



Kristian Hertz

Vejledning i dimensionering af bygningskonstruktioner for fuldt udviklet brand

Version 2-3
September 2006
SR 06-09

Forord

Denne vejledning er blevet til på foranledning af Dansk Byggeri, Erhvervs og Byggestyrelsen, COWI A/S, Betonelement-Foreningen, Rambøll A/S og MT Højgaard A/S, der alle takkes for deres engagement og støtte. Endvidere tak til Spæncom A/S, Birch & Krogboe A/S, ES Consult og Københavns Kommune, der har deltaget i arbejdet.

Denne udgave erstatter version 2-3 fra september 2006.

Den første udgave 1-1 gav sammen med forfatterens foredragsvirksomhed anledning til en tilføjelse i det danske bygningsreglement, der udmøntedes i Tillæg 14 fra 1. april 2006.

De følgende udgaver 2-2 og 2-3 fra juni og september 2006 tager højde for disse ændringer og behandler desuden eftervisning af krav om integritet og isolering samt en nøjere analyse af værdier for brandbelastninger og af åbningsfaktorbrænde i store flade brandrum. Med appendiks 3 behandles endvidere et spørgsmål om betydningen af afkølingskurvens form og spørgsmålet om betydningen af isolerede brandrum diskuteres mere indgående i disse udgaver.

Der er udgivet to programmer til hjælp for projekteringen. Damage, som giver svækkelsen af de fleste kvaliteter af beton eller stål under og efter opvarmningen, og ConTemp, der giver temperaturer i et betontværsnit opvarmet af enhver brand. Begge kan fås eksempelvis på www.byg.dtu.dk under Forskning og Software.

I denne udgave 2-4 af vejledningen er tabelværdier for temperaturerne justeret lidt, så de bliver i overensstemmelse med det nye program ConTemp, som benytter materialeværdier, der stemmer med anbefalingerne bl.a. i den europæiske betonnorm.

Vejledningen kan fås på Erhvervs- og Byggestyrelsens hjemmeside www.ebst.dk og på www.byg.dtu.dk

December 2006

Kristian Hertz

Forfatteren

Har en baggrund som rådgivende ingeniør i M. Folmer Andersen A/S og eget firma, indsatsleder i Civilforsvarskorpset samt lektor ved DTU og initiativtager til oprettelsen af Masteruddannelsen i Brandsikkerhed, samt teknisk assessor for akkreditering af brandteknisk prøvning i Danmark.

Er medforfatter til brandafsnittene i den danske lastnorm, betonnorm og CEN normen for betonkonstruktioner, samt en række artikler og forelæsningsnoter om emnet, og har igennem 25 år deltaget i internationalt arbejde med forskning og undervisning i konstruktioners brandsikkerhed.

Forsiden: Forfatterens konstruktion af efterspændt halvcylinderskal, på taget af Det Kongelige Teater i København.

Indhold

Forord	2
Indhold	3
Symboler	4
Indledning	4
Funktionsbaseret projektering	5
Standardbrand	6
Åbningsfaktorbrand	7
To-zone modeller og CFD beregninger	10
Bygningsreglementets opbygning	11
Konstruktioners bæreevne ved brand	13
Fastsættelse af designbrande for konstruktioner	15
Fastsættelse af designbrande for industrialiseret byggeri	15
Den termiske inertie	16
Åbningsfaktoren	18
Indflydelse af åbningsfaktoren for betonkonstruktioner	18
Indflydelse af åbningsfaktoren for trækonstruktioner	21
Indflydelse af åbningsfaktoren for stålkonstruktioner	22
Indflydelse af afkølingskurvens form	22
Integritet og isolering	23
Betonkonstruktioners isolering og integritet	27
Trækonstruktioners isolering og integritet	30
Stålkonstruktioners isolering og integritet	31
Referencer	32
Appendix 1 Brandbelastninger fra forskellige kilder	35
Appendix 2 Fuldt udviklede brande i store flade brandceller..	38
Appendix 3 Betydningen af afkølingskurvens form	51

