

RAMVERK FÖR HANTERING AV BRANDBELASTNING VID PROJEKTERING AV TRÄHUS

Slutrapport

Författare: Axel Mossberg, Daniel Brandon, Alastair Temple, Robert McNamee & Bengt Gåfväls

Rapport nr: 2023:1

SBUF ID: 14145

Finansiärer:





Sammanfattning

Byggandet av trähus ökar snabbt i Sverige. Ökat byggande med trä kan potentiellt bidra till både ökad kostnadseffektivitet och en lägre klimatbelastning inom byggbranschen. För att det ska bli en lägre klimatbelastning är det dock viktigt att byggnaden fungerar som en kolsänka, vilket innebär att kolet i byggnaden hålls bundet, åtminstone till dess att nya träd har vuxit upp. Det är därför viktigt för personsäkerhet, egendomsskydd och klimat att byggnader i trä inte har väsentligt större risk än andra byggnader för att totalskadas vid brand.

Sen 1994 och introduktionen av Boverkets Byggregler (BBR) är de svenska byggreglerna kopplat till brand materialneutrala. Det innebär att byggnader med stomme i trä har samma förutsättningar rent regeltekniskt som byggnader med stomme i betong, stål eller andra material. Det finns dock en avgörande skillnad i byggnadens brandbelastning när stommen är brännbar, speciellt om stommen samtidigt är exponerad, vilket inte tas hänsyn till på ett tydligt sätt i regelverket. Brandbelastning är en viktig faktor i det svenska regelverket och reglerar bland annat byggnadens bärförmåga vid brand, tillåten storlek och brandmotstånd på brandceller/-sektioner och liknande. Trä skiljer sig här från sina obrännbara motsvarigheter och samtidigt som byggandet med trä har ökat har även forskningen och medvetenheten på området gått snabbt framåt på senare år. Med ökat kunskapsunderlag har dock en osäkerhet skapats kopplat till hur regelverk och kunskap ska tillämpas vid bedömningen av brandbelastningen för byggnader i trä. Boverket har identifierat frågan som en särskilt viktig utredningspunkt i arbetet med de nya byggreglerna och även föreslagit ändringar i regelverket för att tydligare kravställa att motsvarande säkerhetsnivå i byggnader med brännbart stommaterial som i andra byggnader. Även de stora branschföreningarna (Föreningen för Brandteknisk ingenjörsvetenskap, BIV, och Sveriges Brandkonsultförening, BRA) har pekat ut frågan om den inneboende brandbelastningen i trästommen som speciellt viktig att utreda för att säkerställa att korrekta säkerhetsnivåer kravställs.

Det byggs med trä i högt tempo redan nu och avsikten med det aktuella projektet är att ge enkel och praktisk vägledning i hur trähus bör projekteras ur brandteknisk synvinkel för att ta hänsyn till både gällande, och kanske än mer kommande, regelverk och den kunskap som finns på området. Ramverket som presenteras i denna rapport avser att ge projektörer stöd och ett gemensamt underlag att utgå ifrån för att minska säkerhets- och projektrisker kopplade till den brandtekniska projekteringen av byggnader med trä som bärande stommaterial.

Ramverket som utvecklats beaktar verksamhets- och byggnadsspecifika förutsättningar så som variabel brandbelastning, utformning av öppningar (även benämnt öppningsfaktor) och mängd exponerad trästomme. Ramverket har utformats för att vara enkelt att använda, vilket ökar möjligheten för likartade bedömningar i olika projekt med exponerad trästomme. Det utvecklade ramverket bedöms genom detta kunna bidra till att förenkla byggande med

trästomme samtidigt som säkerhetsnivån både bedöms bli bättre, mer effektivt utformad och mer homogen.

Ramverket är förenklat men bygger på flera olika avancerade modeller och är förknippat med en rad begränsningar, avgränsningar och avgörande antaganden. Användare av ramverket behöver därför sätta sig in i det underlag som presenteras i rapporten för att säkerställa att projektering sker i enlighet med de förutsättningar som ramverket bygger på. Ansvaret vid användande av ramverket ligger alltså hos respektive projektör och inte hos författarna till denna rapport.

Förord

Den här rapporten utgör slutrapport i projektet ”Ramverk för hantering av brandbelastning vid projektering av trähus”. Projektet finansierades av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Smart Housing Småland (SHS)¹, Sveriges Brandkonsultförening (BRA) och Centrum för Boende och Byggnade i Trä (CBBT).

Arbetet som ligger till grund för denna rapport genomfördes av författarna och koordinerades av Axel Mossberg, Bengt Dahlgren Brand & Risk. Ramverket som presenteras utvecklades genom en samlad insats av projektgruppen där Bengt Dahlgren Brand & Risk och NCC i huvudsak stod för kartläggning av behoven hos de tänkta användarna av ramverket samt vilka grundläggande kravställningar och principiella underlag som ramverket behövde uppfylla för att bli praktiskt applicerbart. RISE, under ledning av Daniel Brandon, stod för att utveckla en teknisk lösning för att möta dessa kravställningar och behov.

Projektets syfte var att ta fram ett underlag för brandsäker projektering av trähus. I samband med arbetet i projektet presenterade Boverket remissen för de nya byggregler som planeras att träda i kraft under 2024. I dessa byggregler är regleringen av byggnader med trästomme förändrad på ett sätt som kan ha relativt stor påverkan på många sådana byggnader. Resultaten från det aktuella projektet kan ge projektörer stöd i hur utformningen av byggnader med trästomme ska kunna utföras i de fall som t.ex. delar av trästommen exponeras eller liknande.

Till projektet knöts en expertgrupp för regeltolkning som bestod av:

- Caspar Kindt, Bricon
- Cecilia Ylikangas, Tyréns
- Jesper Dalgren, FSD
- Lisa Broberg, Brandskyddslaget
- Martin Tornborg, Ramböll
- Martina Jelvinger, Bengt Dahlgren Brand & Risk
- Tim Hedlund, Brandskyddslaget

Utöver expertgruppen var även projektets referensgrupp en viktig del av framgången. I referensgruppen ingick:

- Caroline Bernelius Cronsioe, Föreningen för Brandteknisk Ingenjörsvetenskap (BIV)

¹ Smart Housing Småland finansieras av Vinnova, Region Kalmar, Jönköping och Kronoberg

- Fabian Ardin, Boverket
- Håkan Frantzich, Lunds Tekniska Högskola (LTH)
- Madelene Nordkvist, Räddningstjänsten Storgöteborg
- Magnus Norberg, Sveriges Brandkonsultförening (BRA)
- Mats Sundbom, Jämtlands Räddningstjänstförbund
- Stephanie Lenngren, SSEA
- Åsa Bolmsvik, Skanska

Författarna vill rikta ett stort tack till alla medverkande för gott samarbete under projektets gång.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	9
1.1	Syfte och mål.....	11
1.2	Begränsningar/avgränsningar	12
1.3	Läsanvisningar	15
2	METOD	16
2.1	Genomförande	16
2.2	Litteraturstudie	17
2.3	Workshop med experter	17
2.4	Hantering av riskfaktorer	17
2.5	Analys och använd beräkningsmodell	18
2.6	Riktlinjer för projektering/användning av resultat	27
3	LITTERATURSTUDIE	28
3.1	Brandbelastning och brandmotstånd	28
3.2	Bakgrund till kraven på brandmotstånd i det svenska regelverket	29
3.3	Föreslagna ändringar av det svenska regelverket	36
3.4	Trä och brand.....	37
3.5	Reperterbarhet vid tillämpning av analytiska lösningar	38
3.6	Brandbelastning för olika verksamheter	38
3.7	Öppningsfaktorns påverkan på brandförloppet	39
3.8	Sammanfattande diskussion.....	39
4	RAMVERK FÖR DIMENSIONERING AV TRÄKONSTRUKTIONER	41
4.1	Dimensioneringsprocess	41
4.2	Förkolningsdjup	43
4.3	Passivt skydd av icke-exponerade ytor	45
4.4	Säkerställande av integritet i KL-trä.....	47
4.5	Justering av förkolningsdjup beroende på placering	48
5	EXEMPEL PÅ TILLÄMPNING	49
6	DISKUSSION	54
7	SLUTSATS	57
8	FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA FORSKNING	58
9	REFERENSER	59

BILAGA A – INGÅENDE BESKRIVNING AV BERÄKNINGSMODELLEN	66
Equations	70
BILAGA B – VALIDERING AV BERÄKNINGSMODELL.....	78
BILAGA C – KÄNSLIGHETSANALYS	83
BILAGA D – MAXIMAL TEMPERATUR VID FÖRKOLNINGSRANDEN UNDER BRANDFÖRLOPPET	89

I INLEDNING

I och med övergången från Nybyggnadsreglerna till Boverkets byggregler 1994 skiftade byggreglerna till att vara s.k. materialneutrala. Detta innebar att det tidigare förbudet mot att ha brännbart material i stommen för byggnader med fler än tre våningsplan inte längre fanns. I konsekvensutredningen vid denna övergång angavs då att det nu skulle finnas möjlighet att bygga hus med fler våningar i trä än tidigare och att det fanns exempel på byggnader i trä med upp till fem våningsplan i t.ex. USA och Kanada.

Bygandet med trästomme gick i början relativt långsamt men med introduktionen av KL-trä på marknaden ändrades förutsättningarna markant. Det byggs idag mer hus med trästomme än någonsin tidigare och under 2021 var ca 20 % av de påbörjade lägenhetsbyggena i byggnader med trästomme [1]. Det byggs inte bara fler byggnader i trä utan även högre byggnader. Några exempel på detta är bygandet av Mjöstornet i norska Brummunddal (18 våningar), Sara Kulturhus i Skellefteå (20 våningar) och HoHo i Wien (24 våningar). Incitamenten att bygga med trä är både kopplade till ekonomi och miljö. För att trähus ska bidra till en mindre klimatpåverkan än byggnader med andra stommaterial krävs dock att de står kvar under en sådan tid att nya träd hinner växa upp. Det är därför viktigt för personsäkerhet, egendomsskydd och klimat att byggnader i trä inte har väsentligt större risk än andra byggnader för att totalskadas vid brand.

Med det ökade bygandet i trä har även forskningen på området ökat och det har på senare år både publicerats och initierats mer forskning på området än någonsin tidigare [2]. Med ökad kunskap har det dock även uppkommit en osäkerhet i branschen i vilken mån hänsyn ska tas till stommens brandbelastning vid dimensionering av byggnader med trästomme. Strikt tolkat kan reglerna både läsas som att hela stommens brandbelastning behöver beaktas eller som att ingen brandbelastning från stommen behöver beaktas. När Boverket tillfrågats (dnr 2766/2019) har svaret varit att den juridiskt korrekta lösningen inte nödvändigtvis är en säker lösning och att byggherren och brandskyddskonsulterna bör ”hantera situationen på ett klokt sätt” oaktat formuleringarna i regelverket. Boverket har även gått ut med att just byggnader med trästomme

är ett av de områden som särskilt utreds för ändrade kravställningar kopplat till arbetet med Möjligheternas byggregler².

Frågan har på senare tid även diskuterats av branschföreningarna Sveriges Brandkonsultförening (BRA) och föreningen för Brandteknisk Ingenjörsvetenskap (BIV). Den senare av dessa har även släppt en rapport med frågeställningar kopplat till brandskydd av trähusbyggnader [3]. Även här är mycket fokus på frågan om brandbelastning och exponerade stomdelar, vilket är parametrar som har stor påverkan på projekteringen av brandskyddet i en byggnad.

Denna fråga har även diskuterats i tidigare forskningsprojekt, men då primärt kopplat till byggnader med fler än 16 våningsplan [4], [5]. I dessa projekt konstaterades även att brandbelastningen hos stommen i en byggnad av trä är en fråga där stora kunskapsluckor finns och där lösningarna varierar. Det kan även konstateras att de projekten inte fokuserade på denna fråga och därför rekommenderade en enkel lösning för problemet, det vill säga inklädnad av hela stommen med gips, eller motsvarande material. Denna lösning är dock inte alltid önskvärd och kan innebära en högre belastning på klimatet än nödvändigt för många byggnader. Det bör även tilläggas att byggnader med fler än 16 våningsplan är speciella ur brandteknisk synpunkt då det inte finns några allmänna råd att förhålla sig till gällande projekteringen av brandskyddet. Det finns därför fortsatt behov av stöd kopplat till mer ”vanliga” byggnader, som inte har fler än 16 våningsplan.

Osäkerheterna kopplat till lämplig kravnivå och tolkningen av regelverket innebär idag att olika fastighetsägare, brandskyddskonsulter och granskande myndigheter riskerar att ha olika uppfattning om vilken kravbild som föreligger. Detta innebär en tydlig projektrisk för många byggnader med trästomme, speciellt i de fall stommen avser vara helt, eller delvis, exponerad. Det finns exempel på fall där olika brandskyddskonsulter (eller sakkunniga) ställt olika krav på bärverkets brandklass för en och samma byggnad, även för relativt ”vanliga” byggnader. Motsvarande gäller även huruvida stommen kan vara helt, delvis eller alls exponerad, där åsikterna om skyddsbehov och riskpåverkan idag går isär i branschen. Det finns även risk för att osäkerheterna, och/eller eventuella bränder i byggnader där brandskyddet inte projekterats korrekt i förhållande till den belastningen som skulle kunna uppstå. Sådana incidenter skulle kunna leda till en överdrivet konservativ reglering som effekt. Exempel på sådana effekter kan

² Presentation Fabian Ardin, Boverket, på Brandskydd 2021 samt mailkonversation med Fabian Ardin, Boverket, 2022-05-11.

ses i efterspelet av den tragiska branden i Grenfell tower i Storbritannien, där många människor omkom på grund av snabb brandspridning i fasaden. I eftermälet av branden har brännbara delar förbjudits i fasadkonstruktionen generellt för vissa byggnader i Storbritannien [6]. Sådan reglering kan vara naturlig efter en omfattande händelse men skulle kunna ge stor påverkan på vilka material som får användas och hur. En omfattande händelse i en träbyggnad skulle alltså kunna riskera att påverka möjligheterna att bygga med trä negativt.

Av den forskning som publicerats på området kan det konstateras att det i hög takt tillkommer ny kunskap om hur en byggnad med träkonstruktion beter sig i olika brandförlopp, men att denna kunskap är svår för brandskyddskonsulter att applicera i byggprojekt. Detta då inga samlade riktlinjer eller vägledningar tagits fram som utifrån utförda tester kopplar till hur brandbelastning och exponerade stomdelar bör beaktas vid projektering. Trots vissa kvarvarande kunskapsluckor så finns det alltså mycket kunskap som skulle kunna användas men det har hittills saknats ett ramverk för hur dessa kunskaper ska implementeras vid projektering av trähus. I och med förslagen till ändringar i de nya byggreglerna blir ämnet ännu mer aktuellt, i och med att brandbelastningen i byggnader med trästomme framöver sannolikt kommer behöva beaktas. Detta är något som få konsulter idag har kunskap om hur det ska göras.

1.1 Syfte och mål

Mot bakgrund av ovanstående problemställningar är syftet med projektet att möjliggöra en förenklad och evidensbaserad metod för att beakta den permanenta brandbelastningen i byggnader med trästomme. Detta bedöms kunna förenkla användandet av trästomme på ett brandtekniskt säkert sätt och på så sätt bidra positivt till möjligheterna att bygga mer med trä samtidigt som riskerna vid brand minskas.

Målet med projektet är att ta fram ett ramverk för projektering av träbyggnader där byggnads- och verksamhetsspecifika riskfaktorer kopplas till lämpligt brandskydd i förhållande till den brännbara stommen. Ett sådant ramverk bedöms ge större möjligheter för enhetliga bedömningar och således sänka projektriskerna kopplat till brandskyddet vid byggande med trästomme. Det bedöms även minska den långsiktiga risken för omfattande bränder i denna typ av byggnader. Det räcker med att enskilda omfattande bränder inträffar för att påverka allmänhetens tilltro till trä som byggmaterial, vilket i förlängningen skulle kunna påverka regleringen av byggnader med trästomme på ett sätt som är negativt för träbyggandet. Med ett evidensbaserat ramverk bedöms denna risk minska avsevärt. Ramverket i sig baseras på beräkningar av inbränning i träkonstruktionen för ett fullständigt brandförlopp samt underlag för

att beräkna det icke-bärande lagret för brandlastfall enligt EKS. Dessutom ges kravställningar på eventuell täandskyddande beklädnad av icke exponerade delar av träkonstruktionen.

Utöver ovanstående kommer projektet kunna bidra med underlag till Boverket och branschen som stöd till en framtida reglering, och/eller standardisering, av brandskyddskraven kopplat till byggnader med trästomme. Detta bedöms viktigt då projektet bedöms kunna ge en nyanserad bild av riskerna kopplat till byggnader med trästomme och på så vis bidra till att regleringen inte blir överdrivet konservativ, vilket kan ha negativ effekt på framtida byggmöjligheter och/eller kostnader för sådana byggnader.

1.2 Begränsningar/avgränsningar

Arbetet som är utfört i den här rapporten är förknippat med ett antal antaganden och begränsningar. Dessa är delvis direkt förknippade med beräkningsmodellen, men även med den indata som beräkningsmodellen använder. Samtliga begränsningar och avgränsningar går inte att lista specifikt men i detta avsnitt har några viktiga aspekter särskilt belysts. Observera dock att ytterligare begränsningar/avgränsningar nämns i den löpande texten och att beräkningsmodeller och liknande kan ha inneboende begränsningar och avgränsningar som kan behöva beaktas.

Det är viktigt att observera att användare av ramverket som presenteras i denna rapport i slutändan också är ansvariga för att säkerställa att ramverket tillämpligt för den aktuella projekteringssituationen. Användare måste alltså verifiera att de antaganden och begränsningar som listas nedan innehålls eller behandlas konservativt. Detta gäller även de principiella antaganden som är förknippade med enzonsmodellering generellt, vilket diskuteras vidare i avsnitt 2.5.1.

Målet med projektet är alltså att ta fram ett ramverk för projektering av byggnader med trästomme där byggnads- och verksamhetsspecifika riskfaktorer kopplas till lämpligt brandskydd. Målet är även att ta hänsyn till gällande och, i den mån det är möjligt, de kommande byggreglerna som föreslås i projektet *Möjligheternas byggregler*. Detta innebär att grundsyftet med ramverket är att uppfylla kraven vid dimensionering enligt modell av naturligt brandförlopp i EKS 12 [7]. För högre brandsäkerhetsklasser och Br0-byggnader kan användaren behöva justera brandbelastningen med 50 %, respektive 100 %, beroende på byggnad och byggnadsdel. Detta är alltså något som användaren själv behöver beakta vid användning av ramverket.

Vid korrekt användande bedöms ramverket vara applicerbart för de flesta möjliga utformningar med trästomme. Det är dock viktigt att notera att branddynamiken i träbyggnader är komplex och brandskadorna i utrymmen med exponerat trä kan påverkas av flera olika parametrar. Att hantera alla sådana parametrar som variabler i ramverket skulle resultera i både en för omfattande mängd scenarier att studera och för omfattande resultat för att hålla ramverket relevant och praktiskt applicerbart. För att reducera antalet variabler har följande principer tillämpats för olika parametrar:

1. Konservativa antaganden där detta bedömts lämpligt.
2. Omformulering av ingångsparametrar för att ge större applicerbarhet.
3. Användning av etablerade standarder och bedömningsmetoder för enskilda parametrar.

Där osäkerheter har funnits i olika variabelers påverkan på slutresultatet har dessutom ett antal känslighetsanalyser genomförts.

I tabellen nedan listas några viktiga parametrar och hur de hanterats i ramverket.

Tabell 1. Lista på parametrar och hur dessa hanterats i ramverket.

Parameter	Hantering i ramverket
Storlek på ventilationsöppningar	Behandlas som en variabel i ramverket.
Omfattning av exponerad trästomme	Behandlas som en variabel i ramverket.
Placering av exponerade ytor	Om exponerade träytor placeras så att de strålar mot varandra med stor synfaktor finns det en risk att branden inte självslocknar. Det bör därför undvikas att placera exponerade träytor i innerhörn eller andra sammansättningar med stor synfaktor mot varandra. Inom det aktuella projektet har det inte studerats vilka avstånd som kan vara lämpliga.
Brandbelastning	Behandlas som en variabel i ramverket. Dock behöver brandbelastning per golvarea omvandlas till brandbelastning per omslutningsarea för att minska känsligheten av utrymmets storlek och volym, se känslighetsanalys i avsnitt 2.5.3.
Utrymmets volym och utformning	Modellen bedöms applicerbar för de geometriska utformningar där de grundläggande antagandena för modellen bedöms

korrekta. Se dock även känslighetsanalysen som är utförd i avsnitt 2.5.3 samt diskussion gällande hantering av lokaler med väldigt stor öppningsfaktor i avsnitt 6.

Ytskikt i utrymmet

De delar av utrymmet som inte utgörs av exponerat trä antas vara klädda med gips, eller termiskt motsvarande material, i tillräcklig utsträckning för att bakomliggande brännbart material inte ska involveras i branden, se även avsnitt 4.3. Gips är relativt termiskt inert, vilket innebär att beräknade brandtemperaturer under detta antagande aningen är representativa eller konservativa.

Maximal effektutveckling per ytenhet för variabel brandbelastning

Har antagits vara 250 kW/m^2 i enlighet med EN 1991-1-2 [8], vilket anges som maxvärde för de flesta listade verksamheter, utom teatrar och bibliotek.

Brandens tillväxthastighet

I och med att det som primärt studeras är bränder som går till övertändning med relativt stora ytor exponerade träytor så bedöms den konstruktiva påverkan av en brand beräknad i modellen vara relativt okänslig för tillväxthastigheten i den variabla brandbelastningen. Detta eftersom tidsperioden innan träytskiktet antänder inte innebär några större skador på träkonstruktionen och förbränningen av trämaterial bedöms bli styrande efter det att träkonstruktionen antänt. Förbränningen av träkonstruktionen accelererar i sin tur förbränningen av den variabla brandbelastningen i utrymmet. På grund av detta bedöms en fast brandtillväxt enligt EN 1991-1-2 [8] vara ett rimligt antagande i beräkningarna.

Materialbeteende**Integritet hos exponerat trä**

Beräkningsmodellen förutsätter att delaminering inte sker, vilket alltså behöver säkerställas vid tillämpning. För konstruktioner i limmat trä behöver därför limmets integritet vid brand bekräftas med GLIF-test [9], eller motsvarande. Alternativt kan erforderlig lamelltjocklek väljas för att undvika påverkan på limskiktet i enlighet med avsnitt 4.4 och 4.5.

Ytbehandling av exponerat trä	Har inte beaktats i projektet på grund av bristande kunskapsläge kring påverkan av ytbehandling på förkolningshastigheter och liknande.
Integritet hos passivt skydd av träkonstruktioner	Där skydd av träkonstruktionen krävs ska detta uppfylla kravnivåerna enligt avsnitt 4.3.

Observera att det kan även komma ny kunskap som inte beaktats i detta ramverk och som kan behöva beaktas vid framtida dimensionering. Sådana hänsynstaganden behöver respektive projektör beakta vid dimensionering.

1.3 Läsanvisningar

Efter detta inledande avsnitt redovisas i rapporten metoden för den aktuella studien i avsnitt 2. Detta är ett avgörande avsnitt som beskriver både genomförande av projektets olika delar och den tillämpade beräkningsmodellen samt hur den utvärderats. Metoden följs av litteraturstudie i avsnitt 3 och sedan presenteras själva ramverket i avsnitt 4. För att ytterligare illustrera hur ramverket ska användas redovisas ett tillämpningsexempel i avsnitt 5. I avsnitt 6 redovisas diskussion och i avsnitt 7 redovisas slutsatser från arbetet. Slutligen redovisas förslag på framtida forskning i avsnitt 8.

Utöver grundrapporten finns vidare detaljer i bilagorna, där Bilaga A redovisar en mer ingående beskrivning av den använda beräkningsmodellen än den övergripande beskrivning som ges i avsnitt 2. I Bilaga B redovisas mer detaljer kring valideringen av beräkningsmodellen och i Bilaga C redovisas en känslighetsanalys. I Bilaga D redovisas temperaturer vid förkolningsranden, vilket är kompletterande information till beräkningsresultatet för att kunna beräkna det icke-bärande lagret i träkonstruktionen. Observera att bilagorna är skrivna på engelska.

2 METOD

I avsnittet nedan beskrivs metoden som tillämpats i projektet.

2.1 Genomförande

Projektet inleddes med en litteraturstudie för att ge ett underlag till projektets fortsatta genomförande. Inom litteraturstudien fokuserades på källor kopplade till brandbelastning, branddynamik och brandmotstånd i träbyggnader. Även regelverk och riktlinjer för bärande och avskiljande konstruktioner vid brand undersöktes. Litteraturstudiens genomförande redogörs för i mer detalj i avsnitt 2.2 och resultaten presenteras i avsnitt 3.

Som ytterligare underlag till projektet genomfördes en workshop med brandskyddskonsulter där flera olika frågor kopplade till träbyggnader och brandskydd diskuterades. Huvudfokus låg dock på hur hantering av stommens brandbelastning för sådana byggnader fungerar idag och hur konsulterna ansåg att detta bör fungera i framtiden. Vidare fokuserades även på hur en byggnads risk kan ansättas och hanteras i relation till skyddet för ras och brandspridning inom byggnaden. Slutligen diskuterades även hur utformningen av ett eventuellt ramverk skulle kunna se ut för att fungera på bästa sätt i konsulternas vardag. Workshopen redogörs för i mer detalj i avsnitt 2.3.

I det vidare arbetet sammanställdes de olika riskfaktorer som identifierats och bedömts relevanta kopplade till branddynamik och brandmotstånd i träbyggnader. Sedan diskuterades hantering av dessa riskfaktorer inom kontexten för projektet och analysmetoden som valts. I detta steg genomfördes även ett antal olika känslighetsanalyser. Dessa analyser genomfördes i form av beräkningar för att identifiera hur stor påverkan olika faktorer hade på slutresultatet. Syftet med känslighetsanalyserna var att identifiera vilka faktorer som är viktiga att beakta och huruvida dessa faktorer kan generaliseras eller inte i det vidare arbetet. Detta arbete beskrivs vidare i avsnitt 2.4.

När parametrarna för analysen hade identifierats i föregående steg utfördes ett stort antal olika beräkningar av brandförlopp i byggnader med trästomme. Den använda beräkningsmodellen beskrivs övergripande i avsnitt 2.5 och mer i detalj i Bilaga A. Resultatet från beräkningarna är det huvudsakliga resultatet som presenteras i denna rapport i avsnitt 4.

Slutligen sammanställdes en riktlinje för hur beräkningsresultatet kan användas vid projektering av byggnader med trästomme. Denna riktlinje redovisas i avsnitt 4.

2.2 Litteraturstudie

Som nämnt ovan hade den litteraturstudie som genomfördes fokus brandbelastning, branddynamik och brandmotstånd i träbyggnader samt på regelverk och standarder kopplat till brandbelastning och dess påverkan på avskiljande och bärande konstruktioner i byggnader generellt. Litteraturstudien genomfördes delvis genom sökningar på vetenskapliga databaser som Scopus, Google Scholar, Web of Science och liknande. Utöver detta studerades även gällande och tidigare regelverk för brandskydd samt deras konsekvensutredningar när detta funnits tillgängligt.

Resultatet från litteraturstudien redovisas i avsnitt 3.

2.3 Workshop med experter

Workshopen med experter planerades ursprungligen för att diskutera hur projektet skulle hantera riskfaktorer och dimensioneringsprinciper för byggnader med trästomme i förhållande till de regelverk som var aktuella vid projektets genomförande (BBR 29 [10] och EKS 12 [7]). Under projektets framdrift släpptes dock först ett utkast och sen en remiss [11] till nya byggregler, där byggnader med brännbara stommar föreslogs hanteras annorlunda än tidigare. Detta gjorde att projektet och workshoparna omformulerades något, för att linjera mer med de nya förslagen till regelverk.

I den workshop som genomfördes i projektet deltog en expertgrupp med brandskyddskonsulter aktiva inom den svenska byggsektorn. Deltagarna rekryterades via Sveriges brandkonsultförening (BRA) och rekryterades genom en intresseanmälan. En fullständig deltagarlista finns i förordet till denna rapport. Workshopen genomfördes digitalt 13/12 – 2022.

Syftet med workshopen var delvis att diskutera riskfaktorer i byggnaden och hur dessa kunde hanteras inom kontexten för den analysmodell som projektet avsåg tillämpa. Vidare var syftet även att diskutera hur resultaten från projektet skulle presenteras för att på bästa sätt kunna användas i den dagliga projekteringen.

2.4 Hantering av riskfaktorer

I arbetet identifierades ett antal faktorer som kan påverka risken vid brand i en byggnad. Sådana faktorer är exempelvis verksamhet, våningsantal och sprinklersystem. En utmaning är att översätta effekterna av riskfaktorerna till något som kan hanteras inom den analysmodell som valts. I och med att Boverket under projektets gång presenterat nya förslag på regelverk [11]

bedömdes dock en hantering inom de ramar som regelverket rekommenderar vara att föredra. Detta innebär att samtliga riskfaktorer hanteras genom en påverkan på den brandbelastning som beräknas för respektive byggnad/verksamhet/utrymme, t.ex. hanteras den ökade risken i byggnader med många våningsplan genom att brandbelastningen utökas.

2.5 Analys och använd beräkningsmodell

Modellen som används inom projekt har utvecklats i flera steg. Den ursprungliga modellen utvecklades av Brandon och Anderson, 2018 [12]. En uppdaterad version, som används som utgångspunkt i detta projekt, publicerades av Brandon et. al. 2021 [13]. Denna rapport inkluderar också en längre diskussion kring validering av modellen i Bilaga B.

