

Brandsikring af højhuse med træ som bærende konstruktion

Diplom afgangprojekt

DTU BYG – Diplom Bygningsdesign
Danmarks Tekniske Universitet - DTU

Jonathan Dahl Jørgensen
s123163
11-01-2016

Abstract

This project studies the possibilities for using the combustible material wood as main construction material in high buildings (up to 100 meters) in Denmark, regards to fire hazard. The focus lies within traditional residential buildings where traditional refers to the use of simple building geometry and known construction processes.

The aim of the project is to find possible performance based solutions for the building type and to suggest expansion possibilities for the Danish prescribed ruleset for fire safety in residential buildings.

A background study revealed that mainly three fire hazards are of concern if wood is chosen as the main construction material, these being the internal fire spread, the jeopardized safe evacuation time, and the rescue services operating time. The internal fire spread are studied through literature and relevant experimental data, while the evacuation time is calculated on the basis of a comparative method and the rescue service time is calculated based on a quantitative model.

The results show that fire-protecting measures that keep the wood from catching fire, like fireproofing cladding or a sprinkler system, make it possible to document a fire-safe building.

The project concludes that performance based design can be used to achieve safe solutions for the traditional buildings up to 100 meters high. The achievement rely on either fireproofing cladding class K₂ 60 A2-s1, d0, or a sprinkler system.

It was also concluded that the Danish prescribed ruleset can be expanded with the use of sprinkler systems to cover buildings mainly constructed from timber up to a maximum height to the top floor of 22 meter.

Forord

Denne rapport er udarbejdet som afgangsprøve på min diplomingeniøruddannelse i bygningsdesign på Danmarks Tekniske Universitet (DTU). Projektet er 20 ECTS point og skrevet i perioden september 2015 til januar 2016.

Interessen for bærende trækonstruktioner er fremkommet ved et samarbejde med DARK Arkitekter (NO), der ville anvende træ i et konkurrenceprojekt. Jeg skrev, i samarbejdet, et litteraturstudie om træ og brand, og undrede mig over, at Danmarks nabolande er så meget længere fremme i brugen af træ. Derfor kontaktede jeg Dr. Grunde Jomaas (Lektor, DTU), der foreslog et projekt i samarbejde med Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI). I maj 2015 afholdte DBI en temadag om at gentænke træ som bærende konstruktionsmateriale, hvor min deltagelse førte til kontakt til Anders Vestergaard (DBI, senere ansat ved Kullegaard), der gerne ville vejlede projektet.

Projektet er udarbejdet for at være med til at give et større vidensgrundlag for at anvende træ som bærende konstruktionsmateriale i højere bygninger. Dette fuldføres ved at synliggøre de muligheder der findes ved at udnytte funktionsbaseret design, samt ved at give forslag på udvidelsesmuligheder til de danske præskriptive krav.

Projektet skal være med til at give mig selv en større forståelse for brandområdet og for at fremme min grundlæggende viden som fremtidig konstruktions- eller brandingeniør. Projektet vil derfor også kunne benyttes af andre studerende med samme interesse.

Derudover vil projektet kunne give interessenter, rådgivere og produktudviklere en forståelse for mulighederne der foreligger for brugen af træ, og på den måde være med til at bistå Danmark i at udnytte denne fornybare ressource på bedste og sikreste vis.

Tak for hjælpen til min erhvervsvejleder DBI for at tage mig ind i deres rådgivningsteam, og her specielt Anders Vestergaard, der har vist tillid og interesse til projektet. Foruden Grunde Jomaas, der har været en uvurderlig kontakt på DTU med masser af rådgivning. Derudover min kæreste, mine medstuderende og mine arbejdskolleger hos rådgivningsvirksomheden Sweco for sparring igennem forløbet.

Indholdsfortegnelse

Abstract	i
Forord	ii
Ordliste	v
1 Indledning	1
1.1 Afgrænsning	3
1.2 Problemformulering	3
1.3 Læsevejledning	3
2 Baggrundsstudier	5
2.1.1 Traditionelt udførte bygninger	5
2.1.2 Høje bygninger	6
2.1.3 Højhusprojekter i træ	7
2.1.4 Byggetekniske bestemmelser og præskriptive krav	9
2.2 Farlige elementer i højhuse	15
2.3 Aktive og passive påvirkningsmuligheder	19
3 Retnings specifikt studie	20
3.1 Fremgangsmåde	20
3.2 Indvendig brandspredning	22
3.2.1 Forløb	22
3.2.2 Ændring ved brug af træ	25
3.2.3 Brandsikringstiltagens muligheder	26
3.2.4 Forskningsprojekter	27
3.2.5 Delresultat	28
3.3 Evakuering	30
3.3.1 Evakueringstids overslag	31
3.3.2 Delresultat	34
3.4 Indsatstid	35
3.4.1 Overslag på indsatstid	35
3.4.2 Delresultat	38
4 Resultater	39
4.1 Hovedresultater for retnings specifikt studie	39
4.1.1 Forslag til løsningsmuligheder	41

5	Diskussion	44
6	Konklusion	46
6.1	Fremtidigt arbejde.....	48
	Referencer	49
	Appendiks	52

Ordliste

Ordlisten introducerer grundlæggende begreber der bliver anvendt igennem projektet.

Funktionsbaserede krav, er krav der bygger på at opnå en funktion frem for et specifikt mål. Funktionen kan eksempelvis være tilstrækkelig personsikkerhed for folk der evakuerer fra en brandende bygning.

Præskriptive løsninger, betegner projekteringsløsninger der er på forhånd er godkendt til at overholde de funktionsbaserede krav.

Eksempelsamling om brandsikring af byggeri [4] (EBB12), er den danske udgivelse af præskriptive løsninger til at opnå et tilfredsstillende brandsikkerhedsniveau.

Brandmæssige enheder udnyttes til at inddele en bygning i mindre enheder, sådan at en brand kan fastholdes i eller omkring initialbrandrummet. Inddelingen vil give redningsberedskabet langt bedre mulighed for at bekæmpe branden, og der vil være langt større chance for sikker flugtvej for de der evakuerer.

- **Brandcelle**, er et begreb anvendt for en brandmæssig enhed i EBB12, blandt andet for boligenheder og gang, der fungerer som flugtvej. EBB12 beskriver, at "de bygningsdele, som afgrænser en brandcelle, vil som regel yde den fornødne brandmodstandsevne, hvis de f.eks. udføres som bygningsdel klasse EI 60" [4].
- **Brandsektion**, er et begreb anvendt for en brandmæssig enhed i EBB12, blandt andet til at inddele flere beboelseslejligheder (brandceller). Kravet til brandsektionsinddeling indeholder både brandmodstandsadskillende og materialeklasse krav. Eksempelvis EI 60 A2-s1, d0 for boliger.

Passive brandsikringstiltag, er tiltag der ikke skal aktiveres af brandkendetegn, for at sikre bygningen og personerne der opholder sig heri mod brand. Passive tiltag kan eksempelvis være skiltning eller forskellige brandsikrende beklædninger, der værner om de bærende konstruktioner.

Aktive brandsikringstiltag, er tiltag der skal aktiveres for at være med til at værne om konstruktionen og dennes beboere i tilfælde af brand. Den mest kendte af disse er røgalarmen der er installeret i næsten alle danske hjem.

1 Indledning

Træ er blandt de ældste bygningsmaterialer brugt af mennesket og har været brugt gennem årtusinder i forskellige afskygninger. Igennem historien er der imidlertid opstået flere forfærdelige brandulykker i større byer, hvilke tidligere primært var opbygget af bærende trækonstruktioner, blandt andet i København og London [1]. Dette har skabt en øget frygt for brandulykker ved anvendelsen af træ i byggeriet, hvorfor brugen af træ som udgangspunkt er blevet meget afgrænset. Afgrænsningen er sket igennem regler over hele kloden, specielt for mellemhøje og høje bygninger, da man har anset brandfaremomenterne til at være for store [1].

Igennem de seneste år er interessen steget for højere bebyggelse af træ. Ikke specielt grundet den teknologiske udvikling af blandt andet massivtræ, men mere domineret af trangen for at bygge med grøn og bæredygtig arkitektur [2]. Således er flere af de lande, som Danmark normalt sammenlignes med, i fuld gang og har allerede flere realiserede projekter med bærende konstruktioner i træ, se Tabel 1. Disse lande har formået at skabe nogle tekniske omstændigheder, der sikrer dem, at brandfaremomenterne ikke udgør en større risiko end hvad der tillades. I Danmark kan udviklingen også mærkes, blandt andet i form af stor interesse for konferencen "Gentænk træ som bærende bygningsdele i høje bygninger", afholdt af Center for Industriel Arkitektur og DBI den 20. maj 2015, med kapaciteter fra ind- og udland som indlægsholdere [42]. Lovgivningen herhjemme menes dog af enkelte personer ikke at være fulgt med udviklingen, når det gælder bærende konstruktioner i træ, hvilket kan være med til at afgrænse udviklingen enormt [3].

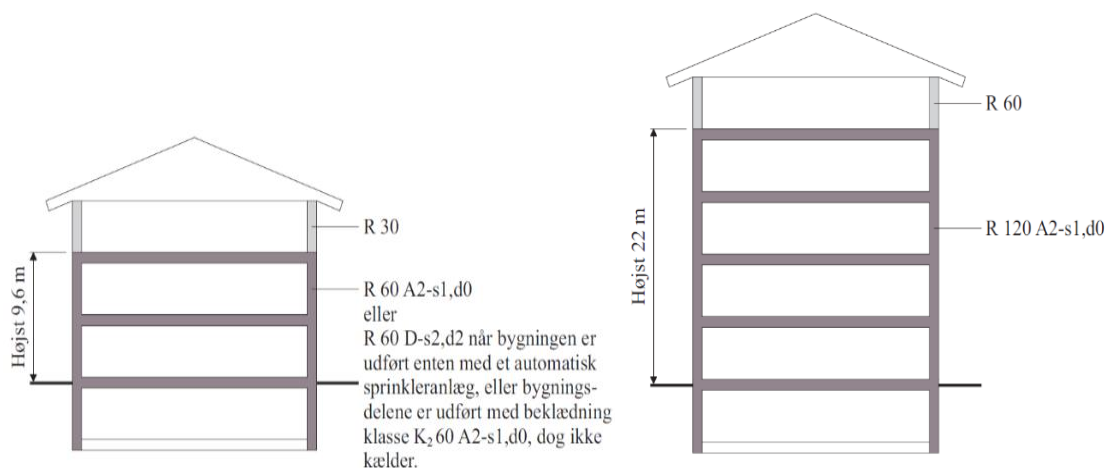
Tabel 1 - Realiserede træbyggerier i nabolande

Land	Location	Færdigt	Etager	Højde [m]	Lejligheder
Sverige	Limnologen, Växjö	2009	8	25	134
Tyskland	Bad Aibling	2011	8	25	-
Finland	Kuokkala	2015	8	26	150
England	Murray Grove, London	2008	9	29	29
Norge	Bergen	2015	14	51	62

De danske byggebestemmelser, i form af det funktionsbaserede bygningsreglement af 2010 (BR10), sætter som sådan ingen afgrænsning for brugen af bærende trækonstruktioner. Med den rette brandtekniske dokumentation er det muligt at bygge så højt, som dokumentationen kan overbevise myndighederne om er sikkert. At fremskaffe denne dokumentation kan imidlertid være omfattende, og derfor økonomisk tung for et byggeprojekt, specielt hvor nye konstruktionsløsninger, som bærende trækonstruktioner, skal indføres. Blandt andet af denne årsag, er der udgivet en "Eksempelsamling om brandsikring af byggeri" af 2012 (EBB12) [4], som giver eksempler på projekteringsløsninger, der overholder BR10, sådan at den brandtekniske dokumentation kan bestå af præskriptive forhåndsgodkendte forhold. På baggrund af den økonomiske vinding og sikkerhed der opnås ved brugen af EBB12, bliver langt de fleste bygninger i Danmark bygget på baggrund af de brandtekniske eksempler heri, eller med disse som udgangspunkt, og det er heraf afgrænsningen af bærende trækonstruktioner fremkommer.

Afgrænsningen i EBB12 er den maksimale højde for anvendelse af bærende trækonstruktioner, hvilke kan anvendes op til hvor gulvet på øverste etage ikke overstiger 9,6 m., hvortil det yderligere foreskrives, at bygningen enten udføres med automatisk sprinkleranlæg eller, at bygningsdelene er udført med brandsikker beklædning. I kontrast til dette giver EBB12 mulighed for anvendelse af beton, hvor gulvet på øverste etage ikke overstiger 22 m., og her kræves ingen yderligere brandsikringstiltag.

På Figur 1 er højdemulighederne ved anvendelse af de to materialer skitseret, med de tekniske kategorier for træ (R60 D-s2, d2), til venstre og beton (R 120 A2-s1, d0), til højre.



Figur 1 - Eksempler på udførelse af bærende bygningsdele [4], brændbare materialer til venstre og ubrændbare til højre

Ovenstående afgrænsning beskriver eksplicit, at standard konstruktionsløsninger i træ ikke kan opnå samme tilstrækkelige sikkerhedsniveau som løsninger i beton, hvis der projekteres op til 22 meter. Hvilket giver favorable muligheder for de ubrændbare konstruktionsmaterialer, som beton, frem for brændbare, som træ. Afgrænsningen handler i bund og grund om, at træ statistisk set har givet flere og større brandulykker. Statistikkerne er imidlertid ændret i takt med udviklingen af brandtekniske tiltag, som beklædning og sprinkling [5]. Derfor giver det formentlig ikke mening at opdele primære konstruktionsmaterialer som træ og beton på samme vis som tidligere. Brandfarer vil i dag, ved indføring af brandsikringstiltag, i stor stil kunne sidestilles i traditionelle højhusbyggerier, hvorfor det vil være interessant at undersøge udvidelsesmuligheder af EBB12, for derigennem at fremme brugen af trækonstruktioner i Danmark.

Når højere byggerier tages i betragtning, kan EBB12 ikke længere anvendes til projekteringen. I disse tilfælde er den brandtekniske dokumentation, beskrevet af BR10 kapitel 1.3.3 stk. 3 [6], nødvendig at fremskaffe ved brandteknisk dimensionering. De fire største byer i landet er dog kommet med nogle umiddelbare principper for brandsikringskrav i bygninger op til 100 m., hvilke giver brand- og byggemyndigheder et ståsted for byggesagsbehandling af høje bygninger [7].

Det er forventeligt at farende ved brand i disse højere bygninger, vil være større end i bygninger med 22 meter til gulv i øverste etage, hvorfor et studie heraf ville kunne være relevant at afgrænse. Det forholder sig imidlertid sådan at Danmark har enkelte højere boligbygninger, hvor det højeste er "Domus Vista", som har 30 etager og er 102 meter højt, samt at træ har statiske muligheder op til i hvert fald 30 etager [8]. Det er derfor fundet at det er interessant at kende til anvendelsesmulighederne helt op til disse højder.

1.1 Afgrænsning

På baggrund af indledningen ønskes det at finde brandsikre muligheder for brug af bærende trækonstruktioner i Danmark.

Undersøgelserne afgrænses til at nærstudere de muligheder der findes for boligbygninger i anvendelseskategori 4 [6], da hoveddelen af de nuværende højhuse med bærende konstruktioner i træ findes i denne kategori. Da indledningen peger på at en udvidelse af EBB12 vil være fordelagtigt for dansk byggeprojekter, afgrænses dette yderligere til kun traditionelt udførte boligbygninger.

Med baggrund i den nuværende danske boligmasse og de bærende muligheder for trækonstruktioner, udledes at kun bygninger op til 100 meter, vil have interesse at studere.

Projektet indeholder ikke overvejelser om valg af byggesystem, som massivtræspaneler eller et bjælke- og søjlesystem, men tager blot udgangspunkt i valget af træ. Grundlæggende vil projektets højdeafgrænsning dog afskrive lettere træskeletsystemer, da de ikke anses for mulige at opføre højere end ca. 6 etager [18].

Overordnet indbefatter projektet ikke:

- Andre materialer end træ
- Komplekse bygningsstrukturer
- Andre anvendelsesklasser end klasse 4
- Bygninger med mere end 100 meter fra terræn til øverste gulv
- Økonomiske aspekter, blandt andet ved til og fravalg af brandsikringstiltag

1.2 Problemformulering

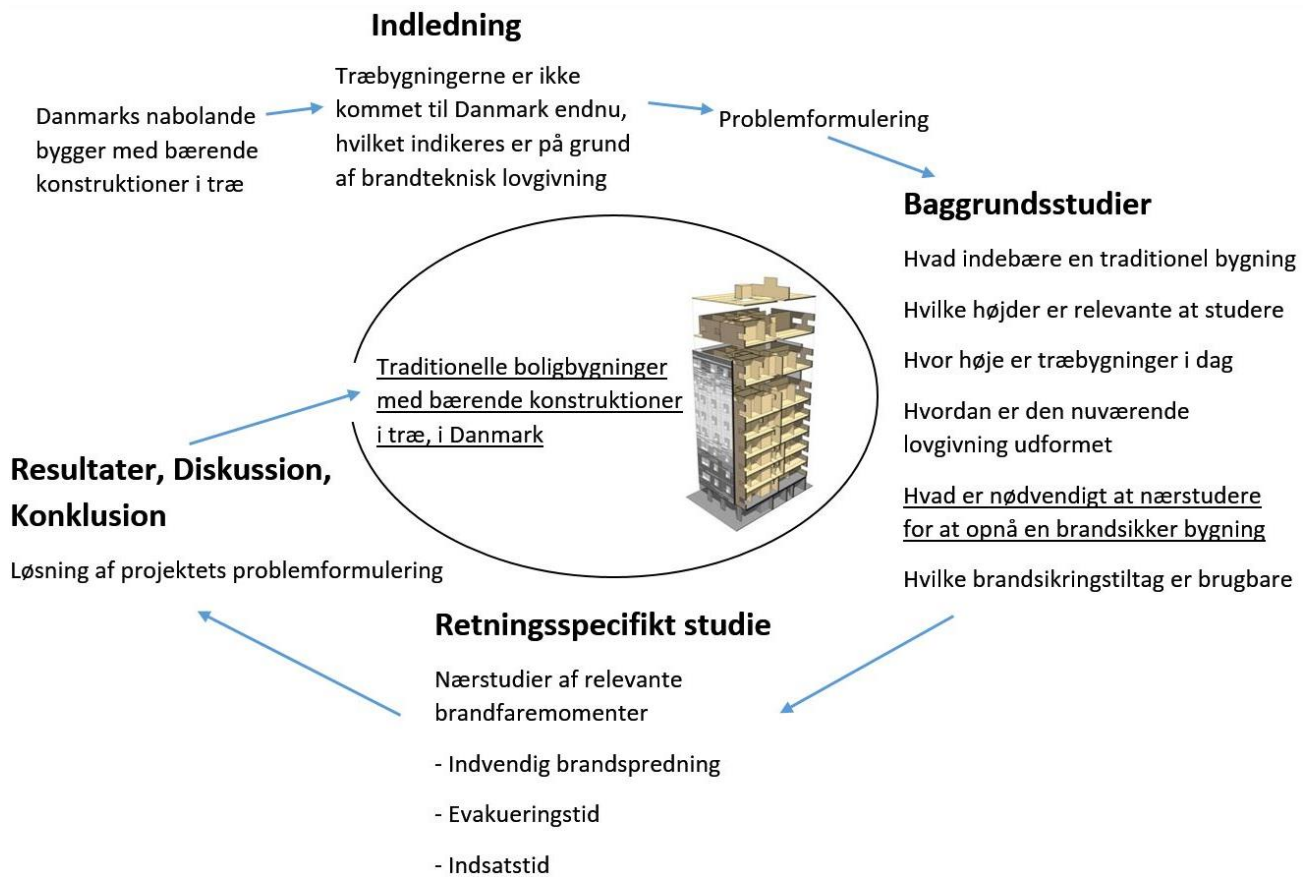
Som følge af indledningen og afgrænsningen arbejder dette projekt mod at give bedre muligheder for at anvende bærende konstruktioner i træ, ved at svare på følgende:

Hvilke projekteringsmuligheder giver funktionsbaseret design, for brandsikring af traditionelle boligbygninger opbygget af bærende konstruktioner i træ, og kan brandsikringstiltag muliggøre en udvidelse af *eksemplarsamling om brandsikring af byggeri* med tanke på den tilladte højde af bygninger med bærende konstruktioner i træ?

