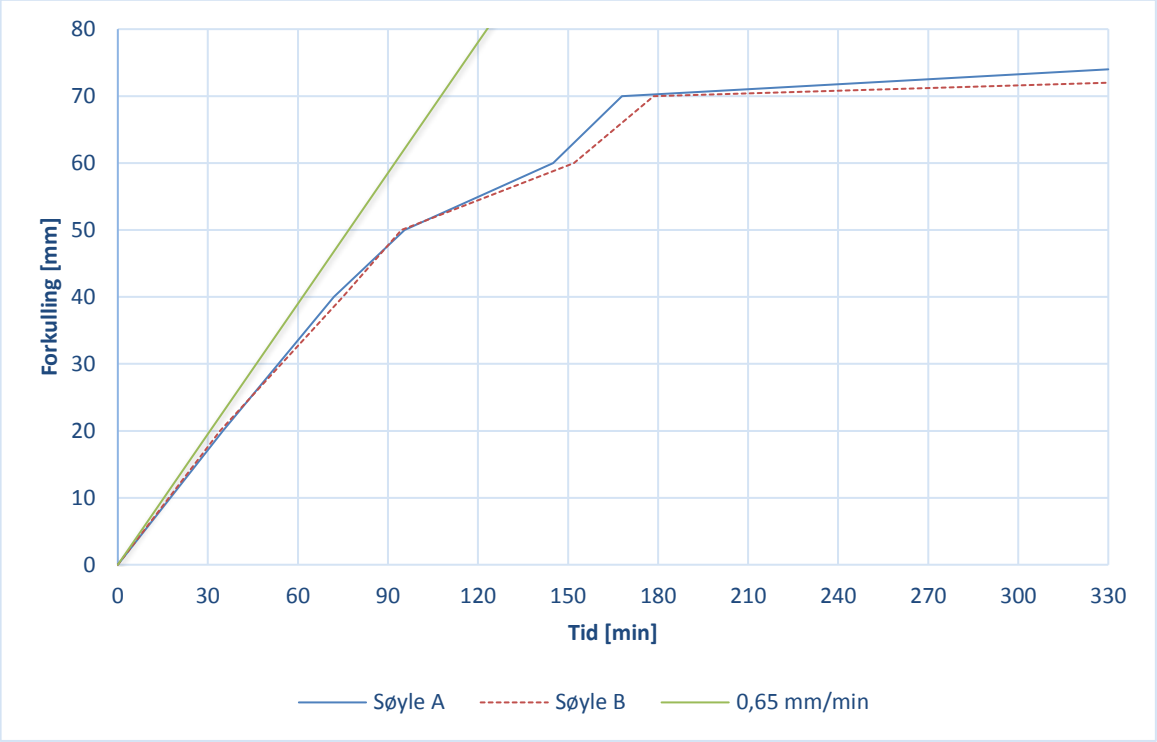


Figur 14: Sammenligning temperatur i testovn og ISO 834 kurven.

Figur 14 viser temperaturutvikling i testovnen frem til temperaturen synker under 300 °C. Søyle A ble påkjent temperaturer over 300 °C i 123 minutter. Søyle B og C ble påkjent temperaturer over 300 °C frem til de ble løftet ut etter hhv. 102 og 109 min. Arealet under temperaturkurven i ovnen etter 123 minutter tilsvarer arealet under ISO 834 kurven etter ca. 103 minutter. For søyle B og C er tilsvarende tall ca. 100 minutter.

Ekvivalent branneksponeringstid kan ikke uten videre benyttes for ubeskyttede trekonstruksjoner. Oppsettet viser dog at brannforløpet søylene har blitt utsatt for er signifikant verre enn hva betong- eller stålsøyler som er testes for R 90 blir utsatt for.

4.4 Forkullingsforløp i søyler



Figur 15: *Forkullingsforløp i Akse D i søyle A og B og endimensjonal forkulling iht. [2].*

Forkullingshastighet beregnet ut i fra gjennomsnittstid til temperaturen er 300 °C de respektive målepunkter i akse D:

Målepunkter	Søyle A	Søyle B
0-20 mm	0,57 mm/min	0,59 mm/min
20-40 mm	0,54 mm/min	0,49 mm/min
40-50 mm	0,43 mm/min	0,51 mm/min
50-60 mm	0,20 mm/min	0,17 mm/min
60-70 mm	0,44 mm/min [4]	0,38 mm/min [5]

Som forventet synker forkullingshastigheten etter hvert som tykkelsen på kullaget øker. 300 °C-isotermen når 50 mm ca. 95 minutter etter teststart i begge prøvestykkene. Temperaturen i ovnen var etter 95 minutter ca. 800 °C. Varmeveksling mellom ovn og søyler var dermed fremdeles stor, og den lavere forkulningshastigheten mellom 40-50 mm kan dermed ikke tilskrives den reduserte ovnstemperaturen. Fra 50-60 mm halveres den, før den igjen øker mellom 60-70 mm.