I beräkningsmodellen representeras brandrummet av en enzonsmodell som bygger på antagandet att brandgaserna är väl omblandade. Grundprincipen för en beräkning är att beräkningsgången initieras genom att temperaturutvecklingen över tid baserat på geometrin och mängden variabel brandbelastning beräknas. Baserat på den temperaturexponering som då beräknats i modellen ges temperaturprofilerna och inbränningen på de exponerade ytorna av trä, vilka i sin tur ger extra pyrolysgaser till branden. De pyrolysgaser som frigörs antas brinna i brandrummet om syrehalten är tillräckligt hög och utanför brandrummet om syrehalten är låg.

Därefter görs den ursprungliga beräkningen om men då inkluderas det ”nya” energitillskottet från de brandexponerade ytorna, det vill säga genom de pyrolysgaser som förbränns inne i brandrummet. Detta resulterar i en ny temperaturprofil och ny inbränning i träkonstruktionen som hanteras på motsvarande sätt som i föregående steg. Sedan upprepas denna beräkningsgång med så många iterationer som krävs för att beräkningsresultatet ska konvergera.

Energitillskottet från de brinnande träytorna bygger på experimentella data från Schmid et al. (2018) [14]. Det har visat sig att en del av energin stannar i kolskiktet och frigörs i ett senare skede när kolet oxideras vilket observerats under rumsbrandförsök [13]. Denna oxidation av det kolade skiktet utgör ungefär 20% av den totala energin och frigörs primärt efter att brandens flammande fas är över. Även detta fenomen inkluderas i modellen.

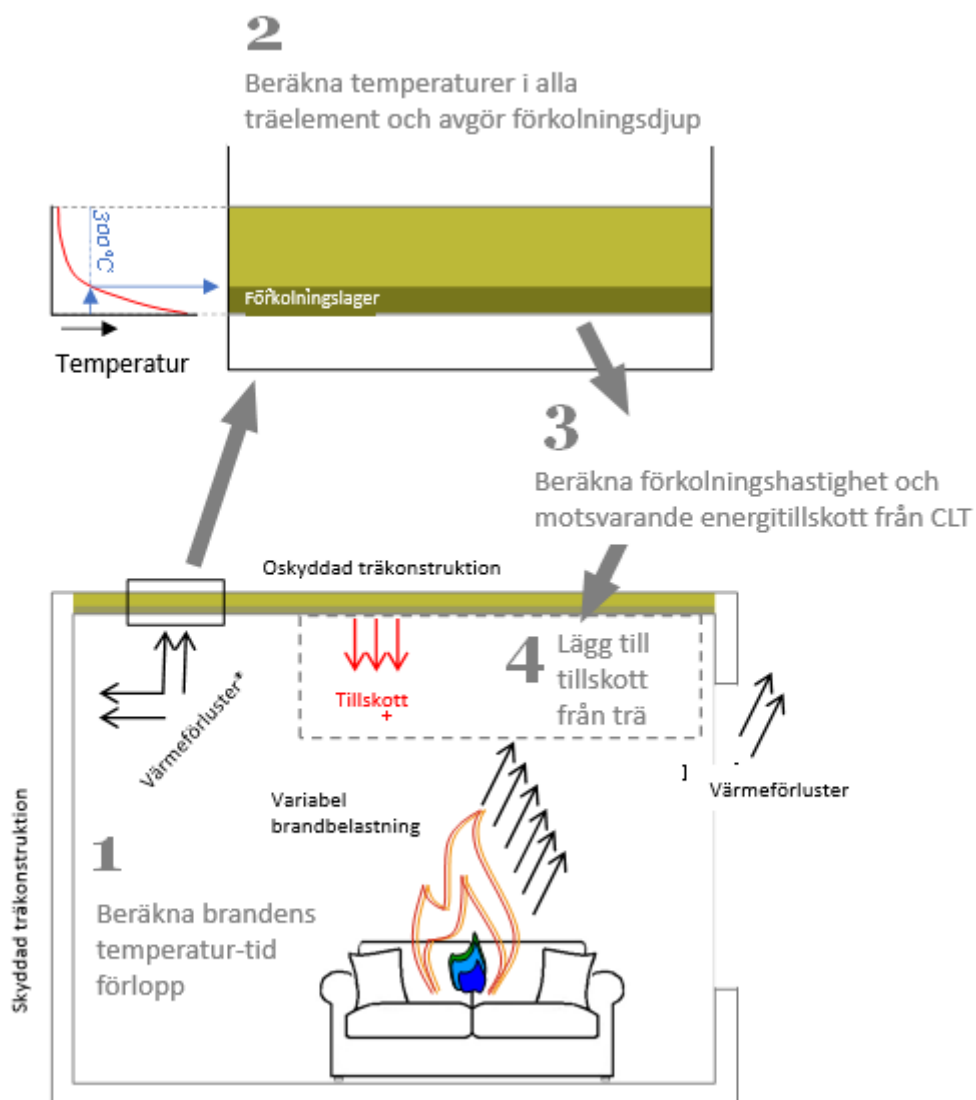
Ett ytterligare fenomen som inkluderas på ett förenklat sätt i modellen är att värmeöverföringen mellan brandrummet och inneslutningen förändras då den flammande fasen av branden är över. Under den fullt utvecklade brandens flammande fas antas brandgaserna vara opaka och värmeöverföringen genom strålning sker direkt från gasen mot alla ytor. När flamfasen är över och temperaturen i brandrummet blir lägre än på ytorna blir volymen genomskinlig och ytorna

”ser” varandra. I denna fas kyls ytorna av konvektion och strålningsutbytet mellan ytorna antas vara litet så emissiviteten sätts till 0 för att simulera ett realistiskt avsvlningsförlopp.

Modellen kan sammanfattas med följande steg:

1. Beräkna brandrummets temperaturutveckling över tid med hjälp av en enzonmodell. Den initiala beräkningen bygger på mängden variabel brandbelastning/brandenergi (se Bilaga B). För alla efterföljande beräkningar används effektkurvan från steg 4.
2. Använd temperaturkurvan i brandcellen för att beräkna temperaturprofilerna i alla skyddade och oskyddade träelement.
3. Beräkna inbränningen och energin som tillförs från de brännbara ytorna.
4. Addera energin som frigjorts från träytorna till den variabla brandenergin inkluderat energin från det oxiderande kolskiktet.
5. Iterera tills modellen konvergerar (Steg 1-4)

Modellen illustreras grafiskt i Figur 1. En mer detaljerad beskrivning av modellen finns i Bilaga A.



Figur 1. Grafisk illustration av den använda beräkningsmodellen.

2.5.1 Grundläggande antaganden hos enzonsmodeller

Ett grundläggande antagande vid enzonsmodellering är att gastemperaturen i utrymmet är homogen, det vill säga det råder samma temperatur i hela utrymmet i ett givet tidssteg. Detta antagande är generellt betraktat som rimligt för bränder där oförbrända brandgaser är välblandade [15], vilket kan uppstå efter övertändning. För stora, öppna lokaler är dock detta antagande inte nödvändigtvis korrekt. Flera experiment har genomförts för att studera effekterna av så kallade "traveling fires" i byggnader med stålstomme, där det indikerats att en långsamt "vandrande" ("traveling") brand kan ge en värre belastning för stålstommen än det som förutsetts vid parametrisk brand [16]. En studie som genomfört motsvarande jämförelse men med träkonstruktion visade dock att motsvarande slutsats inte nödvändigtvis gäller för sådana konstruktioner [17]. Resultaten från den studien redovisas summerat i Tabell 2.

Tabell 2. Summering av resultat från [17].

Parametrar enligt metoden för effektivt tvärsnitt i EN 1995-1-2 ³	Vandrande brand	Parametrisk brand
Förkolningsskikt, d_{char}	42 mm	46 mm
Icke-bärande skikt, d_0	7-12 mm	5-11 mm
Totalt ineffektivt skikt, d_{ef}	49-54 mm	51-57 mm

Även om referenser i fråga endast berör ett specifikt fall och dessutom använder en annan brandmodell än den som tillämpas vid enzonsmodellering så finns begränsningar som fortsatt indikerar att enzonsmodellering är den bästa lösningen för den aktuella problemställningen. De begränsningar som bedöms relevanta för valet inom den aktuella beräkningsmodellen listas nedan:

- Det finns inga tillgängliga studier som indikerar att vandrande bränder är dimensionerande vid brand i träkonstruktioner.
- Det finns inga tillgängliga experiment med en exponerad träkonstruktion där en sakta vandrande brand inträffat.

³ Observera att EN 1995-1-2 endast anger värden för standardiserad brandpåverkan. Värden i tabellen bedöms dock kunna användas i motsvarande tillämpning.

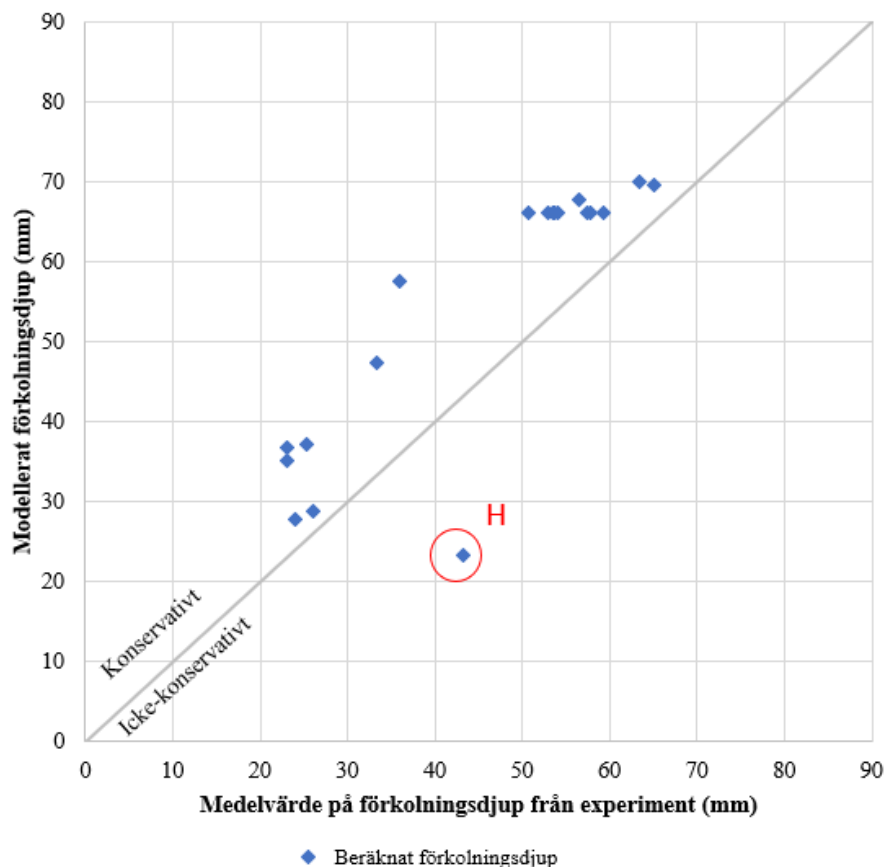
- Det finns få eller inga beräkningsmodeller som kan hantera sakta vandrande bränder.

Utöver ovanstående kan det konstateras att för det största/längsta brandtest med exponerad träkonstruktion som genomförts (20 och 35 meter långa rum) så ger den aktuella modellen konservativa resultat. Detta diskuteras vidare i Bilaga B.

2.5.2 Utvärdering av beräkningsmodell

Beräkningsmodellens beräkningar av förkolningsdjup har validerats mot 22 brandförsök, vilket redovisas i Bilaga B. Försöken inkluderade öppningsfaktorer från 0,03 till 0,27 m^{0,5} och med rumsareor från 7 till 350 m². Modellens uppskattningar konstaterades vara konservativa för samtliga förkolningsdjup i utrymmen med öppningsfaktorer upp till 0,19 m^{0,5}. Dock konstaterades det även att modellen inte gav konservativa resultat för ett test med en öppningsfaktor som var större än 0,27 m^{0,5}, vilket markerats med en röd cirkel i Figur 2. Detta beror sannolikt på att avsvälningstakten i brandrummet överskattats efter det att den flammande fasen av branden avslutats. Några justeringar av modellen testades, men på grund av brist på försöksdata med stora öppningsfaktorer konstaterades det att denna problematik inte enkelt gick att åtgärda. Därför hanteras stora öppningsfaktorer (>0,15 m^{0,5}) genom konservativa antaganden i det föreslagna ramverket. Dessa beskrivs vidare i avsnitt 4.

För övriga öppningsfaktorer konstaterades alltså att modellen gav konservativa resultat.



Figur 2. Modellerat förkolningsdjup jämfört med medelvärdet för förkolningsdjupet i utförda experiment. Experimentet med stor öppningsfaktor är markerad med en röd cirkel och ett rött H.

Vidare konstaterades det att förkolningsdjupet generellt är större längre ner på byggnadsdelarna i brandrummet, vilket sannolikt beror på högre syrekoncentrationer i den lägre delen av brandrummet [13]. Detta innebär att även om modellen generellt ger en bra representation av medelvärdet på förkolningsdjupet på både väggar och i brandrummet som helhet så har den en tendens att underskatta förkolningsdjupet långt ner på väggarna och överskatta förkolningsdjupet i taket. I enlighet med analysen i Bilaga B bedöms förkolningsdjupet fortsatt vara konservativt om användaren multiplicerar modellens förkolningsdjup med:

- 0,85 för att få förkolningsdjup i tak
- 1,0 för att få genomsnittligt förkolningsdjup på väggar, och
- 1,15 för att få förkolningsdjup på den nedre halvan av väggar.

För väggar kan alltså förkolningsdjupet multipliceras med 1,15 för den nedre halvan och med 1,0 för den övre halvan.

Detaljerade jämförelser av specifika brandförsök visade att modellens beräknade yttemperaturer för gipsskivor stämde väl överens med experimentella resultat för plattermoelement. Eftersom både gipsskivor och plattermoelement är termiskt inerta bedöms detta vara en bra jämförelse för modellvalideringen. Dock överskattade modellen de högsta brandtemperaturerna i brandrummet.

2.5.3 Känslighetsanalys

Grundsytet med ramverket som presenteras i denna rapport har varit att göra det så enkelt och praktiskt tillämpbart som möjligt. Det innebär generellt att tabeller med enkla resultatvärden utifrån enkelt identifierbara eller beräkningsbara variabler har eftersträvat. För att nå ett sådant utfall, utan att äventyra ramverkets säkerhet eller giltighet har en omfattande känslighetsanalys genomförts. Målet med känslighetsanalysen, som beskrivs i mer detalj i Bilaga C, har varit att reducera antalet variabler som behöver ingå i resultattabellerna, i och med att tabeller med fler variabler än två generellt blir opraktiskt att tillämpa.

I känslighetsanalysen studerades påverkan av hur utrymmets brandbelastning formulerades, brandrummets storlek respektive bredd/längd-förhållande och omfattning på exponerad trästomme. I den första delen av känslighetsanalysen jämfördes användandet av brandbelastning per golvarea med brandbelastning per omslutningsarea som styrande indataparameter. Resultaten visade att förkolningsdjupet är mer konstant för utrymmen av olika storlek men med samma brandbelastning per omslutningsarea. För utrymmen med olika storlek och samma brandbelastning per golvarea visade beräkningarna att relativt stora variationer av förkolningsdjup förekommer. Det innebär att om brandbelastning per golvyta inte skulle räknas om till brandbelastning per omslutningsarea skulle projektet behöva presentera resultat för många olika storleksintervall av brandceller, något som inte behövs i samma omfattning med aktuellt angreppssätt.

Den andra delen av känslighetsanalysen studerade olika konfigurationer och utformningar av brandrummet. Här konstaterades att utformningen av brandrummet hade minimal påverkan på det beräknade förkolningsdjupet när övriga ingångsvärden hölls konstanta.

I den tredje delen av känslighetsanalysen studerades förkolningsdjupet när brandrummets storlek, brandbelastning och öppningsfaktor varierades. Det konstaterades att beräkningsresultatet varierade mellan 5–10 % beroende på brandcellsstorleken när övriga faktorer hölls konstanta.

Med grund i de tre delarna av känslighetsanalysen beslutades det att införa det mest konservativa resultatet av beräkningar på tre olika brandrumsstorlekar (30, 250 och 1250 m²) i ramverket som presenteras i denna rapport.

2.5.4 Beskrivning av icke-bärande lager

I Eurokod 5 [18] inkluderas tre olika metoder för att dimensionera bärförmåga i träkonstruktioner. I det aktuella arbetet är metoden med reducerat tvärsnitt samt den avancerade beräkningsmetoden i Bilaga B relevanta. Det är värt att notera att metoden med reducerat tvärsnitt motsvarar metoden med effektivt tvärsnitt enligt det förslag som finns till kommande Eurokod 5 [19].

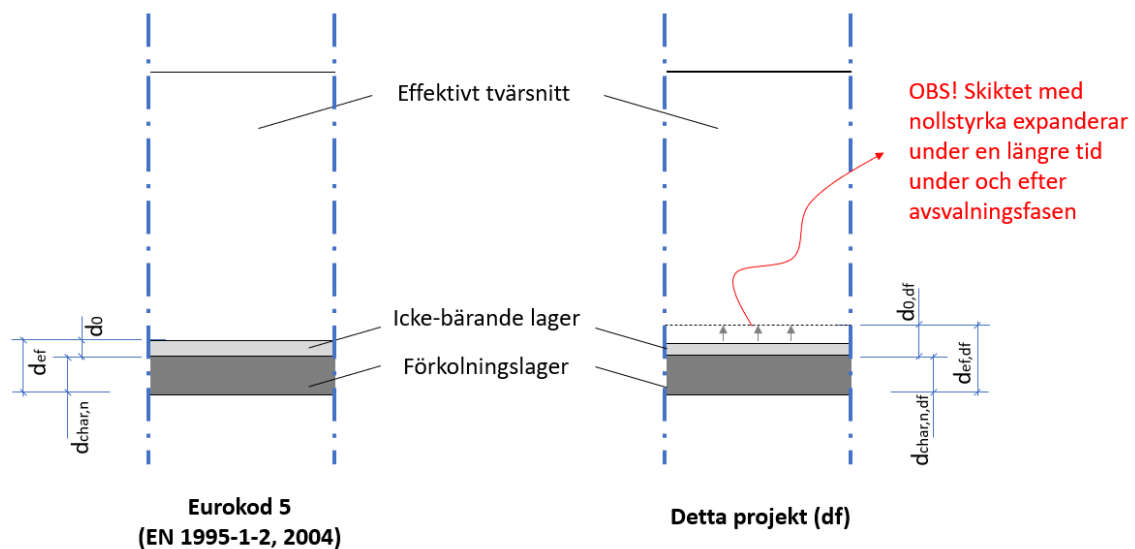
I metoden med reducerat/effektivt tvärsnitt beräknas ett förkolningsdjup (d_{char} i Figur 3) och ett icke-bärande lager (d_0 i Figur 3) som sedan dras bort från den bärande byggnadsdelen vid dimensionering av bärförmåga vid brand. Beräkningen utgår från dimensionering enligt standardbranden, det vill säga den belastning som gäller vid brandprovning. I det aktuella projektet studeras naturliga (eller ”realistiska”) bränder, vilket innebär att motsvarande angreppssätt behöver justeras. Detta då det icke-bärande lagret, som är ett fiktivt lager vars bärförmåga antas försvinna på grund av upphettning i de delar av träkonstruktionen som inte förkolnas, kommer att fortsätta växa i brandens avsvalningsfas, det vill säga även efter att förkolningen i konstruktionen har avstannat [20]. Det beror på träkonstruktionens termiska tröghet, som gör att ”värmevågen” går genom materialet med en viss fördröjning.

Det icke-bärande lagret dras av från bärverksdelens ursprungstvårsnitt samtidigt som olika lastsituationer (t.ex. vid kompression, böjning eller spänning) påverkar tvärsnittet på olika sätt. Det innebär att omfattningen på ett verkligt icke-bärande lager beror på vilken lastsituation som studeras [21]. Exempelvis indikerar resultaten av en nyligen genomförd studie att den bärande

kapaciteten hos axiellt lastade träpelare kan reduceras drastiskt under avsvalningsfasen [22], sannolikt på grund av den termiska trögheten som nämnts ovan.

Utöver den komplexitet i bestämningen av det icke-bärande lagret som nämns ovan är det sannolikt att detta lager skiljer sig i homogena material (t.ex. massivträ) och icke-homogena material (t.ex. KL-trä) [23]. Olika sammansättningar av KL-trä kan därför ge upphov till olika storlek på det icke-bärande lagret. Istället för att kvantifiera detta lager för många olika konstruktioner och lastsituationer så ges istället temperaturprofilerna vid förkolningsranden i Bilaga D. Arbetet med att kvantifiera det icke-bärande lagret föreslås som en vidareutveckling av detta arbete.

Principen för beräkningen av det reducerade/effektiva tvärsnittet i det aktuella projektet jämfört med det som föreslås i Eurokod 5 illustreras i Figur 3.



Figur 3. Metoden med reducerat tvärsnitt i Eurokod 5 (t.v.) jämfört med metoden som tillämpas i detta projekt (t.h.).

Observera att denna metod inte kan användas för bärverksdelar med små tvärsnitt och som exponeras från flera sidor. För beräkningar av brandmotstånd anger Eurokod 5 att hänsyn ska tas till 8-10 % extra förkolning för att kompensera för hörneffekter. Metoden med reducerat tvärsnitt får inte användas för linjära element där den minsta tvärsnittsdimensionen understiger $4x_{d_{char}}$. Dessa riktlinjer är dock baserade på data från brandmotståndsprovningar, som i

allmänhet ger branta temperaturprofiler när ytan i trämaterial. Vid naturliga brandförlopp tränger värmen längre in i konstruktionen under avsvlningsfasen, vilket kan ge större påverkan på kapaciteten i materialet vid långa bränder eller bränder med lång avsvlningsfas. I brist på en bättre riktlinje rekommenderar författarna att måttet ovan från Eurokod 5 kan användas som vägledning men att det bör behandlas med viss försiktighet. Om det råder tveksamheter kring måttets tillämpbarhet rekommenderas en numerisk analys med beräkningar som baseras på de brandgastemperaturer som anges i bilaga E. För dessa beräkningar kan beräkningsmetoder enligt Eurokod 5 Annex B tillämpas. I stället för att använda de materialegenskaper som anges i det aktuella annexet till Eurokod 5 rekommenderas dock att använda de materialegenskaper som anges i bilaga A (tabell 5) i denna rapport. Alternativt kan andra termiska materialegenskaper användas som har fastställts för naturlig brandexponering.

2.6 Riktlinjer för projektering/användning av resultat

Ett huvudsyfte med projektet har varit att ta fram enkla riktlinjer som ska kunna tillämpas vid projektering av byggnader med brännbar stomme. Användbarhet och enkelhet har därför varit i fokus vid val av tillvägagångssätt och beräkningsfall. Trots detta har vissa anpassningar behövts göras på grund av analysmodellen, projektets tidplan och budget.

En sådan anpassning är att projektören behöver anpassa brandbelastningen i utrymmet som studeras till brandbelastning per omslutningsarea istället för golvarea som normalt används. Detta har diskuterats i avsnitt 2.5.3 och redogörs vidare för i Bilaga C.

En ytterligare anpassning är att projektörerna ansvariga för konstruktionen fortsatt behöver beräkna det icke-bärande skiktet ("zero strength layer") för respektive bärverksdel som finns i de utrymmen som analyseras. Som underlag till en sådan beräkning ges dock temperaturprofilen i trä i Bilaga D. Anledningen till att inte tjockleken på ett sådant skikt också kan ges är att det beräknas olika beroende på om bärverksdelen utsätts för ensidig brandpåverkan (som t.ex. för ett brandavskiljande bjälklag eller en brandavskiljande vägg) eller om den utsätts för brandpåverkan på flera sidor (som t.ex. för en pelare eller balk). För att kunna presentera sådana resultat hade det alltså behövts genomföras ett stort antal strukturella beräkningar för respektive beräknat förkolningsdjup, något som inte gick att genomföra inom ramen för projektets tidplan och budget.

Hur byggnader ska projekteras med stöd av det aktuella projektet redovisas vidare i avsnitt 4 och ett exempel på tillämpning ges i avsnitt 5.

3 LITTERATURSTUDIE

Det finns många aspekter av hur träkonstruktioner påverkar branddynamiken vid ett brandförlopp och även många andra aspekter att beakta när trä inkluderas i byggnader på olika sätt. Det finns flera referenser som ger en överblick över sådana aspekter, t.ex. [2], [24], och en helhetsbild presenteras inte i denna rapport. Här fokuseras istället på de aspekter som har påverkan på byggnadens brandbelastning och/eller som har direkt påverkan på den bärande eller avskiljande förmågan hos träkonstruktioner vid brand.

Nedan redovisas den litteratur som studerats i projektet övergripande. Syftet är att ge en överblick över vilka dokument som legat till grund för projektet och inte att redovisa detaljer inom respektive källa.

3.1 Brandbelastning och brandmotstånd

Brandbelastning är ett avgörande begrepp i det svenska brandskyddsregelverket. Enligt Boverkets allmänna råd om brandbelastning (BBRBE) [25] definieras brandbelastning enligt följande:

Med brandbelastning avses brandenergi per golvarea inom ett visst utrymme. Brandbelastning bestäms för den totala mängd energi som kan förbrännas vid ett fullständigt brandförlopp i förhållande till golvarean för aktuellt utrymme.

Brandbelastning är alltså allt brännbart i ett utrymme som vid en brand kan förväntas brinna upp. Brandbelastningen reglerar i sin tur flera av kraven i byggreglerna, så som krav på brandmotstånd hos brandcellsgränser och bärverk. Generellt gäller att högre brandbelastning ger högre krav. Exempelvis dimensioneras bostäder och kontor för ”normal brandbelastning”, vilket innebär under 800 MJ/m^2 golvarea. Det ger ett grundkrav på 60 minuters brandmotstånd enligt standardbranden ISO 834 [26].

Bakgrunden till att brandbelastning utgör en viktig del av regelverket kan spåras tillbaka till början av 1900-talet [27]. Då genomfördes ett antal större brandtester och bakgrunden till det som nu är standardbranden utvecklades. I senare arbeten kopplades även brandbelastningen till brandmotståndet och tanken var då, i alla fall enligt flera senare tolkningar, att brandmotståndet i en ”fullt skyddad” byggnad skulle motsvara att all brandbelastning i ett utrymme konsumerades, utan påverkan av räddningstjänsten eller annan släckning [27], [28]. Denna

grundtanke har till stor del levt kvar i det svenska regelverket, vilket även kan ses i Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder) [7]. Där anges det att vid dimensionering genom beräkning så ska de högre brandsäkerhetsklasserna motstå ett fullständigt brandförlopp, inklusive avsvalningsfas.

Det kan konstateras att det som normalt anges som 60 minuters brandmotstånd i det svenska regelverket alltså har som grundsyfte att motstå att all brandbelastning konsumeras vid brand i ett utrymme, utan att branden påverkas av en släckinsats eller annan begränsning. Detta bekräftas av Boverkets remiss till nya byggregler där bland annat följande anges [11]:

Skyddsmålet för byggnader i byggnadsklass Br1 är att det bärande huvudsystemet ska vara utformat för att utan insats från räddningstjänst med stor sannolikhet motstå ett fullständigt brandförlopp inklusive avsvalningsfasen.

När byggnaden blir tillräckligt hög införs även en säkerhetsmarginal för att ytterligare minska risken att ett brands intensitet och förlopp överskrider den belastning som bärverket i byggnaden är dimensionerat för. Summerat uttrycker sig Boverket i samma remiss som nämns ovan enligt följande:

En vanlig missuppfattning är exempelvis att brandmotståndstiden 60 minuter (R 60) i en byggnad i byggnadsklass Br1 innebär att bärförmågan vid brand är 60 minuter. I själva verket innebär detta alltså att byggnadsdelen med stor sannolikhet ska motstå ett fullständigt brandförlopp, oavsett hur intensivt brandförloppet är och därmed hur snabbt energin i brandbelastningen frigörs. När antalet våningsplan ökar i byggnaden, ökar också den brandmotståndstid som en byggnadsdel ska uppfylla. Inte heller här ska detta förstås som att byggnadsdelar i en högre byggnad ska förutsättas kollapsa efter en längre tid än i en lägre byggnad, utan i stället som att en ökad säkerhetsmarginal mot kollaps ska finnas.

3.2 Bakgrund till kraven på brandmotstånd i det svenska regelverket

I Sverige reglerades byggande länge på lokal nivå och de första nationella byggreglerna infördes av Byggnadsstyrelsen 1947 [29] tillsammans med anvisningar som komplement till dessa regler [30]. Där angavs bland annat att brandmotståndsklasser, vilka delades in efter om materialet var obrännbart eller innehöll brännbara delar samt efter hur lång brandprovningstid och efterföljande vattenbegjutning som materialet klarat. För byggnader med tre eller fler våningsplan skulle vertikala bärverk då utföras brandsäkra, vilket bland annat innebar att konstruktionen skulle vara obrännbar. För byggnader med fler än fyra våningsplan skulle även

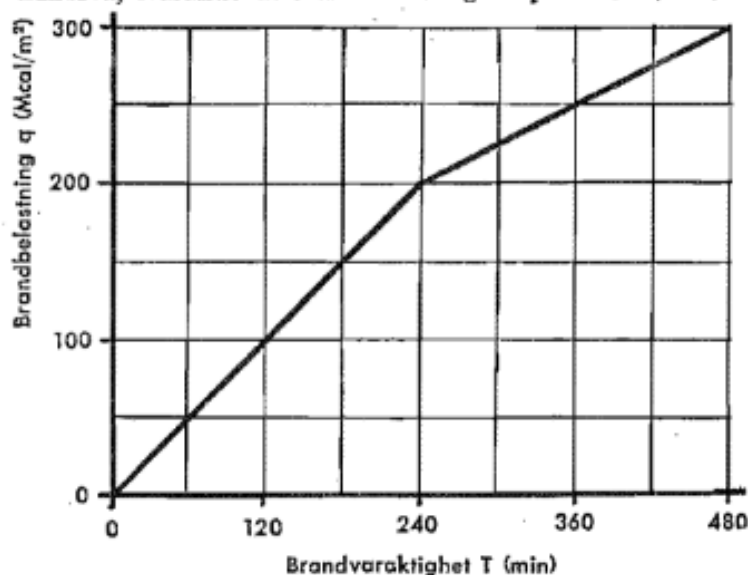
bjälklag utföras obrännbara. Dessutom angavs att byggnader av trä med större planyta än 300 m² skulle delas in med brandmurar så att den ytan inte överskreds i någon del.