1.3 Læsevejledning

Projektet er opdelt i tre grunddele. Første del, kapitel 2, er baggrundsstudier der danner grobund for det videre projekt, samt analyse af de elementer der er essentielle at nærstudere, for at kunne give løsningsforslag til problemet. Anden del, kapitel 3, er de nævnte nærstudier, der frembringer den essentielle viden der vil kunne lede til projektets overordnede løsningsforslag. Tredje del, kapitel 4, 5 og 6, består af resultater og diskussion, samt konklusion på opgavens fremlagte løsninger.

Projektets overordnede sammenhæng gives også af Figur 2.



Figur 2 - Projektets overordnede struktur

2 Baggrundsstudier

Dette kapitel indeholder baggrundsstudier der danner fundament for projektets vurderinger og resultater.

Det grundlæggende indhold består af hvad en traditionelt opført bygning indebærer, en redegørelse for hvilke højder dette projekt vil arbejde med, realiserede og urealiserede højhuse med bærende konstruktioner i træ, samt nuværende dansk lovgivning.

Foruden det grundlæggende indhold, udføres et studie af hvilke faremomenter der ændres ved at anvende træ som bærende konstruktionsmateriale, frem for ubrændbare materialer. Studiet skal anvendes til at indsnævre feltet af brandfaremomenter der er nødvendige at nærstudere, for videre at kunne vurdere, hvordan det er muligt at anvende bærende trækonstruktioner herhjemme.

Sidst i afsnittet studeres aktive og passive brandsikringstiltag. Tiltag der kan være med til at forbedre præstationen af trækonstruktionerne, mod at opnå nogle sikre konstruktionsløsninger.

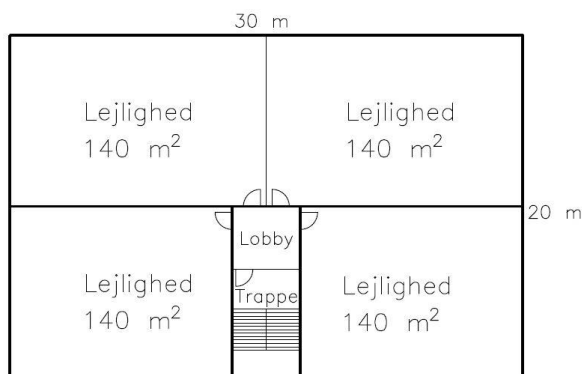
2.1.1 Traditionelt udførte bygninger

Bygninger der falder under traditionelt udførte, er bygninger der er opført af velkendte materialer, konstruktionsløsninger og samlingsdetaljer. Mere komplekse bygninger, som bygninger med overdækkede gårde, meget høje bygninger, hvor der er mere end 22 meter til gulv i øverste etage, eller bygninger med store åbne rum [4], falder ikke i denne kategori.

Projekt behandler, som udgangspunkt, kun traditionelt opførte boligbygninger, selvom flere resultater herfra vil kunne anvendes i selv mere komplekse bygninger. Det er valgt at have fokus på traditionelle bygninger, fordi mere komplekse bygninger vil kunne give alt for store udslag på faremomenter i højhuse, såsom anderledes brandpåvirkning i dobbelthøje rum, eller større risiko for udvendig brandspredning med skrånende facader.

Som udgangspunkt er bygninger med mere end 22 meter til øverste gulv ikke indbefattet af begrebet traditionelle bygninger. I dette projekt anvendes begrebet dog også over denne grænse.

Flere forhold i EBB12, som brandsektioner, indeholder forbehold for etageareal og geometri. Derfor er der indført en simpel grundplan på 600 m², som eksempel for dette projekts løsningsmuligheder, se Figur 3. Grundplanet tjener også som baggrund for overvejelser om evakuering og indsatsparametre.



Figur 3 - Forsimplet etageplan, med inspiration fra [34]

2.1.2 Høje bygninger

I Danmark findes ingen definition på, hvad en høj bygning er. I dette projekt er det således valgt at opdele højere bygninger i to dele, nemlig mellemhøje og høje bygninger.

Mellemhøje bygninger er bygninger, hvor gulvet i øverste etage ligger mellem 9,6 og 22 meter over terræn. Den nedre grænse er defineret ud fra hvor højt det er muligt at projektere bærende trækonstruktioner, som følge af EBB12, i dag. Den øvre grænse er defineret ud fra de generelle projekteringsmuligheder i EBB12.

Bygninger højere end 22 meter kaldes i dette projekt for høje bygninger. Disse bygninger hører normalvis, ikke under begrebet traditionelle bygninger, og kan således ikke projekteres ved brug af EBB12. Grænsen på 22 meter fremkommer meget naturligt af redningsberedskabets indsatsmuligheder. Indsatsmuligheden begrænses specifikt af stigevoznens rækkevidde, da denne skal kunne fungere som alternativ flugt- og indsatsvej, og er begrænset til denne højde. Således fremgår det af BR10, kap. 5.2 stk. 8, at der ved disse bygningshøjder skal tages særligt hensyn:

”I en bygning, hvor gulv i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, eller hvor alle redningsåbningerne ikke kan nås af redningsberedskabets stiger, jf. kap. 5.6.1, stk. 2, skal der ved indretning af bygningen tages særligt hensyn til muligheden for evakuering fra bygningen, redningsberedskabets indsatstid og adgang til etagerne”. [6]

I dette projekt studeres bygninger op til 100 meter, hvilket er omkring 34 etager. Denne højde er til dags dato kun nået ved ét enkelt boligkompleks i Danmark, nemlig ”Domus Vista”, på 102 m., 30 etager. Der er imidlertid gjort forstudier for, at sådanne højder er mulige at nå med bærende trækonstruktioner [8], hvorfor de ikke er udeladt.

Der findes, som beskrevet, ingen præskriptive krav på området for bygninger mellem 22 og 100 m., kun de generelle bestemmelser i BR10. Danmarks fire store byer Aalborg, Odense, Aarhus og Københavns brand- og byggemyndigheder har imidlertid udgivet en ”Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri” [7]. Vejledningen indeholder nogle umiddelbare principper for brandsikringskrav i bygninger op til 100 m., hvilket giver brand- og byggemyndigheder et ståsted for byggesagsbehandling af høje bygninger. Principperne er opdelt i de højdekategorier der fremgår herunder, hvortil der beskrives forskellige krav:

- Bygninger med gulv til øverste etage over 22m men under 30/40m fra terræn
- Bygninger med gulv til øverste etage over 30/40m men under 60m fra terræn
- Bygninger med gulv til øverste etage over 60m men under 100m fra terræn

Højdekategorierne er videreført som dette projekts vurderingshøjder, hvor principperne i kategorien 30/40-60 meter, på den sikre side, altid føres ned til 30 meter.

Inden for EBB12's grænser, er det valgt at studere de maksimale forhold ved 22 meter, samt en højde mellem de tilladelige 9,6 meter og de 22 meter, på 15 meter.

Et overblik over de højder der bliver vurderet i dette projekt, for mulighederne for at anvende trækonstruktioner, er givet i Tabel 2. Det omtrentlige antal etager er givet ud fra at der går 3 meter på en etage, og at dette er til gulv i øverste etage, fra terræn.

Tabel 2 - Overblik over projekts vurderede højder

Højdekategori	Vurderingshøjde [m]	Omtrentligt antal etager
Mellemhøj	15	6
Mellemhøj	22	8
Høj	30	11
Høj	60	21
Høj	100	34

2.1.3 Højhusprojekter i træ

For at indsamle relevante sammenligningsmuligheder, samt få forståelse for træhøjhustendenserne der findes i dag, beskrives i dette afsnit allerede opførte træhøjhuse [10-12] og træhøjhuse på tegnebrættet [13-15].

Herunder følger to visuelle tabeller, Tabel 3 og Tabel 4, der med illustration, antal etager og bygningshøjde, fremviser nogle af de byggerier dette projekt kan være med til at skabe grobund for i Danmark.

Tabel 3 - Nogle af verdens højeste opførte træbygninger

Allerede opførte bygninger		
Kuokkala, Finland 8 etager, 26 meter	Melbourne, Australien 10 etager, 32 meter	Bergen, Norge (<i>Treet</i>) 14 etager, 51 meter
		

Tabel 4 - Verdens højeste træbygninger der ligger på tegnebrættet

Bygninger på tegnebrættet		
Vancouver, Canada 18 etager, 53 meter	Wien, Østrig 24 etager, 84 meter	Stockholm, Sverige 34 etager, ukendt højde
		

Tabel 5 indeholder de samme bygninger, men med yderligere information omkring, hvornår bygningerne står færdige, samt antal lejligheder. Informationerne i Tabel 5 er med til at give en forståelse for højdeudviklingen, samt størrelserne af bygningerne i form af antal lejligheder.

Tabel 5 - Udvidet informationstabel over nævnte træbygninger (stigende bygningshøjde)

Land	Location	Færdigt	Etager	Højde	Lejligheder
Finland	Jyväskylä	2015	8	26	150
Australien	Melbourne	2012	10	32	23
Norge	Bergen	2015	14	51	62
Canada	Vancouver	Forventet 2017	18	53	305
Østrig	Wien	Forventet 2017	24	84	-
Sverige	Stockholm	Forventet 2023	34	-	-

Generelt leder undersøgelsen af nuværende og kommende træbygninger mod det fælles mål, der findes i dag om at bygge højere træbygninger. Målet realiseres imidlertid kun langsomt, da kendskabet til og accepten af højhuse i træ ikke er fuldt udviklet endnu [8]. Bygningshøjderne skaber imidlertid en tendens mod støt udvikling på området, én etage ad gangen.

Samlet for bygningerne fremvist herover gælder, at de alle er boligbyggerier udformet i forholdsvist traditionelle geometrier, med den eneste virkelige udstikker værende det skrånende tag på C. F. Møller bygningen, i Stockholm. Udformningerne falder godt i spænd med dette projekts fokus på netop traditionelt udførte boligbygninger i træ.

2.1.4 Byggetekniske bestemmelser og præskriptive krav

Som det er nævnt i indledningen, er de danske brandtekniske bestemmelser med til at sætte begrænsning for udviklingen af højhusbygninger med bærende konstruktioner i træ, grundet økonomiske forhold for opfyldning heraf. Lovgivningen for bygninger, hvilken blandt andet indeholder brandtekniske bestemmelser, beskrives af bygningsreglementet fra 2010 (BR10). BR10 består af funktionsbaserede bestemmelser, hvilke ikke indeholder specielle forhold imod trækonstruktioner. Det er imidlertid forholdsvis omfattende at dokumentere, at en bygning overholder de funktionsbaserede bestemmelser, hvorfor der i sammenhæng med udgivelsen heraf er udgivet en "Eksempelsamling om brandsikring af byggeri" (EBB12) [4]. Denne eksempelsamling indeholder en række eksempler på, hvordan bestemmelserne i BR10 f.eks. kan opfyldes, og det er som følge af denne, at hovedtrækkene i de fleste danske bygninger bliver brandteknisk projekteret. Det er også, som følge af EBB12, at trækonstruktioner bliver afgrænset i mulighederne for at bygge højhuse.

Herunder er det forsøgt at udpensle de mest relevante områder af de nuværende bestemmelser, de eksempler der sætter grænser for brugen af træ i EBB12, foruden en oversigt over nogle af vores nabolandes bestemmelser på området. Introduktionen skal være med til at danne baggrund for projektets øvrige kapitler, i form af at introducere nuværende bestemmelser, hvilke projekteringen tager udgangspunkt i. De udenlandske bestemmelser skal give et indtryk af andre landes projekteringsmuligheder, hvilke dette projekts forslag til udvidelser, kan læne sig imod.

Igennem projektet udnyttes det europæiske klassifikationssystem, dette er beskrevet i appendiks A1.

Bygningsreglement 2010

Den danske lovgivning for opførelse, indretning og vedligeholdelse af bygninger beskrives under dette projekts proces igennem bestemmelserne i BR10. Fra januar 2016 justeres bestemmelserne og den brandtekniske projektering skal herefter tage udgangspunkt i bestemmelserne fra bygningsreglement 2015. Der sker imidlertid ikke nogle umiddelbare ændringer på det brandtekniske område, andet end tekniske præciseringer og ændringer af korrekturmæssig karakter [16]. I dette projekt arbejdes der derfor ud fra BR10 bestemmelser.

BR10 bestemmelserne er alle funktionsbaserede krav, hvilke den projekterende skal bevise over for myndighederne er overholdt. Mængden af brandteknisk dokumentation, der skal leveres til myndighederne afhænger af byggeprojektet. Kap. 1.3.3 stk. 3 beskriver således, hvilken dokumentation kommunalbestyrelsen kan forlange, hvis det skønnes nødvendigt. Da højhuse i træ endnu ikke er udbredt, samt at højhuse generelt vil udsætte flere personer for fare om der skulle opstå brand, forventes det, at der for højhuse i træ altid vil kræves denne dokumentation.

Kap. 1.3.3

Stk. 3.

Hvis det skønnes nødvendigt i det enkelte tilfælde, kan kommunalbestyrelsen forlange:

- 1) Brandteknisk dokumentation for bygningens udformning og grundlaget for de valgte brandsikkerheds-tiltag.
- 2) Dokumentation for, hvordan kontrol og vedligeholdelse af de brandtekniske installationer og bygningsdele vil blive gennemført.
- 3) Kommunalbestyrelsen kan indhente en sagkyndig erklæring vedrørende den brandtekniske dokumentation, jf. nr. 1 og 2. Udgifterne hertil afholdes af ansøgeren.
- 4) Dokumentation for, at bygningskonstruktionerne opfylder bestemmelserne i kap. 4, Konstruktioner. Dokumentationen skal være i overensstemmelse med bilag 4 (Dokumentation af bærende konstruktioner).
- 5) Attestering af en landinspektør, i Københavns og Frederiksberg Kommune af Geodatastyrelsen, af oplysninger om grundens størrelse eller afsætningen af byggeriet.

Foruden omfanget af den brandtekniske dokumentation er der i BR10, kapitel 5, udformet en række funktionsbaserede krav. Heraf er de mest relevante, for dette projekts mål om at fastsætte muligheden for brug af træ i bærende højhuskonstruktioner, listet herunder.

Kap. 5.1

Stk. 1

Bygninger skal opføres og indrettes, så der opnås tilfredsstillende tryghed mod brand og mod brandspredning til andre bygninger på egen og på omliggende grunde. Der skal være forsvarlig mulighed for redning af personer og for slukningsarbejdet.

Stk. 2.

Brandsikkerheden i en bygning skal opretholdes i hele bygningens levetid.

Kap. 5.3

Stk. 1.

Byggevarer og bygningsdele skal udføres, så personer i eller ved bygningen kan bringe sig i sikkerhed på terræn i det fri eller et sikkert sted i bygningen, og så redningsberedskabet har mulighed for redning af personer og sikre acceptable forhold for dyr samt for slukningsarbejde.

Kap. 5.5

Stk. 1.

Bygninger skal opføres og indrettes, så en brand kan begrænses til den brandmæssige enhed, hvor branden er opstået. Spredning af brand og røg til andre brandmæssige enheder skal forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats.

Kap. 5.5.1

Stk. 1.

Indvendige overflader skal udføres på en sådan måde, at de ikke bidrager væsentligt til brand- og røgudviklingen i den tid, som personer, der opholder sig i rummet, skal bruge til at bringe sig i sikkerhed.

BR10 forholder sig overordnet til funktion og ikke geometriske emner som højde. Derfor findes også kun tre stykker der udelukkende behandler bygninger over 22 meter, hvilke er listet herunder.

Kap. 5.2

Stk. 8.

I en bygning, hvor gulv i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, eller hvor alle redningsåbningerne ikke kan nås af redningsberedskabets stiger, jf. kap. 5.6.1, stk. 2, skal der ved indretning af bygningen tages særligt hensyn til muligheden for evakuering fra bygningen, redningsberedskabets indsatstid og adgang til etagerne.

Kap. 5.3

Stk. 4.

I en bygning, hvor gulvet i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, skal der ved dimensioneringen af de bærende konstruktioner tages særligt hensyn til tiden til evakuering af bygningen, redningsberedskabets indsatstid, adgang til etagerne, brandbelastningen og lignende.

Kap. 5.4

Stk. 13.

I en bygning, hvor gulvet i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, skal der ved valg af brandtekniske installationer tages særligt hensyn til muligheden for evakuering fra bygningen, redningsberedskabets indsatstid, adgang til etagerne, brandbelastningen og bygningens konstruktive forhold.

Samlet set giver BR10 kapitel 5, anledning til at bygninger bliver projekteret ud fra at sikkerheden for de der evakuerer skal være tilstrækkelig og at det er forsvarligt for redningsberedskabet at udfører rednings- og slukningsarbejde.

Eksempelsamling om brandsikring af byggeri 2012

Eksempelsamlingen om brandsikring af byggeri (EBB12) [4], består af præsriptive brandtekniske eksempler på, hvordan de funktionsbaserede bestemmelser i BR10 vil kunne overholdes. Det er et omfattende kompendium, der indeholder eksempler på brandsikre projekteringsløsninger af alt fra konstruktioner til redningsberedskabets indsatsmuligheder, for traditionelt byggeri. Strategien der ligger til baggrund for eksemplerne er baseret på, at alle personer i bygningen skal kunne redde sig ud til terræn i det fri, enten ved egen hjælp eller ved hjælp af redningsberedskabet, inden personerne trues af branden [4].