[4] Måledata kun fra A-D.9, da A-D.5 maksimalt når 210 °C.
[5] Tid til B-D.9 når makstemperatur på 289 °C og B-D.5 når 300 °C.

Det plutselige fallet i forkullingshastighet er en naturlig konsekvens av den fallende temperaturen i prøvestykkenes omgivelser. Hvorfor hastigheten i to målepunkt stiger igjen mellom 60-70 mm er ukjent. Økningen i forkullingshastighet mellom 60-70 mm korrelerer dårlig med de manuelle målingene av forkullingen som viser at forkullingen i gjennomsnitt stanset på 71-74 mm. Det kan ha sammenheng med at målepunktene er plassert i umiddelbar nærhet til hverandre og i en limfuge som kan være med på å skape sprekker som kan legge til rette for glødende forbrenning. I akse D er det ingen målepunkter dypere enn 70 mm inn i konstruksjonen som når 300 °C, men B-C.7 (kote 90 mm) når en topp på 200 °C i samme tidsrom som forkullingen er rundt 60 mm i søyle B.

En annen mulighet er at 300 °C isotermen ikke er et godt mål på dybden på kullaget i avkjølingsfasen. Den bratte temperaturstigningen som vanligvis observeres rundt 300 °C inntrer ikke, og feil temperatur på forkulling blir dermed en større feilkilde.

Forkullingsdybden 50 mm etter 95 min er relativt sikker, da temperaturen rundt de relevante målepunktene fortsatt stiger raskt på dette tidspunktet. Sammenlignet med de manuelt målte verdiene for forkulling etter testslutt blir forkulling i avkjølingsfasen 24 mm for søyle A og 21 mm for søyle B.

Forkullingshastighetene som er oppgitt her må ikke benyttes til dimensjonering.

5 Konklusjon

Med bakgrunn i testresultatene konkluderer Sweco med følgende:

Det er mulig å dimensjonere et hovedbæresystem i limtre for å motstå et fullstendig brannforløp uten at brannen blir slokket av et automatisk slokkeanlegg.

Med grove limtrekonstruksjoner som ikke bidrar signifikant til forlengelse av brannforløpet viser testen at forkullingen i all hovedsak stopper opp når det ikke lenger tilføres varme.

Enkelte punkter på søylene, særlig i limfuger der det var plassert termoelementer, har noe røyk- og varmeutvikling når testen avsluttes. Punkter der det ble observert glødende forbrenning var limfuger mellom bjelker (limt med PRF). Det ble ikke observert ulming i limfuger mellom lameller (limt med MUF).

Dette viser at kan være nødvendig med noe slokkeinnsats, men slokkeinnsatsen er ikke tidskritisk, da forkullingshastigheten reduseres betydelig når temperaturen i branncellen synker og forkullingen i all hovedsak stanser. Det må tas særlig hensyn ved detaljprosjektering for å unngå unødvendige sprekker og hulrom som kan tilrettelegge for ulmende forbrenning.

Det ble ikke observert en signifikant forskjell mellom temperaturen i dybler som var tettet med spuns og ikke.

Det må utvises varsomhet ved dimensjonering av trekonstruksjoner som er plassert i brannceller som har lange brannforløp, uavhengig av maksimaltemperatur. Brannenergien som tilføres som følge av brennbart bæresystem må inkluderes i beregningene.

Da det ikke er testet med last må det dokumenteres at resttverrsnittet har tilstrekkelig bæreevne til at bæresystemet opprettholder sin bæreevne i et fullstendig brannforløp.

6 Referanser

[1] Brannteknisk prøvning av limtresøyler basert på NS-EN 1361-1, SPFR rapport 150060-05, SP Fire v/Per Arne Hansen, 2016-08-26.

[2] NS-EN 1995-1-2:2004 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering, Standard Norge

[3] Limtreboka, Limtreforeningen 2015

[4] NS-EN 1991-1-2 *Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann*., Standard Norge

7 Vedlegg

SPFR rapport 150060-05