Kopplingen mellan krav på bärverk och brandbelastningen infördes sedermera i det byggregelverk som kallades Svensk Byggnorm och som utgavs av Statens planverk 1967 [31]. Där angavs att:

Brandbelastningen för en brandcell utgör den sammanlagda värmemängd (q), som per ytenhet av brandcellens totala omslutningsyta (A_t) frigörs vid en fullständig förbränning av allt brännbart material i brandcellen (inkl byggnadsstomme, inredning, beklädnad och golvbeläggning).

I byggreglerna angavs även att brandmotståndet kunde bestämmas utifrån en temperatur-tidkurva som uttrycktes med en ekvation lik den som idag definierar standarbranden enligt ISO 834. Samband mellan brandgastemperaturer och tiden utifrån den styrande ekvationen angavs i en separat tabell. Det angavs även ett förenklat samband mellan brandvaraktigheten och brandbelastning som återges nedan [31].

För brandcellens avsvalningsfas väljs en linjär temperatur-tidkurva, svarande mot en minskning i θ_t av 10°C/min.



Figur 4. Samband mellan brandvaraktighet och brandbelastning enligt SBN 67.

Vidare angavs att teoretiska beräkningar med utgångspunkt i värme- och massbalanskvationer kunde tillämpas. Här angavs även förenklade samband för brandcellstemperaturer vid olika öppningsfaktorer.

I uppdateringen av Svensk byggnorm 1975 [32] infördes en tabell med ett utseende likt den som fortfarande finns i nu gällande allmänna råd om brandbelastning, BBRBE [25]. Tabellen visas nedan.

Byggnadsdel	I annan byggnad än brandsäker eller brandhärdig	I brandhärdig byggnad	I brandsäker byggnad för olika brandbelastning f (MJ/m ²)			
			$f \leq 100$	$100 < f \leq 200$	$200 < f \leq 400$	$f > 400$
	1	2	3	4	5	6
1. Vertikalt bärverk jämte stomstabiliserande horisontellt bärverk						
a) i byggnad med högst 2 våningar	–	B 30	B 30	B 60	B 120	B 240
b) i byggnad med 3 eller 4 våningar	–	–	A 30	A 60	A 120	A 240
c) i byggnad med fler än 4 våningar	–	–	A 60	A 90 ^e	A 180 ^g	A 240
d) under översta källarplanet	A 60	A 60	A 60	A 90	A 180	A 240
2. Horisontellt, ej stomstabiliserande bärverk	–	B 30	B 30	B 60	B 120	B 240
3. Brandcells begränsande byggnadsdel ^a	B 30	B 30	B 30	B 60	B 120	B 240
4. Trappa (trapplopp och trappplan) utan brandcells begränsande funktion ^b	A 30 ^d	A 30 ^d	A 30	A 30	A 30	A 30
5. Fönster, dörr eller lucka i brandcells begränsande byggnadsdel, såvida ej annat särskilt anges ^c	B 15	B 30	B 30	B 60	B 60	B 60
6. Brandmur (jfr :37)	A 120	A 120	A 120	A 120 ^f	A 180 ^f	A 240

^a I brandsäker byggnad gäller att byggnadsdel, som avskiljer källare från byggnaden i övrigt, utförs i A-klass med angiven sifferbeteckning samt att vindbjälklag i B-klass förses med tändskyddande beklädnad på ovansidan. Beträffande yttervägg se :341 och :342.

^b Angivna krav behöver inte uppfyllas beträffande trappa för kommunikation inom annan brandcell än trapphuset.

^c Ej bärande överstycke till dörr får utföras i samma klass som dörren.

^d Endast för trappa belägen under översta källarplanet.

^e I byggnad med högst åtta våningar gäller A 60 för bjälklag.

^f Gemensam brandmur dock A 240.

^g I byggnad med högst åtta våningar gäller A 120 för bjälklag.

Figur 5. Tabell för brandklasser beroende på brandbelastning från SBN 1975.

Tabellen kompletterades med en anvisning att kolumn 4, det vill säga brandbelastning på mellan 100 och 200 MJ/m² kunde tillämpas för bostads- och kontorslägenheter, skola, hotell, personbilsgarage samt utrymme med förråd för bostadslägenheter. Det angavs även att den kolumnen kunde tillämpas vid högre brandbelastning än 200 MJ/m², om det fanns förutsättningar för att brandförsvaret genom insats eller på annat sätt sannolikt kunde bekämpa branden inom 60 minuter från brandstart. Observera att brandbelastningen uttrycktes som en funktion av omslutningsarean, vilket är anledningen till att värdena är avsevärt lägre än de som idag ges i BBRBE.

Siffrorna som hänvisar till klasserna i tabellen baserades på statistiska undersökningar för olika lokal- och byggnadstyper som publicerades i en separat kommentar till byggnormen [33]. Värdena från den undersökningen redovisas i Figur 6 nedan, då återskapade från rapporten *Brandteknisk dimensionering av massiva träkonstruktioner* [34]. Dessa värden är de som fortsatt legat till grund för värden på dimensionerande brandbelastning i samtliga regelverk fram till och med dagens BBRBE [25], vilket även bekräftats av Boverket i remissen till de kommande byggreglerna [11].

Det kan alltså noteras att det statistiska underlaget, som fortfarande gäller som dimensionerande brandbelastning, är insamlat på en tid då brännbar stomme inte tilläts för byggnader i fler än tre till fyra våningsplan. Det bör även noteras att praxis vid tillämpning var att golvbeläggningen inte ingick i de dimensionerande värdena utan att denna lades till separat vid dimensionering, eftersom golvbeläggning normalt är homogen och därför enkel att kvantifiera brandbelastningen ifrån [34].

Vidare angavs i SBN 1975 [32] att dimensionering genom beräkning fortsatt var möjligt och att ekvationerna för värme- och massbalans då kunde utgå från att 80:e percentilen av det statistiska underlaget för brandbelastning. Det angavs även flera kurvor för olika brandgastemperaturer beroende av öppningsfaktor och brandbelastning.

Typ av lokal eller byggnad	Brandbe- lastning, medelvärde	Brandbe- lastning, standard- avvikelse	Dimensionerande brandbelastning. (Brandbelastning som innehålls i 80 % av observe- rade fall)
	MJ m ⁻²	MJ m ⁻²	MJ m ⁻²
1 Bostäder ¹			
1a 2 rum + kök	150	24,7	168
1b 3 rum + kök	139	20,1	149
2 Kontorshus ^{2,3}			
2a Tekniska kontors- lokaler (arkitekt- kontor o d)	615	155	730
2b Ekonomiska och administrativa kon- torslokaler (banker, försäkringsbolag o d)	512	162	644
2c Samtliga undersökta kontorslokaler	579	205	709
3 Skolor ²			
3a Lågstadieskolor	84,2	14,2	98,4
3b Mellanstadieskolor	96,7	20,5	117
3c Högstadieskolor	61,1	18,4	71,2
3d Samtliga undersökta skolor	80,4	23,4	96,3
4 Sjukhus	116	36,0	147
5 Hotell ²	67,0	19,3	81,6

¹ Brandbelastning av golvbeläggning är ej inkluderad i angivna värden.

² Angivna värden gäller endast brandbelastning av lösa inventarier.

³ Här angivna värden refererar till kontorsrummens golvyta i stället för brandcellens omslutningsyta, beroende på svårigheter att bestämma brandcellernas storlek vid den statistiska undersökningen. Brandbelastningen refererad till omslutningsarean erhålls genom att tabellvärdena multipliceras med kvoten mellan brandcellens golvarea och omslutningsarea.

Figur 6. Tabell över statistiska underlag till dimensionerande brandbelastningsvärden i Svensk Byggnorm 1975.

I Svensk Byggnorm 1980 [35] infördes en ytterligare parameter att beakta vid dimensionering genom beräkning, genom att byggnadsdelar med ett grundkrav på A 90 skulle dimensioneras med en utökad brandbelastning om 50 %. Detta är alltså motsvarande krav som idag ges för vissa byggnadsdelar vid beräkning av naturligt brandförlopp i EKS [7]. Varför kravnivån infördes har det inte hittats några noteringar kring men det kan konstateras att höjningen av brandbelastningen är i linje med det utökade minutkravet som funnits för vissa bärverksdelar i högre byggnader sedan SBN 1975 [32]. Enligt Boverket är grunden till detta utökade krav dock en utökning av säkerhetsmarginalen vid dimensionering av bärverksdelar vars kollaps kan innebära en mycket stor konsekvens [11].

Motsvarande tabeller, fastän omarbetade i mindre delar, fanns kvar i regelverket även när Svensk Byggnorm byttes ut mot Nybyggnadsreglerna 1988 [36]. Vid övergången till Boverkets Byggregler (BBR) 1994 [37] gjordes ett antal större förändringar varav en var att regelverket blev så kallat ”materialneutralt”. Detta innebar att byggnader med brännbar stomme nu kunde uppföras med fler våningsantal än tidigare. I konsekvensutredningen till denna ändring angav Boverket att det nu skulle bli möjligt att bygga hus med fler våningar i trä än tidigare och att det fanns exempel på byggnader i trä med upp till fem våningsplan i t.ex. USA och Kanada. I BBR infördes även en ny not i anslutning till tabellen för krav på bärverk där det angavs att *”om det i byggnadsdelen ingår brännbart material, behöver detta endast beaktas i skäligen utsträckning vid beräkning av brandbelastning”*. Inga övriga schabloner för brandbelastning eller liknande uppdaterades i samband med denna övergång. Möjligheten att dimensionera för den lägsta brandbelastningen om räddningstjänsten kunde förväntas hantera branden inom 60 minuter behölls och kompletterades med att motsvarande dimensionering kunde tillämpas i byggnader med skydd av automatisk vattensprinkler [37].

I övergången till BBR 19 [38] som skedde 2012 ändrades brandbelastning från att uttryckas som en funktion av omslutningsarea till golvarea. Syftet var dock inte att ändra kravnivåer och nya nivåer bedömdes motsvara tidigare nivåer [39]. I och med övergången till BBR 19 utgick även Boverkets konstruktionsregler och samtliga brandskyddskrav på konstruktioner hanterades istället inom då gällande EKS 7 [40]. Inom BBR 19 och EKS 7 utgick även möjligheten att dimensionera för att räddningstjänsten skulle kunna hantera branden och reduktionen för sprinklade ändrades till att reducera en klassificeringsperiod för vissa bärverk istället för tidigare gällande generella reduktion oavsett brandbelastning och bärverksdel.

2013 införde Boverket ett nytt allmänt råd om brandbelastning, BBRBE [25], som då ersatte en tidigare handbok som Boverket gett ut 2008 och som gav vägledning om brandbelastning [41]. Denna handbok publicerades i samband med införandet av EKS. Handboken och det allmänna rådet är väldigt liknande och motsvarande schabloner återfinns i båda. I båda anges att permanent brandenergi kan vara exempelvis brännbara bärande byggnadsdelar inklusive den bärande konstruktionen. I handboken angavs dock även att konservativa uppskattningar av den permanenta brandbelastningen kan vara att föredra, eftersom exempelvis tilläggsisolering i framtiden skulle kunna öka den permanenta brandbelastningen i ett utrymme [41]. Både handboken och BBRBE anger dock att 200 MJ/m² kan ansättas som permanent brandbelastning och i båda skrifterna anges samma schabloner som tidigare gällt sedan SBN 1975.

I handboken angavs även att brandbelastningen kunde reduceras till 61 % av ursprungsvärdet i sprinklade utrymmen, vilket baserades på en sannolikhetsavvägning där säkerheten i en normal osprinklad byggnad bedömdes vara motsvarande som den i en sprinklad byggnad med reducerad brandbelastning [41]. Denna reduktion finns idag kvar både inom EKS 12 [7] och i BBRAD [42] men har justerats till 60 %.

I EKS 11 som infördes 2019 [43] infördes ytterligare en förutsättning vid dimensionering, nämligen att en särskild bedömning numera ska utföras för Br0-byggnader, det vill säga byggnader med mycket högt skyddsbehov. En sådan bedömning kan resultera i att kravnivån behöver utökas enligt förenklad dimensionering och vid dimensionering enligt naturligt brandförlopp kan den innebära att brandbelastningen ska utökas med 100 % för vissa byggnadsdelar. Värt att notera är att denna kravhöjning är tillbakadragen i den remiss som Boverket skickat ut för kommande byggregler [11].

Det kan alltså konstateras av ovanstående att brandbelastning varit en avgörande del av det svenska brandtekniska regelsystemet ända sedan krav på nationell nivå infördes. Det kan även konstateras att kravnivåer till viss del utvecklats men att hänsyn till effekterna av den brännbara stommen inte följt med fullt ut när regelverket blev material neutralt. Denna problematik har på senare år uppmärksammats i större utsträckning [5], [44] och Boverket har redan innan den nu gällande remissen publicerades aviserat att de avsett utreda frågan mer noggrant i kommande regelförändringar. Vidare kan det konstateras att grundsyftet hela tiden bedöms ha varit att en konstruktion i en byggnad med fler än tre till fyra våningsplan ska kunna motstå ett fullständigt brandförlopp inklusive avsvalningsfas för den brandbelastning som kan förväntas i utrymmet, både permanent och variabel.

3.3 Föreslagna ändringar av det svenska regelverket

Som nämnt ovan har Boverket nyligen släppt en remiss [11] på det som avses bli de nya byggreglerna som enligt nu gällande tidplan ska träda i kraft sommaren 2024, med övergångstid ett år. Byggreglerna är fullständigt omstrukturerade och innebär flertalet nyheter i förhållande till dagens regelverk. Ett av syftena med de nya byggreglerna är enligt Boverket att *”Byggreglerna ska utgöras av ett förenklat, konsekvent och funktionsbaserat teknik- och materialneutralt regelverk med en likriktad struktur och detaljeringsgrad.”*

Boverket lyfter att ”Flervåningsbyggnader med brännbar stomme” har varit en fokuspunkt under revideringsarbetet och kravnivån har i förslaget justerats för sådana byggnader under vissa förutsättningar. I förslaget finns ett förtydligande gällande tillskottet av permanent brandbelastning för byggnader med brännbar stomme och hur, samt när, denna ska beaktas vid dimensioneringen. I stort berör skillnaden inte byggnader med färre än fem plan som alltså kan utformas med motsvarande skydd som tidigare.

För byggnader med fler än fyra plan ovan mark behöver tillskottet av permanent brandbelastning beaktas, dock med undantag för byggnader som är upp till och med 8 plan ovan mark och försedda med sprinklerskydd samt för byggnader där stommen skyddas mot ett fullständigt brandförlopp (K_{260} för byggnader med variabel brandbelastning $<600 \text{ MJ/m}^2$). Det senare är aktuellt för de flesta verksamheter som normalt finns i byggnader med fler än fem våningsplan, det vill säga t.ex. hotell, bostäder, kontor och liknande.

De föreslagna förändringarna summeras i tabellen på nästa sida.

Tabell 3. Summering av krav för att inte behöva beakta tillskottet av permanent brandbelastningen från stommaterialet.

Byggnad	Krav (en av punkterna väljs)
Upp till och med fyra plan ovan mark	<ul style="list-style-type: none"> Tillskott av permanent brandbelastning behöver inte beaktas
Fem till åtta plan ovan mark för verksamheter med <600 MJ/m ² i variabel brandbelastning T.ex. kontor, bostäder, hotell och skolor	<ul style="list-style-type: none"> Sprinkler Stomme skyddas motsvarande K₂60
Fem till åtta plan ovan mark för verksamheter med >600 MJ/m ² i variabel brandbelastning T.ex. shoppingcentrum, arkiv, bibliotek	<ul style="list-style-type: none"> Stomme skyddas motsvarande ett fullständigt brandförlopp
Fler än åtta plan ovan mark	<ul style="list-style-type: none"> Stomme skyddas motsvarande ett fullständigt brandförlopp

Alternativen till ovanstående är att antingen beräkna, och hantera, brandbelastningstillskottet från den brännbara stommen eller att dimensionera efter naturliga brandförlopp. Att hantera brandbelastningstillskottet från stommen inom ramarna för förenklad dimensionering bedöms dock problematiskt, då de flesta schabloner inte ger utrymme för en speciellt hög ökning av brandbelastning. Sådan dimensionering kommer alltså sannolikt innebära väldigt höga krav på både stomme och brandceller. För att kunna exponera trästommen inom kommande regelverk kan dimensionering enligt naturligt brandförlopp således bli en viktig metod.

Det bör dock noteras att det som presenterats av Boverket endast är ett förslag och den slutgiltiga utformningen av regelverket är således inte känd vid skrivandet av denna rapport.

3.4 Trä och brand

Trä är ett brännbart material som börjar pyrolyseras (det vill säga utsöndrar brännbara gaser) vid ca 200-300 °C [45]. Det innebär att när trä är en del av en byggnads konstruktion så påverkas branddynamiken vid en rumsbrand, under förutsättning att träkonstruktionen är, eller blir, exponerat mot branden. En viktig parameter som påverkar brandförloppet är att energimängderna i det trä som pyrolyseras tillförs till rumsbranden, det vill säga brandbelastningen i utrymmet ökar, vilket bidrar till ett intensivare och/eller längre brandförlopp

[2]. I vilken omfattning som brandbelastning tillförs till en rumsbrand beror dock på ett flertal faktorer så som öppningsfaktor, variabel brandbelastning, utformning av lokalen, med mera [2], [24].

3.5 Repeterbarhet vid tillämpning av analytiska lösningar

Det svenska brandskyddsregelverket är, som för flera andra länder, i grunden funktionsbaserat. Det innebär att analytiska lösningar kan tillämpas som alternativ till att använda förenklade regler och klassificeringar. När analytiska lösningar tillämpas inom brandskydd ställer det dock relativt höga krav på kompetensen hos den aktuella projektören. För att säkerställa att korrekta säkerhetsnivåer erhålls är det viktigt att utvärdera repeterbarheten i sådana lösningar.

För att utvärdera detta har så kallade ”Round Robin”-studier genomförts på olika delar av brandområdet. Round Robin-studier innebär att flera olika aktörer ges samma problem och ombeds lösa detta oberoende av varandra. För de studier som genomförts på brandområdet konstaterades stora skillnader i bedömningarna [46], [47], vilket bedömdes kunna innebära trovärdighetsproblem för sådan dimensionering.

För vissa metoder, så som de zonmodeller som används inom ramarna för det aktuella projektet, har det dock konstaterats att a priori modellering av fullskaliga brandförsök överensstämmer relativt väl med verkligheten [48]. De använda beräkningsmetoderna är dock komplexa och har flera viktiga begränsningar, vilket gör att det fortfarande finns risk för felanvändning hos projektörer och andra tillämpare. Det är därför viktigt med tydlig struktur och vägledning i hur dessa modeller, och resultaten från dem, kan användas [48].

3.6 Brandbelastning för olika verksamheter

Som nämnt ovan är grunderna för de svenska riktlinjerna för brandbelastning relativt gamla och inte nödvändigtvis representativa för verksamheter som finns idag. I litteraturstudien genomfördes därför en övergripande undersökning kopplat till om det finns annat underlag för brandbelastning som kan vara mer relevant att luta sig mot. En sammanfattning av olika källor och vilken variabel brandbelastning som föreslås för dessa redovisas i tabellen på nästa sida.

Tabell 4. Sammanställning av variabel brandbelastning för olika verksamheter från olika källor.

Verksamhet	BBRBE* [49]	SS-EN 1991-1-2* [8]	PD 7974-7*** [50]	Spearpoint, et al. 2015* [51]	Zalok, et al. 2009** [52]
Bostad	750	948	780		
Hotell	400	377	310		
Kontor	520	511	420		
Restaurang	600		298		582
Affär/Varuhus	750	730	393		661
Parkeringshus	400			260	
Skola	450	347	285		
Sjukhus	360	280	230		

* 80:e percentil

** 95:e percentil

*** Medelvärde

Som ses ovan är de olika referenserna relativt svåra att jämföra då det i många fall anges olika percentiler och det är inte alltid som den underliggande fördelningen redovisas. Det kan även konstateras att bakgrundsmaterialet till det som anges även i andra länders standarder inte alltid beskriver hur dimensionerande värden tagits fram.

3.7 Öppningsfaktorns påverkan på brandförloppet

Som nämnt ovan är öppningsfaktor en viktig parameter som har stor påverkan på brandförloppet i ett utrymme. Sammanställningar av öppningsfaktorer har genomförts i tidigare studier [13] och dessa kontrollerades inom projektet mot ett antal olika ritningsunderlag inom projekt som deltagarna varit involverade i. Sammantaget användes underlaget för val av öppningsfaktorer att studera vidare inom projektet.

3.8 Sammanfattande diskussion

Av litteraturstudien ovan kan det konstateras att ett grundsyfte med gällande regelverk varit att byggnader med fler än tre till fyra våningar ska kunna motstå ett fullständigt brandförlopp med

den brandbelastning som finns i utrymmet. Även om denna faktor inte fullt ut följt med i regelverket vid förändringarna som innebar att högre byggnader med brännbar stomme blev tillåtet så bedöms det fortsatt varit en grundläggande faktor i kravens utformning. För vissa byggnadsdelar finns även ett ökat skyddsbehov, vilket gör att dessa ska hanteras med större säkerhetsmarginal, även den kopplad till brandbelastningen i utrymmet.

Av Boverkets nya regelförslag kan det även konstateras att beräkning av naturligt brandförlopp, likt det som genomförs inom ramarna för det aktuella projektet, bedöms bli en viktig del av att kunna exponera bärande trästommar om förslaget genomförs. För träkonstruktioner är sådana beräkningar komplicerade och det bedöms därför finns behov av tydliga ramverk och vägledning för att säkerställa korrekt hantering av projektörer.

Med grund i litteraturstudien har utgångspunkten för det vidare arbetet varit att verifiera funktionskravet att en byggnad ska kunna motstå ett fullständigt brandförlopp i enlighet med kravnivåerna som anges för naturliga bränder i EKS 12 [7]. Detta innebär även att hänsyn tagits till att brandbelastningen kan behöva utökas 50-100 % beroende på byggnad och byggnadsdel när val av beräknade brandbelastningsnivåer gjorts.

4 RAMVERK FÖR DIMENSIONERING AV TRÄKONSTRUKTIONER

Nedan redovisas dimensioneringsprocess samt förkolningsdjup och passivt skydd av icke-exponerade ytor.

4.1 Dimensioneringsprocess

Det ramverk som föreslås för dimensionering av träkonstruktioner innebär att projektören behöver genomföra följande steg:

1. Definiera dimensionerande öppningsfaktor för utrymmet/lokalen/byggnaden.

Generellt ger en mindre öppningsfaktor mer konservativa resultat. Om flera olika delar av en byggnad dimensioneras med en och samma öppningsfaktor bör därför den dimensionerande öppningsfaktorn vara den minsta som förekommer inom de delar som berörs av den aktuella dimensioneringen.

2. Definiera dimensionerande brandbelastning.

Brandbelastningen som avses här är den dimensionerande brandbelastning (variabel och permanent) som förekommer i utrymmet/lokalen/byggnaden och som inte består av de brännbara byggnadsdelar som är exponerade enligt kommande steg i denna dimensioneringsprocess. I många fall kan därför sannolikt permanent brandbelastning reduceras, eller eventuellt bortses från, vid val av denna brandbelastning. Det är upp till respektive projektör att avgöra hur stor denna brandbelastning är.

Observera att valet av brandbelastning kan påverka framtida flexibilitet i utrymmet/lokalen/byggnaden i och med att det har avgörande påverkan på dimensioneringen. Att ändra verksamhet till en med högre brandbelastning kan således vara svårt om detta inte tagits höjd för från början.

3. Om brandbelastning enligt steget ovan uttryckts per golvarea – omvandla denna till per omslutningsarea.

Observera att omslutningsarea här är arean av golv, tak och väggar, inklusive öppningar, så som dörrar och fönster. Dock inkluderas **inte** innerväggar, pelare och/eller balkar. Normal görs denna bedömning för respektive studerad brandcell.

4. Definiera exponerad omfattningen på exponerad brännbar stomme i utrymmet/lokalen/byggnaden i förhållande till omslutningsytan.

Observera att omslutningsarea här är arean av golv, tak och väggar, inklusive öppningar, så som dörrar och fönster. Här inkluderas dock innerväggar, pelare och/eller balkar.

5. Identifiera korrekt tabell i avsnitt 4.2 för att definiera förkolningsdjup.

Om värden hamnar ”mellan” olika tabeller eller värden i tabeller kan linjär interpolering tillämpas för att definiera korrekt värde. Justering av förkolningsdjup utförs i enlighet med avsnitt 4.5.

6. Identifiera temperaturprofil vid förkolningsranden i Bilaga D för beräkning av icke-bärande lager.

Om projektören inte är bekant med denna typ av beräkning rekommenderas det att en person med tillräcklig kompetens tillfrågas för att utföra beräkningen.

7. Identifiera korrekt tabell i avsnitt 4.3 för att definiera passivt skydd för icke-exponerade ytor.

I tabellerna ges brandmotstånd i minuter. Det innebär att ytorna ska skyddas med tändskyddande beklädnad (K₂XX) i motsvarande de minuttal som anges i tabellerna.

Om värden hamnar ”mellan” olika tabeller eller värden i tabeller kan linjär interpolering tillämpas för att definiera korrekt värde.

8. Välj lämplig skyddsmetod för att uppfylla steg 7.

Skyddsmetoden kan vara gips, brandgips eller andra typer av skivmaterial med skyddande egenskaper.

9. Säkerställ att delaminering inte kan ske i träkonstruktionen.

Vägledning för detta steg finns i avsnitt 4.4.

4.2 Förkolningsdjup

I tabellerna nedan anges förkolningsdjup för brandrum med upp till $0,15 \text{ m}^{0,5}$ i öppningsfaktor. För större öppningsfaktorer kan dock samma värden som för $0,15 \text{ m}^{0,5}$ användas, under förutsättning att det bedöms rimligt att en större öppningsfaktor skulle innebära en brand med generellt lägre temperatur. Det är upp till den ansvariga projektören i respektive projekt att avgöra om detta är ett rimligt antagande eller inte. Raderna för $0,15 \text{ m}^{0,5}$ och större är markerade med * för att uppmärksamma läsaren på denna notering. Röd markering innebär att inget konvergerande förkolningsdjup uppnåts och värdet är därför inte att betrakta som konservativt.

10 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	27	41	53	63	73	>81
	0.06	24	37	48	57	65	72
	0.1	18	29	37	44	51	57
	≥0.15*	13	21	27	33	38	42

*se inledande stycke

20 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	31	45	57	68	>77	>86
	0.06	27	41	52	61	70	78
	0.1	21	33	41	49	55	62
	≥0.15*	15	23	29	36	41	45

30 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	35	49	61	72	>82	>>90
	0.06	33	46	56	64	73	82
	0.1	24	37	46	53	60	66
	≥0.15*	17	26	32	39	44	49

40 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppnings- faktor (m ^{0.5})	0.04	40	55	67	78	>86	>>94
	0.06	37	50	60	68	76	85
	0.1	28	41	51	58	64	70
	≥0.15*	21	29	36	42	48	53

50 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppnings- faktor (m ^{0.5})	0.04	56	70	82	>93	>100	>>105
	0.06	47	60	70	79	87	>95
	0.1	39	53	62	69	75	81
	≥0.15*	27	37	46	53	59	64

60 % exponerad omslutningsyta

Förkolningsdjup (mm)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppnings- faktor (m ^{0.5})	0.04	71	83	>94	>102	>>107	>>110
	0.06	56	67	77	85	94	>101
	0.1	44	57	66	72	79	84
	≥0.15*	32	43	52	59	65	70

4.3 Passivt skydd av icke-exponerade ytor

I tabellerna nedan redovisas brandmotståndskrav i minuter för ett standardiserat brandförlopp som brännbara delar av den studerade lokalen/brandcellen ska skyddas med för att betraktas som icke-exponerade. Detta motsvarar alltså krav på tändskyddande beklädnad (K₂XX) definierat enligt SS-EN 13381-7:2019 eller bestämd enligt metoder i Eurokod 5. Röd markering innebär att inget konvergerande brandmotstånd uppnåtts och värdet är därför inte att betrakta som konservativt.

10 % exponerad omslutningsyta

Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	31	53	75	95	113	>120
	0.06	29	48	67	83	116	113
	0.1	20	34	48	61	75	89
	≥0.15*	14	25	31	38	46	53

*Se inledande stycke i avsnitt 4.1.