I dette projekt er det valgt at medtage en introduktion til de mest essentielle eksempler i samlingen, for de i projektet søgte løsninger.

Bærende bygningsdele

Herunder, Tabel 6, er gengivet et udpluk af oplysningerne fra Tabel 3.1 i EBB12, hvilken fastsætter de bærende bygningsdeles præsriptive projekteringsmuligheder. Udplukket er taget af de, for anvendelseskategori 4, relevante oplysninger.

Tabel 6 – Bærende konstruktioners brandmodstandsbæreevne. Gengivelse af oplysninger fra EBB12, Tabel 3.1

Bygningsdele i bygningers øverste etage
Bygningsdel klasse R 30
Ved højde til gulv i øverste etage mellem 12-22 m over terræn, dog bygningsdel klasse R 60*
Etageadskillelse over kælder samt de bygningsdele, der bærer denne etageadskillelse
Bygningsdel klasse R 60 A2-s1, d0
Ved højde til gulv i øverste etage mellem 12-22 m over terræn, dog bygningsdel klasse R 120 A2-s1, d0*
Bygninger i flere etager, hvor højde til gulv i øverste etage er mellem 5,1 m og 9,6 m over terræn (bortset fra bygningsdele i bygningens øverste etage og etageadskillelse over kælder samt de bygningsdele der bærer denne etageadskillelse)
Bygningsdel klasse R 60 A2-s1, d0
Eller Bygningsdel klasse R 60 D-s2, d2 , når bygningen er udført enten med automatisk sprinkleranlæg, eller bygningsdelene er udført med beklædning klasse K2 60 A2-s1, d0
Bygninger i flere etager, hvor højde til gulv i øverste etage er mellem 9,6 m og 12 m over terræn (bortset fra bygningsdele i bygningens øverste etage og etageadskillelse over kælder samt de bygningsdele der bærer denne etageadskillelse)
Bygningsdel klasse R 60 A2-s1, d0
Bygninger i flere etager, hvor højde til gulv i øverste etage er mellem 12 m og 22 m over terræn (bortset fra bygningsdele i bygningens øverste etage og etageadskillelse over kælder samt de bygningsdele der bærer denne etageadskillelse)
Bygningsdel klasse R 120 A2-s1, d0*

*) De bærende konstruktioner i en bygning anses at have en tilstrækkelig brandmodstandsevne, hvis det dokumenteres, at bygningen bevarer sin stabilitet ved standardbrandpåvirkning i 120 minutter. Det betyder bl.a., at nøgleelementer og deres fastholdelser i knudepunktsfiguren har en brandmodstandsevne på mindst 120 minutter. Der kan være bygningsdele, der har en brandmodstandsevne på mindre end 120 minutter, hvis det dokumenteres f.eks. ved brug af Eurocodes mv., at bygningen bevarer sin stabilitet uanset, at der måtte ske kollaps og evt. nedfald af delelementer af konstruktionen.

Adskillende bygningsdele

EBB12 kræver en traditionel bygning opdelt i brandceller, eksempelvis lejligheder og gang, med bygningsdele i klasse EI 60.

Yderligere kræves bygningen opdelt i brandsektioner, som etageadskillelser. I anvendelseskategori 4 er kravet en opdeling med bygningsdele i klasse EI 60 A2-s1, d0.

Beklædning

Ifølge BR10 kap. 5.1.1 stk. 1, skal "indvendige overflader udføres på en sådan måde, at de ikke bidrager væsentligt til brand- og røgudviklingen i den tid, som personer, der opholder sig i rummet, skal bruge til at bringe sig i sikkerhed" [6].

For at opnå dette gives der som eksempel i EBB12, for bygninger hvor gulv i øverste etage er højst 22 m. over terræn, at vægge og loft skal beklædes med materialer klassificeret som følge af Tabel 7.

Tabel 7 - Eksempler på beklædningsklasser i bygninger med under 22 m. til øverste etage

Eksempler på udførelse af beklædningsklasser			
Beklædningssted	Vægbeklædning	Loftbeklædning	Gulvbeklædning
Alle rum	K ₁ 10 D-s2, d2	K ₁ 10 B-s1, d0	Intet krav
Flugtveje	K ₁ 10 B-s1, d0	K ₁ 10 B-s1, d0	D _{fl} – s1

Andre lande

De realiserede højhusprojekter viser, at muligheden for at anvende bærende trækonstruktioner allerede benyttes i vores nabolande. Derfor er det interessant at kende til, om deres bestemmelser for brug heraf afviger fra vores egen. For at vurdere de europæiske muligheder har E. Mikkola og M. Giraldo sammensat en tabel, der viser landenes muligheder når det kommer til anvendelsen af træ [17]. Et uddrag af denne er vist i Tabel 8, hvor kun de mest relevante nabolande er fremvist.

For dette projekt er de to vigtigste ting at bemærke at:

- Finland og Østrig tillader betydeligt højere bygninger med bærende trækonstruktioner igennem præskriptive krav, end Danmark.
- Sverige, Norge og Østrigs højhusbygninger med bærende trækonstruktioner, er højere end deres præskriptive krav tillader, hvorfor disse må være projekteret fra funktionsbaserede bestemmelser.

Tabel 8 - Udenlandske forhold for projektering med klasse D materiale, blandt andet træ [17]

Land	Tilladt antal etager for klasse D materiale					D/D _{FI} klasse produkter tilladt i bygninger med mindst 3 etager					
	Bærende konstruktioner			Udvendig beklædning		Indendørs væg/loft				Gulvbelægning	
	Præskriptive krav (Præ)	Præ. Beskyttelses krav	Funktionsbaserede krav (FB)	Uden sprinkling	Med sprinkling	Sprinkling i flugtvej		Sprinkling i lejligheder		Flugtveje	I lejligheder
						Nej	Ja	Nej	Ja		
Danmark	3-4		a	3-4	3-4	+	+	+	+	+	+
Finland	2/8 ^b	K ₂ 10/ K ₂ 30	a	2/4	8	-	-	+	+	+	+
Norge	4	EI30/EI60 , K210	a	4	4	-	-	+	+	+	+
Sverige	Se FB	Nej	a	2	≥ 5	-	-	-	+	+	+
Østrig	6	Nej	a	6	6	-	-	+	+	-	+

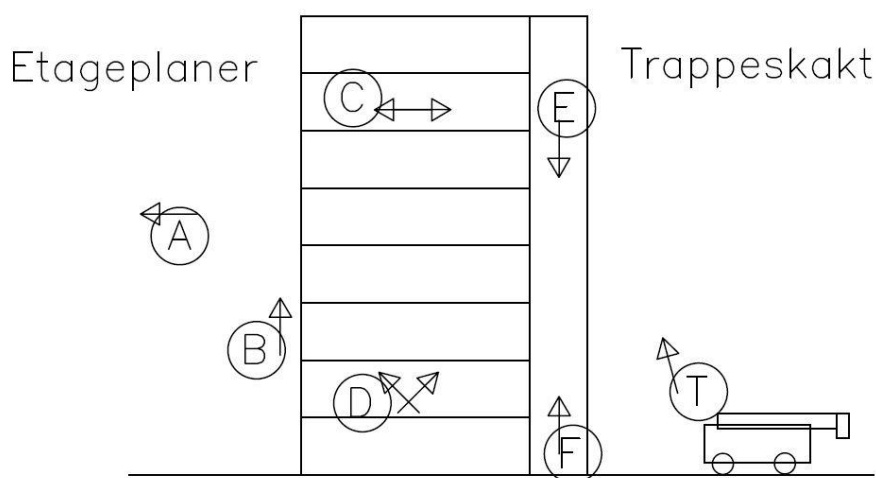
a) Ingen begrænsning

b) Med sprinkling

2.2 Farlige elementer i højhuse

Da dette projekt udelukkende omhandler traditionelt udførte boligbygningers mulighed for anvendelse af bærende trækonstruktioner, forventes det ikke, at alle brandfaremomenter vil have indflydelse på, hvorvidt bygningen er opført med det ene eller det andet bærende materiale. Derfor belyses, i dette afsnit, hvilke faremomenter det vil være nødvendigt at undersøge nærmere, for at kunne udvikle sikkerhedsmæssigt fornuftige løsninger for anvendelse af træ, i mellemhøje og høje bygninger.

På Figur 4 er med bogstavnummerering afbildet de kendte brandfaremomenter, der findes for højhusbyggeri. Efter figuren følger en individuel vurdering, for om disse brandfaremomenter har indvirkning på valget af træ, som bærende konstruktionsmateriale, eller ej.



Figur 4 - Brandfaremomenter for højhuse i træ (bogstavnummereret).

- A. Brandsmitte til anden bygning
- B. Udvendig brandspredning
- C. Menneskelige forhold
- D. Indvendig brandspredning
- E. Evakueringstid
- F. Indsatstid
- T. Redningsberedskabs materiel.

A. Brandsmitte til anden bygning

Ved brand i facade eller rum med store facadeåbninger, er der risiko for brandspredning til nærtstående bebyggelse, grundet høj varmepåvirkning.

En traditionelt opført bygning, der eksempelvis overholder BR10 ved at anvende de præskriptive krav i EBB12, vil imidlertid ikke ændre sine forhold for brandsmitte til øvrig bygningsmasse ved at benytte træ, frem for et mindre brandbart bærende konstruktionsmateriale. Det antages, at BR10 bestemmelserne også vil være overholdt med de præskriptive EBB12 krav for høje bygninger, og at boligerne, der studeres i dette projekts brandsmitte, derfor kan negligeres, når der vurderes mulige anvendelser af træ.

B. Udvendig brandspredning

Udvendig brandspredning betragtes i dette projekt som brandspredning igennem facadeåbninger til andre brandmæssige enheder eller til facade, samt igennem tagkonstruktionen til tilstødende brandmæssige enheder.

Risikoen for udvendig brandspredning, fra et brændende lokale i bygningen, afhænger blandt andet af den brandbelastning, der findes i lokalet samt det facademateriale der findes på bygningen. Bestemmelserne i BR10, der omhandler disse forhold, anses generelt som overholdt ved at følge en række krav fra EBB12. Kravene i EBB12 indeholder blandt andet afstande til skæl for at undgå brandsmitte til andre bygninger, samt forbehold for valg af facadebeklædning, se Tabel 9, og tagbeklædning.

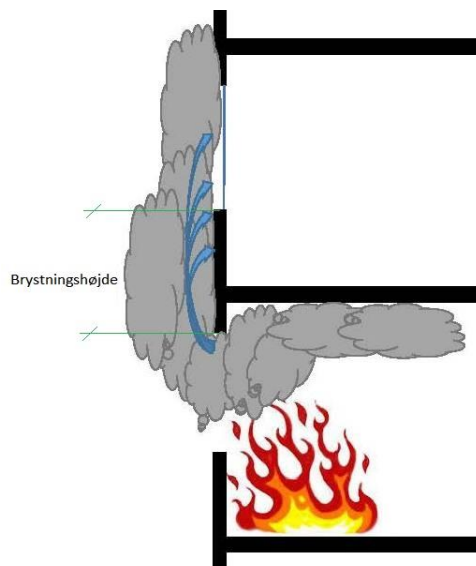
Tabel 9 - Eksempler på udførelse af udvendige vægoverflade. (Udsnit af tabel 5.3 i EBB12)

EKSEMPLER PÅ UDFØRELSE AF UDVENDIGE VÆGOVERFLADE
Højde til gulv i øverste etage højst 22 m over terræn Beklædning klasse K ₁ 10 B-s1, d0
Mindre partier med et samlet areal på omkring 20 % af ydervæggens areal kan udføres som beklædning klasse K ₁ 10 D-s2, d2 eller som ydervæg med udvendig overflade klasse D-s2, d2. Partierne placeres, så risikoen for brandspredning fra en brandmæssig enhed til en anden enhed minimeres
Højde til gulv i øverste etage mere end 22 m over terræn Beklædning klasse K ₁ 10 B-s1, d0

Foruden facadebeklædning anses det som værende forsvarligt at have en brystningshøjde på 1,2 meter, se Figur 5, for at undgå brandspredning [8].

Ovenfor nævnte udformnings- og materialekrav vil, ved skift fra den ene type bærende konstruktion til den anden, ikke ændre sig eller påvirke brandfaren. Brandbelastningen vil dog have mulighed for at ændre sig ved tilførsel i træ. Det forholder sig dog sådan, at EBB12 i forvejen muliggør opbygning af brandcellevægge og skillevægge i træskeletsystemer, hvorfor en øget brandbelastning herfra vil være medtaget i overvejelserne for de præskriptive krav. Desuden forholder det sig sådan, at den generelle holdning til brandsikring af træbygninger ligger vægt på at håndtere den selvsamme brandbelastning med brandsikringstiltag [18].

Således antages det, at der ikke vil være udvidet risiko for udvendig brandspredning i de traditionelle bygninger der studeres i dette projekt, selv for høje bygninger.



Figur 5 - Udvendig brandspredning, brystningshøjde

C. Menneskelige forhold

Menneskers reaktion på brand og fare i det hele taget, kan være meget varierende. Derfor er det nødvendigt at indregne, hvordan beboerne reagerer i en brandsituation, når bygningen som følge af BR10 skal "udformes, så evakuering let og betryggende kan ske via flugtveje" [6].

De menneskelige faktorer vil imidlertid være identiske i to identiske bygninger, hvor ændringen udelukkende er valget af konstruktionsmateriale. Det antages således, at de menneskelige forhold ikke bør have indflydelse på valget af konstruktionsmaterialet.

D. Indvendig brandspredning

Indvendig brandspredning betragtes i dette studie som spredning af brand fra initialbrandrummet, til et andet rum i samme bygning. Branden vil ofte først spredes igennem åbninger, som døre, men vil senere i brandforløbet kunne bryde igennem barrierer i bygningen, såsom væg og loft.

I tilfælde hvor branden bryder igennem væg- og loftbeklædning vil konstruktionsmaterialerne blive blotlagt. Blotlægningen vil ikke påvirke branden synderligt ved ubrændbare materialer, som stål og beton. Disse vil blot ved høj nok varmebelastning drætte sammen og lade branden sprede sig til det næste lokale. Træ vil imidlertid ved blotlægning, kunne tilgå branden som brandstof, hvorfor anvendelsen af træ i dette tilfælde formegentlig vil være negativ.

Grundet ovenstående, er det valgt at lave en grundigere vurdering af, hvordan den indvendige brandspredning vil påvirkes ved anvendelsen af træ som bærende konstruktionsmateriale. Vurderingen skal belyse faren ved at anvende træ frem for et ubrændbart materiale, blandt andet ved at kigge på faren ved den ekstra tilgang til brandbart materiale, samt den indvirkning brandsikringstiltag kan have på brandforløbet. Resultaterne heraf skal være med til at forstå hvordan et brandforløb kan håndteres.

E. Evakueringstid

BR10 bestemmelserne tager udgangspunkt i personsikkerhed, blandt andet i form af at sikre beboernes evakuering. En sikker evakuering afhænger i stor grad af hvor hurtigt branden spreder sig og hvor mange røggasser der findes i flugtveje. Derfor er det nødvendigt at kende til evakueringstiden for at kunne udforme krav til brugen af trækonstruktioner i mellem høje og høje bygninger. Denne vil derfor, ligesom den indvendige brandspredning, blive gransket i det retningspecifikke studie.

F. Indsatstid

Ligesom beboerens personsikkerhed, ligger BR10 også vægt på redningsberedskabets sikkerhed. BR10 foreskriver således i kap. 5.6 stk. 1, at "bygninger skal placeres på grunden og udformes på en sådan måde, at redningsberedskabet har forsvarlig mulighed for redning af personer, dyr og for slukningsarbejdet.

Det er altså nødvendigt at udforme bygningen sådan, at redningsberedskabet ved indsats, forsvarligt kan udføre deres arbejde. Derfor er det nødvendigt at sikre, at de bærende konstruktioner og brandsikre enheder bibeholder deres formål indtil indsatsen er fuldendt.

Grundet ovenstående er det vurderet nødvendigt at kende til redningsberedskabets overordnede indsats tid, for at kunne udforme krav til brugen af bærende trækonstruktioner i mellem høje og høje bygninger.

T. Redningsberedskabs materiel

Redningsberedskabet anvender meget forskelligt materiel, når det drejer sig om brandbekæmpelse. Et af disse er drejestigen, der ses på Figur 6, hvilken spiller en vigtig rolle som sekundær flugtvej, indsatsvej og slukningsmulighed. Drejestigen har imidlertid en begrænset rækkevidde på minimum 22 meter, hvilket begrænser indsatsmulighederne, ligesom andre udfordringer for indsats i høje bygninger.



Figur 6 – En af Københavns drejestiger, rækkevidde op til 30 meter

Det vigtigste i denne vurdering er imidlertid, at alt dette materiale og eventuelle udfordringer, vil være nøjagtig identiske, uden hensyn til om højhuset er bygget med bærende trækonstruktioner, eller ej. Derfor vil redningsberedskabets materiel, ikke have indflydelse på materialevalget i de bærende konstruktioner, ud fra den vurdering at der opnås samme sikkerhed.

Samlet set er det som følge af ovenstående vurderinger, tre brandfemomenter der bør indgå i det videre studie af om træ vil være sikkerhedsmæssigt forsvarligt at anvende i mellemhøje og høje bygninger. Disse er "indvendig brandspredning", "evakueringstid" og "indsatstid". Brandfemomenterne studeres derfor yderligere i kapitlet retningspecifikt studie.

2.3 Aktive og passive påvirkningsmuligheder

Bærende konstruktioner står ikke alene i en brandsituation. Ofte er der udført passive brandsikringstiltag, og i langt de fleste tilfælde er der ydermere installeret aktive brandsikringstiltag, hvoraf det mest kendte tiltag er røgalarmen, der er installeret i næsten alle danske hjem.

Herunder er listet de mest gængse brandsikringstiltag. Under hver liste er de brandsikringstiltag der er mest anvendelige til at håndtere de relevante brandfaremomenter, fundet i forrige afsnit, trukket ud og beskrevet. De beskrevne tiltag vil indgå i det retningsspecifikke studie, blandt andet for at undersøge ændringen og fordelene ved anvendelse heraf.

Passive brandsikringstiltag

- Afstand til andre bygninger på samme grund eller til naboskæl
- Udvendige overflader på vægge og tag
- Inddeling i brandmæssige enheder samt brandadskillende bygningsdele
- Indvendige overflader med gode brandtekniske egenskaber
- Isolering af gennembrydninger i brandadskillende bygningsdele (for installationer m.m.)
- Skilte og markeringer

Et fokus på bygningsmæssig **inddeling i brandmæssige enheder, samt brandadskillende bygningsdele**, vil sørge for at fastholde branden omkring eller i initialbrandrummet, og sådan være med til at afgrænse skader. En inddeling vil også give redningsberedskabet langt bedre mulighed for at bekæmpe branden, og der vil være langt større chance for sikker flugtvej for de der evakuerer.

Indvendige overflader med gode brandtekniske egenskaber, er essentielt for at sikre personsikkerheden i bygningen, da overflader der udvikler røg og varme kan skade personer og udvikle branden.

Aktive brandsikringstiltag

- Automatisk brandalarmanlæg (ABA-anlæg)
- Automatisk sprinkleranlæg (AVS-anlæg)
- Røgalarmenlæg
- Varslingsanlæg
- Brandventilation
- Automatisk branddørlukningsanlæg (ABDL-anlæg)
- Flugtvejs- og panikbelysning

Automatisk brandalarmanlæg (ABA-anlæg) alarmerer redningsberedskabet direkte, når en sensor i bygningen påvirkes af brandlignende forhold, som røg og varme. Dette vil ofte nedsætte indsatstiden, da den personlige alarmering bliver sprunget over. Løsningen anvendes ofte i industri, undervisningsinstitutioner og plejecentre, men sjældnere i boliger, blandt andet grundet tilgang til inspektion. Installation af et ABA-anlæg vil kunne give hurtig responstid og derigennem bedre indsatsmuligheder.

Automatisk sprinkleranlæg (AVS-anlæg) er konstrueret til at detektere en brand og slukke den med vand i begyndelsesfasen eller, at kontrollere branden indtil den kan slukkes med andre brandbekæmpelsesmidler. AVS-anlægget består af små vanddyser, der enkeltvis udløses ved varmepåvirkning f.eks. ved 68 grader og er beregnet til, at sikre at der ikke opstår farlige situationer for de personer der opholder sig i bygningen, samt for at sikre bygningen bedst muligt [19].

3 Retnings specifikt studie

Dette kapitel indeholder nærstudier af de brandfæremomenter, der i kapitlet baggrundsstudier, er udledt vil have indvirkning på valget af bærende konstruktioner i træ i traditionelle bygninger.

Nedenfor fremgår den fremgangsmåde der er anvendt for at udlede de relevante resultater, efter fremgangsmåden følge de enkelte brandfæremomentstudier.

3.1 Fremgangsmåde

I dette afsnit beskrives hvad der ønskes undersøgt for de respektive brandfæremomenter, samt de metoder der er anvendt hertil.

Indvendig brandspredning

Projektet ønsker en forståelse for den indvendige brandspredning og hvordan denne påvirkes hvis bygningen udføres med bærende konstruktioner i træ. Ydermere vil det blive udledt, hvordan passive og aktive brandsikringstiltag kan benyttes til at håndtere en negativ indvirkning fra træet.

Undersøgelsen af dette sker ved brug af litteratur samt, forsknings- og forsøgsartikler, blandt andet fuldskala brandforsøg.

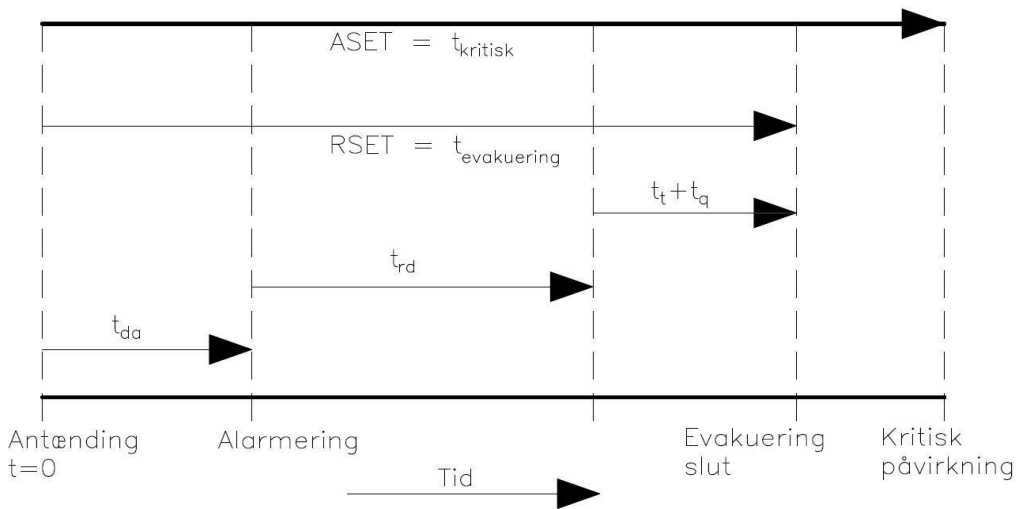
Evakueringstid

Det danske bygningsreglement ligger stor vægt på personsikkerhed, derfor skal et brandsikkert design blandt andet tage udgangspunkt i beboerens sikkerhed. Det forventes at sikkerheden vil kunne opretholdes, hvis alle beboere kan nå at flygte inden branden leder til uheldsmæssigt store færemomenter, som varme og røg.

Det er vurderet at et fornuftigt overslag, på evakueringstiden kan blive beregnet ved brug af den komparative metode RSET (**Required Safe Egress Time**), der ofte anvendes til funktionsbaseret dimensionering. RSET-værdien sættes i metoden op mod ASET-værdien (**Available Safe Egress Time**), for at kende til om beboerne når at flygte i tide [20].

Figur 7 viser hvordan de to dele af metoden forholder sig til hinanden over tid, samt de mellemtider der indgår i RSET. I Tabel 10 findes en beskrivelse af de enkelte mellemtider. RSET kan beregnes ud fra en sammenlægning af mellemtiderne, som følge af:

$$RSET = t_{evakuering} = t_{da} + t_{rd} + t_t + t_q$$



Figur 7 - Evakueringstids overblik ved $RSET < ASET$

Tabel 10 - Beskrivelse af mellemtider i RSET

Begreb	Beskrivelse
t_{da}	Tiden der anvendes på detektering og alarmering
t_{rd}	Tiden der anvendes på reaktion og beslutning for reaktion
t_t	Tiden der anvendes på gang til sikkerhed
t_q	Tiden der anvendes i kø på vej mod sikkerhed (flow)

ASET er den tid beboerne har til at flygte i, før der opstår et usikkert miljø. Det usikre miljø vurderes på baggrund af BR10 kap. 5.2 stk. 4, hvilket beskriver, at der ikke må forekomme temperaturer, røgkoncentrationer, varmestråling eller andre forhold, som hindrer evakueringen. ASET reguleres i stor stil af væg- og loftkonstruktioners udvikling af røggasser og varme der kan påvirke de der evakuerer. På baggrund af dette vurderes ASET værdien i dette projekt, som tæt forbundet med hvornår væg- og loftkonstruktioner påvirker branden.

Indsatstid

Personsikkerheden for redningsberedskabet er, ligesom for de evakuerende, vigtig at dokumentere for at kunne projektere et brandsikkert byggeri.

For at bestemme indsatstiden for det funktionsbaserede design, er det muligt at anvende en kvalitativ model kaldet "The Fire Brigade Intervention Model" [21]. Modellen lister en omfattende række punkter der påvirker indsatstiden, og udleder på baggrund af disse om designet af bygningen lever op til kravene. Hvis modellens punkter tyder på at der er risiko for personskade, sendes brugeren retur til design fasen for at ændre på bygningen. Efter rettelserne er sket anvendes modellen på ny, ind til den forødede sikkerhed opnås.

Grundet flere meget bygningsspecifikke dele er modellen i dette projekt kun anvendt til inspiration, og således ikke fulgt ned i detaljen. Hvis modellen var blevet brugt slavisk ville det ikke have været muligt at give et overordnet løsningsforslag, som er interessant for dette projekt.

3.2 Indvendig brandspredning

Træ vil, som bekræftet i baggrundsstudiet, kunne ændre brandbelastningen i en bygning, blandt andet ved at generere u hensigtsmæssigt meget varme og røg. Derfor er det anset nødvendigt at studere den indvendige brandspredning nærmere, for at kende til den påvirkning bærende konstruktioner i træ vil have på en brand, frem for mindre brændbare materialer.

Indvendig brandspredning betegnes i dette projekt, som spredning af brand fra et sted i den implicerede bygning til et andet. En udvidelse af brandomfanget kan forværre forhold for mennesker og ejendom, hvorfor en spredning absolut bør undgås. Risikoen for spredning afhænger i stor stil af inventar og indvendige overflader, men når dette er bortbrændt også bygningsdele, som træ eller beton [22].

Følgende studie skal give en grundlæggende forståelse for forløbet af en indvendig brandspredning, samt håndtering af faren. Derudover gives en indsigt i, hvordan den indvendige brandspredning vil ændre sig ved indførelse af træ som bærende konstruktionsmateriale, hvordan brandsikringstiltag kan være med til at håndtere implementeringen af trækonstruktionerne, samt hvordan større projekter forholder sig til og løser problemstillingen.

3.2.1 Forløb

Typisk for beboelse vil en brand opstå i et stykke inventar, hvorfra branden kan sprede sig på et utal af måder. På baggrund af kendskabet til BR10, er det specielt nødvendigt at branden ikke spredes til andre brandmæssige enheder, hvilket typisk vil ske ved stråling, røgspredning og overtænding [23].

Spredningsfarende

Spredning ved stråling sker typisk direkte fra branden eller fra de varme røggasser, der vil sprede sig langs loftet. Den direkte stråling kan ske igennem åbninger i konstruktionen som åbne døre eller igennem glaspartier. Røgspredning kan ske igennem små eller store åbninger i konstruktionen til andre rum i bygningen, hvor varmestrålingen kan antænde objekter med lav antændelsestemperatur.

Foruden faren for direkte brandspredning, kan røggasserne være farlige for personer, der opholder sig i dem. Personerne kan eksempelvis være sovende og på den måde ikke reagerer i tide på, at der trænger røggasser ind og forgifter dem.

Røggasserne kan også forårsage overtænding, hvilket er en pludselig antændelse af røggassens brændbare gasser. Gasserne skal for, at dette er muligt, befinde sig i en koncentration som ligger mellem nedre og øvre antændelsesgrænse. Antændelsesgrænsen opnås hurtigst i rum med brændsel, der afgiver store mængder røggasser eller i mindre rum, hvor mængden af atmosfærisk luft, der skal opblandes, ikke er stor. Når antændelsesgrænsen er opnået, kan gasserne antændes af selv en lille gnist, eksempelvis fra et elektrisk apparat [23]. Når overtændingen forløber stiger trykket i rummet pludseligt, hvilket i sammenhæng med brandpåvirkningen, kan medføre integritetssvigt i de omgivende bygningsdele. Overtændinger giver således ofte anledning til både indvendig røg- og brandspredning.

Foruden ovenstående kan branden spredes ved direkte kollaps af bygningsdele, som et nedfaldende loft, eller ved at adskillende bygningsdele ikke holder længe nok, hvorved branden vil kunne tilgå en tilstødende brandmæssig enhed.

Håndtering af spredningsfarende

Om der dannes for mange røggasser i et rum vurderes i Danmark som følge af BR10. Her er blandt andet beskrevet i kap. 5.2 stk. 4, at "i det tidsrum, hvor flugtvejene skal anvendes til evakuering, må der ikke forekomme temperaturer, røggaskoncentrationer, varmestråling eller andre forhold, som hindrer evakueringen" [6]. På den baggrund er det nødvendigt at undgå hurtig brandspredning, hvor de evakuerende færdes, altså med hovedvægt på flugtvejene.

For at opnå dette i bygninger med op til 22 meter til øverste gulv, kan EBB12 beklædningerne fra baggrundstudiet benyttes for at skærme mod hurtig udvikling af varme og røg. For bygninger i intervallet 22-100 meter skal projekteringen ske på baggrund af dimensionering, som følge af den stigende tidsramme for evakuering og indsats. Det vil her specielt være nødvendigt at have fokus på brand- og røgspredning i flugtveje således, at flugt og indsats opnår et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau.

I den 51 meter høje træbygning fra Bergen (*Treet*), se baggrundstudiet, er sikkerheden i flugtvejene opnået ved at anvende fornuftige beklædningsmaterialer, samt brandimprægnering for at lade de eksponerede massivtræs bjælker opnå klassifikationen K₁ 10 B-s1, d0 [24].

Om integritet og isolation overholdes længe nok i henhold til den indvendige brandspredning, vurderes i Danmark også som følge af BR10. Her står generelt om brand- og røgspredning i kapitel 5.5 stk. 1, at "bygninger skal opføres og indrettes, så en brand kan begrænses til den brandmæssige enhed, hvor branden er opstået. Spredning af brand og røg til andre brandmæssige enheder skal forhindres i den tid, som er nødvendig for evakuering og redningsberedskabets indsats" [6]. Det er på baggrund af denne bestemmelse nødvendigt at holde højdespecifikke evakuerings- og indsatstider op mod valg af konstruktioner, samt brandsikrings tiltag, som beklædning og sprinkling. Kun derigennem kan findes løsningsmuligheder for brandmæssig opdeling i bygningen, hvilket er essentielt for at undgå indvendig brandspredning, hvis træ anvendes som bærende konstruktionsmateriale.

Eksempler på at opfylde integritet og isolation i bygninger, med bærende konstruktioner i træ, gives op til 9,6 meter til øverste gulv af EBB12, som beskrevet i baggrundstudiet. Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut (DBI) har på baggrund af den forøgede interesse for anvendelsen af træ, imidlertid udgivet en rapport omkring "Anvendelse af træ som bærende bygningsdele" [25]. I denne foreslås udvidelse af EBB12 således, at BR10 bestemmelserne for brandsikre enheder kan overholdes med trækonstruktioner i klasse EI 90 D-s2, d2, hvor bygningshøjden ikke overstiger 15 meter til øverste gulv, med forbehold for brug af K₂ 60 A2-s1, d0 beklædning eller sprinkling.

For højere bebyggelse hvor der skal anvendes funktionsbaseret krav, afhænger de brandmæssigt adskillende værdier af, hvor længe det anses nødvendigt at opretholde de brandmæssige enheder, altså den nødvendige tid for evakuering og redningsberedskabets indsats.

Som følge af Norske standarder kræves det, at højere træbygninger dimensioneres for et fuldstændigt brandforløb [22]. For *Treet* er dette beregnet til at vare mindre end 90 minutter, hvilket i sammenhæng med anvendelsen af sprinkling, har gjort det muligt her at udføre etagedæk med EI90 bygningsdele, og lejlighedsskæl med EI60 bygningsdele, og stadig opfylde kravene til opdeling i brandmæssige enheder [24].

For at undgå kollaps af bygningsdele, hvilket er beskrevet kan føre til direkte indvendig brandspredning, skal de bærende bygningsdele udføres med en vis brandmodstandsbæreevne. Udførelseskravet bestemmes på baggrund af BR10 kap. 5.3 stk. 1, der beskriver, at bygningsdele skal udføres så der opnås sikre forhold for de

evakuerende og redningsberedskabet. Ydermere beskriver BR10 kap. 5.3 stk. 4, at der i bygninger "hvor gulvet i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, skal der ved dimensioneringen af de bærende konstruktioner tages særligt hensyn til tiden til evakuering af bygningen, redningsberedskabets indsatstid, adgang til etagerne, brandbelastningen og lignende" [6]. Som følge af disse to stykker forstås at brandmodstandsevnen skal være tilstrækkelig, i form af at bygningsdelene skal kunne overleve et relevant brandforløb, der tager udgangspunkt i evakuerings- og indsatstid. Desuden forstås at der ved højere bygninger skal ligges ekstra vægt på dimensionering af de bærende elementer, blandt andet grundet risiko for forlænget evakuerings- og indsatstid.

Brandmodstandsbæreevnen kan for bygninger med bærende konstruktioner i træ, udføres med eksempler på klassifikation fra EBB12, i bygninger med op til 9,6 meter til øverste gulv, se baggrundsstudiet. Ligesom for de adskillende bygningsdele stiller "Anvendelse af træ som bærende bygningsdele" [25] også forslag om muligheden for at anvende bærende bygningsdele af træ, i bygninger med op til 15 meter til øverste gulv. I rapporten vurderes, at R 90 D-s2, d2 kan anvendes, med forbehold for brug af K₂ 60 A2-s1, d0 beklædning eller sprinkling. For højere bygninger er det nødvendigt at beregne evakuerings og indsatstider, samt skabe en forståelse for blandt andet bygningsgeometrier for at kende til det nødvendige krav for brandmodstandsbæreevnen.

For *Treet* anvendes, ligesom for adskillende bygningsdele, det fuldstændige brandforløb på 90 minutter, til at vurdere den nødvendige brandmodstandsbæreevne til klasse R 90. Det har således været muligt at overbevise de Norske myndigheder om, at deres funktionsbaserede bestemmelser er overholdt, og det med mindre brandmodstandsbæreevne end, hvad der ifølge EBB12 bør anvendes ved 22 meter, hvor en bygning per eksempel bør have R 120 A2-s1, d0 bygningsdele.

3.2.2 Ændring ved brug af træ

Almindeligvis opføres mellemhøje og høje bygninger, med ubrændbare bærende konstruktionsmaterialer, som stål og beton. I sådanne tilfælde vil hver enkelt brandmæssig enheds brandbelastning bestå af det interiør den fyldes med. Det betyder, at de brandmæssige enheder vil kunne udføres til at udstå en fuld udbrænding sådan, at branden per teori vil slukke sig selv grundet manglende brandbart materiale. Generelt udnyttes dog tiden for at de der evakuerer har kommet i sikkerhed, og at redningsberedskabet er færdige med deres indsats, som følge af BR10 bestemmelser, til at vurdere hvor længe de bærende og adskillende konstruktioner skal opfylde deres brandmodstandsevne, altså ikke den fulde udbrænding.

For bærende trækonstruktioner vil situationen være ændret, da der i dette tilfælde findes en betydelig brandbelastning i form af de bærende bygningsdele [26]. Bygningsdelene vil, hvis påvirket af brand, starte pyrolyse og forkulle på overfladen, hvilket vil medføre øget risiko for brandspredning, som igen kan lede til farlige situationer.

Tidligere forsøg viser, at massive vægelementer, CLT (cross laminated timber), vil have risiko for delaminering under brandforløbet, hvilket vil fjerne det isolerende forkullede lag træ og på den måde kontinuert bistå med stor brandbelastning. Andre massivtræsformer har ikke samme problem, hvorfor deres brandbelastning vil sænkes til et stabilt niveau over tid [27].