20 % exponerad omslutningsyta

Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	36	61	83	120	>120	>120
	0.06	34	56	78	110	116	>120
	0.1	25	43	56	72	86	110
	≥0.15*	16	27	34	43	51	59

30 % exponerad omslutningsyta
Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	43	69	92	>120	>120	>120
	0.06	43	67	83	>120	>120	>120
	0.1	31	51	69	83	101	>120
	≥0.15*	20	29	38	51	59	67

40 % exponerad omslutningsyta
Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	53	81	>120	>120	>120	>120
	0.06	51	75	101	>120	>120	>120
	0.1	38	59	78	95	>120	>120
	≥0.15*	25	36	46	56	67	75

50 % exponerad omslutningsyta
Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	61	89	>120	>120	>120	>120
	0.06	51	75	107	>120	>120	>120
	0.1	43	67	86	113	>120	>120
	≥0.15*	31	46	56	64	69	75

60 % exponerad omslutningsyta
Brandmotstånd (min)

		Brandbelastning per omslutningsarea (MJ/m ²)					
		60	120	180	240	300	360
Öppningsfaktor (m ^{0.5})	0.04	83	>120	>120	>120	>120	>120
	0.06	61	86	120	>120	>120	>120
	0.1	51	78	95	>120	>120	>120
	≥0.15*	38	56	67	75	81	86

4.4 Säkerställande av integritet i KL-trä

Som har beskrivits i avsnitt 1.2 och avsnitt 2.5 förutsätter modellen att delaminering inte uppstår vid brand. För att säkerställa att delaminering inte sker rekommenderas att metoden som föreslås i prEN 1995-1-2:2025 [19] och som utvecklats av Brandon, Klippel och Frangi (2021) [9] används. Här bör även noteras att den vanliga föreställningen att melaminlim inte ger upphov till delaminering inte är korrekt. Det är därför viktigt att kontrollera integriteten av den aktuella KL-träkonstruktionen i ett brandtest, så som det som föreslagits ovan.

Ett alternativ till brandtest är att utforma konstruktionen med tillräcklig lamelltjocklek för att undvika att värmen tränger in till limningen och på så vis undvika att delaminering uppstår. Här är det viktigt att ta hänsyn till de temperaturer som kan uppstå inne i konstruktionen, för att säkerställa att limmet klarar dessa. Vidare är det viktigt att beakta att temperaturen som limmet klarar beror av lamelltjockleken [21] och tidsperioden som limmet utsätts för värme [53] samt att temperaturtåligheten för KL-trä lim sällan nämns specifikt i produktdatablad eller liknande.

Förutom osäkerheterna kopplade till limmet ovan så bör följande punkter beaktas och hanteras konservativt om avsikten är att skydda mot delaminering genom tjockleken på det yttersta skiktet i konstruktionen:

- Delaminering startar ofta lokalt och kan då initiera en kaskadeffekt för större delar. Lokalt större skada kan därför leda till delaminering. Det är därför viktigt att beakta att de värden som anges i avsnitt 4.2 är medelvärden och att de därför inte nödvändigtvis är tillräckliga för att skydda mot delaminering.

- Det kan förekomma betydligt större förkolningsdjup i de lägre delarna av ett brandrum som i sin tur kan initiera delaminering. Detta förklarar varför delaminering ofta börjar längst ner på exponerade väggar [54].
- I byggreglerna hanteras vanligtvis ett spektrum av scenarier och det dimensionerande fallet är inte alltid ett av de värsta tänkbara. Exempelvis dimensioneras variabel brandbelastning utifrån 80:e percentilen på ett representativt statistiskt underlag. Det bör därför beaktas att det kan förekomma högre brandbelastning i ett verkligt scenario och att detta kan leda till allvarliga konsekvenser om det driver brandrummet till delaminering.

På grund av osäkerheterna ovan rekommenderas detta tillvägagångssätt primärt användas för konstruktioner i taknivå.

4.5 Justering av förkolningsdjup beroende på placering

Baserat på valideringen av modellen som diskuterats i avsnitt 2.5 samt i Bilaga B föreslås justeringsfaktorer för att justera förkolningsdjupet beroende på hur den undersökta byggnadsdelen är placerad. Detta är en justering som både kan öka materialeffektivitet och säkerhet. Justeringen beaktar den icke-homogena brandskada som ofta ses i brandrum med träkonstruktioner.

Föreslagen justeringsfaktor för förkolningsdjupet är:

$$\alpha_{\text{tak}} = 0.85$$

$$\alpha_{\text{nedre halvan av väggar}} = 1.15$$

För väggar kan alltså förkolningsdjupet multipliceras med 1,15 för den nedre halvan och med 1,0 för den övre halvan. Förkolningsdjupet för de byggnadsdelar som anges ovan ska alltså multipliceras med faktorerna ovan för att få ett mer korrekt/representativt värde.

Det är viktigt att denna faktor beaktas om lamelltjockleken används för att skydda mot delaminering, vilket diskuterats i avsnitt 4.4. Det är även viktigt att beakta detta vid dimensionering av lastbärande väggar så att inte förkolningsdjupet långt ner på väggen riskerar att påverka bärverksdelens totalstabilitet vid brand. Observera dock att underlaget för denna justering är relativt begränsat och det är därför viktigt att projektören själv avgör vad som är lämplig säkerhet vid dimensionering.

5 EXEMPEL PÅ TILLÄMPNING

Nedan redovisas ett exempel på tillämpning, där även den linjära interpoleringen som föreslagits i ramverket ovan exemplifieras. Observera dock att beräkningen av det icke-bärande lagret genom värdena i Bilaga D inte tagits med på grund av att detta hade krävt utförliga förklaringar av detaljerna. Om projektören/läsaren inte är bekant med denna typ av beräkning rekommenderas det att en erfaren konstruktör tillfrågas för att genomföra det steget i processen.

Exemplet nedan baseras på ett utförd brandförsök av Brandon et al. (2021) [13] (Test 1). Brandrummet som studerades var 7,0 x 6,85 x 2,73 m (längd x bredd x höjd), det vill säga cirka 48 m². Den totala omslutningsytan i rummet 170,7 m² (A_t).

Observera att det innan det första steget är viktigt att beakta de begränsningar och antaganden som ligger till grund för ramverket och som anges i avsnitt 1.2 och 2.5.

STEG 1: DEFINIERA ÖPPNINGSAKTOR

Lokalen har två öppningar om 2,25 x 1,78 (b_v x h_v). Öppningsfaktor beräknas enligt nedan.

$$O = \frac{b_{v,t} \cdot h_{v,t} \cdot \sqrt{h_{v,t}}}{A_t} = 0.063m^{0.5}$$

STEG 2: DEFINIERA DIMENSIONERANDE BRANDBELASTNING

Rummet har en brandbelastning om 560 MJ/m² golvarea (q_f).

STEG 3: OMVANDLA BRANDBELASTNING TILL OMSLUTNINGSAREA

Omvandlingen av brandbelastningen till omslutningsarea beräknas enligt nedan.

$$q_{t,d} = \frac{q_f \cdot l \cdot b}{A_t} = 157.3 \text{ MJ/m}^2$$

STEG 4: DEFINIERA EXPONERAD MÄNGD BRÄNNBAR STOMME I UTRYMMET/LOKALEN/BYGGNADEN I FÖRHÅLLANDE TILL OMSLUTNINGSYTAN

I utrymmet exponeras tak och balkar, vilka sammanlagt har en area om: A_{exp} = 54 m². Detta ger i sin tur exponerad mängd brännbar stomme enligt nedan.

$$a_{exp} = \frac{A_{exp}}{A_t} * 100 = 31.5\%$$

STEG 5: IDENTIFIERA KORREKT TABELL FÖR ATT DEFINIERA FÖRKOLNINGSDJUP

För att identifiera korrekt förkolningsdjup behöver interpolering mellan åtta olika värden från tabellerna i avsnitt 4.2 genomföras. Detta redovisas i diagrammet nedan.

	Lägre värde a_{exp} : 30%				Högre värde a_{exp} : 40%			
	Lägre värde $q_{t,d}: 120 \text{ MJ/m}^2$		Högre värde $q_{t,d}: 180 \text{ MJ/m}^2$		Lägre värde $q_{t,d}: 120 \text{ MJ/m}^2$		Högre värde $q_{t,d}: 180 \text{ MJ/m}^2$	
	Lägre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.06	Högre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.08	Lägre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.06	Högre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.08	Lägre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.06	Högre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.08	Lägre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.06	Högre värde ($\text{m}^{0.5}$) O: 0.08
Tabellvärden	46 mm	37 mm	56 mm	46 mm	50 mm	41 mm	60 mm	51 mm
1:a ordningens interpolering	45.4 mm ($O = 0.063 \text{ m}^{0.5}$)		55.3 mm ($O = 0.063 \text{ m}^{0.5}$)		49.4 mm ($O = 0.063 \text{ m}^{0.5}$)		59.4 mm ($O = 0.063 \text{ m}^{0.5}$)	
2:a ordningens interpolering	51.5 mm ($q_{t,d} = 157.3 \text{ MJ/m}^2$)				55.6 mm ($q_{t,d} = 157.3 \text{ MJ/m}^2$)			
3:e ordningens interpolering (Resultat)	52.2 mm ($a_{exp} = 31.5\%$)							

Det resulterande förkolningsdjupet enligt ramverket är alltså 52,2 mm.

Under förutsättning att integriteten kan säkerställas bedöms även reduktionsfaktorn för inbränning i tak som anges i avsnitt 4.5 kunna användas. Förkolningsdjupet bedöms alltså kunna reduceras med en faktor 0,85.

STEG 6: IDENTIFIERA TEMPERATURPROFIL VID FÖRKOLNINGSRANDEN I BILAGA D FÖR BERÄKNING AV ICKE-BÄRANDE LAGER.

För att definiera det icke-bärande lagret bakom förkolningsranden har data inte tagits fram på motsvarande sätt som för förkolningsdjup och passivt skydd. För att kunna beräkna det icke-bärande lagret behöver dock projektören välja korrekt rad i Bilaga D. Även här rekommenderas linjär interpolering om det behövs för att erhålla ett värde.

Beräkning av icke-bärande lager kan göras genom finita-element-metoder eller andra beräkningsmetoder, exempelvis den föreslagna av Brandon et al. (2017) [20]. Den lokala påverkan som branden kan ha på materialegenskaper ska beaktas. Det kan exempelvis uppnås genom att bärverksdelen delas in i många små element där varje element ges egenskaper som överensstämmer med den temperatur som förekommer i elementet. Detta steg bör genomföras av en person som har erfarenhet av denna typ av beräkningar.

Observera att steg 5 och 6 kan ersättas av numeriska beräkningar med användning av brandtemperaturerna som anges i bilaga E. Detta måste inkludera beräkning av temperaturerna genom hela det bärande tvärsnittet och en beräkning av den strukturella kapaciteten där de mekaniska egenskaperna för trä motsvarar de som kan förväntas vid gällande temperaturer. Här kan Eurokod 5 Annex B användas som utgångspunkt, men det är viktigt att korrekta termiska egenskaper för att förutsäga temperaturen hos trä som utsätts för naturliga bränder används. Här kan exempelvis även de egenskaper som anges i bilaga A (Tabell 5) i denna rapport användas. Tills ytterligare forskning har genomförts kan detta föredras för linjära element som är exponerade mot brand från flera sidor. Denna metod skulle också kunna användas för att fånga effekten av mer komplexa fenomen som oxidation (dvs reduktion) av kolskiktet. Sådana hänsynstaganden förväntas leda till mindre konservativa förutsägelser av temperaturfördelningen i träelementen under brandens avsvältningsfas.

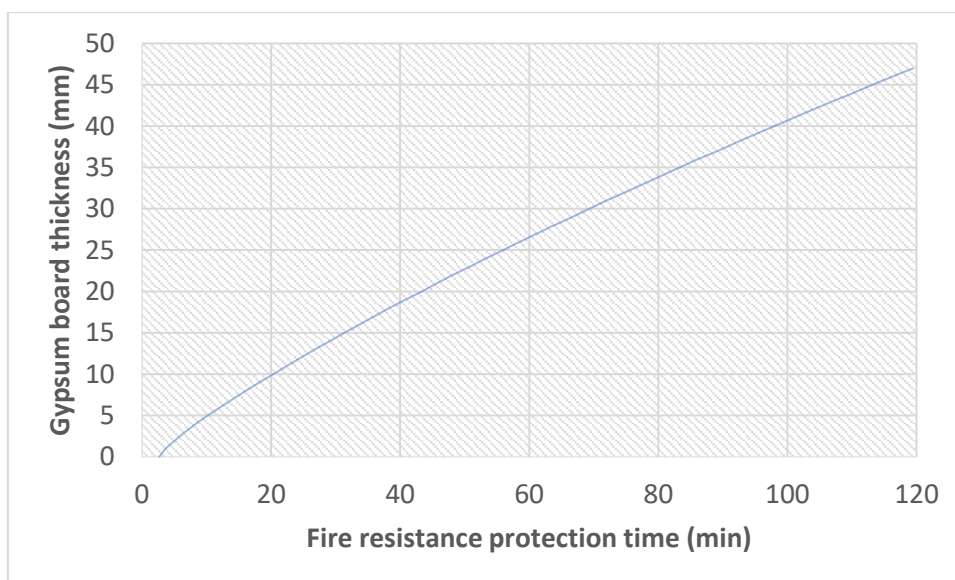
STEG 7: IDENTIFIERA KORREKT TABELL FÖR ATT DEFINIERA PASSIVT SKYDD FÖR ICKE-EXPONERADE YTOR

För att identifiera korrekt passivt skydd behöver interpolering mellan åtta olika värden från tabellerna i avsnitt 4.3 genomföras. Motsvarande interpolering som i Steg 5 resulterar i krav på 78,1 minuters brandmotstånd för skyddade delar.

STEG 8: VÄLJ LÄMPLIG SKYDDSMETOD FÖR ATT UPPFYLLA STEG 7

I det aktuella exemplet är endast tak och balkar exponerade och övriga träkonstruktioner behöver därför skyddas mot brand med den ekvivalenta brandmotståndstid som angetts i Steg 7 ovan för att säkerställa att brandförloppet avslutas. För att uppnå de 78 minuter som anges ovan krävs enligt [24] mer än två lager 18 mm tjocka gipsskivor av typ F. Det krävs alltså minst tre lager skydd av sådan klass för att upprätthålla brandmotståndet. Det kan konstateras att sådant skydd både är kostsamt [55] och ger stor påverkan på klimatbelastningen i en byggnad. Det rekommenderas därför att studera och utvärdera fästmetoder för de skyddande skivorna, för att på så vis förlänga tiden som de sitter fast och skyddar det underliggande materialet vid brand.

Om infästningen av skivorna kan säkerställas så kan mängden gips som krävs för att skydda underliggande lager avsevärt reduceras. En analys baserad på den avancerade beräkningsmetoden som föreslås i prEN 1995-1-2:2025 [19] där det antas att gipsskivorna är direkt monterade på KL-trä och har en initial densitet på 679 kg/m^3 visar att totalt 32 mm (t.ex. två 16 mm gipsskivor) behövs, se Figur 7. Detta har undersökts i fullskaleförsök av Brandon, et al. (2021) [13], vilket även är motsvarande utformning som det exempel som återges i detta avsnitt. I försöken förekom förkolning lokalt på olika ställen, vilket indikerar att skyddslagret var precis på gränsen för att motstå det fullständiga brandförloppet i utrymmet.



Figur 7. Samband mellan gipstjocklek och brandmotståndstid för gipsskivor som är direkt monterade på KL-trä och som är monterade så att de inte faller ner under brandförloppet. Beräknad enligt prEN 1995-1-2:2025 och en initial gipsdensitet på 679 kg/m³.

STEG 9: SÄKERSTÄLLANDE AV INTEGRITET I KL-TRÄ

KL-trä tillverkas normalt inte med större lamelltjocklek än 40 mm. Detta innebär att limmet sannolikt kommer utsättas för temperaturer som överskrider de kritiska temperaturer som ofta förekommer i publicerade tester för när lim fallerar (ofta i intervallet 200-300 °C). Det är därför att använda en konstruktion som klarat testet som anges i prEN 1995-1-2:2025. Detta är viktigt även för de balkar som förekommer i konstruktionen.

6 DISKUSSION

Som litteraturstudien visat så bedöms grundsyftet med det svenska byggregelverket vara att en byggnad med fler än tre-fyra våningar ska kunna motstå ett fullständigt brandförlopp, inklusive avsvälning. För träkonstruktioner med exponerad yta är detta dock relativt komplicerat att garantera och säkerställa. Det finns endast ett fåtal beräkningsmetoder utvecklade för att studera huruvida sådana bränder slocknar eller inte och dessa beräkningsmodeller varierar från parametriska modeller [56] till relativt komplicerade zonmodeller [48], [57], [58]. Dessutom finns det endast ett fåtal personer som har erfarenhet av och kan genomföra denna typ av beräkningar utan stor grad av osäkerhet.

Som nämnts i litteraturstudien så har Round robin-studier visat att beräkningsresultat från olika brandskyddsprojektörer varierar kraftigt när de ges i uppgift att bedöma samma brandförlopp. Även utan den ytterligare komplexiteten av en exponerad trästomme så fanns det i studierna inte två olika projektörer som producerade exakt samma resultat. Att ytterligare lägga lager av komplexitet i dimensioneringen bedöms därmed ge en överhängande risk för ojämna säkerhetsnivåer som kan vara kraftigt personberoende.

För att underlätta projektering av brandsäkra träbyggnader både i förhållande till nuvarande och kommande byggregler har författarna till denna rapport därför ansett att det är bättre att tillämpa en av de bäst validerade tillgängliga modellerna för att utveckla ett förenklat ramverk. Det förenklade ramverket är det som beskrivs i huvuddelen av denna rapport. I arbetet med ramverket har flera känslighetsanalyser genomförts, begränsningar diskuterats och konservativa antaganden i vad som bedöms vara lämplig grad ansatts.

Antaganden och begränsningar diskuteras i andra delar av denna rapport men några av de mest avgörande antaganden är:

- Brandrummet antas ha en uniform gastemperatur
- Effektutvecklingen per golvarea är satt till 250 kW/m² i enlighet med det som gäller för de flesta verksamheter i Eurkod 1, EN 1991-1-2.

Viktiga förutsättningar är:

- Modellen förutsätter att delaminering av träkonstruktionen inte förekommer.

- Alla ytor som inte exponeras förutsätts vara skyddade mot hela det beräknade brandförloppet.

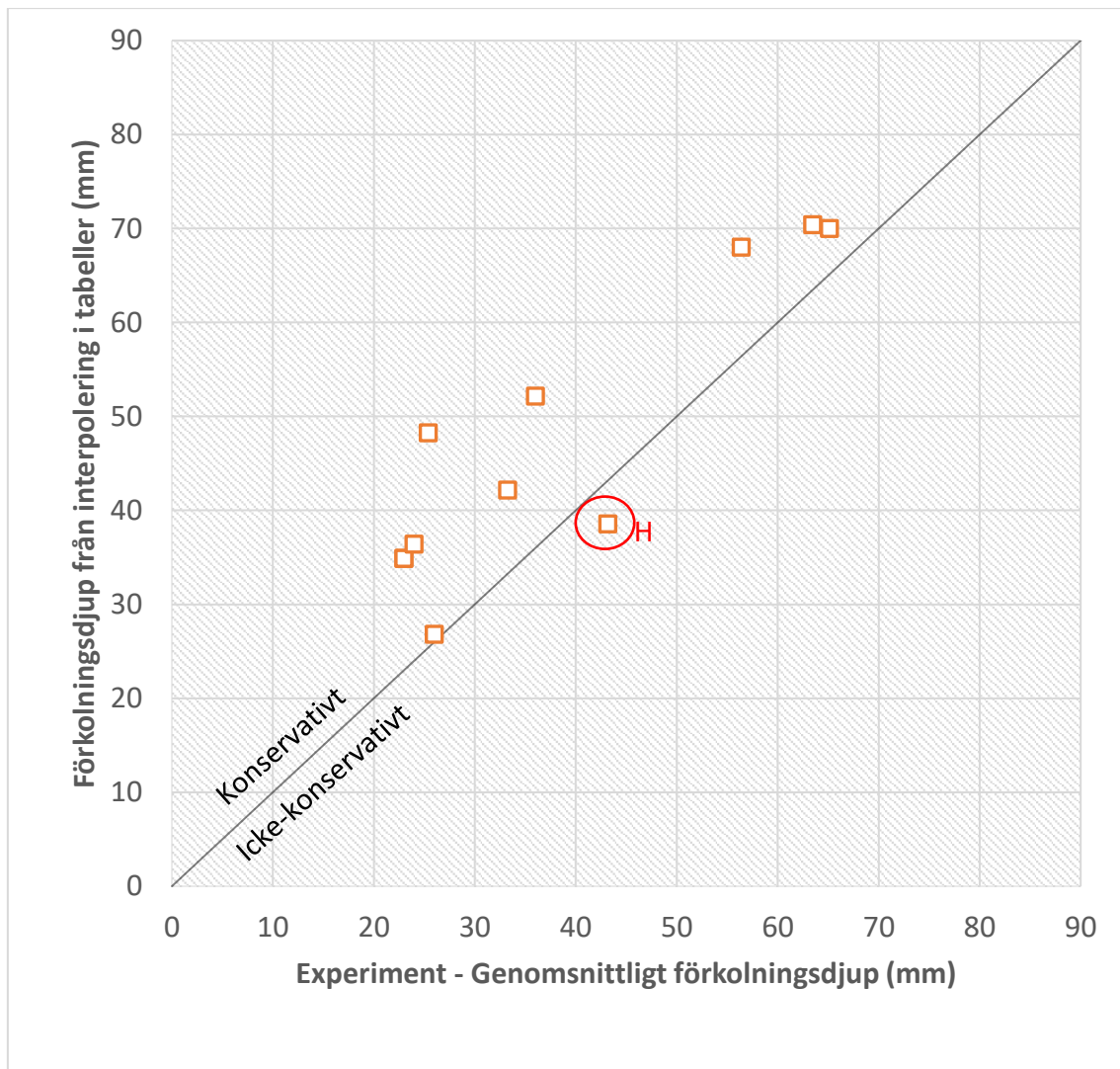
Några viktiga begränsningar är:

- Effekterna av ytbehandlingar av träkonstruktionen har inte beaktats på grund av bristande dataunderlag för sådan bedömning. Det bedöms dock konservativt att inte beakta sådana behandlingar.
- Beräkningar indikerar att utrymmen med väldigt stor öppningsfaktor inte modelleras på ett korrekt och konservativt sätt. Detta behandlas genom antagandet att en lägre öppningsfaktor kan vara representativ/konservativ i bedömningen av lokaler med stora öppningsfaktorer. Detta bedöms vara konservativt men det är upp till respektive projektör att själv avgöra om så är fallet för den utformning som är aktuell i det specifika fallet.

I och med att ett huvudsyfte med denna rapport är att tillgängliggöra kunskap, reducera risken för felprojekteringar samt öka säkerheten vid dimensionering är exemplet på tillämpning i avsnitt 5 en viktig del av rapporten. För att studera modellens resultat genomfördes motsvarande procedur för alla brandtester som är listade i Bilaga B. Resultaten från denna genomgång redovisas i figuren nedan. Den förenklade metoden bedöms förutsäga förkolningsdjupen med god precision.

Som det diskuteras i avsnitt 4.5 är det dock viktigt att beakta att förkolningsdjupet kan variera beroende på var i brandrummet förkolningen sker. Detta behöver alltså också beaktas i enlighet med de riktlinjer som ges där.

Det är även viktigt för projektörer att beakta begränsningarna kopplat till verksamhetsförändringar när dimensionering görs utifrån specifika brandbelastningar med hjälp av det presenterade ramverket. Verksamhetsförändringar som innebär utökad brandbelastning kan alltså innebära högre kravnivåer, vilket kan vara svårt att hantera vid ändring/ombyggnad. Således bör byggnadens framtida flexibilitet vara en parameter som beaktas när projektörer väljer dimensionerande brandbelastning.



Figur 8. Förkolningsdjup som tagits fram via interpolering i tabellerna jämfört med experimentella genomsnittliga förkolningsdjup. Observera att tabellerna inte inkluderar öppningsfaktorer mindre än $0,04 m^{0.5}$, vilket gör att vissa experiment inte har inkluderats.

7 SLUTSATS

Syftet med projektet har varit att ta fram ett förenklat och evidensbaserat ramverk för att beakta den permanenta brandbelastningen i byggnader med trästomme. Detta har genomförts och ramverket bedöms avsevärt förenkla användandet av trästomme på ett brandtekniskt säkert sätt i byggnader.

Ramverket beaktar verksamhets- och byggnadsspecifika förutsättningar så som variabel brandbelastning, utformning av öppningar och mängd exponerad trästomme. Ramverket bedöms enkelt att använda, vilket ökar möjligheten för likartade bedömningar i olika projekt med exponerad trästomme.

Sammantaget bedöms ramverket kunna bidra till att förenkla byggande med trästomme samtidigt som säkerhetsnivån både bedöms bli bättre, mer effektivt utformad och mer homogen.

8 FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA FORSKNING

I projektet har det konstaterats att det finns områden där vidare utveckling skulle kunna förbättra eller effektivisera dimensionering av både träbyggnader och andra byggnader. Sådana områden är:

Beräkning av icke-bärande lager

Som nämnts i rapporten har kvantifiering av icke-bärande lager inte genomförts. Detta är ett omfattande arbete, men det hade kunnat ge en avsevärt bättre dimensioneringssituation om det fanns tillgängligt på ett sätt liknande det som presenteras i denna rapport. Studien av icke-bärande lager bör innefatta effekten av hörneffekter och en definition av nedre gränsvärden för balkdimensioner för användning av den presenterade metoden för sådana linjära element.

Undersökningar av brandbelastning

Det kan konstateras att statistiska data för brandbelastningar i olika verksamheter ofta är både inaktuell och relativt begränsad. Det rekommenderas därför att en omfattande större undersökning av brandbelastningar i olika verksamheter genomförs för att ge ett underlag till bättre dimensionering av både träbyggnader och andra byggnader.

Sätt att motverka delaminering

Att undvika delaminering är en viktig parameter vid dimensionering av träkonstruktioner. Därmed bedöms mer data behövas på olika angreppssätt att hantera denna problematik.

Ytbehandlingars påverkan på förkolningsdjup

Som nämnt i denna rapport bedöms ytbehandlingar eventuellt kunna påverka förkolningsdjupet positivt. Mer data behövs dock på området för att kunna utreda denna fråga.

Synfaktorns påverkan på fortsatt förkolning

Som nämnt i detta arbete så finns det, på grund av den höga synfaktorn, risk för fortsatt förkolning i hörn eller liknande där brännbara ytor går emot varandra. Vidare studier för att studera vilka skyddsavstånd eller liknande som behövs mellan brännbara ytor i hörn skulle behövas för att öka kunskapen på detta område.

9 REFERENSER

- [1] Trä- och möbelföretagen, ”Trähusbarometern - Mars 2022”, 2022.
- [2] C. Pettersson, ”Fire Safety in Timber Buildings - A review of existing knowledge”, Brandforsk, Stockholm, Brandforsk 2020:10, 2020.
- [3] Föreningen för brandteknisk ingenjörsvetenskap, ”Sammanställning av frågeställningar kring trähus och trähusbyggande från föreningen för Brandteknisk Ingenjörsvetenskaps medlemmar”, BIV, BIV Rapport 2022:1, 2022.
- [4] B. Andersson, L. Broberg, J. Hultquist, B. Evers, C. Eriksson Lantz, och F. Nystedt, ”Brandskydd i Br0-byggnader - Tillämpningsstöd vid brandteknisk dimensionering av höga Br0-byggnader med förnyelsebara material (trä)”, Brandskyddslaget/Briab, Stockholm, SBUF ID-13371, 2018.
- [5] A. Mossberg *m.fl.*, ”Brandteknisk beskrivning av två konceptus i byggnadsklass Br0”, SBUF, 2020.
- [6] S. Matarazzo, ”The Grenfell impact – Will the new post-Grenfell fire regulations change the way we build?”, *alsecco UK Iconic Façades*, 11 april 2019. <https://alsecco.co.uk/2019/04/the-grenfell-impact-will-the-new-post-grenfell-fire-regulations-change-the-way-we-build/> (åtkomstdatum 16 maj 2022).
- [7] Boverket, *Boverkets konstruktionsregler - EKS 12 (BFS 2011:10 med ändringar t.o.m. 2022:4)*. Karlskrona, 2022.
- [8] SIS, *Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-2: Allmänna laster - Termisk och mekanisk verkan av brand*, vol. SS-EN 1991-1-2.
- [9] D. Brandon, M. Klippel, och A. Frangi, ”Glueline Integrity in Fire”, RISE, Borås, RISE Report 2021:107, 2021.
- [10] Boverket, *Boverkets byggregler - BBR 29 (BFS 2011:6 med ändringar t.o.m. BFS 2020:4)*. Karlskrona, 2020.

- [11] Boverket, *Remiss - Boverkets förslag till föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i händelse av brand i byggnader*. Karlskrona, 2023.
- [12] D. Brandon och J. Anderson, "Wind effect on internal and external compartment fire exposure", RISE, Borås, 2018:72, 2018.
- [13] D. Brandon, J. Sjöström, A. Temple, E. Hallberg, och F. Kahl, "Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings – compartment fire testing", RISE, Borås, 2021:40, 2021.
- [14] J. Schmid, A. Santomaso, D. Brandon, U. Wickström, och A. Frangi, "Timber under Real Fire Conditions : the influence of oxygen content and gas velocity on the charring behavior", *J. Struct. Fire Eng.*, vol. 9, nr 3, s. 222–236, 2018.
- [15] U. Wickström, *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-30172-3.
- [16] J. Stern-Gottfried och G. Rein, "Travelling fires for structural design–Part I: Literature review", *Fire Saf. J.*, vol. 54, s. 74–85, nov. 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
- [17] F. Richter, P. Kotsovinos, E. Rackauskaite, och G. Rein, "Thermal Response of Timber Slabs Exposed to Travelling Fires and Traditional Design Fires", *Fire Technol.*, vol. 57, nr 1, s. 393–414, jan. 2021, doi: 10.1007/s10694-020-01000-1.
- [18] "Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-2: Allmänt - Brandteknisk dimensionering SS-EN 1995-1-2:2004", SIS, Stockholm, 2004.
- [19] "Förslag till tekniskt innehåll i kommande Eurokod 5 - prEN 1995-1-2:2025", SIS, Stockholm, 2023.
- [20] D. Brandon, A. Just, och M. Tiso, "Parametric fire design – zero-strengthlayers and charring rates", presenterad vid INTER International Network on Timber Engineering Research Proceedings, Kyoto, 2017.