Brandbelastningen fra de bærende trækonstruktioner er en primær udfordring for en sikker brandprojektering og er endnu ikke fuldt afdækket. Derfor vil det være nødvendigt med yderligere brandforsøg for at afgøre den faktiske påvirkning fra træet i den brandsikre enhed [27].

Grundet det uafklarede forhold til brandbelastningen fra bærende trækonstruktioner og de indvirkninger det vil have for brandudviklingen i en brandmæssig enhed, vil det formegentlig være nødvendigt at brandbeskytte træet således, at dette i mindre grad vil indgå i brandbelastningen. Brandbeskyttelsen kan bestå af passive tiltag, som kemikaliebehandling og inddækning eller af aktive tiltag som sprinkling. Med disse tiltag vil det være muligt at opnå samme brandmæssige sikkerhedsniveau, som ved bygninger med ubrændbare massive konstruktioner [26].

Foruden den ekstra brandbelastning vil træelementerne, hvis påvirket tilstrækkeligt, bryde sammen og på den måde sprede branden eller forårsage bygningskollaps. Det forholder sig imidlertid sådan, at brandens påvirkning på træets bæreevne kan beregnes meget nøjagtigt, hvorfor dette kan undgås ved at justere på dimensionerne, hvorved samme eller bedre brandmodstandsevne kan opnås for træ, fremfor ubrændbare konstruktionsmaterialer [28].

Overordnet er de grundlæggende parametre for projekteringen de samme for brændbare og ubrændbare materialer, alle dokumenteret igennem de funktionsbaserede krav i BR10. Således skal der for bærende trækonstruktioner, som for ubrændbare konstruktioner, findes en tidshorisont for, hvor længe brandmodstandsevnen, i form af bæreevne, integritet og isolation, skal opretholdes for at kunne tilfredsstille myndighedskravet for overholdelse af BR10.

3.2.3 Brandsikringstiltagenes muligheder

For at håndtere den brandpåvirkning der vil blive tilført bygningen, hvis der anvendes bærende konstruktioner i træ, vil der være behov for brug af brandsikringstiltag. Enten i form af passive eller aktive tiltag. Herunder beskrives mulige brandsikringstag samt hvordan disse vil kunne påvirke træets indvirkning på den indvendige brandspredning.

Beklædning

Der findes flere muligheder for beklædning, men til at beskytte brandbart materiale skal beklædningssystemer af klassifikation K₂ 30 A2-s1, d0 eller K₂ 60 A2-s1, d0 anvendes i Danmark. Disse har til opgave at sikre, at de brændbare materialer i den beskyttede konstruktion ikke medvirker til eller påvirkes af branden i det tidsrum der er beskrevet. Typisk udføres systemerne af gipsplader, der i form af kemisk bundet vand, sørger for at holde varmen fra det beskyttede materiale.

Ved at udnytte gipsinddækning på CLT-elementer, er det igennem forsøg påvist, at træets pyrolyse begrænses til et ubetydeligt niveau [26], hvilket også vil være forventeligt på andre træbyggesystemer. Dette bekræfter muligheden for brug af beklædningssystemerne, da kravet om ikke at medvirke til branden overholdes.

Ved højere bygninger vil det ofte være nødvendigt at kunne dokumentere sikkerheden for brandforløb af længere varighed end 30 eller 60 minutter, som det er muligt i dag at klassificere beklædningssystemer. Det er derfor nødvendigt at kende til, hvordan brandforløbet vil påvirkes efter beklædningssystemerne svigter. Dette findes der endnu ikke forsøgsresultater for, selvom det dog er konkluderet i forsøg, at den ekstra tilgang til brandbart materiale vil give anledning til forlænget varmepåvirkning og risiko for en ekstra overtænding [29]. Overtændingen vil som beskrevet kunne medføre integritetssvigt, hvor branden på ny have mulighed for at udvikle sig, hvorfor beklædning i dette tilfælde ikke kan anbefales benyttet.

Med beklædning er det muligt at projekttere CLT-elementer til at modstå længerevarende brandpåvirkning, således kan der i dag opnås elementer med klassifikation op til REI 120 [30], hvilke havde været relevante at udnytte. Grundet kendskabet til delaminering og større varmeudvikling fra træet, kan der dog stilles spørgsmålstegn ved om en standard brandtest vil yde stor nok påvirkning til et sådant forsøg.

Behandling

Grundlæggende findes to former for brandsikrende behandling for træ, en indvendig der opløses ved brand og trækker varme ud af branden, og en udvendig der skummer op og danner et beskyttende lag.

Begge muligheder er påvirkelige af vand, hvorfor brandbeskyttelsen ved luftfugtighed på 70 % eller ved direkte kontakt med vand risikerer at forsvinde helt eller delvist. For at undgå dette anbefales det at tilføje vandresistent overfladebehandling, eller kun at benytte mulighederne indendørs. Flere produkter under udvikling forsøger at tage hånd om denne problemstilling [31].

Der findes endnu ikke behandlinger, der kan forhindre træets indvirkning på branden over længere perioder, hvorfor denne beskyttelsesform ikke er velegnet til at opretholde brandsikre enheder, som det kræves af BR10. Der er imidlertid muligt at anvende behandlinger til, i begrænsede perioder, at sikre mod uhensigtsmæssig stor udvikling af røg og varme sådan, at de der evakuerer er sikrede.

Sprinkling

Sprinkling kan udnyttes til at detektere en brand og slukke den med vand i begyndelsesfasen eller som minimum til at kontrollere branden, indtil den kan slukkes med andre brandbekæmpelsesmidler. Slukningen sker oftest af redningsberedskabet, der tilkaldes ved sprinkleraktivering.

Sprinklingen vil som minimum nedsætte varmen i brandrummet, hvorved træets pyrolyse udsættes, sammen med en eventuel overtænding. Ved påvirkning af sprinkling er det således også normmæssigt accepteret at nedsætte brandbelastningen til 60 % [32].

En serie af forsøg med et hurtigt reagerende sprinklersystem bekræfter, at systemet kompenserer for valget af blotlagte trækonstruktioner. I forsøgene blev det bemærket, at selv med hurtig brandudvikling var konstruktionerne ubeskadigede, da systemet hurtigt slukkede branden [18]. En indvendig brandspredning vil således, ved sprinkleraktivering, kunne undgås.

Pålideligheden af sprinkleranlæg er som regel meget højere end andre systemer for brandbeskyttelse, hvoraf branddøre, med pålidelighed ned til 70 %, er det mest ekstreme eksempel [18]. I Danmark er fra 2007-2011 udført en kontrol af sprinkleranlæg, der viser et gennemsnit af funktionsdygtige anlæg på 96,14 % [33]. Af de anlæg med fejl ses at mindre end 50 % af fejlene ligger på anlæggene, mens resten blandt andet er korrektion for bygningsændringer, hvorfor flere af disse anlæg stadig vil have indvirkning i mindre grad. Amerikanske studier af boligsprinkling, viser det omtrent samme sikkerhedsniveau for sprinkling, i form af 97 % sikkerhed for begrænsning af brandskader til initialbrandrummet [34].

I Scottsdale, Arizona, USA, blev der i 1985 indført krav til sprinkling i alle nye boligbygninger, hvilket har medført, at der ikke er registreret en eneste dødsbrand, og at de materielle skader er sænket med 90 %, hvor sprinkling er benyttet [22]. Til sammenligning omkom 79 personer i Danmark, som følge af brand i bolig i 2014 [35].

3.2.4 Forskningsprojekter

Der er inden for de sidste år udgivet flere større rapporter, der omhandler muligheden for at bygge højhuse af træ. I rapporterne belyses flere væsentlige synspunkter omhandlende brandsikring således, at indvendig brandspredning undgås, hvilke vil blive forelagt her.

Use of Timber in Tall Multi-Storey Buildings (2014)

En rapport udgivet af det internationale forbund for bro og konstruktions ingeniører (IABSE) omhandlende specielt træ som primært bærende konstruktionsmateriale.

Kapitel 3 i IABSE rapporten beskriver koncepter for brandsikkerhed for høje bygninger baseret på, at mennesker kan blive fanget i øvre dele af bygningen, grundet brand i underliggende etager. Yderligere, at der ikke vil være mulighed for at slukke branden, eksempelvis grundet jordskælv, men at denne vil brande indtil alt brandbart materiale er væk. Ud fra dette worst-case senarie, opsættes følgende to overvejelser:

1. Adskillende elementer skal designes sådan, at de kan udstå en fuld udbrænding sådan, at ukontrolleret brandspredning til andre brandmæssige enheder undgås.
2. Bærende elementer skal designes sådan, at strukturelt kollaps undgås under en fuld udbrænding, uden indgriben fra redningsberedskab.

Forfatterene ligger vægt på indkapsling af trækonstruktionerne med beklædning, samt brug af hybrid strukturer, som træ-beton dækelementer. [18]

The Case for Tall Wood Buildings (2012)

Rapporten beskriver designforslag til 10, 20 og 30 etager høje træbygninger. Mange aspekter af brandsikkerhed afdækkes, men der udledes ingen overordnet strategi, der kan overholde de Canadiske standarder, hvilke er funktionsbaserede som de danske.

Rapporten ligger vægt på at designe således, at træbygningerne opnår sammenlignelige forhold for brandsikkerhed, som bygninger med ubrændbare materialer skal opnå. Det skal opnås ved anvendelse af sprinklersystemer sammen med forudsigeligheden for massivtræets indbrændingshastighed og beklædning hvor dette er nødvendigt.

Rapporten foreslår således ikke, at det er nødvendigt at designe for at kunne modstå fuld udbrænding. Muligheden for fejl i sprinkleranlægget håndteres ved at designe kritiske bærende elementer med en to timers brandmodstandsevne. [18]

Technical Guideline for Europe (2010)

Første europæiske guide, der giver baggrund for og design metoder til at bygge bygninger med træ, der vil opnå samme brandsikkerhed som bygninger med andre materialer.

Guiden har kapitler omhandlende både beklædninger, brandstop, brandsikringssystemer, nye produkter og deres implementering. Rapporten introducerer sprinkling som specielt attraktivt for bygninger, hvor de bærende konstruktioner i træ ønskes blotlagt.

Specielt interessant for indvendig brandspredning findes også kapitler med forslag til avancerede beredningsmetoder for både adskillende og bærende bygningsdele, både med og uden gipsbeklædning, hvilke foreslås implementeret i fremtidige udgivelser af Eurocodes. [18, 36]

3.2.5 Delresultat

Forløb

Det er som følge af risikoen for indvendig brandspredning essentielt at håndtere brandmodstandsevnen for de bærende og adskillende konstruktioner med omhu. Dette er direkte indeholdt i BR10 bestemmelser, der lader afgrænsningen for håndteringen gå ved personsikkerheden, i form af mulighed for de evakuerende at flygte og for redningsberedskabet at færdiggøre deres indsats. For høje bygninger, over 22 meter, kræver BR10 ekstra fokus på sikkerheden.

Helt grundlæggende for håndtering af indvendig brandspredning er, at bygningen opføres inddelt i brandsikre enheder. De brandsikre enheder skal som følge af BR10, tilbageholde brandspredning indtil evakuering og indsats er færdig.

Det er således nødvendigt at kende til højdespecifikke evakuerings- og indsattider for at kunne give forslag til, hvordan det er muligt at anvende træ som bærende konstruktionsmateriale for de udspecificerede højder, som det også er antydnet af baggrundsstudiet.

Norsk standard beskriver specifikt, at højere træbygninger over fire etager, er muligt, men dokumentationen skal være udførlig, og at baggrunden skal ligge i projektering ud fra et fuldstændigt brandforløb. *Treet*, den

51 meter høje massivtræskonstruktion i Bergen er således udført med bærende R 90 konstruktioner, adskillende EI 90 etagedæk og adskillende EI 60 vægelementer.

Ændring ved brug af træ

Bærende konstruktioner i træ vil tilføje betydelig brandbelastning til bygningen, hvilket vil kunne medføre forlængede brande og forhøjede temperaturer. Ved brug af massivtræs vægelementer, CLT, vil der være risiko for delaminering, hvilket vil forårsage kontinueret tilgang til brandbart materiale.

Samlet forstås det, at brandpåvirkningen fra bærende trækonstruktioner, mangler en del forsøgsdata før den fulde forståelse for påvirkningen af den indvendige brandspredning vil være afdækket.

Grundet den manglende forståelse er det relevant at beskytte træet for at mindske brandens tilgang hertil. Med beskyttelsen vil det være muligt at opnå samme brandmæssige sikkerhedsniveau, som ved bygninger med ubrændbare massive konstruktioner.

Grundlæggende er projekteringen for at modstå indvendig brandspredning, den samme for brændbare og ubrændbare materialer i form af evakuerings- og indsatsikkerheden i BR10.

Brandsikringstiltagenes muligheder

Beklædningssystemer, K₂ 30-60 A2-s1, d0, kan anvendes til at begrænse pyrolyse fra træet til et ubetydeligt niveau. Ved højere bygninger vil der imidlertid være brug for længere beskyttelse, men der findes endnu ikke forsøgsresultater, der afdækker blotlægning af trækonstruktioner efter beklædningssvigt. Forsøg viser dog, at blotlægning vil medføre forlænget varmpåvirkning og risiko for en ekstra overtænding.

Behandling kan udføres med indvendigt eller udvendigt virkende stoffer. Begge er påvirkelige af vand. Behandlingerne er ikke anvendelige til at undgå indvendig brandspredning, men vil kunne hindre træets udvikling af varme og røg i brandens begyndelsesfase, hvilket kan lede til frie flugtveje.

Sprinkling giver god trykthed mod indvendig brandspredning og har høj pålidelighed. Hurtigt tilkald af redningsberedskabet medvirker desuden til øget sikkerhed.

Forskningsprojekter

Use of Timber in Tall Multi-Storey Buildings (2014), behandler worst-case risiko for indespærring af beboere på øvre etager, uden mulighed for indblanding af redningsberedskab. Foreslår således, at både adskillende og bærende elementer skal dimensioneres for fuld udbrænding.

The Case for Tall Wood Buildings (2012), fremlægger design på baggrund af sprinkling. Risiko for fejl skal håndteres ved at dimensionere bærende elementer til to timers brandmodstand.

Technical Guideline for Europe (2010), indeholder designmetoder til at opnå sikre træbygninger. Rapporten fremhæver sprinkling som attraktivt, specielt ved blotlagte konstruktioner i træ. Indeholder forslag til udvidede beregningsmetoder til bærende og adskillende elementer, hvilke skal indarbejdes i Eurocodes.

3.3 Evakuering

Som beskrevet i baggrundsstudiet er det nødvendigt at kende til evakueringstiden for at få en forståelse for, hvor længe bygningen skal sikres, i målet om at opnå den personsikkerhed som kræves af BR10.

Evakuering kan udføres på forskellig vis, i form af eksempelvis simultan evakuering eller faseopdelt evakuering. Ved simultan evakuering, evakuerer alle beboere på samme tid, hvilket kan sætte stort tryk på flugtveje, men til gengæld kræver mindre organisering og færre overvejelser for beboere og redningsberedskab. Ved faseopdelt evakuering er bygningen opdelt i grupper således, at eksempelvis en gruppe etager evakuerer før en anden. Denne metode er anvendelig for meget høje bygninger, da dette kan sikre, at der ikke vil opstå alt for fulde flugtveje, samt give mulighed for større organisatorisk overblik hos redningsberedskabet.

For dette studies højdeinteresseområde, for bygningshøjder op til 100 meter eller omkring 33 etager, se baggrundsstudiet, anvendes simultan evakuering. Evakueringsformen matcher målet om afprøvede metoder ved traditionelt byggeri og vil være mulig, da det på baggrund af et studie fra Hong Kong, er vist, at de evakuerende først vil udmattes efter 30-40 etager [8].

Evakueringen afhænger i stort omfang af flugtvejenes dimensioner og sikkerhed mod røg- og varmeudvikling heri. Som oftest bør flugtvejstrapper derfor udføres i en selvstændig brandmæssig enhed. For bygninger med mere end 22 meter til øverste gulv beskriver "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7] specifikt, at sikkerhedstrapper, brandmandselevator og indsatsrum bør indføres. Det præciseres, at "såfremt der anvendes indeliggende trappe skal der etableres overtryksventilation el. lign. foranstaltning, idet trappe, brandmandselevator og indsatsrum lægges i en sikker kerne med omgivende konstruktioner svarende til mindst EI 60 A2-s1, d0". For bygningshøjder i intervallet 60-100 meter foreslås dog mindst REI 120 A2-s1, d0 [7].

Som følge af resultaterne fra studiet af indvendig brandspredning bør kerner svarende til EI 60 A2-s1, d0 kunne udføres med bærende træelementer, ved brug af brandsikringstiltag som beklædning og sprinkling. For kerner med større brandmodstandsevne vil det dog være nødvendigt med yderligere kendskab til træets indvirkning på brandforløbet.

I Danmark findes ingen bestemmelser for antallet af trapper, mens der i andre lande, som New Zealand, findes krav til, at der forefindes to trapper. Yderligere antal trapper kan give større sikkerhed for de evakuerende og bedre indsatsmulighed for redningsberedskabet. Derfor anvendes ofte flere trapper ved højere byggeri, hvilket blandt andet er gjort i *Treet*, det 51 meter høje massivtræsbyggeri i Bergen, der er udført med en hoved- og en bitrappel. I dette projekt studeres, på baggrund af afgrænsningen til traditionelt byggeri, bygninger med en enkelt trappe.

3.3.1 Evakueringstids overslag

I dette afsnit vil evakueringstiden for de i baggrundsstudiet udspecificerede bygningshøjder blive beregnet. Beregningen tager udgangspunkt i RSET/ASET metoden, som beskrevet i metode kapitlet.

De beregnede tider vil i de næste resultat kapitler blive anvendt til at vurdere mulighederne for anvendelsen af trækonstruktioner, i sammenhæng med hvilke brandsikringstiltag disse eventuelt skal beskyttes af.

Evakueringstid

t_{da} , detekterings og alarmeringstiden, vil være identisk for alle bygningshøjder, men vil kunne reguleres ved installation af brandsikringstiltag. Tiden kan aflæses som følge af Tabel 11 [43], hvilken indeholder empiriske forslag til værdier. Værdierne kan variere og vil aldrig kunne bestemmes helt nøjagtigt, men ved konsekvent brug af disse værdier vil der være en fornuftig sammenhæng for alle bygninger [20].

Som følge af BR10 kap. 5.4 stk. 13, kræves det for nybyggeri i anvendelseskategori 4, at der installeres røgalarmanlæg i boligerne. Desuden kræves det af kap. 5.4 stk. 19, at "i en bygning, hvor gulvet i øverste etage er beliggende mere end 22 m over terræn, skal der ved valg af brandtekniske installationer tages særligt hensyn til muligheden for evakuering fra bygningen, redningsberedskabets indsatstid, adgang til etagerne, brandbelastningen og bygningens konstruktive forhold" [6]. Der er således ikke direkte krav til automatiske brandalarmeringsanlæg, hvorfor detekterings og alarmeringstiden samt reaktion og beslutning vælges konservativt til:

$$t_{da} + t_{rd} = 3 \text{ min} + 5 \text{ min} = 8 \text{ min}$$

Tabel 11 - Forslag til tider for detektering og alarmering samt, reaktion og beslutnings [43]

Anvendelses-kategori	Uden ABA-anlæg eller varslingssystem		Med ABA-anlæg og varslingssystem	
	Detektering og alarmering [min]	Reaktion og beslutning [min]	Detektering og alarmering [min]	Reaktion og beslutning [min]
1	-	-	2	-
2	2	4	2	2
3 ^{*1}	5	6	2	4
4	3	5	2	3
5	-	-	2	3
6	-	-	2	5

^{*1} Mørke lokaler med støj, som sportsarenaer eller diskoteker

Gangtiden de evakuerende bruger på at bevæge sig i sikkerhed, er sammensat af den tid det tager personerne at gå hen til døren til det fri, samt eventuel køtid eller flaskehals problemer ved indsnævring.

Gangtiden, t_t , beregnes på baggrund af gangafstanden [m], l , og ganghastigheden [m/min], v , ved følgende formel:

$$t_t = \frac{l}{v}$$

Ganghastighederne kan findes i "Information om brandteknisk dimensionering" [37]. Disse er videregivet i Tabel 12. Værdierne kan benyttes ved den antagelse, at der vil være en persontæthed på 1,0 personer/m², hvilket synes realistisk, i flugtvejene, for et højhusbyggeri med et etageareal på 600 m². Grundet beboernes

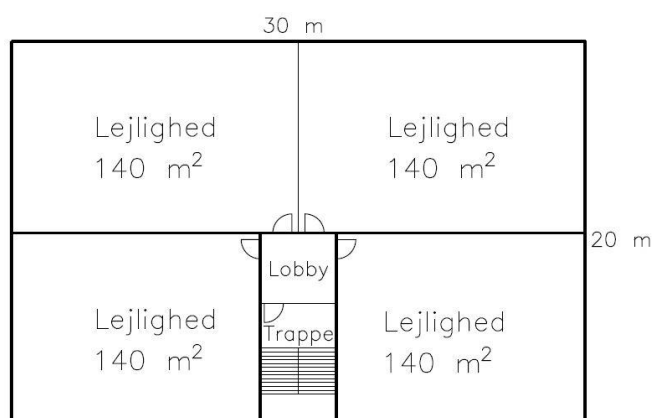
kendskab til bygningen vil tiderne formegentlig yderligere kunne opjusteres, men er anvendt for at få et konservativt overslag.

Tabel 12 - Gengivelse fra [37] af "Tabel 2.2. Ganghastigheder langs planet i anvendelseskategori 1 - 5 ved persontæthed mindre end 1,0 personer/m²"

Bevægelse	Ganghastigheder langs planet
I vandret plan	1,30 m/s = 78 m/minut
Op ad trappe	0,60 m/s = 36 m/minut
Ned ad trappe	0,75 m/s = 45 m/minut

Gangafstanden skal findes ud fra bygningens geometri. En forsimplet etageplan kan ses på Figur 8, hvoraf en maksimal afstand til trappen på 30 meter anslås fornuftig som beregningsgrundlag:

$$t_{t,30\text{ m}} = \frac{30\text{ m}}{78 \frac{\text{m}}{\text{min}}} = 0,38\text{ min}$$



Figur 8 - Forsimplet etageplan, med inspiration fra [34]

Afstanden til jorden via trappen måles langs trappens skrå plan. Det antages, at der anvendes to-løbstrapper med et samlet skråt plan på 6 meter, som følge af en hældning til vandret på 30 grader og en etagehøjde på 3 meter. Den vandrette afstand antages konservativt til at være 2 meter samlet. For at de der evakuerer skal kunne flygte en etage ned vil det kræve følgende tid:

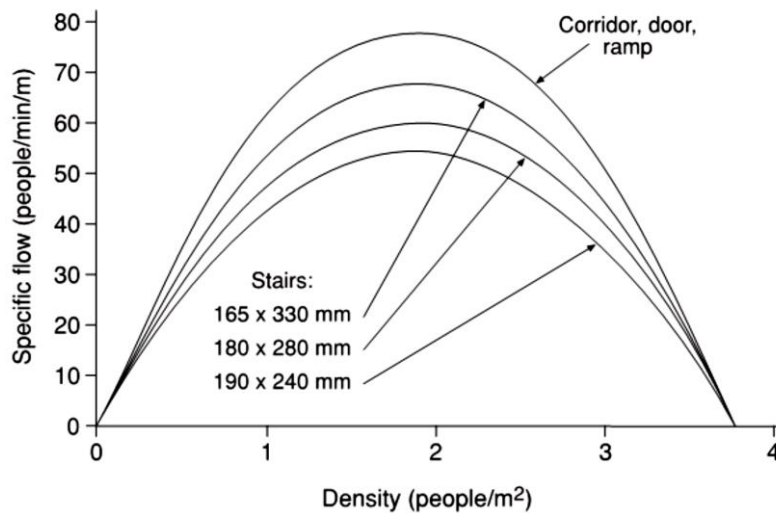
$$t_{t,1\text{ etage}} = \frac{2\text{ m}}{78 \frac{\text{m}}{\text{min}}} + \frac{6\text{ m}}{45 \frac{\text{m}}{\text{min}}} = 0,16\text{ min}$$

For at kende til tiden de evakuerende bruger på at stå i kø på vej mod sikkerhed i det fri, anvendes følgende:

$$f_q = \frac{N}{F_a} = \frac{N}{F_s * W_e}$$

N er antallet af personer, W_e er den udnyttelige gang- og dørbredde, og F_s er det specifikke flow. Antallet af personer er antaget til 5 per lejlighed, altså et estimat på 20 per etage. Den udnyttelige gang- og dørbredde,

W_e , bestemmes ved at trække 15 cm fra i hver side. Gangbredden skal som minimum være 1,3 m, og dørbredden minimum 0,77 m på etagerne og 1,2 m ved terræn [4]. Trappen udføres på baggrund af "vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7], som sikkerhedsstøtte og skal have en fri bredde på mindst 1,2 m. Det specifikke flow kan aflæses som følge af Figur 9 [44].



Figur 9 - Specifikt flow afhængig af persondensitet [44]

Ud fra ovenstående antagelser og minimumsværdier kan tiden der spildes på kødannelse estimeres.

$$f_{q, \text{gang}} = \frac{20 \text{ pers.}}{60 \frac{\text{min}}{\text{m}} * (1,3 \text{ m} - 0,3 \text{ m})} = 0,33 \text{ min}$$

$$f_{q, \text{dør til trappe}} = \frac{20 \text{ pers.}}{60 \frac{\text{min}}{\text{m}} * (0,77 \text{ m} - 0,3 \text{ m})} = 0,71 \text{ min}$$

$$f_{q, \text{trappe}} = \frac{20 \text{ pers.}}{45 \frac{\text{min}}{\text{m}} * (1,2 \text{ m} - 0,3 \text{ m})} = 0,49 \text{ min}$$

$$f_{q, \text{dør terræn}} = \frac{20 \text{ pers.}}{60 \frac{\text{min}}{\text{m}} * (1,2 \text{ m} - 0,3 \text{ m})} = 0,37 \text{ min}$$

Risikoen for kødannelse i trapperummet vil stige med antallet af evakuerende, det antages derfor at et tillæg på 10 % af trappe kødannelsen, vil være nødvendig per ekstra etage. Altså et tillæg på 0,049 sek \approx 0,05 sek, per etage.

Alle de ovenstående resultater summeres i Tabel 13, for at finde den samlede evakueringstid for de individuelle bygningshøjder.

Tabel 13 - Samlet evakueringstid for repræsenterede bygningshøjder

Højde-kategori	Højde [m]	Omtrentligt antal etager	Sammenlægning [min] $RSET = t_{da} + t_{rd} + t_t + t_q$	Samlet Evakueringstid [min]
Mellemhøj	15	6	$(8)+(0,38+6*0,16)+(0,33+0,71+0,49+0,37+(0,05*6))$	11,5
Mellemhøj	22	8	$(8)+(0,38+8*0,16)+(0,33+0,71+0,49+0,37+(0,05*8))$	12,0
Høj	30	11	$(8)+(0,38+10*0,16)+(0,33+0,71+0,49+0,37+(0,05*10))$	12,4
Høj	60	21	$(8)+(0,38+20*0,16)+(0,33+0,71+0,49+0,37+(0,05*20))$	14,5
Høj	100	34	$(8)+(0,38+33*0,16)+(0,33+0,71+0,49+0,37+(0,05*33))$	17,2

RSET estimeret af evakueringstiden giver et godt indtryk af hvor lang tid beboerne bruger for at komme i sikkerhed. Estimeret bygger dog på at beboerne handler rationelt i situationen, og følger den direkte flugtrute som en robot, hvilket evakuerende fra eget hjem ofte fejler i at gøre [38]. Foruden den menneskelige påvirkning afhænger evakueringstiden i stor stil af de aktive brandsikringstiltags effektivitet, blandt andet hvor hurtigt røgalarmen detekterer og alarmerer.

3.3.2 Delresultat

Hovedresultatet for dette afsnit er evakueringstiderne for de repræsenterede bygningshøjder, der ligger i intervallet 11,5 til 17,2 minutter, se Tabel 13. Disse resultater skal videreføres til resultatkapitlet, for at kunne vurdere sikkerheden for de der evakuerer, hvis bygningen er med bærende trækonstruktioner.

Evakueringstiderne er fundet ved den komparative metode kaldet RSET/ASET. Rapporten "RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment" [38], stiller imidlertid spørgsmålstegn ved brug af denne metode, blandt andet fordi folk der evakuerer fra eget hjem ofte har svært ved at efterlade deres ejendomme, og vil prøve at sikre sig deres familie og venners sikkerhed. Det vurderes imidlertid, at tiderne givet for denne del af processen er valgt så konservative, at dette ikke vil være et problem.

I afsnittet vurderes flere forhold, hvoraf de vigtigste er anvendelsen af simultan evakuering, valg af sikkerhedsstrapper som følge af "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7], samt kun at benytte en enkelt trappe.

3.4 Indsatstid

Det er, som beskrevet i baggrundsstudiet, nødvendigt at kende til den tid det tager redningsberedskabet at redde personer og dyr, samt udføre slukningsarbejde, for at kunne projektere de bærende konstruktioner sådan, at redningsberedskabet ikke udsættes for fare under deres arbejde.

Indsatstiden er, på baggrund af ovenstående, i dette projekt betegnet som den tid det tager fra, at branden opstår til, at redningsberedskabet har sikret den brandende bygning. Med 'sikret bygning' forstås, reddet personer og dyr samt sikret kontrol over branden.

Dette afsnit forsøger at beregne et konservativt overslag på, hvor lang tid redningsberedskabets indsats vil tage i de projektrelaterede interessante bygningshøjder. Ligesom det er gjort for evakueringstiden i forrige afsnit.

3.4.1 Overslag på indsatstid

Tiden der anvendes på en indsats vil være afhængig af flere bygningsmæssige parametre. Som start på denne vurdering antages derfor, at adgangs- og tilkørselsforhold samt tilgang til supplerende vand fra brandhane, vil være gode på baggrund af, at det er traditionelle bygninger der vurderes.

Derudover antages det, at branden altid vil florere i bygningens øverste etager således, at den mest konservative tilgangstid for redningsberedskabet skal anvendes.

"The Fire Brigade Intervention Model" [21] er en model for beregning af redningsberedskabets indsatstid, til brug for funktionsbaseret design af bygninger. Ud fra de elementer, der indgår i modellen er det vurderet, at et realistisk overslag på indsatstiden vil kunne gives ved en sammenlægning af tiden brugt i følgende delelementer:

1. Tid for alarmering
2. Tid for udrykning til brandstedet
3. Tid fra redningsberedskabet ankommer til bygningen, til de er fremme ved branden, klar til slukning
4. Tid før branden er under kontrol og personer og dyr er reddet

Deltiderne bliver vurderet enkeltvis herunder og sammensat til slut i afsnittet.

Alarmering 1.

Tiden der går før redningsberedskabet bliver alarmeret kan variere, blandt andet afhængigt af, hvor branden opstår, om beboerne er hjemme, om beboerne sover eller hvis der findes automatiske tilkaldesystemer, hvor hurtigt disse reagerer.

Alarmeringstiden antages i bygninger uden automatiske tilkaldesystemer at kunne sættes til 3 minutter, på baggrund af værdierne fra Tabel 11, der omhandler beboernes alarmerings og reaktionstid.

For høje bygninger antages det, på baggrund af principperne i "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7], samt de forhold der er beskrevet i afsnittet om indvendig brandspredning, at sprinkling altid vil blive implementeret. Sprinklersystemet tilkalder automatisk redningsberedskabet, hvilket vil lede til kortere alarmeringstider, på under et minut [39].

Udrykning 2.

Den landsgennemsnitlige udrykningstid, fra at alarmcentralen sender opgaven til det kommunale redningsberedskab til, at det første mandskab er ved den brandende bygning, kan udledes af "Redningsberedskabets Statistik 2015" [40], til lige under 8 minutter. Det forventes, at der ved at benytte en faktor på 1,5 kan tages forbehold for, at en anden station kan være nødsaget til at håndtere opgaven eller, at stationen i fremtiden kan blive flyttet [21]. Der opnås således en udrykningstid på 12 minutter, hvilket også matcher med den samlede alarmerings- og udrykningstid, der arbejdes med i andre projekter [34].

Klar ved branden 3.

For at bestemme tiden der går før redningsberedskabet er klar ved branden, skal det overvejes hvor lang tid der bruges på at samle informationer, på at bevæge sig op til den respektive etage, samt på klargøring til indsat [47, 56].

I gennem en analyse af tidligere forsøgsdata, vurderer "Development of a fire risk assessment model for tall residential buildings in Denmark" [34], at tiderne kan beregnes som følge af værdierne i Tabel 14.

Tabel 14 - Gengivelse af Tabel 2.19 fra [34], beregning af "klar ved branden" tidsforbrug. N = etager.

Tilgang	Information	Bevægelse	Klargøring
Trapper	6	$0.3 * N$	$0,25 * N$
Elevator	8,5	$1/30 * N$	$0,25 * N$

Forsøgsdataene opdeler overslagsberegningen, i indsats ved trappe og indsats med brandmandselevator. Opdelingen grunder i den simpelhed der ligger i at anvende en trappe, hvorimod redningsberedskabet sjældnere benytter sig af brandmandselevatorene.

Projektets høje bygninger udføres, som følge af principperne i "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7], alle med brandmandselevator, mens de mellemhøje vurderes ud fra at have trapper.

I beregningerne er N antallet etager op til branden, hvorfor bygningshøjderne omsættes til et omtrentligt antal etager, før den samlede "klar ved branden" tid beregnes i Tabel 15.

Tabel 15 - "Klar ved branden" beregning

Højdekategori	Højde [m]	Omtrentligt antal etager	Sammenlægning [min]	Samlet "klartid" [min]
Mellemhøj	15	6	$6 + 0,3*6 + 0,25*6$	9,3
Mellemhøj	22	8	$6 + 0,3*8 + 0,25*8$	10,4
Høj	30	11	$8,5 + 10/30 + 0,25*10$	11,4
Høj	60	21	$8,5 + 20/30 + 0,25*20$	14,2
Høj	100	34	$8,5 + 33/30 + 0,25*33$	17,9

Den ekstra tid der bliver anvendt for høje bygninger, tillægges blandt andet de tiltag, der skal til for at sikre vand oppe i denne højde, hvortil det er nødvendigt med trykforøgende pumper, der kræver yderligere ekspertise og håndteringstid.

De beregnede tider anses som konservative, specielt for de høje bygninger, da flere tiltag vil være med til at nedsætte tiden. Eksempelvis kan installeres særlige vandfyldte slangevinder til brug ved førsteindsats, hvilke kan benyttes indtil den normale vandforsyning etableres [7].

Sikret bygning 4.

Tiden der går fra at redningsberedskabet er ved branden, klar til at påbegynde slukningsarbejde og eventuel redningsarbejde, til at branden er under kontrol og alle beboere er i sikkerhed, er en meget kompleks vurderingssag. Hovedvægten i vurderingen bunder i omfanget af branden, der blandt andet styres af tiden der går før der sker overtænding, og holdbarheden af de brandmæssige enheder.

På baggrund af afsnittet om indvendig brandspredning forstås, at der i alle de projektrelaterede bygningshøjder, enten vil være installeret K₂ 60 A2-s1, d0 beklædning, der vil opretholde de brandsikre enheder i 60 minutter eller sprinkleranlæg der vil sørge for, at branden ikke vokser sig stor nok til at bryde de etablerede brandmæssige enheder.

Med baggrund i at de brandmæssige enheder, som minimum ikke vil brydes inden for de første 60 minutter, og at beregningerne herover viser, at redningsberedskabet vil være klar ved branden på maksimalt 30,9 minutter. Antages det, at det værste brandtilfælde vil være brand i en hel brandmæssig enhed, eksempelvis en lejlighed. Ved denne antagelse og uden fejl i udførelsen af beklædningen eller i sprinklersystemet, vil det således give redningsberedskabet omkring 29 minutter til at slukke den brandende lejlighed.

Til den videre vurdering udnyttes disse 29 minutter, som et konservativt bud på hvornår branden er under kontrol sådan, at der ikke sker yderligere skade på bygning eller personer. Det vurderes yderligere, at disse 29 minutter vil kunne dække eventuelt uheldige udfald i forløbet, som åbne døre eller andet og stadig være på den sikre side.

Alle de ovenstående resultater summeres i Tabel 16, for at finde den samlede evakueringstid for de individuelle bygningshøjder.

Tabel 16 - Samlet indsatsid for repræsenterede bygningshøjder

Højdekategori	Højde [m]	Omtrentligt antal etager	Sammenlægning [min]	Samlet indsatsid [min]
Mellemhøj	15	6	3 + 12 + 9,3 + "29"	54,3 < 60
Mellemhøj	22	8	3 + 12 + 10,4 + "29"	55,4 < 60
Høj	30	11	1 + 12 + 11,4 + "29"	54,4 < 60
Høj	60	21	1 + 12 + 14,2 + "29"	57,2 < 60
Høj	100	34	1 + 12 + 17,9 + "29"	59,9 < 60

3.4.2 Delresultat

Hovedresultaterne for dette afsnit fremgår af Tabel 16, hvoraf den vigtigste udledning er, at alle de repræsenterede bygningshøjder vil have en samlet indsats tid på mindre end 60 minutter. Denne viden vil i resultatkapitlet blive brugt til at udlede, hvordan det brandteknisk sikkert er muligt at anvende bærende trækonstruktioner.