Åtkomstdatum: 02 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid:
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59254>

- [21] M. Klippel, J. Schmid, R. Fahrni, A. Frangi, och D. Lange, ”Assessing the adhesive performance in CLT exposed to fire”, presenterad vid World Conference on Timber Engineering, Seoul, 2018.
- [22] T. Gernay, ”Fire resistance and burnout resistance of timber columns”, *Fire Saf. J.*, vol. 122, s. 103350, juni 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103350.
- [23] M. Klippel och J. Schmid, ”Design of Cross-Laminated Timber in Fire”, *Struct. Eng. Int.*, vol. 27, nr 2, s. 224–230, maj 2017, doi: 10.2749/101686617X14881932436096.
- [24] A. B. Östman Birgit, Red., *Fire Safe Use of Wood in Buildings: Global Design Guide*. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003190318.
- [25] Boverket, *Boverkets allmänna råd om brandbelastning, BBRBE*. 2013.
- [26] International Organization for Standardization, *ISO 834-1 Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. 1999.
- [27] A. Law och L. Bisby, ”The rise and rise of fire resistance”, *Fire Saf. J.*, vol. 116, s. 103188, sep. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103188.
- [28] V. Babrauskas och R. B. Williamson, ”The historical basis of fire resistance testing — Part II”, *Fire Technol.*, vol. 14, nr 4, s. 304–316, nov. 1978, doi: 10.1007/BF01998390.
- [29] *Kungl. Maj:ts Byggnadsstadga*. 1947.
- [30] ”Anvisningar till byggnadsstadgan”, Kungl Byggnadsstyrelsens anvisningar 1946:1, 1946.
- [31] Statens Planverk, *Svensk Byggnorm 67*. 1967.
- [32] Statens Planverk, *Svensk Byggnorm 1975*. Stockholm, 1975.

- [33] Statens Planverk, *Kommentar till Svensk Byggnorm 1976:1*. Stockholm, 1976.
- [34] O. Carling, "Brandteknisk dimensionering av massiva träkonstruktioner", Träteknik, Stockholm, 1990.
- [35] Statens Planverk, "Svensk Byggnorm 1980", Stockholm, PFS 1980:1, 1980.
- [36] Boverket, "Nybyggnadsregler", BFS 1988:18, 1988.
- [37] Boverket, "Boverkets byggregler", BFS 1993:57, 1993.
- [38] Boverket, *Boverkets byggregler - BBR 19 (BFS 2011:26)*. Karlskrona, 2011.
- [39] Boverket, "Konsekvensutredning för revidering (BFS 2011:26) av avsnitt 5 Brandskydd i Boverkets byggregler, BBR (BFS 2011:6) samt för allmänt råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (BFS 2011:27)", Karlskrona, 2011.
- [40] Boverket, *Boverkets konstruktionsregler - EKS 7 (BFS 2008:8 med ändringar t.o.m. 2010:28)*. Karlskrona, 2010.
- [41] Boverket, "Handbok om brandbelastning", Karlskrona, 2008.
- [42] Boverket, *Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BBRAD 3*. 2013.
- [43] Boverket, *Boverkets konstruktionsregler - EKS 11 (BFS 2011:10 med ändringar t.o.m. 2019:1)*. Karlskrona, 2019.
- [44] K. Eriksson och J. Löfgren, "Brandbelastning i träbyggnader - Jämförande beräkning och kartläggning om hur branschen hanterar permanent brandbelastning", Mälardalens Högskola, 2020.
- [45] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, och L. A. Bisby, "A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction", *Fire Technol.*, vol. 55, nr 1, s. 1–49, jan. 2019, doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.

- [46] G. Rein *m.fl.*, "Round-robin study of a priori modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One", *Fire Saf. J.*, vol. 44, nr 4, s. 590–602, maj 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2008.12.008.
- [47] N. Johansson, J. Anderson, R. McNamee, och C. Pelo, "A Round Robin of fire modelling for performance-based design", *Fire Mater.*, vol. 45, nr 8, s. 985–998, 2021, doi: 10.1002/fam.2891.
- [48] D. Brandon, A. Temple, och J. Sjöström, *Predictive method for fires in CLT and glulam structures – A priori modelling versus real scale compartment fire tests & an improved method*. 2021. Åtkomstdatum: 02 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-58151>
- [49] Boverket, "Konsekvensutredning - Boverkets allmänna råd om brandbelastning, BBRBE", Karlskrona, 2013.
- [50] *Published Document 7974-7:2019 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Part 7: Probabilistic risk assessment*. 2019.
- [51] M. J. Spearpoint, M. Z. M. Tohir, A. K. Abu, och P. Xie, "Fire load energy densities for risk-based design of car parking buildings", *Case Stud. Fire Saf.*, vol. 3, s. 44–50, maj 2015, doi: 10.1016/j.csfs.2015.04.001.
- [52] E. Zalok, G. V. Hadjisophocleous, och J. R. Mehaffey, "Fire loads in commercial premises", *Fire Mater.*, vol. 33, nr 2, s. 63–78, 2009, doi: 10.1002/fam.984.
- [53] D. Brandon och C. Dagenais, "Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire", NFPA, Quincy, MA, FPRF-2018-05, 2017. Åtkomstdatum: 03 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59256>
- [54] D. Brandon, A. Just, P. Andersson, och B. Östman, "Mitigation of fire damages in multi-storey timber buildings : Statistical analysis and guidelines for design", RISE, Borås, 2018:43, 2018. Åtkomstdatum: 03

juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid:
<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-35110>

- [55] R. Chaggaris, S. Pei, G. Kingsley, och E. Kinder, "Cost-Effectiveness of Mass Timber Beam–Column Gravity Systems", *J. Archit. Eng.*, vol. 27, nr 3, s. 04021028, sep. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000494.
- [56] D. Brandon, "Engineering methods for structural fire design of wood buildings – structural integrity during a full natural fire", RISE, Borås, 2018:44, 2018. Åtkomstdatum: 03 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-59255>
- [57] J. Schmid och A. Frangi, "Structural Timber In Compartment Fires – The Timber Charring and Heat Storage Model", *Open Eng.*, vol. 11, nr 1, s. 435–452, jan. 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0043.
- [58] C. Wade, M. Spearpoint, C. Fleischmann, G. Baker, och A. Abu, "Predicting the Fire Dynamics of Exposed Timber Surfaces in Compartments Using a Two-Zone Model", *Fire Technol.*, vol. 54, nr 4, s. 893–920, juli 2018, doi: 10.1007/s10694-018-0714-2.
- [59] J. A. ROCKETT, "Fire Induced Gas Flow in an Enclosure", *Combust. Sci. Technol.*, vol. 12, nr 4–6, s. 165–175, apr. 1976, doi: 10.1080/00102207608946717.
- [60] A. H. Buchanan och A. K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*, 2nd edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2017.
- [61] D. Brandon, S. Qvist, Ij. van Straalen, Y. Watez, och P. Steenbakkens, "Literatuurstudie - Brandveiligheid en Bouwen met Hout", RISE, Borås, 2022:99, 2022. Åtkomstdatum: 03 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-62449>
- [62] D. Brandon, J. Schmid, J. Z. Su, M. S. Hoehler, B. Östman, och A. Kimball, "Experimental Fire-Simulator For Post-Flashover Compartment Fires", presenterad vid The 10th International Conference on Structures in Fire, Belfast, 2018. Åtkomstdatum: 03 juli 2023. [Online]. Tillgänglig vid: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Fire-Simulator-For->

Post-Flashover-Brandon-
Schmid/14fbc778693d81c2d051b2c483b067bbe48a6aec

- [63] M. Hevia och A. Ramon, "Fire Resistance of Partially Protected Cross-Laminated Timber Rooms", Carleton University, Ottawa, 2014.
- [64] S. Zelinka, L. Hasburgh, K. Bourne, D. Tucholski, och J. Ouellette, "Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building", United States Department of Agriculture, FPL-GTR-247, 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.26223.33447.
- [65] R. M. Hadden *m.fl.*, "Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics", *Fire Saf. J.*, vol. 91, s. 480–489, juli 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.074.
- [66] R. McNamee, J. Zehfuss, A. I. Bartlett, M. Heidari, F. Robert, och L. A. Bisby, "Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling", *Fire Mater.*, vol. 45, nr 7, s. 847–857, 2021, doi: 10.1002/fam.2904.
- [67] P. Kotsovinos *m.fl.*, "Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed #01", *Fire Mater.*, vol. 47, nr 4, s. 542–568, 2023, doi: 10.1002/fam.3049.
- [68] J. Su, P.-S. Lafrance, M. Hoehler, och M. Bundy, "Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests", Fire Protection Research Foundation, Quincy, 2018.

BILAGA A – INGÅENDE BESKRIVNING AV BERÄKNINGSMODELLEN

Overview

The model used within this project was developed and first published by Brandon and Andersson (2018) [12] with an updated version, as used in this project, published by Brandon et. al. (2021) [48] in 2021, which also includes discussion regarding the validation of the model.

The model is based around a single zone model and utilises knowledge of the movable fuel load in a compartment with the single zone model, and the corresponding assumption of well mixed conditions within the compartment, to predict an initial fire within a compartment. This fire is used to calculate the heating of a timber section, from which a charring rate can then be established for the timber. The combustion gasses released by this charring are subsequently assumed to combust within the compartment at the time of, or soon after, their release or, where there is insufficient oxygen, outside of the compartment. By utilising relationships between charring and heat release rates of timber, as established experimentally by Schmid et al. (2018) [14], the heat released by this charring process can then be added to that from the movable fuel. In addition to this immediate release, it has been shown that part of the combustion energy is stored within the char itself and then released later during oxidation of the char. As observed during large scale compartment tests, Brandon et al. (2021) [13], this char oxidation occurs primarily after the cessation of flaming combustion, likely due to the increase in available oxygen at the char surface. It has been estimated from experimental studies that approximately 20 % of the energy from the timber is released during this oxidation process [57].

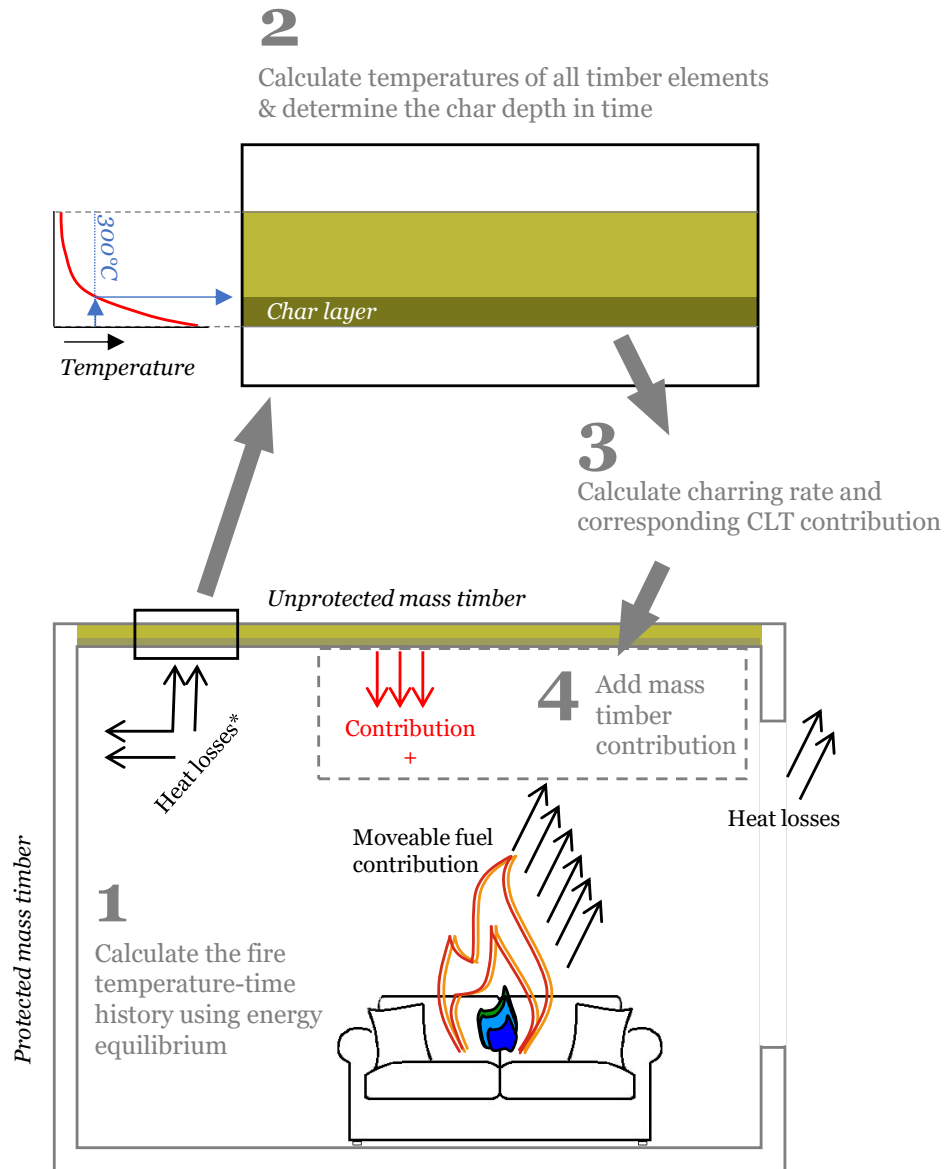
The final phenomenon approximated in the model is the change in heat transfer between the fire and the compartment boundary when flaming combustion stops. In the earlier stages of the fire and through the fully developed stage, the high level of flaming means that the gases are in effect opaque and there is therefore radiation transfer between the gases within the compartment and the boundaries. This is captured in typical zone models where it is assumed that for the duration of the model there is convective and radiative heat transfer between the hot fire gases and the boundaries. However, when flaming stops, the gases within the compartment become transparent and the walls from this point “see” each other (and the outside through any openings). As during the decay phase the boundaries of the compartment are typically hotter than the gases, the removal of the radiative interaction between the gases and boundaries

therefore slows down the cooling of the boundaries (in this case the mass timber). This is simulated within the implementation of the model by setting the emissivity of the surfaces to 0 after the cessation of flaming (assumed to be when the gas temperature drops below 700°C).

The model can therefore be summarised via the following steps:

1. Calculate the compartment fire temperatures for the full temperature-time history using a single zone model and a heat release rate curve. For the first calculation the heat release rate curve should correspond to the moveable fuel in the room (e.g. the basic fire curve described in Annex B). For all subsequent calculations, the heat release rate curve from step 4 is used.
2. Use these compartment temperatures to calculate the temperature-time history of any protected and unprotected timber structural element.
3. Calculate the charring rate through time for any timber structural element and calculate the potential heat release rate through time due to the charring,
4. Add the CLT combustion contribution to contribution of the moveable fuel load, and establish char oxidation energy release.
5. Iterate (i.e. repeat steps 1 to 4) until convergence.

The model is also illustrated graphically and schematically in Figure 1 and Figure 2 respectively.



*in the decay phase, the net heat flux is directed from the boundary surfaces towards the room

Figure 1: The four steps of every iteration

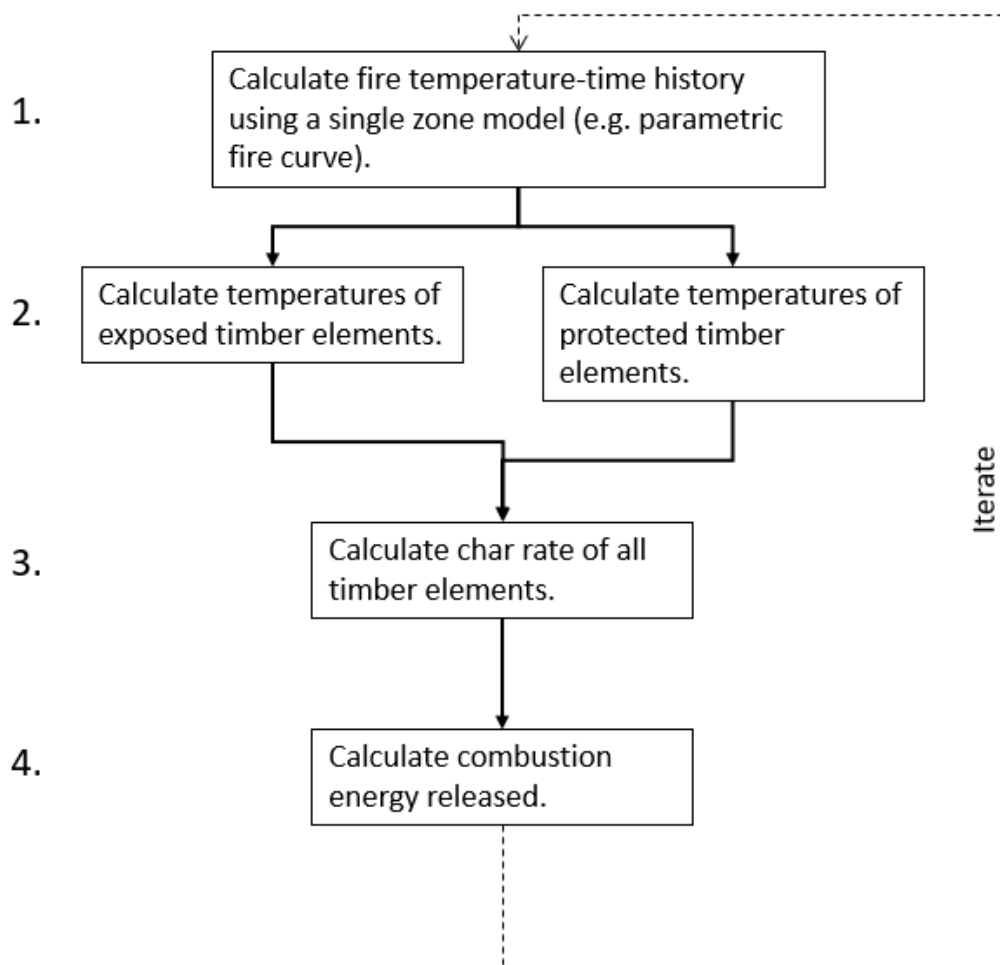


Figure 2: Schematic of model process

Equations

Movable Fuel Load Fire

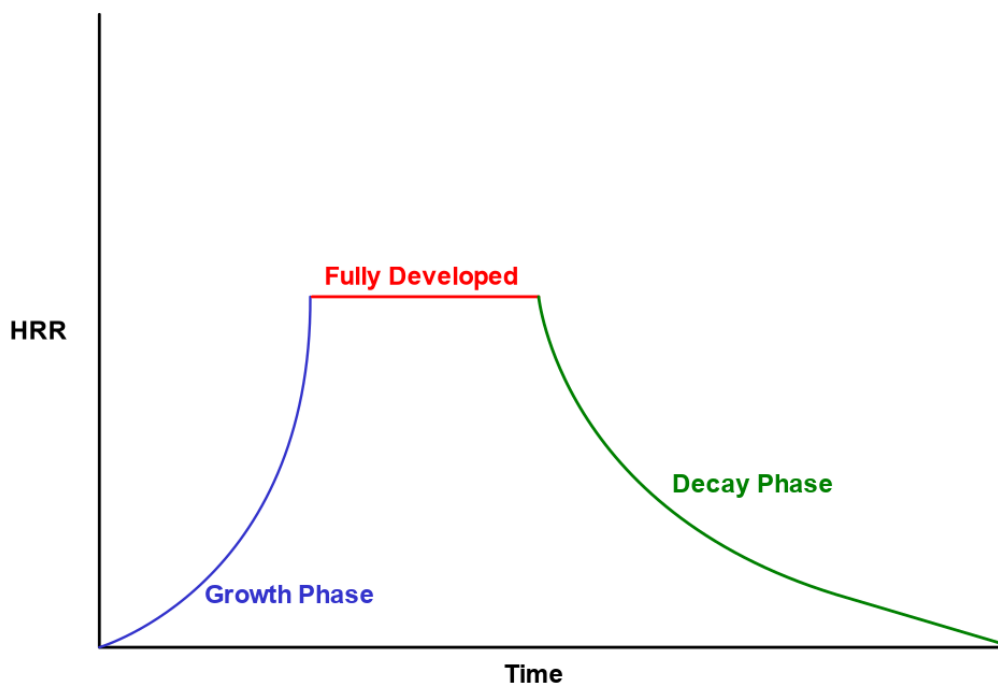


Figure 3. Sketch showing shape and phases of the movable fuel load fire

Beyond the design of the compartment in question, the primary driver of the fire is the movable fuel load, its type (which will dictate the growth rate), and its quantity (represented by a fuel load density, which will dictate the duration of its contribution). When conducting a standalone analysis using this model, it is important for appropriate assumptions to be made for both of these factors. As the aim of the modelling in the project is to provide information for a range of design cases the “quantity” of the fuel varies for each calculation conducted so as to give results covering common design situations. The fuel load densities included a range from 270-1500 MJ/m² floor area, which was then recalculated to better fit with fire load densities per boundary area. This gave a range of 60-360 MJ/m² as an approximation.

From these inputs the heat release rate history, or “fire curve” of the movable fuel load is calculated. The fire curve is split into 3 parts for calculation, as sketched in Figure 3, a growth phase, fully developed (or “maximum”) phase and a decay phase. First the maximum heat

release rate is calculated. The fire will either be ventilation or fuel controlled, and can therefore be described with the following equation:

$$\dot{Q}_{C,max} = \max \{ \dot{Q}_{C,max;vent} \dot{Q}_{C,max;fuel} \} \quad \text{eq. A1}$$

Where $\dot{Q}_{C,max;vent}$, the maximum heat release rate under ventilation-controlled conditions, is described by the following equation [15]:

$$\dot{Q}_{C,max;vent} = \alpha_1 * \alpha_{air} * A_o \sqrt{H_o} \quad \text{eq. A2}$$

Where α_1 is a flow rate coefficient, α_{air} is the energy released per unit mass of inflowing air ($3.01 * 10^6$ W s/kg, if supply air has an oxygen content of 23% - volume basis) A_o is the total area of the compartment openings and H_o the average height of all openings. And the maximum heat release rate under fuel-controlled conditions is given by:

$$\dot{Q}_{C,max;fuel} = \beta * A_{fl} \quad \text{eq. A3}$$

Where β is the heat release rate density of the fuel (kW/m²) and A_{fl} is the area of the floor (m²).

During the post-flashover phase combustion will also take place outside the compartment, as unburnt combustibles within the fire gases flow out of openings and into an oxygen rich environment. This is normally described with an excess fuel fraction, α_4 ⁴. This fraction is defined as the ration between the exterior and interior heat release rates, and the HRR therefore is calculated by:

$$\dot{Q}_{C,max,total} = \dot{Q}_{C,max,int} * (1 + \alpha_4) \quad \text{eq. A4}$$

Where $\dot{Q}_{C,max,total}$ is the combined maximum heat release rate of internal and external combustion. An excess fuel fraction of 0.1 has been assumed for this project.

After this maximum HRR has been established the growth phase can be calculated, it follows the form of:

$$\dot{Q}_t = \alpha_7 t^2 \quad \text{eq. A5}$$

⁴ Note that the subscripts of the various α factors used in the equations in this appendix do not increase with the order they appear in the appendix, but rather are named to maintain consistency with those in the report *Predictive method for fires in CLT and glulam structures – A priori modelling versus real scale compartment fire tests & an improved method* by Brandon et al (2021) which is referenced in places as a source of further detail. This is done to avoid confusion should a reader review the reference report.

Where α_7 is the growth rate and t is the time since ignition. For this project a fast fire growth rate, of 0.047 kW/s^2 , as shown to provide a good match for fires in validation studies of the model [13] has been used. The fire curve follows this growth until the calculated maximum is reached.

Finally, there is a decay phase. The decay phase will start after a proportion of the total moveable fuel has been used. It has been found during validation studies [13] that a value of 0.5 provides a good match. This start point is therefore found by establishing the duration of maximum heat release rate required so that the area under the HRR curve is equal to 0.5 the total fuel load. The shape of the decay curve is governed by a hyperbolic function rather than the more commonly used linear or parabolic functions. These latter functions cause a relatively sharp stop to the fire, while a hyperbolic function provides a smoother end to the fire as observed in real fires. The decay curve is therefore governed by the following equation:

$$Q_{C;dec}(t) = \frac{1}{x(t-y)} \quad \text{eq. A6}$$

Where $Q_{C;dec}(t)$ is the heat release rate of the variable fire load during the decay phase as a function of time, t is the time and x and y are determined using the following boundary conditions:

- $\int_0^{t_{dec}} Q_C(t) dt = \alpha_5 \alpha_6 F$, as the total area under the heat release rate curve should correspond to the fuel load, F , and the combustion efficiency, α_5 . α_6 is the fraction of fuel consumed at the start of the decay phase (0.5).
- $Q_C(t_{dec}) = \dot{Q}_{C;max;total}$, as the heat release declines during the decay phase, from the heat release rate corresponding to the fully developed phase to zero.
- $\int_{t_{dec}}^{\infty} Q_{C;dec}(t) dt = \alpha_5 (1 - \alpha_6) F$, as the area under the heat release rate curve of the decay phase should correspond to fuel left at the start of the decay and the combustion efficiency.

Fire Temperature Calculation

Once the movable fuel load is calculated the first part of the iterative portion of the model is to use a single zone model to calculate the gas temperature. This requires the heat release rate of the fire to be known, movable fuel portion described above and the CLT contribution below, along with the losses (primarily via gas flow out of any openings and via convective and radiative heat transfer into the boundaries). Using the law of conservation of energy states the energy released should, be equal to the energy lost (hereby the heat energy stored in gasses

inside the compartment is considered negligible) and so the energy balance of the zone model can be described using the following equation:

$$\dot{Q}_C + \dot{Q}_{C;CLT} = \dot{Q}_W + \dot{Q}_R + \dot{Q}_L \quad \text{eq. A7}$$

Where:

\dot{Q}_C is the heat release rate corresponding to the movable fuel load

\dot{Q}_W is the rate of heat loss through compartment boundaries (floor, walls and ceiling)

\dot{Q}_L is the rate of heat loss through air flow out of openings in the compartment

\dot{Q}_R is the rate of heat loss through radiation out of openings

$\dot{Q}_{C;CLT}$ is the heat release rate of the CLT calculated using a heat transfer model

The maximum heat loss rate due to air flow out of the openings is calculated using (Wickström 1986):

$$\dot{Q}_L = \alpha_1 (T_f - T_\infty) c A \sqrt{h} \quad \text{eq. A8}$$

Where:

T_f is the fire temperature (K).

T_∞ is the ambient temperature (K)

c is the specific heat of air

The factor α_1 is a flow rate coefficient and is often assumed to be $0.50 \text{ kg}/(\text{s m}^{5/2})$. According to [59] the value of this coefficient ranges between 0.40 and $0.61 \text{ kg}/(\text{s m}^{5/2})$. For this model α_1 was chosen empirically based on historic test data with a value of $\alpha_1=0.40$ being found to correspond well to the data [13].

Up to the point of flame extinction, assumed to be 700°C in the implementation of this model, it can be assumed that there is radiative interaction between the thick flames of the compartment fire and the boundaries. This heat transfer between the two is described by:

$$\dot{Q}_{R,CP} = \sigma \varepsilon (T_f^4 - T_s^4) \quad \text{eq. A9}$$

Where:

σ is the Stefan Boltzmann constant

ε is the effective emissivity

T_s is the surface temperature

In addition to this interaction between the surfaces and the fire there are also radiative losses out of the opening. In keeping with the single zone assumption of the model it has been assumed that there is a view factor of 1 across the area of the opening. At the cessation of flaming the fire

itself would stop radiating to outside, and radiative losses via the opening would in fact come from the boundary surfaces. To keep the implementation of the model simple, this change has not been included and instead it has been assumed that the fire gases continue to radiate to outside. As this occurs during the decay phase, where the gas temperatures are lower than the surface temperatures, this will result in a lower heat loss and therefore be conservative with regards to the exposure to the timber structure. The radiative losses are therefore described by the following equation:

$$\dot{Q}_{R,CB} = A_O(T_f^4 - T_\infty^4)\sigma \quad \text{eq. A10}$$

Where:

A_O is the surface area of all openings

The heat losses through the boundaries are calculated via the use of a 1D heat transfer analysis, described in the following subsection. With all of these losses established, the temperature history of the fire can be calculated by substituting the loss terms into eq. A8 and rearranging for T_f :

$$T_f = \frac{\dot{Q}_C + \dot{Q}_{C;CLT} - \dot{Q}_W - \dot{Q}_R}{c\alpha_1 A \sqrt{h}} + T_\infty \quad \text{eq. A11}$$

Noting that for the first iteration of the model this is not possible, and so it is assumed that the combined heat losses equal half of the initial heat released by the movable fuel and that the contribution of the CLT ($\dot{Q}_{C;CLT}$) is zero.

Calculation of Timber Temperatures

To establish the contribution of the CLT to the fire, first the rate of charring must be established, and for this to be calculated the history of the through depth temperatures is required in turn. This is calculated using a 1-dimensional finite element heat transfer model to predict the heat transfer through the depth of the wall from the fire side to the external, ambient, side. On both sides of the wall, it is assumed that both radiative and convective boundaries exist and that the boundary condition can be expressed as:

$$q_n = h(T_g - T_s) + \sigma\varepsilon(T_g^4 - T_s^4) \quad \text{eq. A12}$$

Where:

q_n is the net heat flux through the surface,
 h is a convection coefficient (W/m²K),
 T_g is the gas temperature (K),

T_s is the surface temperature (K)

The convective heat transfer coefficient and emissivity used within the model are 25 W/m²K and 0.8 respectively, which is in accordance with the guidance in EN 1991-1-2 (2002) and EN 1995-1-2 (2004). In fully developed compartment fires with thick flames and smoke, such as for the majority of the duration of the fires considered in this model it is reasonable to assume, as done here, that the radiation and gas temperatures are the same. As described in the model overview, at the cessation of flaming the radiative interaction between the compartment gases and the walls stops, this is implemented in practice by setting the emissivity at the heated boundary in the heat transfer to 0.

In addition to allowing the determination of the charring rate, and hence the contribution of CLT to the fire, by conducting 1D heat transfer calculations through all of the walls, the ceiling and the floor, the total heat losses through the compartment boundary can be calculated (for inclusion in the zone model fire temperature calculation). The heat losses through the boundaries are calculated using:

$$\dot{Q}_w = \sum_{i=1}^m \dot{q}_{n,i} * A_i \quad \text{eq. A13}$$

Where:

- $\dot{q}_{n,i}$ is the net heat flux per surface area through boundary i
- A_i is the surface area of boundary i
- m is the number of boundary

The effective thermal properties used within this model for the timber and gypsum board are shown in Table 1 and Table 2. The thermal properties for temperatures in-between the temperature values of the table were linearly interpolated.

Table 1: Effective thermal properties of CLT material utilized.

Temperature (°C)	Conductivity (W/mK)	Specific Heat (J/kgK)	Density (kg/m ³)
20	0.07	1347	494.6
98	0.06	987	494.6
99	0.73	4006	494.6
120	0.75	6075	494.6

Table 2: Effective thermal properties of gypsum boards utilized.

Temperature (°C)	Conductivity (W/mK)	Specific Heat (J/kgK)	Density (kg/m ³)
11	0.827	816.8	896
70	0.46	514.1	896
100	0.167	628.3	896
130	0.177	8865.5	829.7

121	0.20	2577	494.6
200	0.67	2300	494.6
250	0.82	3671	460
300	0.24	1936	375.9
350	0.12	4305	257.2
400	0.14	3388	187.9
500	0.15	4472	163.2
600	0.53	7799	138.5
800	0.82	9192	128.6
1220	1.37	9192	1

140	0.187	37674	808.2
150	0.243	21700	785.8
170	0.164	672	741.9
600	0.115	960	741
720	0.177	3924	740.1
750	0.38	864	695.3
1000	0.392	864	695.3
1200	1.659	864	695.3

Calculation mass timber energy contribution

Assuming a charring temperature of 300°C [18], [60] the charring rate can be calculated for the whole fire from the calculated timber temperatures by tracking the progress of the heat in the material. It has been found in previous studies that the heat release rate per millimetre of char is a constant 5.39 MJ/m²mm. Using this relationship with the charring rate the heat release rate contribution of the char over the duration of the fire can be calculated. The relationship is as follows:

$$\dot{Q}_{C;CLT} = \sum_{i=1}^m 5.39 * \frac{\dot{\beta}_i}{60} * A_i * \alpha_2 \quad (MW) \quad \text{eq. A14}$$

Where:

$\dot{\beta}_i$ is the charring rate (mm/min)

A_i is the surface area of assembly i (m²)

α_2 the fraction of combustion energy release in oxygen poor environment

In the decay phase it has been observed that the char layer oxidises causing a regression of the char surface. This process also releases heat, and as such will contribute to maintaining high temperatures during the decay phase. From thermogravimetric analysis conducted previously [13] it can be observed that after 400°C there is very little char regression in an oxygen poor environment, while there is a more rapid mass loss in an oxygen rich environment (20% O₂). This comparison indicates that a switch from oxygen poor to oxygen rich environment can involve a significant release of additional energy stored in the char layer. It was also established that the mass fraction of the char, in comparison to uncharred wood, is approximately 0.25. It was also found that a ratio of approximately 0.05 of the mass of the timber remained after

oxidation in the cone tests. It is therefore concluded that an α_2 value of 0.2 is a reasonable assumption for this model.

Following from this the heat released by charring can be calculated and then added to that obtained from the “movable fuel load” (see equation 11) for the calculation of the fire temperatures in the next iteration of the model. This does not however include the energy released by the oxidation of char after flame extinction. The total energy stored in the char after flame extinction can be calculated with:

$$(1 - \alpha_2)\alpha_3 \int_0^{t_{fe}} \dot{Q}_{C;CLT}(t) dt \quad \text{eq. A15}$$

Where t_{fe} is the time at which flaming extinction occurs and α_3 the fraction of the energy stored in the char that is released during oxidation. For the purposes of the modelling undertaken here it is assumed that $\alpha_3 = 1$, which is a conservative assumption.

Experimental work by Brandon et al. (2021) [13] indicates that the char regression is faster during the first half hour after the switch to an oxygen rich environment, after which it slows down. To provide a simple means of including this within the model a hyperbolic function is used to distribute the energy released by oxidation from the point of extinction. This causes a larger release of heat at the start with a long slow down.

Iteration

As the calculation of the fire temperature, using equation A4, requires knowledge of the contribution to the fire of the CLT, which itself is dependent upon the overall fire development which the CLT contributes to. The model is therefore completed using an iterative method, the overall process of which is described in the overview in section A.7, and in the first iteration the CLT contribution is assumed to be 0. A new CLT contribution is calculated from the resulting through depth temperatures, and this is added to the movable fuel load in the second iteration. This process is repeated until convergence between iterations.

BILAGA B – VALIDERING AV BERÄKNINGSMODELL

Comparisons with compartment fire tests are presented here. As mentioned, Section 2.5.1 the framework involves requirements of material performance. These requirements are specifically:

- no significant effects of glue line integrity failure (also known as fire induced delamination)
- complete encapsulation of non-exposed timber with protective boards

Section 2.5.1 and Section 1.2 also mentions assumptions made.

The number of published compartment tests that are fully within the scope are limited as the majority of previous compartment tests with exposed mass timber surfaces did involve glue line integrity failure or significant charring behind gypsum boards [61]. To increase the available data, also replications of compartment tests by Brandon et al. (2018) [62] are included. The full list is shown in Tabell 5.

Tabell 5: Compartment fire tests relevant for validation. *MT* = mass timber; *HRRPUA* = heat release rate per unit area; *var.* = variable; *GB prot.* = gypsum board protection; *adh.* = adhesive; *exp. Avg* = experimental average

Reference	Floor area (m ²)	Fuel load density (MJ/m ²)	Exposed MT surface (m ²)	Opening factor (m ^{0.5})	Maximum HRR PUA of var. fuel (kW/m ²)	CLT outer lamella thickness (mm)	CLT thickn. (mm)	Adh.	GB prot.	Exp. avg char depth (mm)
A: Test 3, Medina Hevia (2015) [63]	15.8	532	11.3	0.042	254	35	175	HBE	2 x 12.7 type X	33
B: Test 2, Zelinka et al. (2018) [64]	82.8	550	16.7	0.105	193	35	175	HBE	2 x 15.9 type X	23
C: Test 3, Zelinka et al. (2018) [64]	82.8	550	24.9	0.105	193	35	175	HBE	2 x 15.9 type X	23
D: Test β1, Hadden et al. (2017) [65]	7.4	132	14.8	0.042	210	20	100	PU	2 x 12.5 type F	24
E: Test 1, Brandon et al. (2021) [13]	48.0	560	53.8	0.063	220	35	175	HBX	2 x 15.9 type X	36
F: Test 2, Brandon et al. (2021) [13]	48.0	560	91.2	0.063	220	35	175	HBX	3 x 15.9 type X	56
G: Test 3, Brandon et al. (2021) [13]	48.0	560	96.2	0.063	220	35	175	HBX	3 x 15.9 type X	**65
H: Test 4, Brandon et al. (2021) [13]	48.0	560	77.9	0.266	584	35	175	HBX	2 x 15.9 type X	43

I: Test 5, Brandon et al. (2021) [13]	48.0	560	97.2	0.063	220	35	175	HBX	3 x 15.9 type X	63
*** J: Test 1, McNamee et al. (2021) [66]	24.0	891	24.0	0.144	Not determined	33	165	HBS	NA	45
***K: Test 2, McNamee et al. (2021) [66]	24.0	891	24.0	0.050	Not determined	33	165	HBS	NA	74
***L: Test 3, McNamee et al. (2021) [66]	24.0	891	24.0	0.032	Not determined	33	165	HBS	NA	**85
M: Code Red #01, Kotsovinos et al. (2021) [67]	352.0	374	352.0	0.071	170	40	140	MUF	NA	25
* N: Test MF-A, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	13.2	0.030	155	35	175	HBX	2 x 12.7 type X	65
* O: Test MF-B, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	MF	NA	51
* P: Test PRF-A, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	MF	NA	54
* Q: Test PRF-B, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	PRF	NA	53
* R: Test EPI-A, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	PRF	NA	59
* S: Test EPI-B, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	EPI	NA	54
* T: Test PU2-A, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	EPI	NA	54
* U: Test PU2-B, Brandon et al. (2018) [53]	41.9	550	41.9	0.032	155	35	175	HBX	NA	58

* Tests with conditions replicated from a compartment test Test 1-4 by Su et al. (2018) [68], it should be noted that the replicated fire involved glue line integrity failure during the fully developed phase, which is expected to have prolonged the duration of the ventilation-controlled conditions. This should lead to somewhat higher damage than typically expected for a scenario where glue line integrity failure is prevented.

**These tests were stopped before full decay occurred

***These tests are out of the scope of the model since glue line integrity failure occurred

Figure 4 (left) shows model predictions and char depths after a fire for all compartment fires that are included in Tabell 5 and have a known maximum heat release rate that only corresponds to the variable fuel. It can be seen that all predictions except for that of Test H are conservative. Test H had, by far, the highest opening factor of the compartment tests.

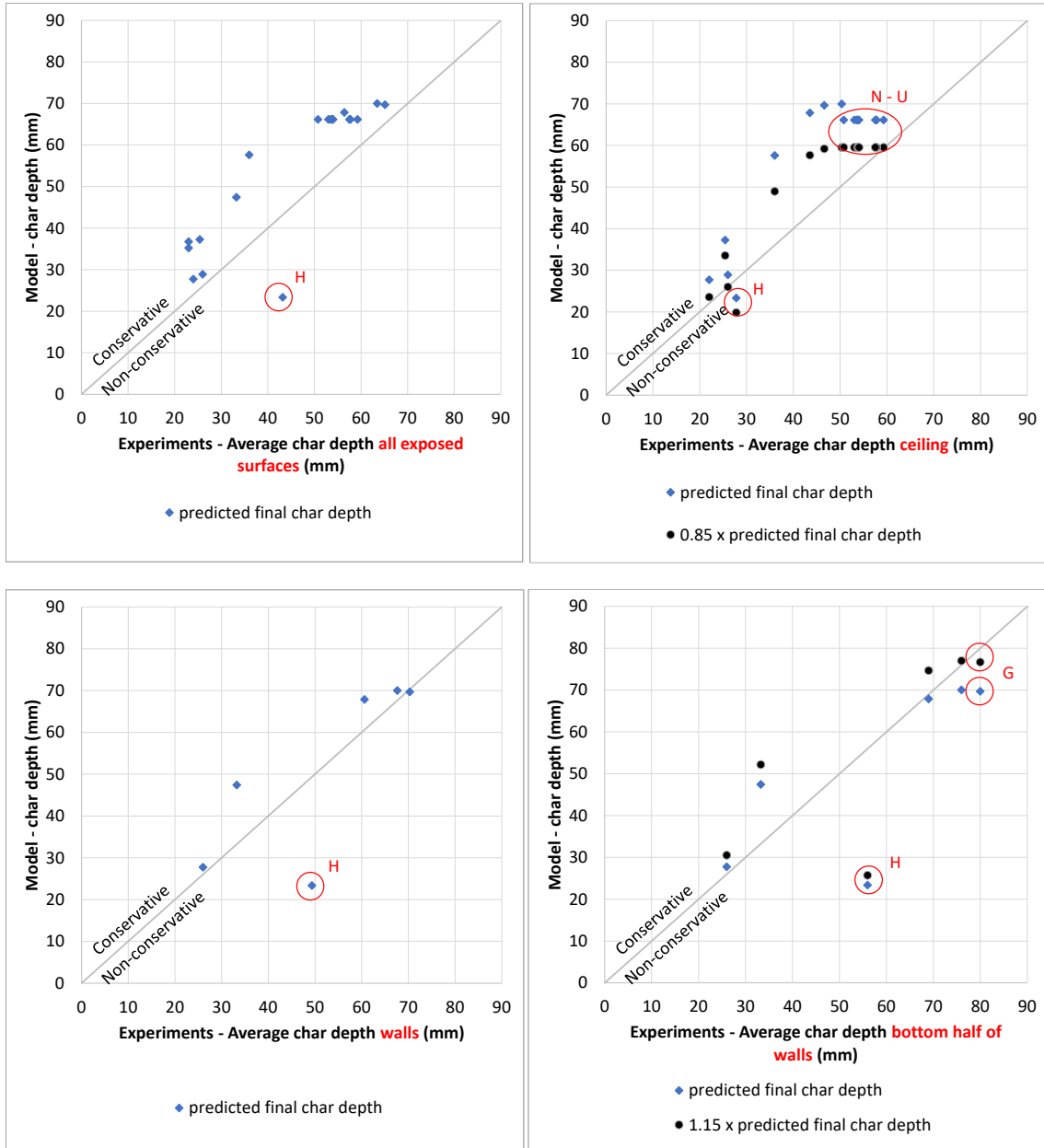


Figure 4. Final char depth predictions versus the average char depth of all exposed surfaces in published compartment tests

This Annex, details an evaluation of the model by setting predictions of char depths against the average char depths measured after 22 different fire tests, 14 of which were compartment fire tests and 8 of which were replication tests in which compartment fire conditions of tests by Su et al. (2018) [68] were replicated. The series only includes tests in which the material performance criteria of Section 2.5.1 for gypsum boards and mass timber integrity were met, meaning that no significant charring behind gypsum board occurred and glue line integrity of the mass timber was avoided. The data set for validation includes opening factors ranging from 0.03 to 0.27 m^{0.5} and floor plan areas from 7 to 350 m².

The model gave conservative estimations of the average char depth for all compartments with opening factors up to 0.19 m^{0.5}. The model did not correspond well with the single compartment test with the larger opening of 0.26 m^{0.5}, in that test (Test H) the heat release rate from the variable fuel was much higher than seen in other experiments with the same variable fuel [13]. In addition, the decay seems to be overestimated by the model. As there was only one test with such a high opening factor, adjustments of the model cannot be justified as there is not enough data for validation.

The model gave conservative predictions of the average char depth for compartments in the whole range of floor areas (7 to 350 m²). Char damage after a fire is generally higher in the bottom of the compartment than it is in the top of the compartment, as can for example be seen in work from McGregor (2014); Hadden et al. (2017); Su et al. (2018), Brandon et al. (2021). Analysis by Brandon et al. 2021 strongly indicates that this is due to higher oxygen concentrations in the bottom of the compartment. Although the model predictions in general correspond well with the average char depth of the compartment and the average char depth over the complete height of walls, the average char depth in the bottom of walls is in several cases non-conservative. Similarly, the char depth predictions of ceiling are in general most conservative.

The analysis of Annex B indicates that the char depth predictions of all data still remain or become conservative if they are:

- multiplied by 0.85 for predictions of the char depth of the ceiling
- multiplied by 1.0 for predictions of the overall char depth of walls
- multiplied by 1.15 for predictions of the char depth of the lower half of walls

For the development of the model Brandon et al. (2021) singled out 5 compartment tests for more in-depth comparisons. With exception of the large opening factor compartment (test H in Tabell 5) discussed above, modeling predictions of the plate thermometer temperature, gas temperatures and heat release rate were put side by side and indicated that predictions of gypsum surface temperatures corresponded well with experimental plate thermometer temperatures⁵. The peak temperature, however, was overestimated by the model in all comparisons.

⁵ As, both, plate thermometers and gypsum boards are thermally inert, the comparison of their surface temperature is deemed useful for model validation.

BILAGA C – KÄNSLIGHETSANALYS

As mentioned in Section 2.5.1, the sensitivity study aims to reduce the number of parameters incorporated in the framework to improve practicality. The parameters under investigation are as follows:

- width to length ratio
- floor area
- fuel load density
- surface area of exposed wood.

In the sensitivity analysis the influence of changing individual parameters is assessed. A smaller variation of predicted char depths is here used as an indication of less sensitivity of the predicted structural damage to the varied parameter.

Sensitivity analysis 1: Fuel per floor area versus fuel per boundary area.

Historically the fuel load in compartments was expressed as fuel load per boundary area in Swedish regulations. Harmonisation within Europe, led to a switch to expressing the fuel load per floor area instead. In order to assess relevant options a first sensitivity analysis was performed whereby:

- 20% of the compartment boundary (including floor and openings) comprises exposed wood.
- The compartment interior height is 3.0 m
- The opening factor⁶ is 0.06 m^{0.5}
- The floor area is **varied** (but a square floorplan is implemented)

Figure 5 shows the results for analysis whereby either the fuel per floor area was constant (red), or the fuel per perimeter area was constant (black). It can be seen that, for this set of calculations, the predicted char depth is significantly dependent on the floor area if the fuel load is expressed per floor area. In contrast expressing the fuel load per boundary area leads to less

⁶ The opening factor is calculated in accordance with Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002) using: $O = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t}$, whereby A_v is the opening area, h is the opening height, A_t is the total area of the compartment boundary including area of openings.

dependence on the floor area for predictions of the char depth, which indicates an opportunity to present a framework in which floor area is not one of the variables.

Due to the high dependency on the floor, expressing the fuel load density per floor area is not considered in further sensitivity analysis.

Note: Flashovers in very large compartments can significantly reduce the available evacuation times and compromise the ability for the fire service to interfere. The risks should be mitigated and accounted for and are not accounted for by only using the framework.

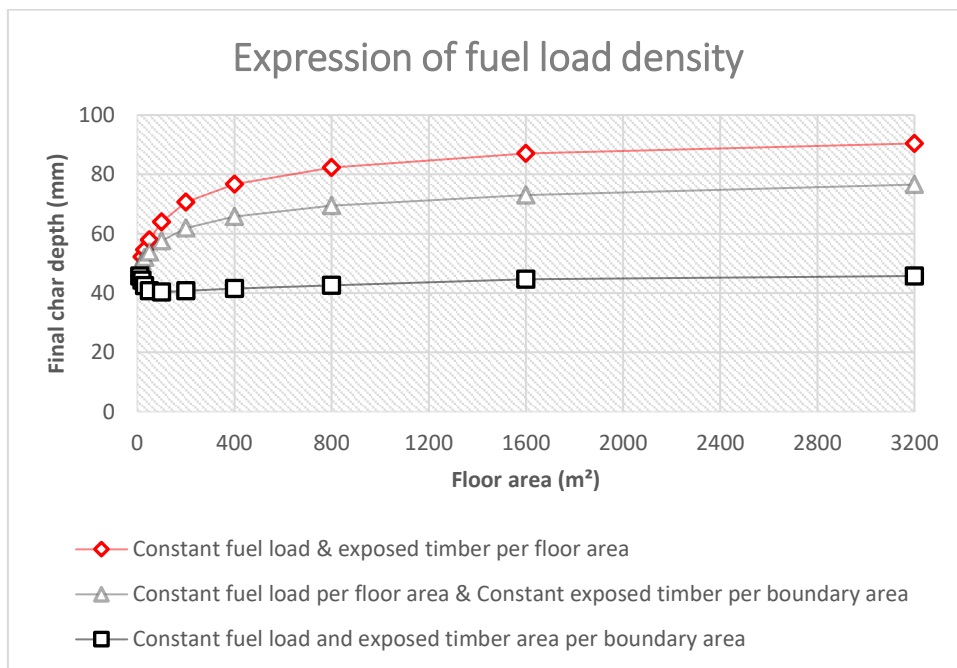


Figure 5. Char depth versus floor area for constant fuel load per floor area (red) and constant fuel load per boundary area.

The advantage of expressing the fuel per boundary area over expressing the fuel per floor area for predictions of the damage also has a physical explanation. Namely, the combustion energy of the fuel will eventually be lost through the compartment boundary and the more boundary area a compartment with a certain volume has, the more heat can be lost through that boundary.

Sensitivity Analysis 2: Shape of the floorplan

While the height of most real fire compartments has minor variations, the width, length, and their ratio can vary significantly. The previous sensitivity analysis (Sensitivity Analysis 1) includes a varying shape, as it keeps the height of the compartment constant and varies the floor area. It however did not cover the dependency of results on the shape of the floor plan. A second sensitivity analysis is discussed here to indicate the dependency of the structural damage on the floor plan shape, by changing the length-to-width ratio of the compartment. Although it is hereby assumed that the floor plan is rectangular, the analyses can to some extent also represent compartments with non-rectangular shapes if the volume and boundary area of the compartment shape are similar to that of the analysis (see Figure 6 for some schematic examples).

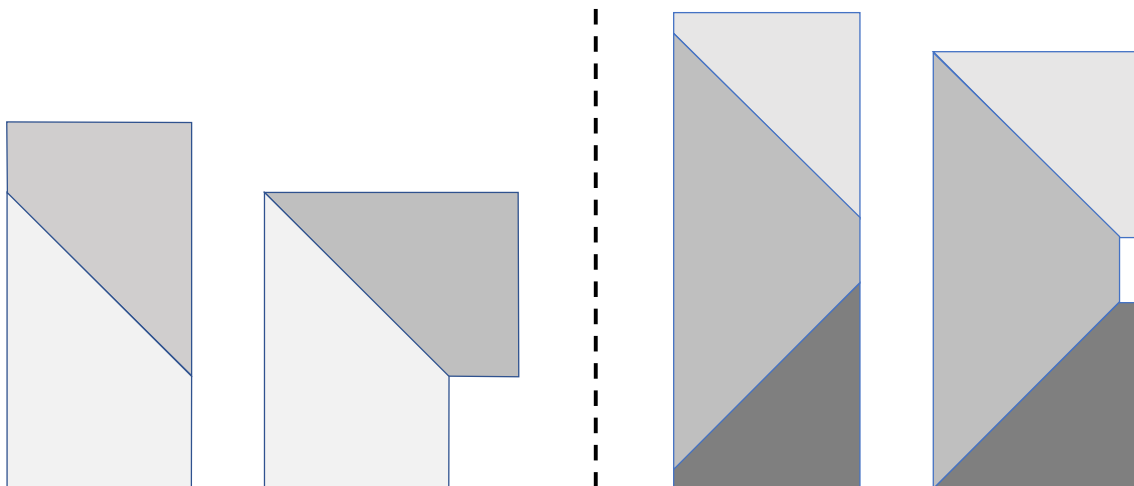


Figure 6. Two schematic examples of floor plan shapes with the same floor area, volume and compartment boundary area.

The sensitivity analysis included eight series describing all possible combinations of the following variables:

- an exposed surface area equal to 60 % or 30% of the compartment boundary area
- a fuel load per compartment boundary area of 200 MJ/m² or 100 MJ/m²
- an opening factor of 0.06 m^{0.5} or 0.16 m^{0.5}

Each series involved nine analyses, with the following compartment properties:

- 1) Length-to-width ratio 1:1 & Floor area 10 m²
- 2) Length-to-width ratio 1.5:1 & Floor area 10 m²
- 3) Length-to-width ratio 2:1 & Floor area 10 m²
- 4) Length-to-width ratio 1:1 & Floor area 100 m²
- 5) Length-to-width ratio 1.5:1 & Floor area 100 m²
- 6) Length-to-width ratio 2:1 & Floor area 100 m²
- 7) Length-to-width ratio 1:1 & Floor area 1000 m²
- 8) Length-to-width ratio 1.5:1 & Floor area 1000 m²
- 9) Length-to-width ratio 2:1 & Floor area 1000 m²

Figure 7 shows predicted char depths. The similarity of final char depths in analysis 1 to 3, 4 to 6 and 7 to 9, separately, indicate an independence of the shape of the floor plan for a compartment with a given volume, a given fuel load per boundary area and a given exposed surface per boundary area.

In line with the results of the first sensitivity analysis, the predicted final char depth was to a small extent dependent on the size of the compartment. Both the first and second sensitivity assessments included very small compartments, with floor areas starting from 10m², which can potentially be left out of the scope of this project due to their relative rarity. A final sensitivity assessment was performed to reformulate the scope, aiming to maintain a practical outcome that leaves out floor area as a dependent variable.

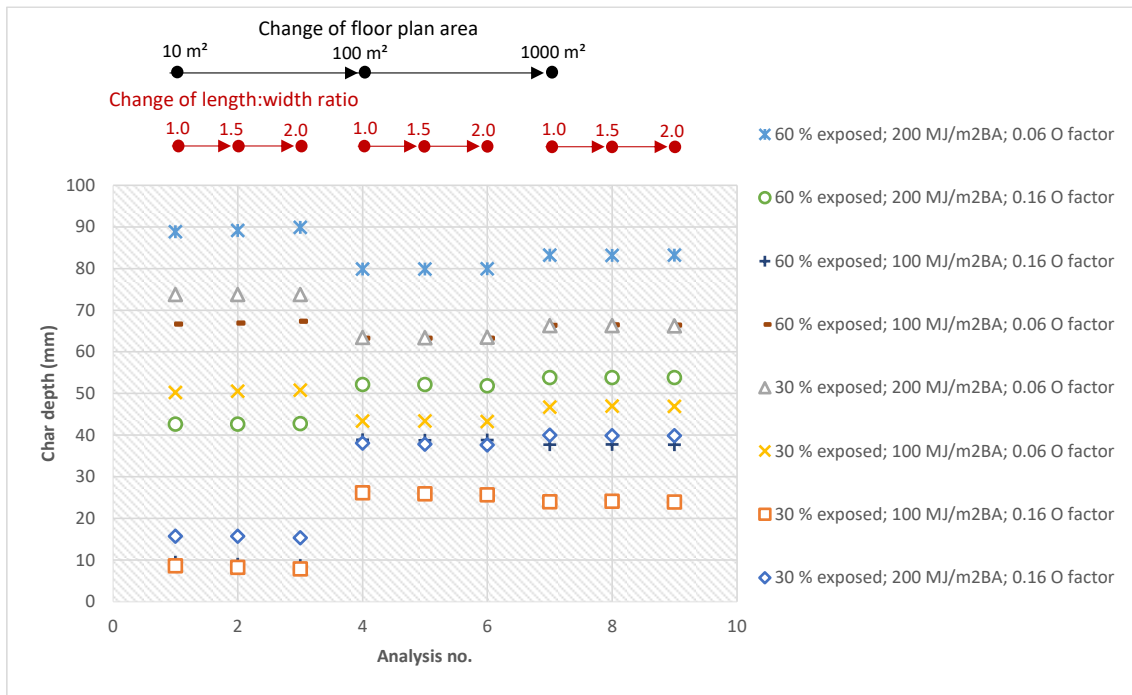


Figure 7. Predicted char depths for scenarios with different compartment shapes, exposed surface areas, opening factors and fuel load densities.

Sensitivity Analysis 3: Assessment

Sensitivity analysis 1 and 2 suggested that expressing the fuel load and the exposed surface area with respect to the total area of the compartment boundary resulted in a small dependency of the char depths to the floor area.

Similar to sensitivity analysis 2, in the third and largest sensitivity analysis series with varying exposed surface areas, fuel load densities and opening factors are run. However, in this analysis the floor plan shape is not considered as a factor and the floor area is varied much more significantly.

Figure 8 shows the dependence of the predicted final char depth on the compartment size. Dependent on the series, the variations in the char depth predictions is roughly 5 to 10 mm (which roughly corresponds to 7 to 10 minutes fire resistance testing).

Based on this analysis the researchers chose to perform the calculations to form the framework with three different floor areas: 30 m², 120m² and 1250m², and present the scenario with the highest predicted char depth in the frame work.

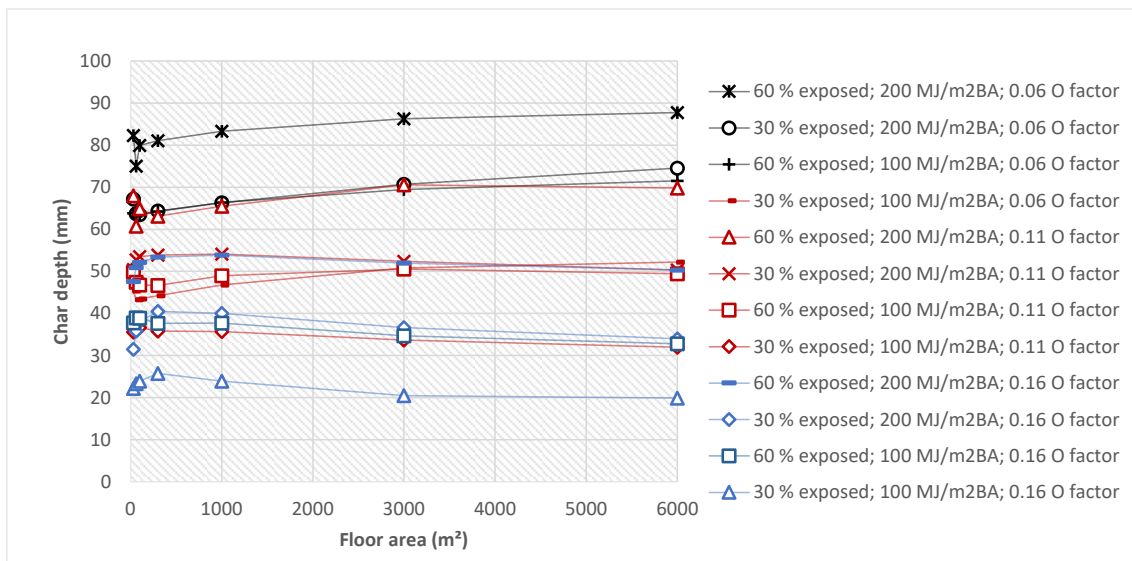


Figure 8. Char depth versus floor area for various defined scenarios.