Resultaterne for indsats tiden er udledt med inspiration i den australske kvantitative model kaldet "The Fire Brigade Intervention Model", hvilken er udviklet for at blive brugt i sammenhæng med funktionsbaseret design.

Afsnittet tager udgangspunkt i, at bygningerne er udført med gode vandsupplerings- og tilkørselsforhold samt, at de mellemhøje bygninger udføres uden brandmandselevator og de høje bygninger med.

Igennem afsnittet fås den forståelse, at sprinkling spiller en stor rolle i at skære i indsats tiden, både i form af tidlig automatisk alarmering, hurtig forståelse for hvor det brander grundet oversigt over aktiverede sprinklerhoveder, samt vigtigst at de mindsker brandens udbredelse eller helt slukker branden, hvorfor sluknings- og redningsarbejde vil lattes.

Derudover forstås, at brandmandselevatorer er et essentielt redskab i bygningshøjder med over 22 meter til øverste gulv.

"Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7], anvendes flere steder til at dokumentere valget af brand-sikkerhedstiltag, som brandmandselevatorer og sprinkling. Principperne i vejledningen betragtes, efter bru- gen her og i de forrige afsnit, som meget relevante i målet om at opnå et tilfredsstillende sikkerhedsniveau i bygningen og i sidste ende byggetilladelse.

4 Resultater

Det er igennem dette projekt forsøgt at belyse de farenmomenter, der vil have indvirkning på et brandsikkert design for en mellemhøj eller høj bygning, der er opført med bærende konstruktioner i træ. I dette kapitel vil hovedresultaterne blive fremlagt og projektets overvejelser for, hvordan det er muligt, brandsikkerhedsmæssigt, at anvende træ som bærende konstruktionsmateriale, for de projektspecificerede højder, vil blive udledt.

Overvejelserne er, som beskrevet i indledningen, møntet på at give en vurdering af mulighederne for at udvikle udvidelser til EBB12 for de mellemhøje bygninger og på at give overordnede løsningsmuligheder for begge højdekategorier for fremtidige bygninger projekteret på baggrund af funktionsbaseret design.

4.1 Hovedresultater for retnings specifikt studie

Igennem projektet er det fundet, at der i dag ikke findes tilstrækkelig forskning for brandpåvirkning fra blotlagte bærende konstruktioner i træ til at kunne anvende disse uden beskyttelse. Det er derfor nødvendigt at anvende brandsikringstiltag for at beskytte træet fra at indgå i en eventuel brand. Det er derudover fastsat, at en bygnings opdeling i brandsikre enheder er essentielt for at håndtere en brandspredning, samt for at overholde BR10. Derfor er det anset nødvendigt ikke kun at komme med en vurdering af de bærende bygningsdeles brandmodstandsbæreevne, men også krav til de adskillende bygningsdele, for derved at kunne udlede, hvordan det brandsikkerhedsmæssigt er muligt at anvende træ som bærende konstruktionsmateriale, i højere traditionel boligbebyggelse.

I boliger er de mest anvendte og studerede brandsikringstiltag, beklædningssystemer og sprinkling. Disse to systemers muligheder for at sikre de bærende konstruktioner i træ er undersøgt.

Hvis der anvendes et beklædningssystem klassificeret $K_2 60 A2-s1, d0$, vil det være muligt at beskytte konstruktioner i træ fra branden i 60 minutter. Det er ved fuldskala forsøg fundet, at træet ikke vil nedbrydes på nogen måde af branden og heller ikke tilgå brandbelastningen i form af røggasser. Et beklædningssystem betragtes derfor, som en god løsning for bygninger, hvor det kan sikres, at en brand vil blive håndteret inden for 60 minutter.

Hvis branden risikerer at hærge i mere end 60 minutter, vil der være risiko for, at trækonstruktionerne blotlægges og tilgår branden. Det er igennem forsøg vist, at hvis trækonstruktionerne blotlægges, i dette tilfælde ved nedbrydning af beklædningssystemet, vil det kunne lede til yderligere og forlænget varmpåvirkning samt overtænding. Det vil derfor kræve yderligere forsøgsresultater for at kunne vurdere muligheden for brug af beklædningssystemer for en længere brandpåvirkning end 60 minutter. Der findes i dag beklædte CLT-elementer, der opfylder REI 120 krav. Problemet er blot kendskabet til, hvor voldsom branden vil være når beklædningen fejler og branden kan tilgå trækonstruktionerne. En meget voldsom brand vil kunne påvirke andre bygningsdele kraftigere end forventet og være meget vanskelig at håndtere for redningsberedskabet.

Ved at benytte et sprinkleranlæg opnås generelt brandslukning i brandens begyndelsesfase eller som minimum, at branden holdes under kontrol indtil den kan slukkes med andre brandbekæmpelsesmidler. Igennem en række fuldskalaforsøg er det vist, at lokaler med blotlagte trækonstruktioner også vil slukkes, hvorfor det

ved brug af sprinkling antages, at en blotlægning er muligt.

Risikoen for, at et sprinkleranlæg svigter er meget lille. Danske undersøgelser viser, at 96 % af alle anlæg vil aktiveres ved brandpåvirkning og amerikanske studier viser, at 97 % af alle boliganlæg begrænser branden til initialbrandrummet. Dette giver, om end lille, en margen for, at sprinklingen ikke vil fungere efter hensigten, hvilket også vil kunne ske som følge af en ulykke. Risikoen for dette svigt adresseres i forskningsprojekter ved at designe de bærende bygningsdele med 120 minutters brandmodstandsbæreevne, hvorved et strukturelt kollaps vil kunne undgås i et fornødent omfang. I Norge håndteres svigtet ved at dimensionere bygningsdelene for et fuldt brandforløb. Det 51 meter høje *Treet* har således bærende bygningsdele klassificeret til 90 minutters brandmodstandsbæreevne.

En bygningsopdeling i mindre brandsikre enheder kræver kendskab til evakuerings- og indsatsid, for at personsikkerheden kan opretholdes.

Evakueringstiden er fundet ved brug af en komparativ metode kaldet RSET/ASET. Den sammenlægger hver enkelt del af evakueringen, fra detektering til personernes kødannelse på vej igennem døren til det fri. For de projektspecifikke traditionelle bygninger er det udledt at evakueringen kan ske simultant fra alle etager. Igennem metoden er det fundet, at evakueringen tager et sted mellem 11,5 og 17,2 minutter, for de respektive bygningshøjder, se Tabel 17.

Indsatsiden er fundet på baggrund af inspiration i den kvantitative model kaldet "The Fire Brigade Intervention Model". Modellen tager udgangspunkt i, at bygningsdesignet skal udvikle sig ind til, at der ikke længere opstår nogle personskader. Igennem arbejdet med modellen udledes, at sprinkling vil kunne nedsætte indsatsiden betydeligt. Undersøgelsen leder til at indsatsen, for alle de repræsenterede bygningshøjder, vil være overstået på under 60 minutter, se Tabel 17.

Tabel 17 - Samlede evakuerings og indsatsider

Højdekategori	Højde [m]	Omtrentligt antal etager	Samlet evakueringstid [min]	Samlet indsatsid [min]
Mellemhøj	15	6	11,5	54,3 < 60
Mellemhøj	22	8	12,0	55,4 < 60
Høj	30	11	12,4	54,4 < 60
Høj	60	21	14,5	57,2 < 60
Høj	100	34	17,2	59,9 < 60

4.1.1 Forslag til løsningsmuligheder

Dette afsnit trækker resultaterne sammen til højdespecifikke muligheder for anvendelsen af bærende trækonstruktioner i traditionelt udformede boligbygninger. Afsnittet er opdelt i løsningsmuligheder for funktionsbaseret design og for præskriptivt design.

Funktionsbaserede løsninger

Det er interessant at kende til funktionsbaserede løsningsmuligheder for alle de projektspecifikke bygningshøjder.

Projektets hovedresultater peger på, at evakuerings- og indsatstiden vil være tæt på identiske for alle de udspecificerede højdekategorier. Dette bundes specielt i overgangen fra indsats via trappe og indsats via brandmandselevator, foruden den simple grundplan og den forholdsvis lave personbelastning.

Personsikkerheden er i BR10 den grundlæggende faktor for at kunne overholde bestemmelserne, derfor betragtes det som tilstrækkeligt at bygningens brandmodstandsevne forholder sig til, hvornår alle beboere og redningsfolk er i sikkerhed, hvilket de vil være når indsatstiden er ovre da dette er den dominerende tid.

Da de projektspecifikke bygningshøjder alle vil være sikret på under 60 minutter, vil de alle brandteknisk kunne dimensioneres på samme vis over for et funktionsbaseret krav, på den baggrund, at principperne i "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7] følges under hensyntagen til bygningshøjden.

Løsninger

Hovedresultaterne leder til, at alle personer og selve bygningen vil være sikret på under 60 minutter for alle de projektspecifikke bygningshøjder.

På den baggrund peger projektet mod, at bygningen vil kunne opnå et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau ved at inddække R 60 trækonstruktioner med et beklædningssystem klassificeret K₂ 60 A2-s1, d0. Trækonstruktionerne bør med beklædningen kunne opnå en klassifikation svarende til REI 60 A2-s1, d0, hvilket ud fra kendskabet til evakuerings- og indsatstid vil være tilstrækkeligt.

For bygninger over 22 meter beskriver BR10, at der skal tages ekstra forbehold for brandsikringen, det kan derfor, for at være med til at overbevise myndighederne om sikkerheden, være nødvendigt at indfører ekstra tiltag. Tiltagene kan bunde i overdimensionering af brandmodstandsbæreevnen for trækonstruktionerne således, at et bygningsmæssigt kollaps vil undgås hvis noget skulle forlænge brandforløbet.

Projektet peger også på, at et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau kan opnås for blotlagte trækonstruktioner, hvis der anvendes et sprinklersystem. Svigt af sprinklersystemet foreslås håndteret ved at dimensionere de bærende bygningsdele med en 120 minutters brandmodstandsbæreevne, eller ud fra et fuldstændigt brandforløb der forventes vil give et mindre krav, som det er set for *Treet*.

For at sikre flugt og indsatsveje er det essentielt at undgå tidlig udvikling af røggasser og varme, det forventes at dette er muligt ved at udnytte kemisk behandling af træet, hvilket allerede er udnyttet i *Treet*.

Af hensyn til bygningsopdeling i mindre brandsikre enheder, vil det for alle byggesystemer være nødvendigt at udføre de adskillende bygningsdele i minimum EI 60 konstruktioner. Dette kan enten opnås ved brug af CLT-elementer eller beklædningsbeklædte skillevægge.

Præskriptive løsninger

Det er for de mellemhøje bygninger, med henholdsvis 15 og 22 meter til øverste gulv, interessant at kende til muligheden for at udvikle præskriptive krav, der kan anvendes til at udvide EBB12.

De nedenstående udledninger tager udgangspunkt i, at øvrige anbefalinger i EBB12 følges for hele den brandtekniske projektering. Samt at der i bygningerne forefindes mindst én sikkerhedstrappe, som flugt og indsatsvej.

15 meter

For bygninger med op til 15 meter til øverste gulv, hvad der svarer til 6 etager, er det fundet, at beboerne vil kunne evakuere på 11,5 minutter, og at redningsberedskabet vil have sikret bygningen på under 60 minutter.

Der findes i dag ikke projekteringskrav for denne specifikke bygningshøjde, men kravene for bygninger med gulv i op til 22 meter over terræn er mulige at anvende. Kravene til de bærende konstruktioner ved 22 meter er R 120 A2-s1, d0, mens kravene i kategorien under, ved 12 meter, er R 60 A2-s1, d0.

For at matche EBB12's forhold til sikkerhed, forventes det at en brandmodstandsklasse imellem de to kategorier vil være anvendelig. Det udledes desuden at en træbaseret bærende bygningsdel, skal kunne opnå samme begrænsede medvirken til brand, som en bygningsdel med A2-s1, d0 klassifikation. Det foreslås derfor, ligesom det er gjort af DBI [25], at en bygningsdel vis medvirken til brand er meget begrænset og har en brandmodstandsevne på R 90, vil være tilstrækkelig.

For at opnå dette vil det på baggrund af de, i projektet belyste forhold, ikke være tilstrækkeligt at anvende et beklædningssystem, da dette kun kan sørge for, at træet ikke tilgår branden i 60 minutter.

Et sprinklersystem vil imidlertid helt kunne holde branden fra at udvikle sig og derved holde træets medvirken til brand meget begrænset. Det forventes på den baggrund at det er muligt at udvikle et præskriptivt krav ved at indføre et sprinkleranlæg, for selv blotlagte bærende trækonstruktioner. Kravet vil eksempelvis kunne udformes som af Tabel 18.

Tabel 18 - Forslag til udvidelse af EBB12 ved 15 meter

Bærende bygningsdele
Bygningsdel klasse R 90 D-s2, d2 , når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.
Brandadskillende bygningsdele
Bygningsdel klasse EI 90 D-s2, d2 , når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.

For at håndtere frygt for svigt i sprinkleranlægget, vil det være muligt at udnytte kemisk behandling af træet, for at undgå tidlig røg og varmeudvikling, eller foreskrive udvidet kontrol af anlægget.

22 meter

For bygninger med op til 22 meter til øverste gulv, hvad der svarer til 8 etager, er det fundet, at beboerne vil kunne evakuere på 12,0 minutter, og at redningsberedskabet også her vil have sikret bygningen på under 60 minutter.

I dag er kravene til de bærende konstruktioner ved 22 meter, klasse R 120 A2-s1, d0. Ligesom for kravene ved 15 meter, betragtes dette som muligt at matche, her med en bygningsdel vis medvirken til brand er meget begrænset og har en brandmodstandsevne på R 120.

Kravet kan igen opfyldes ved at anvende et sprinkleranlæg, og udformes som af Tabel 19.

Tabel 19 - Forslag til udvidelse af EBB12 ved 22 meter

Bærende bygningsdele
Bygningsdel klasse R 120 D-s2, d2 , når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.
Brandadskillende bygningsdele
Bygningsdel klasse EI 120 D-s2, d2 , når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.

For at håndtere risikoen for svigt i sprinkleranlægget, vil gælde samme muligheder som ved 15 meter.

5 Diskussion

Projektets resultater viser, at det igennem et funktionsbaseret design af en traditionel bygning er muligt at opnå forholdsvis simple krav til brandmodstandsevnen. De forholdsvis simple krav tyder på, at årsagen til, at der i dag ikke bygges mellemhøje eller sågar høje bygninger med bærende konstruktioner i træ, ikke bør ligge til grund for, at dansk lovgivning vanskeliggøre det. Dette er interessant, da den grundlæggende forståelse i projektets start netop var, at den danske lovgivning tilbageholder udviklingen herhjemme, som det er beskrevet af B. L. Johansen [3].

I dag lader det imidlertid til, at udviklingen tilbageholdes i større grad af andre aspekter som økonomi eller af de projekterendes forståelse for mulighederne, der ligger i de funktionsbaserede bestemmelser, når det gælder konstruktioner i træ. Dette projekt kan være med til at åbne op for denne forståelse og derigennem muligheden for et grønnere byggeri i Danmark.

Det forhold, som studierne i dette projekt beskriver for funktionsbaseret design, gør sig ikke kun gældende for bærende konstruktioner i træ men for alle typer af konstruktioner. Projektets hovedresultater vil derfor også kunne åbne op for eksempelvis at anvende det funktionsbaserede R 60 krav i stedet for det præskriptive R 120 krav for ubrændbare konstruktioner ved 22 meter. Dette vil kunne give en besparelse på produktion og materialeforbrug, hvorfor det vil være interessant at kende til, om dette vil lede til en samlet økonomisk gevinst og en mere gennearbejdet og derfor sikrere bebyggelse.

Endvidere leder resultaterne i projektet til forslag for udvidelser af EBB12. Forslagene kan danne grund for at gennemføre en opdatering af EBB12, således at det vil blive lettere tilgængeligt at udnytte bærende konstruktioner i træ. Udvikling af EBB12 mod mere tidssvarende brug af bærende trækonstruktioner vil kunne være med til at gøre muligheden herfor mere alment kendt, hvorved dansk byggeri kan udvikle sig i en grønnere retning.

Løsningsforslagene er udledt ved at forsøge at matche den nuværende sikkerhed, hvilket ikke nødvendigvis vil lede til fyldestgørende eksempler. Det må forventes, at der ved en opdateret udgave af EBB12 kan tages forbehold for den viden, som de nuværende eksempler bygger på, hvilket enten kan lempe eller forhøje kravet til de løsningsforslag, der her er givet.

For både funktionsbaseret design og specielt design af de præskriptive udvidelser ligger projektet stor vægt på mulighederne ved sprinkling. Forskningsprojektet "Use of Timber in Tall Multi-Storey Buildings" er modstander af at stole på sprinkling, da større ulykker eller naturkatastrofer, som jordskælv, vil kunne beskadige selve sprinkleranlægget eller vandforsyning [18].

I Danmark forholder det sig dog sådan, at bygningspåvirkende naturkatastrofer generelt ikke forekommer. Derfor ligger dette projekt mere vægt på betragtningerne i forskningsprojektet "The Case for Tall Wood Buildings (CTWB)" [18]. CTWB håndterer brandpåvirkning i bygninger op til 30 etager ved at anvende netop sprinkling. I CTWB håndteres sprinklingens risiko for svigt ved overdimensionering af trækonstruktionerne, der sørger for at indbrænding ikke vil forårsage bygningskollaps. Samme fremgangsmåde er benyttet i *Treet*, der er opbygget af blotlagte massivtræsbjælker med grundlæggende sikkerhed i sprinkling og overdimensionerede tværsnit [24].

Overvejelser om metoder

Ulemperne ved indvendig brandspredning ved større brug af trækonstruktioner er udledt på baggrund af litteratur og forsøgsresultater fra praktisk talt hele kloden. At den empiri, der er indsamlet, kommer fra så varierede kilder kan give anledning til fejltolkning og risiko for usammenhængende faktorer. Det forholder sig imidlertid sådan, at alle forsøg og litteratur tager udgangspunkt i samme standard brandpåvirkning eller et naturligt brandforløb. Med dette fælles tekniske grundlag har det derfor været sikkert at sammenligne viden frembragt i forskellige lande.

Resultaterne i studiet om indvendig brandspredning ville også kunne udledes igennem brandforsøg på DTU eller i faciliteterne hos DBI. Dette ville imidlertid kræve en stor afgrænsning af projektet, da der ville skulle alt for mange forsøg til at påvise alle resultaterne, for ikke at snakke om penge, som håndværkere og andre medarbejdere.