BILAGA D – MAXIMAL TEMPERATUR VID FÖRKOLNINGSRANDEN UNDER BRANDFÖRLOPPET

På kommande sidor redovisas tabeller över temperaturer på olika djup i träkonstruktionen från förkolningsranden räknat.

		<i>Distance from the char line (mm)</i>												
a_{exp} (%)	O ($m^{0.5}$)	q_{td}	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
10	0.04	60	291.9	184.6	116.8	98.9	86.1	74.6	64	54.6	46.7	40.2	35.1	31.2
10	0.04	120	288.8	205.5	148.2	112	92.5	77.3	64.2	53.5	45	38.5	-	-
10	0.04	180	299.1	222.2	167.3	113.6	91.6	74.9	61.2	50.5	42.5	-	-	-
10	0.04	240	294.3	224.8	158.4	107.6	84.4	67.7	54.9	45.4	-	-	-	-
10	0.04	300	299.3	221.7	137.2	97.1	76.2	60.3	49	-	-	-	-	-
10	0.04	360	291	197.8	112.6	83.7	64.2	50.6	-	-	-	-	-	-
10	0.06	120	286.2	192.2	121.6	108.2	92.6	80	68.5	58.5	50.1	43	37.4	-
10	0.06	180	294.5	209.8	154.8	114.8	97	82.3	69.5	58.5	49.5	42.2	-	-
10	0.06	240	295	219.1	169.1	116.6	96.8	81	67.5	56.4	47.4	-	-	-
10	0.06	300	296.4	226.1	173.2	115.7	94.5	78.1	64.5	53.6	-	-	-	-
10	0.06	360	299.1	231.3	171.8	113.5	91	74.4	61	-	-	-	-	-
10	0.1	120	298.5	184.1	115.4	96.6	84.4	74.5	65.1	56.5	49	42.6	37.3	33.1
10	0.1	180	296.2	198.9	128.1	108.1	92.6	80	68.4	58.3	49.8	42.8	37.2	-
10	0.1	240	293.9	207.2	146.2	112.9	95.3	81	68.4	57.7	48.8	41.8	36.2	-
10	0.1	240	293.2	203.4	142.4	109.7	89.7	74.2	61.2	50.7	42.5	36.5	-	-

10	0.1	300	291.8	209.1	151.8	109.9	88.6	72.4	59.1	48.8	41.1	-	-	-
10	0.15	60	282.4	119.1	89.9	74.3	63.7	55.4	49.3	44.6	40.4	36.5	33	30.1
10	0.15	120	296.4	166.3	108.4	88.3	76.9	68.4	60.3	52.8	46.1	40.5	35.7	31.9
10	0.15	180	286.6	180.6	115.3	96.7	83.7	71.7	60.8	51.3	43.5	37.4	32.7	29.3
10	0.15	240	286.7	189.7	119	104.1	87	73	60.8	50.7	42.7	36.6	32.1	-
10	0.15	300	287.7	197.2	128.7	107.1	87.8	72.7	60	49.6	41.6	35.7	31.5	-
10	0.15	360	292.9	205.2	143.4	108.9	88.1	72.2	59	48.5	40.6	34.9	-	-
20	0.04	60	294.4	190.6	119.3	105.1	89.7	76.9	65.3	55.4	47.1	40.4	35.2	-
20	0.04	120	290.8	209.7	155.6	113	93	77.3	64.1	53.3	44.8	38.4	-	-
20	0.04	180	299.9	224.6	168.3	113.2	90.9	74.1	60.5	49.9	42.1	-	-	-
20	0.04	240	296	225.2	155.8	106.3	83.1	66.6	54	44.9	-	-	-	-
20	0.04	300	294.4	212.6	119.9	92.7	72.4	57.5	47.1	-	-	-	-	-
20	0.04	360	290.3	192.1	109.5	80.7	61.4	48.1	-	-	-	-	-	-
20	0.06	120	288.1	196.3	133.2	110.7	94.2	81	69.2	58.9	50.3	43.1	-	-
20	0.06	180	294.7	211.9	159.5	115.7	97.3	82.4	69.3	58.3	49.2	-	-	-
20	0.06	240	293.7	219.7	169.7	116.2	96.2	80.3	66.8	55.7	-	-	-	-
20	0.06	300	293	225.4	170.1	114.6	93	76.7	63.2	-	-	-	-	-
20	0.06	360	294.2	228	165.4	111	88.5	72.1	59.1	-	-	-	-	-
20	0.1	120	287.7	181.1	115.9	98.1	86	75.5	65.7	56.8	49	42.5	37.2	32.9
20	0.1	180	292.4	198.3	129.1	109.4	93.3	80.2	68.4	58.2	49.6	42.6	37	-
20	0.1	240	293.6	208.3	149.3	113.7	95.7	81.1	68.3	57.5	48.7	41.6	-	-
20	0.1	240	294.8	206.2	148	110.4	90	74.3	61.1	50.6	42.5	36.6	-	-

20	0.1	300	293.6	211.8	154.1	110.3	88.6	72.3	59	48.8	41.2	-	-	-
20	0.15	60	291.3	119.6	91.1	75.3	64.7	56.4	50.1	45.4	40.9	36.9	33.3	30.3
20	0.15	120	295.5	167.5	109.5	89.5	78.1	69.3	61	53.3	46.5	40.7	35.9	32
20	0.15	180	290.8	183.7	116.4	98.3	85	72.4	61.2	51.5	43.6	37.4	32.8	29.4
20	0.15	240	295.2	194.8	120.2	105.9	88	73.7	61.3	51	42.9	36.7	32.2	-
20	0.15	300	298.5	203.2	137.1	109	89.1	73.6	60.6	50.1	41.9	35.9	-	-
20	0.15	360	293	206.1	145.1	109	87.9	71.8	58.6	48.2	40.4	34.8	-	-
30	0.04	60	297	196	127.8	108.8	91.7	78.1	66	55.7	47.2	40.4	35.2	-
30	0.04	120	293.6	213	159.3	113.6	93	77	63.6	52.9	44.5	38.1	-	-
30	0.04	180	294.6	223.6	163.7	111.2	88.6	71.9	58.6	48.5	-	-	-	-
30	0.04	240	293	221.4	145.2	101.8	79.9	63.9	52	-	-	-	-	-
30	0.04	300	298.8	211.2	118.5	90.2	70.1	55.7	-	-	-	-	-	-
30	0.04	360	299.7	194.7	109	79.7	60.2	46.1	-	-	-	-	-	-
30	0.06	120	297.5	202.3	141.4	112.6	95.9	82.3	70.1	59.6	50.7	43.4	-	-
30	0.06	180	291.8	211.7	160.3	115.6	96.9	81.8	68.7	57.7	48.7	-	-	-
30	0.06	240	291.8	219.9	169.7	115.8	95.5	79.5	66.1	55	-	-	-	-
30	0.06	300	293.3	226.5	169.9	114.2	92.3	75.9	62.5	-	-	-	-	-
30	0.06	360	298.6	231.1	166.7	110.9	88	71.6	-	-	-	-	-	-
30	0.1	120	299.8	190.5	118.6	103.9	89.7	78.3	67.8	58.3	50.1	43.3	37.7	-
30	0.1	180	292.3	200.6	136.1	111.4	94.6	81	68.9	58.4	49.7	42.6	-	-
30	0.1	240	295.2	210.9	154.8	114.7	96.4	81.5	68.5	57.6	48.7	41.6	-	-
30	0.1	240	289	206.3	151.5	113.5	95	80.2	67.4	56.7	47.8	-	-	-

30	0.1	300	294.9	214.5	156.4	110.7	88.7	72.3	59.1	48.9	41.3	-	-	-
30	0.15	60	273.3	119.2	92.2	76.8	66.5	58.3	52	46.8	41.9	37.5	33.6	30.5
30	0.15	120	290.3	167.4	110.5	91.1	79.7	70.5	61.8	53.8	46.8	40.9	36	32
30	0.15	180	286.9	182.9	116.8	99.9	85.5	72.5	61	51.2	43.3	37.2	32.6	-
30	0.15	240	295.9	196.2	123.4	107	88.4	73.8	61.2	50.9	42.7	36.6	32.2	-
30	0.15	300	288.6	199.5	135.8	107.7	87.8	72.3	59.4	49.1	41.2	35.5	-	-
30	0.15	360	297.9	209.7	150.7	109.7	88.3	72	58.7	48.3	40.5	35	-	-
40	0.04	60	292.4	198.1	135	110.2	92.2	78	65.5	55.1	46.6	39.9	-	-
40	0.04	120	298.8	218.3	165	114.1	93	76.7	63.1	52.4	44.1	-	-	-
40	0.04	180	298.2	226.9	164.5	110.3	87.3	70.6	57.5	47.7	-	-	-	-
40	0.04	240	297	220.9	140.7	97.9	77.4	61.8	50.6	-	-	-	-	-
40	0.04	300	299.2	205	115	86	66.2	52.7	-	-	-	-	-	-
40	0.04	360	296.7	201.6	114	84.9	65.3	-	-	-	-	-	-	-
40	0.06	120	287.5	199.7	140.8	112.4	95.3	81.5	69.2	58.7	49.9	42.6	-	-
40	0.06	180	293.8	214.1	164	115.9	97.1	81.8	68.6	57.5	48.3	-	-	-
40	0.06	240	293.5	222	171	115.9	95.3	79.2	65.6	54.5	-	-	-	-
40	0.06	300	295.5	228.7	170.8	113.9	91.8	75.3	61.8	-	-	-	-	-
40	0.06	360	293.2	225.9	158.6	107.8	85.4	69.3	-	-	-	-	-	-
40	0.1	120	291.5	190.6	119.8	106.8	91.8	79.6	68.4	58.6	50.2	43.2	37.4	-
40	0.1	180	288.3	201.6	141.6	112.4	95.1	81.2	68.8	58.3	49.5	42.3	-	-
40	0.1	240	292.6	211.9	158.7	115.1	96.5	81.4	68.3	57.4	48.4	-	-	-
40	0.1	300	298.7	221.5	170.1	116.6	96.6	80.6	67	55.9	47	-	-	-

40	0.1	300	293.9	217.1	166.2	115.3	95.4	79.7	66.3	55.2	-	-	-	-
40	0.15	60	285.6	133	96.2	80.3	70	61.8	55.2	49.1	43.6	38.6	34.5	31
40	0.15	120	281.8	166.8	111.6	92.9	81.6	71.8	62.6	54.3	47.1	41	36	32
40	0.15	180	292.9	187.9	118.3	103.2	86.9	73.4	61.5	51.5	43.5	37.3	32.7	-
40	0.15	240	291.6	196.1	128.1	107.1	88.2	73.3	60.7	50.4	42.4	36.4	-	-
40	0.15	300	299.8	206.8	144.9	110	89.3	73.4	60.2	49.7	41.7	36	-	-
40	0.15	360	297.3	211	152.4	109.7	88	71.7	58.4	48.1	40.5	-	-	-
50	0.04	60	291.9	209.1	152.8	112.8	93.4	78.2	65.1	54.4	45.9	-	-	-
50	0.04	120	295.6	223.9	166	112.5	90.3	73.9	60.7	50.3	-	-	-	-
50	0.04	180	296.6	224.5	151	103.4	81.5	65.8	-	-	-	-	-	-
50	0.04	240	296.2	205.7	116.5	88.3	69.3	-	-	-	-	-	-	-
50	0.04	300	289.6	183.6	104	75.7	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0.04	360	297	171.9	95.9	69.7	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0.06	120	298.8	207.2	149	114	96.8	82.7	70.1	59.3	50.3	42.8	-	-
50	0.06	180	290.9	214.4	164.7	115.6	96.5	81	67.7	56.6	-	-	-	-
50	0.06	240	299	226.6	174.3	116.6	95.6	79.2	65.5	-	-	-	-	-
50	0.06	300	293	227.5	166.9	112.3	89.9	73.5	-	-	-	-	-	-
50	0.06	360	298.7	229	159.6	107.4	84.8	68.6	-	-	-	-	-	-
50	0.1	120	293.6	195	127.3	109.2	93.4	80.6	69.1	59	50.4	43.2	-	-
50	0.1	120	297.9	203.1	140.3	111	92.8	78.4	65.8	55.3	46.8	-	-	-
50	0.1	180	295	210.8	155.7	113.1	93.2	77.7	64.6	53.9	-	-	-	-
50	0.1	240	294.8	217	163.3	113.3	92.3	76.2	62.9	52.2	-	-	-	-

50	0.1	300	296.9	223.3	166.4	112.7	90.7	74.3	61.1	-	-	-	-	-
50	0.1	360	297.7	227.3	165	110.8	88.2	71.8	-	-	-	-	-	-
50	0.15	60	294.6	154	105.2	86.3	75.4	66.5	58.1	50.5	43.9	38.4	33.9	30.4
50	0.15	120	283.4	177.1	115.4	97.9	85.1	73	62.1	52.7	45	38.8	34	-
50	0.15	180	293.2	194.8	122.3	107.5	89.7	75.5	63.3	53.1	44.9	38.6	-	-
50	0.15	240	297.3	204.6	142.8	110.5	91	75.8	62.9	52.4	44.2	-	-	-
50	0.15	300	296.5	210.3	152.6	111.6	90.7	74.8	61.7	51.2	43.2	-	-	-
50	0.15	360	297.7	216	159.6	111.5	89.8	73.5	60.3	50	-	-	-	-
60	0.04	60	290.9	219.1	162.5	112.3	90.6	74.4	61.2	-	-	-	-	-
60	0.04	120	296.1	225.9	154.9	106.2	83.7	67.8	-	-	-	-	-	-
60	0.04	180	297.7	210.7	119	91.6	72.6	-	-	-	-	-	-	-
60	0.04	240	298.7	194.7	109.1	78.8	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.04	300	299.1	179.6	98.4	71.1	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.04	360	293.9	159.3	91.5	65.3	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.06	60	294.4	205.6	145	112.1	93.9	79.4	66.7	56	47.3	-	-	-
60	0.06	120	292.8	216.5	163.8	114	93.4	77.5	64.2	53.3	-	-	-	-
60	0.06	180	296.1	226	168.2	112.8	90.7	74.3	60.9	-	-	-	-	-
60	0.06	240	295.6	226.6	158.8	107.5	85	68.9	-	-	-	-	-	-
60	0.06	300	299.9	221.7	141.5	98.6	78.8	-	-	-	-	-	-	-
60	0.1	120	296.2	199	134.3	111	94.6	81.5	69.6	59.3	50.5	43.1	-	-
60	0.1	180	298.4	211.7	156.9	115.4	97.5	82.9	70	58.9	49.5	-	-	-
60	0.1	180	297.4	215	161.8	114.1	93.9	78.2	64.9	54	-	-	-	-

60	0.1	240	293.5	218.8	164.8	113.2	92	75.9	62.6	-	-	-	-	-
60	0.1	300	296.2	225.1	166.5	112.5	90.3	73.9	60.5	-	-	-	-	-
60	0.1	360	295.3	226.5	162.4	109.8	87.1	70.8	-	-	-	-	-	-
60	0.15	60	298.4	166.3	109.9	90.5	79.2	69.4	60.3	52.1	45	39.2	34.5	-
60	0.15	120	286.3	184	117.6	102.9	87.5	74.6	63.1	53.4	45.4	39.1	-	-
60	0.15	180	296.8	200.7	135.6	109.7	91.1	76.5	64	53.6	45.3	-	-	-
60	0.15	240	299.6	209.7	151	112.2	92.1	76.6	63.5	52.9	44.6	-	-	-
60	0.15	300	298.1	214.6	159.1	112.5	91.4	75.3	62.1	51.6	-	-	-	-
60	0.15	360	299	220	162.9	112.3	90.2	73.9	60.7	50.3	-	-	-	-

BILAGA E – TEMPERATURER UNDER BERÄKNADE BRANDFÖRLOPP

Här redovisas tabeller med brand temperaturer som resulterade av analysen för olika brandscenarier. Temperaturer presenteras i °C och följande förkortningar används:

- %ETrä - % exponerad omslutningsyta
- BB - Brandbelastning per omslutningsarea
- ÖF - Öppnings-faktor ($m^{0.5}$)

Notera att beräkningarna har en tendens att överskatta maximala gastemperaturer, vilket även diskuteras i bilaga B.

% ETrä	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
BB	60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180	
ÖF	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	
Tid (min)	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
	2.5	28	164	59	107	28	164	59	50	28	165	25	24
	5	58	592	191	371	58	592	191	151	58	594	43	37
	7.5	109	1022	386	675	109	1022	386	304	109	1022	73	59
	10	181	1136	664	714	181	1120	663	522	181	1119	116	91
	12.5	258	1246	938	755	258	1153	937	759	258	1153	172	133
	15	355	747	1055	433	355	1174	1085	899	355	1174	234	184
	17.5	496	575	592	306	496	1192	1117	915	496	1189	296	239
	20	652	484	434	238	652	1220	1138	934	652	1202	400	296
	22.5	868	419	344	196	868	1026	864	669	868	1212	498	383
	25	975	369	284	168	978	837	646	507	978	1217	611	465
	27.5	1057	330	241	148	1058	686	530	411	1058	1200	759	555
30	1058	297	210	132	1094	595	459	344	1094	1110	854	657	

32.5	786	270	186	120	1120	539	405	296	1120	982	940	775
35	659	247	167	111	1141	497	363	259	1140	864	1030	842
37.5	568	227	151	103	1160	461	328	230	1157	759	1118	915
40	503	210	139	97	1185	431	299	208	1171	661	1210	995
42.5	451	196	128	92	1007	404	275	189	1183	606	1295	1062
45	408	183	119	87	884	380	254	173	1194	564	924	713
47.5	373	171	112	83	787	359	236	160	1200	531	734	565
50	342	161	106	79	699	340	220	149	1222	504	612	473
52.5	316	152	101	76	636	323	206	140	1102	480	535	409
55	293	143	96	73	589	307	194	131	997	457	481	361
57.5	273	136	92	71	554	293	183	124	915	437	439	322
60	255	130	89	69	523	280	173	118	848	419	403	291
62.5	240	124	86	66	496	268	164	113	784	402	373	265
65	226	119	83	65	472	257	156	108	710	386	347	243
67.5	214	114	80	63	450	247	149	103	659	372	324	224
70	202	110	78	61	429	237	142	100	624	359	304	209
72.5	192	106	75	60	411	228	136	96	594	346	287	195
75	183	103	73	58	394	220	131	93	569	335	271	183
77.5	174	99	72	57	378	212	126	90	547	324	257	172
80	167	97	70	56	363	205	121	87	528	313	244	163
82.5	159	94	68	55	349	198	117	85	509	304	232	154
85	153	91	67	54	336	191	113	82	492	295	222	147
87.5	147	89	65	53	324	185	109	80	476	286	212	140
90	141	87	64	52	313	179	106	78	461	278	203	134
92.5	136	85	63	51	302	174	103	77	447	270	195	128

95	132	83	62	50	292	169	100	75	434	263	187	123
97.5	128	81	60	49	283	164	97	73	421	256	180	118
100	124	79	59	48	274	159	95	72	410	249	173	114
102.5	120	78	58	48	265	154	93	70	398	243	167	110
105	117	76	57	47	257	150	91	69	388	237	161	107
107.5	114	75	57	46	250	146	88	68	378	231	156	104
110	111	74	56	46	242	142	87	66	368	225	151	101
112.5	109	72	55	45	236	139	85	65	359	220	146	98
115	106	71	54	45	229	135	83	64	350	215	141	96
117.5	104	70	53	44	223	132	81	63	341	210	137	93
120	102	69	53	44	216	128	80	62	332	205	133	91

<i>% ETrä</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>
BB	240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360	360
ÖF	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.5	186	165	25	24	28	165	25	24	28	165	25	24
5	647	596	43	37	58	596	43	37	58	596	42	37
7.5	901	1023	73	59	109	1023	73	59	109	1023	73	59
10	1007	1118	116	91	181	1118	116	91	181	1118	116	91
12.5	1064	1153	172	133	258	1153	172	133	258	1153	172	133
15	1098	1174	234	184	355	1174	234	184	355	1174	233	184
17.5	1124	1189	296	239	497	1189	296	239	497	1189	296	238
20	1143	1202	400	296	654	1202	400	296	654	1202	399	296
22.5	1158	1212	498	383	867	1212	498	383	867	1212	497	382
25	1172	1220	611	465	977	1220	611	465	977	1220	609	464
27.5	1184	1228	759	555	1056	1228	759	555	1056	1228	754	553
30	1195	1234	854	657	1092	1234	854	657	1092	1234	854	654
32.5	1205	1239	940	775	1119	1240	940	775	1119	1240	940	774
35	1214	1231	1030	842	1141	1246	1030	842	1141	1246	1030	841
37.5	1221	1182	1117	915	1158	1251	1117	915	1158	1251	1117	915
40	1228	1070	1194	994	1172	1256	1194	994	1172	1256	1194	993
42.5	1233	965	1270	1073	1184	1268	1271	1073	1184	1260	1271	1073
45	1249	874	1285	1092	1195	1289	1307	1101	1195	1264	1307	1101
47.5	1157	796	1174	973	1205	1153	1318	1107	1205	1268	1321	1107
50	1078	718	969	748	1214	1048	1306	1104	1214	1275	1331	1111
52.5	1000	649	815	612	1222	961	1174	955	1222	1303	1340	1115
55	930	612	689	526	1229	885	1008	775	1229	1206	1359	1128

Tid (min)

57.5	871	579	602	466	1237	820	870	646	1237	1107	1199	955
60	820	551	544	419	1244	761	761	566	1244	1025	1034	793
62.5	776	529	500	380	1249	689	660	507	1250	953	907	672
65	727	508	465	348	1256	643	597	461	1256	891	806	596
67.5	673	490	435	321	1264	614	550	423	1262	836	713	539
70	646	473	409	297	1283	587	513	391	1267	788	636	494
72.5	621	457	386	277	1207	562	483	364	1272	732	592	458
75	599	442	365	259	1138	541	457	340	1278	668	553	426
77.5	579	428	347	244	1070	523	433	319	1284	640	520	399
80	562	415	330	230	1005	507	412	300	1300	615	493	374
82.5	547	403	315	217	948	492	393	283	1238	592	469	353
85	532	391	301	206	900	477	376	268	1180	570	448	334
87.5	519	380	288	196	859	464	361	255	1122	551	428	317
90	506	370	277	187	821	451	346	243	1066	534	411	301
92.5	494	360	266	178	788	439	333	231	1014	518	395	287
95	482	351	256	171	753	428	321	221	972	504	380	274
97.5	471	342	247	164	692	417	310	212	933	491	366	262
100	461	334	238	157	663	407	299	203	898	478	353	251
102.5	451	326	230	151	642	397	289	195	866	466	341	241
105	441	319	222	146	623	388	280	188	834	454	330	232
107.5	432	311	215	141	605	380	271	181	806	443	320	224
110	423	305	209	136	588	371	263	175	777	433	310	216
112.5	415	298	202	132	573	363	255	169	711	423	301	208
115	407	292	196	128	559	356	248	163	673	413	292	201
117.5	399	285	191	124	546	348	241	158	655	404	284	195

	120	391	279	185	120	533	340	234	153	624	394	276	188
<i>% ETrä</i>		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
BB		60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	59	50	28	27	59	50	28	158	59	50
	5	58	51	192	151	58	51	192	151	58	636	192	151
	7.5	110	93	413	311	110	93	412	311	110	1046	412	311
	10	181	153	707	554	181	153	707	554	181	1136	707	554
	12.5	260	223	1049	791	260	223	1048	794	259	1183	1048	794
	15	400	286	1174	923	400	287	1183	985	400	1212	1183	985
	17.5	548	461	603	453	548	460	1206	978	549	1234	1206	978
	20	690	584	446	319	690	583	1216	990	713	1252	1211	978
	22.5	973	788	364	245	974	787	953	700	982	1267	1214	978
	25	1064	1017	306	201	1062	1010	696	513	1064	1276	1209	975
	27.5	1110	1151	264	171	1101	1100	546	420	1101	1263	1128	889
	30	1168	1219	231	149	1124	1196	474	355	1124	1190	906	661
	32.5	949	796	206	132	1147	1220	425	308	1148	1062	730	533
	35	772	596	186	120	1168	1255	385	271	1167	938	602	458
	37.5	631	494	169	110	1185	1324	353	242	1182	833	528	405
	40	540	437	155	102	1194	1065	325	219	1195	730	481	362
	42.5	495	392	143	96	1107	881	301	200	1206	638	445	328
	45	457	355	132	90	991	743	281	184	1216	588	414	299
	47.5	424	324	124	86	884	622	263	170	1221	546	387	275
	50	395	298	116	82	794	550	247	158	1219	517	364	254

Tid (min)

52.5	370	276	110	78	707	505	233	148	1172	494	343	236
55	347	256	104	75	634	474	221	139	1091	474	325	221
57.5	327	239	100	72	583	447	210	131	1001	455	308	208
60	309	224	96	70	547	422	199	124	925	437	294	196
62.5	293	211	92	67	523	401	190	118	861	421	280	185
65	278	199	89	65	501	381	182	113	802	406	268	175
67.5	264	188	86	63	481	363	174	108	728	392	256	167
70	252	178	83	62	462	347	166	104	663	379	246	159
72.5	241	169	80	60	445	332	160	100	625	367	236	152
75	230	161	78	59	429	319	153	97	591	356	228	145
77.5	221	154	76	57	414	306	147	94	564	345	219	139
80	212	146	74	56	400	294	142	91	544	335	212	134
82.5	204	140	72	55	387	283	137	88	527	325	205	129
85	196	134	71	54	375	273	132	86	512	316	198	124
87.5	189	129	69	53	363	264	128	84	497	308	191	120
90	182	124	68	52	352	255	124	82	483	299	185	116
92.5	175	119	66	51	342	247	120	80	470	292	180	112
95	169	115	65	50	332	239	116	78	457	284	174	109
97.5	163	112	64	49	322	232	113	76	446	277	169	106
100	158	109	62	48	313	225	110	74	434	271	165	103
102.5	153	106	61	48	305	218	107	73	424	264	160	101
105	148	103	60	47	297	212	105	71	413	258	156	98
107.5	143	100	59	46	289	206	102	70	404	252	152	96
110	139	98	58	46	282	200	100	69	394	247	148	94
112.5	135	95	58	45	275	195	97	68	385	242	144	92

115	132	93	57	44	268	190	95	66	377	237	140	90
117.5	128	91	56	44	261	185	93	65	368	232	137	88
120	125	89	55	43	255	179	91	64	360	227	133	86

% ETrä		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
BB		240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1
Tid (min)	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	158	25	24	28	158	25	24	28	158	25
	5	58	636	43	37	58	636	43	37	58	635	43
	7.5	110	1046	73	59	110	1046	73	59	110	1043	73
	10	181	1136	116	92	181	1136	116	92	181	1133	116
	12.5	259	1183	172	133	260	1183	172	133	260	1182	172
	15	400	1212	235	184	400	1212	235	184	400	1212	235
	17.5	549	1234	298	240	548	1234	298	240	548	1234	298
	20	713	1252	433	298	690	1252	431	298	690	1252	431
	22.5	982	1267	528	403	974	1267	527	403	974	1267	527
	25	1064	1280	649	485	1062	1280	648	485	1062	1280	648
	27.5	1101	1292	871	579	1101	1292	864	579	1101	1292	864
	30	1124	1303	943	712	1124	1303	943	712	1124	1303	943
	32.5	1148	1311	1028	839	1147	1312	1028	839	1147	1312	1028
	35	1167	1308	1115	900	1166	1321	1115	900	1166	1321	1115
	37.5	1182	1262	1193	973	1181	1327	1193	973	1181	1327	1193
	40	1195	1148	1267	1051	1195	1331	1267	1051	1195	1331	1267
	42.5	1206	1039	1333	1127	1206	1341	1334	1128	1206	1334	1334
	45	1216	943	1342	1144	1217	1360	1355	1153	1217	1337	1355
	47.5	1226	859	1260	1026	1226	1226	1367	1155	1226	1340	1370
50	1234	785	1037	790	1234	1119	1359	1148	1234	1346	1382	
52.5	1241	697	874	630	1242	1029	1239	1001	1242	1373	1392	
55	1249	637	743	533	1250	950	1068	814	1250	1276	1411	

57.5	1252	599	629	471	1256	881	923	668	1256	1178	1257	997
60	1244	565	564	425	1263	820	806	576	1263	1096	1088	830
62.5	1216	536	511	388	1269	761	699	511	1269	1025	956	696
65	1158	515	476	356	1275	680	617	466	1275	963	850	609
67.5	1084	496	447	329	1276	639	567	430	1281	907	762	547
70	1013	480	422	306	1266	608	523	398	1286	855	669	499
72.5	952	464	400	286	1246	579	490	372	1291	807	612	463
75	900	449	380	268	1200	552	464	348	1296	758	569	433
77.5	850	436	362	253	1144	529	441	327	1297	679	532	406
80	805	423	346	239	1084	510	420	309	1290	642	500	382
82.5	750	411	331	226	1027	494	402	292	1277	615	476	361
85	684	399	317	215	976	479	385	277	1238	590	455	343
87.5	651	388	305	205	930	465	369	264	1192	566	436	326
90	624	378	293	196	889	452	355	252	1145	543	419	310
92.5	599	369	283	187	849	439	341	241	1100	521	402	296
95	577	359	273	179	813	427	329	230	1058	504	388	284
97.5	557	351	264	172	785	416	318	221	1018	489	374	272
100	543	342	255	166	736	405	307	213	979	475	361	261
102.5	530	334	247	159	676	395	297	205	943	462	349	251
105	518	327	239	154	653	385	288	197	909	449	338	242
107.5	506	320	232	148	632	376	279	190	877	437	328	233
110	495	313	226	143	611	367	271	184	846	426	318	225
112.5	485	306	219	139	592	358	263	178	818	415	309	218
115	475	300	213	134	574	350	256	172	786	405	300	211
117.5	464	294	208	130	557	342	249	167	718	395	292	204

	120	454	287	202	126	539	334	242	161	674	385	283	197
<i>% ETrä</i>		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
BB		60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	130	50	28	27	60	50	28	27	60	24
	5	58	51	560	152	58	51	191	152	58	51	191	37
	7.5	110	93	982	326	110	93	450	324	110	93	449	60
	10	181	153	1200	587	181	153	737	587	181	153	739	92
	12.5	241	225	1192	855	242	225	1271	859	242	225	1267	134
	15	477	330	651	1044	478	328	1289	1097	478	326	1286	185
	17.5	647	496	454	476	645	498	1307	1051	645	500	1306	241
	20	1062	657	384	347	1058	656	1304	1048	1058	655	1300	301
	22.5	1072	1121	332	274	1068	1105	1043	750	1068	1086	1295	431
	25	1107	1174	292	227	1102	1159	784	523	1102	1153	1285	508
	27.5	1125	1240	261	194	1132	1199	587	427	1132	1198	1203	606
	30	1105	1318	236	170	1151	1229	484	367	1151	1229	979	817
	32.5	1057	966	215	151	1172	1254	437	321	1172	1251	805	910
	35	919	726	198	135	1192	1276	401	286	1190	1270	650	964
	37.5	780	539	183	123	1204	1299	371	257	1204	1286	554	1037
	40	632	461	170	113	1191	1158	345	234	1216	1296	490	1117
	42.5	524	423	158	105	1166	986	323	214	1227	1310	453	1185
	45	482	391	148	99	1093	843	303	198	1237	1351	423	814
	47.5	453	364	139	93	999	715	286	184	1241	1185	398	603
	50	428	340	131	89	904	601	271	172	1240	1046	376	484

Tid (min)

52.5	405	320	123	85	823	531	257	161	1239	931	356	423
55	385	301	117	81	742	485	245	152	1175	833	338	378
57.5	366	284	112	78	647	459	234	143	1103	747	322	342
60	349	269	107	75	587	437	223	135	1028	646	307	311
62.5	333	256	103	72	539	418	214	128	954	590	293	286
65	319	244	100	70	512	400	206	122	887	542	281	265
67.5	305	233	96	68	494	383	198	117	828	504	270	246
70	293	223	93	66	477	368	191	112	774	482	259	230
72.5	281	214	90	64	461	354	184	108	704	464	250	216
75	270	205	88	63	447	341	177	104	646	447	241	204
77.5	261	197	85	61	433	329	171	100	608	431	233	192
80	252	190	83	60	420	317	166	97	573	417	225	183
82.5	243	183	81	58	408	307	160	94	543	403	218	174
85	235	176	79	57	396	297	155	92	522	391	211	165
87.5	228	170	77	56	385	288	150	89	509	379	205	158
90	221	164	75	55	375	279	146	87	496	368	199	151
92.5	214	158	74	54	365	271	141	85	484	357	193	145
95	208	152	72	53	356	263	137	82	473	347	188	139
97.5	201	147	71	52	347	256	133	81	462	338	182	134
100	196	142	69	51	338	249	130	79	451	329	178	129
102.5	190	138	68	50	330	242	126	77	441	320	173	124
105	185	134	67	49	322	236	123	75	432	312	169	120
107.5	179	130	66	49	314	230	120	74	423	305	164	116
110	174	126	65	48	307	225	117	73	414	297	160	112
112.5	170	122	64	47	300	219	114	71	406	290	156	109

115	165	119	63	47	294	214	112	70	398	284	153	106
117.5	160	116	62	46	287	209	109	69	390	277	149	103
120	156	113	61	45	280	204	107	67	382	271	146	101

% ETrä		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
BB		240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360	360
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
Tid (min)	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	156	60	24	28	156	60	24	28	156	25	24
	5	58	681	191	37	58	681	191	37	58	673	43	37
	7.5	110	1039	449	59	110	1039	449	59	110	1032	73	59
	10	181	1156	739	92	181	1156	739	92	181	1154	117	92
	12.5	242	1203	1267	134	241	1203	1267	134	242	1203	173	134
	15	478	1232	1286	184	477	1232	1286	184	478	1232	236	184
	17.5	645	1253	1306	241	647	1253	1306	241	645	1253	309	241
	20	1058	1270	1300	301	1062	1270	1300	301	1058	1270	468	301
	22.5	1068	1285	1296	428	1072	1285	1296	428	1068	1285	565	428
	25	1102	1298	1292	506	1104	1298	1292	506	1102	1298	727	506
	27.5	1132	1310	1290	604	1132	1310	1290	604	1132	1310	1012	604
	30	1151	1320	1292	798	1151	1320	1288	798	1151	1320	1062	798
	32.5	1172	1329	1329	910	1172	1329	1286	910	1172	1329	1130	910
	35	1190	1338	1109	965	1190	1338	1283	965	1190	1338	1202	965
	37.5	1204	1353	936	1037	1204	1345	1272	1037	1204	1345	1276	1037
	40	1216	1221	802	1113	1216	1353	1176	1113	1216	1352	1351	1113
	42.5	1227	1110	676	1185	1227	1365	1039	1185	1227	1358	1368	1185
	45	1237	1011	593	1200	1237	1391	912	1210	1237	1364	1383	1210
	47.5	1246	924	536	1083	1246	1288	804	1207	1246	1370	1394	1207
50	1254	845	489	840	1254	1184	699	1194	1254	1376	1404	1203	
52.5	1262	775	460	657	1263	1093	619	1049	1262	1386	1411	1200	
55	1270	686	435	546	1270	1015	571	857	1270	1328	1411	1207	

57.5	1273	630	413	474	1277	943	526	696	1277	1241	1296	1040
60	1277	590	394	431	1283	877	489	592	1283	1163	1139	869
62.5	1298	554	376	394	1289	818	464	519	1289	1092	1006	729
65	1234	523	359	364	1295	760	443	470	1295	1029	896	626
67.5	1171	501	344	338	1298	681	424	434	1300	971	804	559
70	1107	485	330	315	1301	637	406	404	1305	917	716	504
72.5	1044	470	317	295	1325	605	390	378	1310	867	635	467
75	983	455	306	278	1275	574	375	355	1315	821	591	437
77.5	930	442	295	262	1219	545	361	335	1319	774	550	411
80	882	430	284	249	1164	519	348	317	1321	696	513	388
82.5	839	418	275	236	1111	499	336	300	1335	646	482	368
85	798	407	266	225	1064	483	325	286	1309	618	460	349
87.5	754	396	258	215	1019	469	315	272	1267	591	441	333
90	684	386	250	206	976	456	305	260	1224	565	423	317
92.5	647	376	242	197	937	443	296	249	1182	540	407	304
95	619	367	235	189	899	431	287	239	1140	517	392	291
97.5	592	359	229	182	860	420	279	230	1101	495	378	279
100	567	350	223	175	826	409	272	221	1062	478	365	269
102.5	544	343	217	169	794	399	264	213	1025	465	353	259
105	527	335	212	163	763	389	257	206	989	452	342	250
107.5	515	328	206	158	693	380	251	199	955	441	331	241
110	505	321	201	152	656	371	245	193	922	429	321	233
112.5	494	314	197	148	633	363	239	187	890	419	312	226
115	485	308	192	143	611	355	233	181	858	409	303	219
117.5	475	301	188	139	589	347	228	175	831	399	294	212

	120	465	295	183	134	567	338	222	170	801	388	286	205
<i>% ETrä</i>		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
BB		60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	125	50	28	27	25	50	28	27	25	24
	5	58	51	623	152	58	51	43	152	58	51	43	37
	7.5	110	94	1232	347	110	94	73	343	110	94	73	60
	10	181	153	1299	623	181	153	117	623	181	153	117	92
	12.5	296	227	1330	969	296	227	173	971	296	227	173	134
	15	536	405	776	1182	536	405	238	1221	536	402	238	185
	17.5	785	543	476	503	785	543	353	1121	785	545	348	243
	20	1010	782	400	361	1010	782	494	1103	1010	775	497	313
	22.5	1092	1110	355	294	1092	1109	615	818	1092	1111	613	456
	25	1139	1208	320	248	1136	1201	969	547	1136	1203	942	533
	27.5	1158	1256	291	215	1161	1237	1221	433	1161	1237	1219	637
	30	1152	1281	267	190	1179	1262	1180	377	1179	1261	1185	956
	32.5	1188	1105	247	171	1199	1283	1224	334	1198	1280	1225	1001
	35	1097	888	230	155	1218	1298	1306	300	1215	1297	1290	1040
	37.5	971	684	215	141	1230	1286	1410	272	1228	1312	1373	1105
	40	869	506	202	129	1229	1215	1024	249	1240	1320	1394	1179
	42.5	727	429	191	119	1246	1082	786	230	1250	1328	1459	1250
	45	574	401	180	111	1208	947	596	214	1260	1352	1165	877
	47.5	477	377	171	104	1134	824	481	200	1265	1263	949	640
	50	447	356	162	99	1050	703	421	187	1265	1135	788	499

Tid (min)

52.5	427	337	154	94	965	593	388	177	1269	1019	641	428
55	409	320	147	90	882	520	361	167	1251	918	550	385
57.5	392	305	140	86	808	465	338	158	1201	828	479	350
60	377	291	134	83	726	440	317	150	1137	747	435	321
62.5	363	278	128	80	635	422	299	142	1071	648	408	296
65	350	266	123	77	574	405	283	136	1005	589	385	275
67.5	337	255	118	74	520	389	269	130	941	539	364	257
70	326	245	114	72	484	375	256	124	880	493	346	241
72.5	315	236	110	70	468	362	244	119	827	466	329	227
75	305	228	107	68	455	349	233	114	777	449	314	215
77.5	295	220	104	66	442	338	224	110	709	434	300	204
80	286	213	101	65	430	327	215	107	645	420	287	194
82.5	277	206	98	63	419	317	207	103	606	407	275	185
85	269	200	96	62	408	307	199	100	568	395	265	176
87.5	262	194	93	60	398	298	192	98	532	384	255	169
90	255	188	91	59	388	289	185	95	503	373	246	162
92.5	248	182	89	58	379	281	179	92	487	363	237	156
95	242	177	87	57	370	273	173	90	476	353	229	150
97.5	236	172	85	56	362	266	168	88	465	344	222	144
100	230	167	83	55	354	259	163	86	455	335	215	139
102.5	225	162	81	54	346	253	158	84	446	327	208	134
105	220	157	79	53	339	247	153	82	437	319	202	129
107.5	215	153	78	52	331	241	149	80	428	312	197	125
110	210	148	76	51	325	235	145	79	420	305	191	121
112.5	205	144	75	50	318	230	141	77	412	298	186	117

115	200	140	74	50	312	225	137	76	405	291	181	114
117.5	196	136	72	49	305	220	133	74	397	285	176	111
120	191	133	71	48	299	215	129	73	390	279	171	107

% ETrä		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
BB		240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360	360
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
Tid (min)	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	60	24	88	163	60	24	28	163	60	24
	5	58	51	189	37	383	770	189	37	58	770	189	37
	7.5	110	94	501	60	866	1079	501	60	110	1079	501	60
	10	181	153	765	92	1027	1180	765	92	181	1180	765	92
	12.5	296	227	1237	134	1095	1225	1237	134	290	1225	1237	134
	15	536	402	1314	185	1134	1252	1314	185	544	1252	1314	185
	17.5	785	545	1345	242	1161	1273	1345	242	779	1273	1345	242
	20	1010	775	1367	311	1181	1290	1367	311	1007	1290	1367	311
	22.5	1092	1111	1386	455	1199	1305	1386	455	1093	1305	1386	455
	25	1136	1203	1380	531	1214	1318	1380	531	1136	1318	1380	531
	27.5	1161	1237	1370	636	1226	1329	1370	636	1161	1329	1370	636
	30	1179	1261	1366	942	1238	1339	1362	942	1179	1339	1362	942
	32.5	1198	1280	1397	1002	1249	1347	1355	1002	1198	1347	1355	1002
	35	1215	1297	1172	1043	1258	1355	1348	1043	1215	1355	1349	1043
	37.5	1228	1312	996	1106	1267	1362	1333	1106	1228	1362	1345	1106
	40	1240	1324	857	1175	1275	1369	1234	1175	1240	1369	1341	1175
	42.5	1250	1334	736	1246	1283	1377	1093	1246	1250	1375	1339	1246
	45	1260	1343	625	1260	1290	1376	963	1270	1260	1380	1331	1270
47.5	1269	1354	563	1142	1297	1334	853	1262	1268	1385	1174	1262	
50	1277	1370	508	894	1303	1250	757	1244	1277	1390	1050	1253	
52.5	1284	1398	463	697	1310	1163	656	1099	1284	1393	944	1246	
55	1292	1278	437	570	1315	1084	597	904	1291	1375	852	1250	

57.5	1295	1166	415	485	1315	1013	549	740	1298	1303	771	1083
60	1296	1068	395	436	1323	947	506	616	1304	1228	681	911
62.5	1300	981	378	402	1340	888	468	538	1310	1158	620	770
65	1292	903	361	373	1296	830	443	476	1315	1093	578	652
67.5	1251	834	346	348	1250	773	424	439	1320	1034	539	578
70	1199	772	332	326	1202	691	406	410	1325	977	503	518
72.5	1142	695	320	306	1158	641	390	385	1331	924	470	471
75	1089	629	308	289	1115	607	375	363	1336	873	448	441
77.5	1036	589	297	274	1074	573	361	343	1340	824	430	415
80	984	551	287	260	1033	542	348	325	1345	774	414	393
82.5	935	515	277	248	992	513	336	309	1357	696	399	373
85	892	484	268	237	955	487	325	295	1379	649	385	355
87.5	849	465	260	227	917	469	314	282	1344	620	372	339
90	809	451	252	218	882	456	305	270	1306	592	360	324
92.5	772	438	245	209	848	443	295	259	1268	565	349	310
95	710	426	238	201	813	431	287	249	1229	538	338	298
97.5	655	414	232	194	784	420	279	240	1190	513	328	286
100	625	403	226	187	725	409	271	231	1151	490	319	276
102.5	596	393	220	181	665	399	264	223	1113	471	310	266
105	569	383	214	175	640	390	257	216	1074	457	302	257
107.5	541	374	209	169	615	380	250	209	1040	445	294	248
110	516	365	204	164	591	372	244	203	1006	434	286	240
112.5	495	356	199	159	566	363	238	196	972	424	279	233
115	484	348	195	155	543	355	233	191	939	414	272	226
117.5	473	340	191	150	520	347	227	185	910	404	266	219

	120	462	332	186	146	496	339	222	180	879	395	259	212
<i>% ETrä</i>		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
BB		60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	25	50	28	27	25	50	28	27	25	24
	5	58	51	43	152	58	51	43	152	58	51	43	37
	7.5	110	94	73	374	110	94	73	370	110	94	73	60
	10	185	154	117	659	185	154	117	661	185	154	117	92
	12.5	475	215	173	1252	475	215	173	1227	475	218	173	134
	15	574	519	238	1306	574	519	239	1330	574	516	239	185
	17.5	1009	594	420	563	1009	594	403	1200	1009	606	403	244
	20	1101	1169	519	368	1101	1169	529	1162	1101	1181	529	336
	22.5	1144	1220	650	309	1142	1220	656	890	1142	1217	656	478
	25	1178	1250	1276	266	1174	1245	1310	598	1174	1243	1310	560
	27.5	1192	1283	1320	234	1194	1271	1312	439	1194	1270	1312	724
	30	1189	1278	1429	210	1210	1292	1311	382	1210	1291	1311	1130
	32.5	1206	1207	940	191	1228	1311	1341	342	1227	1309	1339	1115
	35	1227	1037	613	175	1246	1328	1405	310	1242	1324	1394	1121
	37.5	1182	868	403	162	1257	1337	1462	284	1255	1337	1408	1170
	40	1081	682	348	150	1258	1325	1110	261	1266	1345	1422	1241
	42.5	975	513	316	139	1268	1192	876	242	1276	1351	1457	1316
	45	905	405	290	130	1293	1061	677	226	1286	1354	1225	942
	47.5	790	377	268	121	1254	939	537	212	1291	1320	1016	690
	50	623	357	249	114	1192	828	441	200	1293	1221	855	533

Tid (min)

52.5	503	339	233	108	1124	716	389	189	1302	1114	709	436
55	420	323	219	103	1051	600	362	179	1311	1014	594	392
57.5	396	309	207	99	975	528	339	171	1292	921	520	359
60	379	296	196	95	904	458	318	163	1247	837	454	331
62.5	364	284	186	92	841	420	300	155	1190	761	409	308
65	351	272	178	88	774	403	283	149	1135	661	385	287
67.5	338	262	169	85	678	388	269	142	1076	599	365	270
70	327	252	162	82	607	374	256	137	1019	546	346	254
72.5	316	244	155	80	547	361	244	131	963	496	329	240
75	306	236	149	77	490	349	233	126	912	452	314	228
77.5	297	228	142	75	448	338	223	121	861	432	300	217
80	288	221	137	73	431	327	214	117	812	418	288	207
82.5	280	215	131	71	419	317	206	113	766	405	276	198
85	272	208	126	69	408	308	198	110	687	393	265	190
87.5	264	203	121	68	398	299	191	107	633	382	256	182
90	257	197	117	66	388	291	185	104	593	371	247	175
92.5	251	192	113	65	379	283	178	101	554	361	238	168
95	245	186	109	63	371	276	173	99	515	352	230	162
97.5	239	181	107	62	363	269	167	96	479	343	223	157
100	234	177	104	61	355	262	162	94	453	334	216	151
102.5	228	172	101	60	348	256	157	92	441	326	210	147
105	224	168	99	59	341	250	153	90	431	319	204	142
107.5	219	163	97	58	334	244	148	88	422	311	198	137
110	214	159	94	57	327	239	144	86	413	304	193	133
112.5	210	155	92	56	321	234	140	84	404	298	188	129

115	206	151	90	55	315	229	137	83	396	291	183	126
117.5	202	148	88	54	310	224	133	81	389	285	179	122
120	198	144	86	53	304	219	129	80	381	279	174	118

% ETrä		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
BB		240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360	360
ÖF		0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
Tid (min)	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	2.5	28	27	25	24	28	27	25	24	28	27	60	24
	5	58	51	43	37	58	51	43	37	58	51	185	37
	7.5	110	94	73	60	110	94	73	60	110	94	571	60
	10	185	154	117	92	184	154	117	92	184	154	1044	92
	12.5	475	221	173	134	463	221	173	134	448	221	1258	134
	15	574	510	239	185	601	510	239	185	627	510	1334	185
	17.5	1009	617	403	244	1027	617	403	244	1042	617	1366	244
	20	1101	1190	529	336	1102	1190	529	330	1102	1190	1387	330
	22.5	1142	1211	656	478	1141	1211	656	480	1140	1211	1402	480
	25	1174	1240	1310	560	1173	1240	1310	559	1172	1240	1414	559
	27.5	1194	1269	1312	724	1194	1269	1312	709	1193	1269	1424	709
	30	1210	1291	1311	1130	1210	1291	1311	1107	1209	1291	1431	1107
	32.5	1227	1308	1339	1115	1227	1308	1339	1118	1226	1308	1432	1118
	35	1242	1323	1394	1121	1242	1323	1394	1128	1242	1323	1424	1128
	37.5	1255	1336	1407	1170	1255	1337	1407	1175	1255	1337	1415	1175
	40	1266	1347	1418	1236	1266	1347	1418	1240	1266	1347	1407	1240
	42.5	1276	1356	1427	1308	1276	1356	1427	1311	1276	1356	1401	1311
	45	1285	1365	1438	1323	1285	1364	1435	1333	1285	1364	1389	1333
	47.5	1294	1374	1476	1200	1293	1372	1441	1318	1293	1372	1228	1319
50	1301	1383	1238	949	1301	1379	1446	1296	1301	1379	1101	1304	
52.5	1309	1381	1058	750	1308	1385	1439	1146	1308	1385	994	1293	
55	1316	1331	917	603	1315	1391	1239	950	1315	1390	900	1293	

57.5	1319	1243	800	510	1321	1395	1085	784	1321	1395	817	1124
60	1321	1152	684	441	1327	1408	962	648	1327	1399	735	951
62.5	1327	1065	599	406	1332	1344	857	561	1332	1403	649	808
65	1332	987	542	378	1337	1261	767	493	1337	1412	602	682
67.5	1321	914	488	353	1341	1182	667	442	1342	1434	562	599
70	1289	847	441	332	1343	1111	602	413	1348	1358	524	537
72.5	1245	787	412	313	1350	1044	554	388	1353	1286	487	483
75	1200	710	393	296	1361	982	509	367	1360	1215	455	443
77.5	1153	637	375	281	1370	924	467	347	1367	1150	431	418
80	1110	596	359	268	1339	868	432	330	1373	1089	415	396
82.5	1066	555	345	256	1304	814	412	314	1382	1033	400	376
85	1022	516	331	244	1265	765	395	300	1393	979	386	358
87.5	978	479	319	234	1227	685	380	287	1402	928	374	342
90	938	450	307	225	1187	634	365	275	1385	880	362	327
92.5	899	435	297	217	1147	599	352	264	1355	833	351	314
95	860	422	287	209	1108	566	340	254	1321	789	340	301
97.5	822	410	277	201	1069	533	329	244	1286	738	330	290
100	786	399	269	195	1033	501	318	236	1246	663	321	279
102.5	725	388	261	188	996	471	308	228	1209	630	312	269
105	658	378	253	182	962	447	299	220	1171	602	304	260
107.5	630	369	246	177	926	433	290	213	1135	574	296	251
110	598	360	239	172	891	421	282	207	1098	546	289	243
112.5	568	352	233	167	860	410	274	201	1065	521	281	236
115	537	344	227	162	827	400	267	195	1031	494	275	229
117.5	508	336	221	157	792	390	260	190	1000	469	268	222

	120	477	328	215	153	759	380	252	184	967	443	261	216
<i>% ETrä</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>
BB	60	60	60	60	120	120	120	120	180	180	180	180	180
ÖF	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.15
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.5	28	27	25	104	28	27	25	50	28	27	25	24	24
5	59	51	43	543	59	51	43	152	59	51	43	37	37
7.5	110	94	74	987	110	94	74	407	110	94	74	60	60
10	199	154	117	1400	183	154	117	686	176	154	117	92	92
12.5	733	278	173	1187	761	278	173	1429	775	253	173	134	134
15	1074	622	231	596	1082	622	229	1424	1085	652	231	185	185
17.5	1125	1205	480	363	1123	1205	494	1309	1119	1120	496	245	245
20	1155	1201	566	311	1152	1200	566	1240	1150	1178	566	375	375
22.5	1189	1248	1343	272	1187	1248	1368	959	1186	1245	1346	499	499
25	1219	1287	1358	242	1214	1284	1341	655	1213	1282	1325	593	593
27.5	1232	1316	1380	219	1231	1307	1368	468	1230	1305	1365	964	964
30	1232	1328	1458	200	1245	1325	1393	381	1244	1323	1392	1368	1368
32.5	1246	1343	1046	184	1260	1340	1411	343	1259	1338	1410	1208	1208
35	1268	1204	740	171	1276	1354	1427	312	1273	1351	1422	1185	1185
37.5	1286	1047	494	160	1287	1363	1483	286	1285	1362	1432	1225	1225
40	1271	897	352	149	1291	1378	1183	264	1295	1370	1440	1294	1294
42.5	1223	746	316	140	1299	1300	951	245	1305	1376	1451	1371	1371
45	1159	573	292	132	1309	1181	771	229	1313	1387	1275	1004	1004
47.5	1080	443	272	124	1317	1065	608	215	1319	1410	1077	754	754
50	994	355	255	117	1306	955	503	203	1322	1319	916	580	580

52.5	912	332	239	112	1271	852	414	192	1330	1215	784	467
55	842	315	226	107	1220	757	363	183	1340	1117	653	395
57.5	724	301	215	103	1163	639	340	174	1345	1026	566	363
60	603	288	204	99	1101	558	321	166	1337	941	499	336
62.5	502	276	195	96	1040	486	304	159	1306	862	435	313
65	409	266	186	93	979	417	289	152	1264	788	388	293
67.5	352	256	179	90	917	384	275	146	1218	699	366	275
70	332	247	172	87	858	369	263	140	1170	620	349	260
72.5	318	239	165	84	801	356	252	135	1121	567	333	246
75	306	231	159	82	728	344	242	130	1072	514	319	233
77.5	295	224	153	80	640	333	232	126	1025	463	306	222
80	285	217	148	78	584	323	223	121	980	420	294	212
82.5	276	211	142	76	528	314	216	117	933	399	283	203
85	268	206	138	74	472	305	208	113	887	386	273	195
87.5	261	200	133	73	420	297	202	110	843	374	264	187
90	254	195	129	71	389	289	195	107	802	364	255	180
92.5	248	190	125	69	376	282	189	104	739	354	247	174
95	242	185	121	68	365	275	184	102	662	344	239	168
97.5	236	181	117	67	355	268	178	99	621	336	232	162
100	231	177	113	65	347	262	174	97	582	327	226	157
102.5	226	173	110	64	339	256	169	95	540	319	220	152
105	222	169	107	63	331	251	164	93	500	312	214	147
107.5	218	165	104	62	324	245	160	91	460	305	208	143
110	214	161	102	61	317	240	156	90	424	298	203	139
112.5	210	158	100	60	311	235	152	88	401	292	198	135

115	206	154	98	59	305	231	149	86	389	286	193	131
117.5	203	151	96	58	300	226	145	85	380	280	189	128
120	200	147	95	57	295	222	142	83	369	274	184	124
<i>% ETrä</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>	<i>60</i>
BB	240	240	240	240	300	300	300	300	360	360	360	360
ÖF	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15	0.04	0.06	0.1	0.15
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.5	28	27	25	24	28	27	25	24	28	27	25	24
5	59	51	43	37	59	51	43	37	59	51	43	37
7.5	110	94	74	60	110	94	74	60	111	94	74	60
10	176	154	117	92	163	154	117	92	168	154	117	92
12.5	775	253	173	134	770	253	173	134	744	253	173	134
15	1085	652	233	185	1077	652	234	185	1062	652	234	185
17.5	1119	1120	495	245	1106	1120	492	245	1098	1120	492	245
20	1150	1178	567	375	1145	1178	568	368	1142	1178	568	368
22.5	1186	1245	1281	499	1183	1245	1224	502	1182	1245	1224	502
25	1213	1282	1307	593	1210	1282	1300	591	1209	1282	1300	591
27.5	1230	1305	1362	964	1228	1305	1362	915	1227	1305	1362	915
30	1244	1323	1391	1368	1242	1323	1390	1346	1241	1323	1390	1346
32.5	1259	1338	1408	1208	1258	1338	1408	1224	1257	1338	1408	1224
35	1273	1351	1421	1185	1272	1351	1421	1200	1271	1351	1421	1200
37.5	1285	1362	1432	1225	1284	1362	1431	1236	1283	1362	1431	1236
40	1295	1372	1440	1290	1294	1372	1439	1297	1294	1372	1439	1297
42.5	1304	1380	1447	1365	1304	1380	1446	1369	1303	1380	1446	1369
45	1313	1387	1453	1380	1312	1387	1452	1390	1312	1387	1452	1390

Tid (min)

47.5	1321	1395	1484	1253	1320	1394	1457	1371	1319	1394	1457	1372
50	1328	1402	1290	1001	1327	1399	1463	1345	1326	1399	1462	1352
52.5	1334	1408	1113	804	1333	1405	1489	1190	1333	1405	1465	1337
55	1341	1414	973	645	1339	1410	1294	993	1339	1410	1470	1334
57.5	1345	1327	854	546	1345	1414	1138	828	1345	1414	1454	1161
60	1347	1239	752	465	1350	1417	1014	685	1350	1419	1293	990
62.5	1353	1156	645	408	1356	1402	909	591	1355	1424	1159	846
65	1360	1081	578	380	1361	1338	816	522	1361	1431	1049	721
67.5	1368	1009	524	356	1365	1266	731	460	1366	1434	953	625
70	1376	943	472	335	1370	1195	638	415	1372	1411	868	563
72.5	1348	880	422	316	1379	1127	586	390	1380	1357	791	507
75	1316	817	393	300	1388	1063	540	369	1387	1291	716	456
77.5	1280	761	376	285	1395	1004	496	350	1394	1225	634	420
80	1239	675	360	271	1402	948	453	332	1399	1162	592	398
82.5	1199	621	346	259	1390	894	416	317	1407	1104	553	378
85	1158	579	334	248	1367	842	396	303	1414	1049	515	361
87.5	1116	539	322	238	1336	791	380	290	1420	996	478	345
90	1078	498	311	228	1300	739	366	278	1424	946	443	330
92.5	1038	459	301	220	1264	661	354	267	1422	899	414	317
95	999	425	291	212	1225	623	342	257	1401	853	397	305
97.5	961	406	282	205	1188	589	331	247	1374	809	384	293
100	923	395	274	198	1149	556	321	239	1342	769	371	283
102.5	886	384	266	191	1112	524	311	231	1307	708	360	273
105	850	374	258	185	1076	492	302	223	1269	650	349	264
107.5	813	365	251	180	1041	460	294	216	1233	621	339	255

110	777	356	245	175	1005	433	286	210	1198	594	329	247
112.5	710	348	239	170	971	414	278	204	1162	567	320	240
115	655	340	233	165	937	403	271	198	1128	540	312	233
117.5	625	332	227	160	908	393	264	193	1096	513	304	226
120	579	325	221	156	876	382	257	187	1062	486	295	219