Evakueringstiden er udledt på baggrund af den komparative metode RSET/ASET. Metoden er udviklet til brug ved funktionsbaseret dimensionering og udnyttes over hele kloden, hvorfor den også er brugt til dette studie. Det forholder sig imidlertid sådan, at metoden behandler de, der evakuerer, som hvis det var robotter, der blev sat til at gå mod nærmeste udgang, som det er beskrevet i rapporten "RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment" [38]. Dette vil selvfølgelig ikke altid give retvisende resultater, da specielt folk, der evakuerer fra egen bolig, ofte vil have affektionsværdier med sig eller hjælpe familie og naboer i sikkerhed. Det ville derfor være interessant at kende til evakueringstiden ud fra tidligere brande for at se, om personerne i virkeligheden når sikkert ud i det fri på den tid, som det foreslås af metoden.

Indsatstiden er udledt med inspiration i den australske model "The Fire Brigade Intervention Model". I modellen kan indarbejdes nogle meget bygningsspecifikke deltider, der ikke tilstrækkeligt er mulige at udlede for dette projekts meget overordnede bygningstilfælde. Derfor er der brugt nogle gennemsnitlige kørselstider for Danmark, og nogle tider før redningsberedskabet er klar ved branden, der bygger på forsøg fra Tivoli hotel i København. Dette betragtes som langt fra tilstrækkeligt, hvorfor det ville være interessant blandt andet at have oplysninger om, hvor mange kilometer redningsberedskabet i gennemsnit kører per minut i en specifik landsdel. Derigennem vil en mere præcis kørselstid kunne udledes.

Udover kørsel og forberedelse afhænger indsatsen i stor stil af den tid, som det vil kræve af redningsberedskabet at få branden under kontrol og redde beboere. Dette findes der meget lidt dokumentation af, hvorfor det ville være interessant at bestemme specifikke senarier for den tid, som det kræver at slukke eksempelvis en lejlighedsbrand på 140 m². I dette projekt udledes en fiktiv tid for slukning og redning, baseret på at kun en enkelt brandmæssig enhed er antændt. Tiden, på 29 minutter, betragtes som på den sikre side, og udnyttes da dette resulterer i, at alle de studerede bygningshøjder kan slukkes på under én time. Projektets resultater afhænger derfor i stor stil af netop denne tid, hvorfor en mere teknisk udledning absolut havde været at foretrække.

6 Konklusion

Projektet ønskede at undersøge projekteringsmuligheder givet af funktionsbaseret design for brandsikring af traditionelle boligbygninger opbygget af bærende konstruktioner i træ, og om brandsikringstiltag kan muliggøre en udvidelse af *eksempelsamling om brandsikring af byggeri* med tanke på den tilladte højde af bygninger med bærende konstruktioner i træ.

For at nå dette mål er indvendig brandspredning, evakueringstid og indsatstid blevet nærstuderet i dette projekt, hvilket har ledt til følgende delkonklusioner.

Indvendig brandspredning

På baggrund af litteratur om blandt andet forsøgsresultater er det fundet, at brandpåvirkning fra bærende konstruktioner i træ endnu kun er svagt belyst, hvilket leder til, at det er nødvendigt at beskytte træet for at mindske brandens tilgang hertil.

Beklædningssystemer, som K₂60 A2-s1, d0, kan anvendes til at begrænse pyrolyse fra træet til et ubetydeligt niveau, men hvis beklædningen svigter, kan det medføre forlænget varmepåvirkning og risiko for en ekstra overtænding.

Et sprinklersystem giver stor trykthed mod brandspredning og har høj pålidelighed. Den hurtige påvirkning af branden med vand leder til, at selv blotlagt træ ikke vil tilgå et brandforløb.

Evakueringstid

Den afgrænsede bygningshøjde leder til, at der i alle tilfælde kan anvendes simultan evakuering. For mellemhøje bygninger vil det være tilstrækkeligt at have en sikkerhedstrappe, mens det i kategorien høje bygninger er nødvendigt også med brandmandselevatorer, hvilket blandt er vurderet ud fra "Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri" [7].

På baggrund af RSET/ASET metoden er evakueringstiderne beregnet til at ligge i intervallet 11,5 til 17,2 minutter, se Tabel 13.

Indsatstid

Det er fundet, at et sprinklersystem spiller en stor rolle i at skære i indsatstiden, i form af tidlig automatisk alarmering, hurtig oversigt over aktiverede sprinklerhoveder, samt vigtigst ved at mindske brandens udbredelse eller helt slukker branden, hvorfor sluknings- og redningsarbejde vil lattes.

Et overslag på indsatstiden er beregnet på baggrund af den kvantitative model "The Fire Brigade Intervention Model", der leder til, at alle de repræsenterede bygningshøjder vil have en samlet indsatstid på mindre end 60 minutter, se Tabel 16.

På baggrund af delkonklusionerne tyder det på, at traditionelt udførte boligbygninger har gode muligheder for at blive opbygget med bærende trækonstruktioner.

Projektet peger på, at projektering ved funktionsbaseret design kan give store fordele og opnå betydeligt mindre krav til brandmodstandsevnen, end hvad *eksempelsamling om brandsikring af byggeri* foreskriver.

På baggrund af evakuerings- og indsattiderne, se Tabel 13 og Tabel 16, konkluderer projektet ved brug af funktionsbaseret design, at en mellemhøj eller høj traditionel bygning vil kunne opnå et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau ved at inddække de bærende trækonstruktioner med et beklædningssystem klassificeret K₂60 A2-s1, d0. Konstruktionerne bør med beklædningen kunne opnå en klassifikation svarende til REI 60 A2-s1, d0, hvilket ud fra kendskabet til evakuerings- og indsattid vil være tilstrækkeligt.

Det konkluderes yderligere, at et tilstrækkeligt sikkerhedsniveau også kan opnås for blotlagte trækonstruktioner, hvis der anvendes et sprinklersystem. Svigt af sprinklersystemet håndteres ved, at dimensionere de bærende bygningsdele til en 120 minutters brandmodstandsbæreevne eller ud fra et fuldstændigt brandforløb, der forventes vil give et mindre krav. Af hensyn til bygningsopdeling i mindre brandsikre enheder er det under alle omstændigheder nødvendigt at udføre de adskillende bygningsdele i minimum EI 60 konstruktioner.

Ud fra projektets resultater kan det konkluderes, at *eksempelsamling om brandsikring af byggeri* kan udvides med eksempler på udførelse af bærende konstruktioner i træ for bygninger med både 15 og 22 meter, fra de tidligere 9,6 meter til øverste gulv, se Tabel 20.

Dette kan gøres på baggrund af, at der i bygningen installeres et sprinkleranlæg, hvilket ved forsøg er bevist reagerer så hurtigt, at branden slukkes eller som minimum tilbageholder. Sprinkleranlæg har vist sig at være så effektive, at trækonstruktionerne kan blotlægges, hvilket ellers ikke er muligt, da træet i et brandforløb vil generere store mængder varme og generende røg.

Tabel 20 - Oversigt over forslag til præskriptive krav

Højde	Bærende bygningsdele	Brandadskillende bygningsdele
15 meter	Bygningsdel klasse R 90 D-s2, d2, når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.	Bygningsdel klasse EI 90 D-s2, d2, når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.
22 meter	Bygningsdel klasse R 120 D-s2, d2, når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.	Bygningsdel klasse EI 120 D-s2, d2, når bygningen er udført med automatisk sprinkleranlæg.

De samlede resultater indikerer, at dansk boligbyggeri i højere grad kan udføres med bærende trækonstruktioner, end de gør det i dag, og at en begrænsning heraf ikke direkte fremkommer af dansk lovgivning på området. Det samlede projekt kan med dets resultater for funktionsbaseret design og præskriptive løsninger være med til at åbne op for større brug af bærende konstruktioner i træ og funktionsbaseret design for mere traditionelle bygninger. En udvikling i denne retning kan i sidste ende være med til at generere et mere grønt byggeri og være med til at sætte Danmark som et forgangsland for miljøet, også på dette punkt.

6.1 Fremtidigt arbejde

For i fremtiden bedre at kunne opnå at anvende bærende konstruktioner i træ og funktionsbaseret design, anbefales det på baggrund af dette projekt at der udføres mere forskning på følgende problemstillinger.

- Hvordan vil et brandforløb, hvor der ikke gribes ind, udvikle sig efter 60 minutter når den brandtekniske sikkerhed består af et beklædningssystem K₂ 60 A2-s1. d0.
- Hvilken evakuerings tid tyder faktiske brande i boligbygninger på, i sammenligning til RSET/ASET metodens udledning.
- Hvor lang tid vil det tage redningsberedskabet at bekæmpe et worst-case senarie i en boligbygning og sikre bygningen og dens beboere. Dette kunne eksempelvis være en overtændt lejlighedsbrand.
- Vil et funktionsbaseret design frem for et design opbygget af præskriptive løsninger, kunne lede til besparelser på materialeforbrug og fremstilling af bygningsdele, uden at lede til en forringelse af sikkerheden mod brand.

Referencer

1. L. A. Bisby, A. Frangi. Special Issue on Timber in Fire. Springer Science + Business Media New York, USA. 2015.
2. D. Barber, Arup. Tall Timber Buildings: What's Next in Fire Safety?. Springer Science + Business Media New York, USA. 2015.
3. Træsektionen. Træ. Danske Byggeri. Juni 2015.
4. Energistyrelsen. Eksempelsamling om brandsikring af byggeri. 2012.
5. Canadian wood council. Fire safety in residential buildings. 2000.
6. Erhvervs- og Byggestyrelsen. Bygningsreglement 2010 (med tillæg). 2010.
7. Aalborg, Odense, Aarhus og Københavns brand- og byggemyndigheder. Vejledning om brandsikring af højhusbyggeri. Juni 2013.
8. N. L. Brogaard. Fire Safety in Tall Timber Buildings. Kandidatspeciale. Danmarks Tekniske Universitet. Danmark. Januar 2014.
9. Udgået.
10. <http://www.designboom.com/architecture/oopeaa-anssi-lassila-puukuokka-housing-block-jyvaskyla-finland-04-01-2015/> tilgået 17-12-15. Omhandler træbygning i Finland.
11. <https://www.woodsolutions.com.au/Inspiration-Case-Study/forte-living> tilgået 18-12-15. Omhandler træbygning i Australien.
12. <http://www.tu.no/bygg/2015/12/09/i-dag-apner-verdens-hoyeste-trehus> tilgået 17-12-15. Omhandler træbygning i Norge.
13. <http://www.insidevancouver.ca/2015/10/10/wooden-skyscraper-coming-to-vancouver-18-storeys-all-wood/> tilgået 17-12-15.
14. <http://www.e-architect.co.uk/vienna/hoho-tower-in-vienna> tilgået 17-12-15.
15. <http://www.cfmoller.com/r/Wooden-Skyscraper-i13265.html> tilgået 17-12-15.
16. <http://byggningsreglementet.dk/forside/0/2> tilgået 21-12-15. Bygningsreglement 2015.
17. E. Mikkola, M. P. Giraldo. Bio-based products and national fire safety requirements. 2015.

18. A. Buchanan, B. Östman, A. Frangi. White paper - Fire resistance of timber structures. National Institute of Standards and Technology. Marts 2014.
19. http://lollandfalster-brandvaesen.dk/raad_og_vejledning/erhverv/brandtekniske_installationer/automatisk_sprinkleranlaeg_AVs.html tilgået 28-12-15.
20. C. Kindler (COWI). Egress, Occupant Behavior and Acceptance Criteria. Forelæsningslides. September 2015.
21. G. Buckley, W. Bradborn, J. Edwards, R. Marchant, P. Terry, S. Wise. The Fire Brigade Intervention Model. Australasian Fire Authorities Council. 2000.
22. G. Glasø, H. Landrø. FOKUS på tre. Tresenteret i Trondheim. Februar 2012.
23. L. S. Sørensen. Brandfysik og brandteknisk design af bygninger. 1. udgave 1. oplag 2004. Polyteknisk forlag.
24. B. Vangsnes, SWECO. Treet - hvordan brannsikre man verdens højeste trehus? Brannforebyggende forum 2014, Bergen. September 2014.
25. DBI, A. Vestergaard, B. Jensen. InnoBYG Spireprojekt: Fortættet byggeri med lette materialer, Anvendelse af træ som bærende bygningsdele. November 2015.
26. D. I. Kolaitis, E. K. Asimakopoulou, M. A. Founti. Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test. Technical University Athens. Oktober 2014.
27. R. Gerard, D. Barber. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Fire Protection Research Foundation. December 2013.
28. Dansk standard. DS-EN 1995-1-2 + AC-2007, Design of timber structures, part 1-2, general – structural fire design. Juni 2007.
29. R. Gerard, D. Barber. Summary of the fire protection foundation report - fire safety challenges of tall wood buildings. Springer. Juni 2015.
30. Stora Enso. CLT - Cross Laminated Timber - Fire protection. Januar 2014.
31. R. Aseeva, B. Serkov, A. Sivenkov. Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. Springer Science + Business Media. 2014.
32. Dansk standard. DS-EN 1991-1-2, Last på bærende konstruktioner – Del 1-2: Generelle laster – Brandlast. 3. udgave. Juni 2007.
33. R. Knudsen, DBI. Pålidelighed af automatiske sprinkleranlæg (AVS-anlæg). 2012.
34. N. D. Hansen. Development of a fire risk assessment model for tall residential buildings in Denmark. Kandidatspeciale. Danmarks Tekniske Universitet. Danmark. 2012.

35. Beredskabsstyrelsen. Dødsbrande og omkomne ved brand, 2014. 2014.
36. Östman, Mikkola, Stein, Frangi, König, Dhima, Hakkarainen, Bregulla. Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe, Excerpt of chapters 5-7 on Structural fire design. SP Technical Research Institute of Sweden. 2010.
37. Erhvervs- og boligstyrelsen. Information om brandteknisk dimensionering. April 2004.
38. V. Babrauskas, J. M. Fleming, B. D. Russell. RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. Conference Proceedings - Fire and Materials 2009, 11th International Conference and Exhibition, Conf. Proc. Fire Mater 34 side 341–355. April 2010.
39. https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_sprinkler tilgået 05-01-2016.
40. Beredskabsstyrelsen. Redningsberedskabets Statistik 2015. Juni 2015.
41. Udgået.
42. <https://byg-erfa.dk/td-dbi-innobyg-2015> tilgået 10-01-16.
43. H. Bengtsson. Fire-Safety Engineering - Formula Finder. Polyteknisk forlag. 2014.
44. CAE (Centre for Advanced Engineering). Fire Engineering Design Guide. A.H. Buchanan, editor. University of Canterbury. 1994.

Figurer

Figur 1 - Eksempler på udførelse af bærende bygningsdele [4], brændbare materialer til venstre og ubrændbare til højre.

Figur 2 - Projektets overordnede struktur. Skitseret af forfatter.

Figur 3 - Forsimplet etageplan, med inspiration fra [34]. Skitseret af forfatter.

Figur 4 - Brandfaremomenter for højhuse i træ (bogstavnummereret). Skitseret af forfatter.

Figur 5 - Udvendig brandspredning, brystningshøjde. Modificeret figur fra <http://www.highrisefirefigh-ting.co.uk/extspread.html>, besøgt 16-11-15.

Figur 6 – En af Københavns drejestiger, rækkevidde op til 30 meter. Figur fra <http://www.beredskabs-info.dk/materiel/hovedbrandstationen-koebenhavn-drejestige/>, besøgt 10-01-16.

Figur 7 - Evakueringstids overblik ved $RSET < ASET$. Skitseret af forfatter.

Figur 8 - Forsimplet etageplan, med inspiration fra [34]. Skitseret af forfatter.

Figur 9 - Specifikt flow afhængig af persondensitet [44].

Appendiks

A1 Europæiske klassifikationer

Byggevarer og bygningsdele kan klassificeres for deres reaktion på brand og brandmodstandsevne, hvilket er grundlæggende for at kunne beskrive brandsikre konstruktionsløsninger.

Brandmodstandsevne

Brandmodstandsevnen klassifikation er opdelt i tre parametre, bæreevne (R), integritet (E) og isoleringsevne (I), se oversigt i Tabel 21. Parametrene suppleres med det tidsrum hvor bygningsdelen opfylder kravene, under påvirkning af en standardiseret brandprøvning. Tidsrummet angivet i minutter, så som 30, 60, 90, 120.

Tabel 21 - Brandmodstandsevne

Parameter	Beskrivelse for brandpåvirket bygningsdel
R	Bæreevne
E	Integritetsevne (Risiko for revnedannelse eller gennembrydning)
I	Isoleringsevne (Varmestigning på upåvirket side af bygningsdelen)

Reaktion på brand

Dette klassifikationssystem er opdelt i en primærklasse og eventuelle tillægsklasser.

I Tabel 22 ses en oversigt over primærklasserne, og i Tabel 23 følger en oversigt over de mulige tillægsklasser.

Tabel 22 - Primærklasser fra det europæiske klassifikationssystem [4]

Klassebetegnelse	Klassebeskrivelse
A1	Byggevarer, som ikke medvirker til brand, kan ikke kombineres med tillægsklasser.
A2	Byggevarer, hvis medvirken til brand er yderst begrænset, skal kombineres med tillægsklasse for røg (s) og brændende dråber (d).
B	Byggevarer, hvis medvirken til brand er meget begrænset, skal kombineres med tillægsklasse for røg (s) og brændende dråber (d).
C	Byggevarer, som i begrænset udstrækning medvirker til brand, skal kombineres med tillægsklasse for røg (s) og brændende dråber (d).
D	Byggevarer, hvis medvirken til brand kan accepteres, skal kombineres med tillægsklasse for røg (s) og brændende dråber (d).
E	Byggevarer, som i relativt stor udstrækning medvirker til brand, kan enten stå alene eller kombineres med tillægsklasse d2 for brændende dråber.
F	Betyder, at det ikke er dokumenteret, at produktet lever op til noget klassifikationskrav og kan derfor ikke kombineres med tillægsklasser.

Tabel 23 - Tillægsklasser for røg og brændende dråber, fra det europæiske klassifikationssystem [4]

Tillægsbetegnelse	Tillægsbeskrivelse
s1	Meget begrænset mængde af røgudvikling.
s2	Begrænset mængde af røgudvikling.
s3	Intet krav til mængde af røgudvikling.
d0	Ingen brændende dråber eller partikler.
d1	Brændende dråber eller partikler i begrænset mængde.
d2	Intet krav til mængde af brændende dråber eller partikler.

Systemet betegner eksempelvis beton ved A1, da materialet ikke medvirker til brand. Træ betegnes ved D-s2, d2, da dets medvirken til brand kan accepteres, mens der sker begrænset røgudvikling og ikke er krav til mængden af brændende dråber. Hvis træet brandimprægneres kan det dog opnå klassifikationen B-s1, d0.