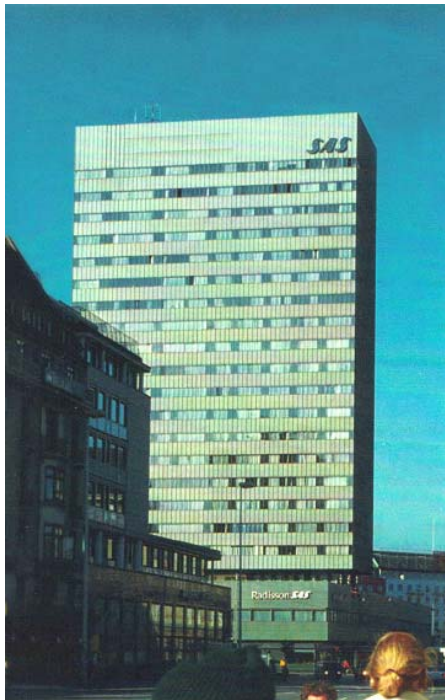
Symboler

A	Areal (m^2)
A_t	Omsluttende overflade (m^2)
B	Bredde af brandcelle (m)
b	Termisk inertie eller berøringstal ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$)
c_p	Specifik varmekapacitet (J/kgK)
F	Kraft (kN)
H	Højde af brandcelle (m)
h	Højde (m)
L	Længde af brandcelle (m)
O	Åbningsfaktor ($\text{m}^{1/2}$)
q	Brandbelastning (MJ/m^2)
$T_d(t)$	Design temperatur tidskurve ($^{\circ}\text{C}$)
T_g	Gastemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_h	Temperatur i varm zone ($^{\circ}\text{C}$)
t	Tid (minutter)
t_d	Tid til max temperatur (minutter)
w	Bredde af åbning (m)
x	Indbrændingsdybde (mm)
β_L	Begyndelsesindbrændingshastighed for limtræ (mm/min)
Γ	Gamma faktor (-)
λ	Varmeledningsevne (W/mK)
ρ	Densitet (kg/m^3)

Indledning

Formålet med denne vejledning er at vise, hvordan man kan dimensionere bærende konstruktioner for fuldt udviklet brand, idet dette emne kun er omfattet af meget få og meget generelle udsagn i konstruktionsnormerne og i det danske bygningsreglement, som det fremstår af Tillæg 8 og Tillæg 14 med de to vejledninger ”Eksempelsamling” og ”Information” af 1. juni 2004 og 1. april 2006 [1].

Denne vejledning omfatter opstilling af designkriterier til bærende konstruktioner generelt og giver et forslag til hvordan kriterierne kan formuleres, hvis man som producent eller rådgiver endnu ikke kender detaljerne i det aktuelle byggeri.



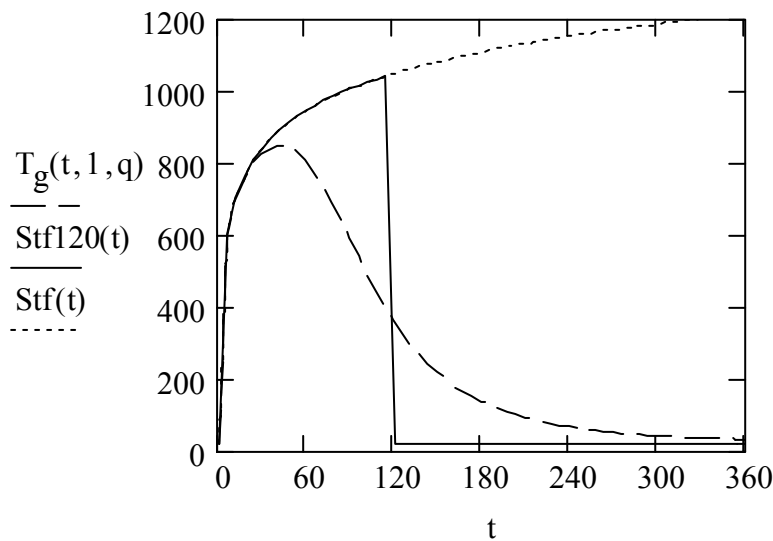
Arne Jacobsens SAS bygning

Funktionsbaseret projektering

Arne Jacobsen indførte funktionsbaseret projektering, da han for 50 år siden tegnede SAS huset i København. I stedet for at angive, hvordan en søjle skulle konstrueres, angav han funktionen af en søjle, der bar lasten fra etage til etage. Det afklarede hvad formålet var med søjlen og muliggjorde, at man til enhver tid kunne erstatte en påtænkt delkonstruktion med en anden, der opfylder alle krav til den. Denne nye tankegang var grundlaget for udviklingen af det industrialiserede byggeri, som har været en væsentlig forudsætning for den meget store danske byggeeksport.

Den eneste del af projekteringen af konstruktioner, der ikke blev gjort funktionsbaseret dengang var den brandtekniske, fordi det var for svært. Man kunne ikke beskrive de brande, der kunne opstå i bygningerne, og man kunne ikke beregne hvordan personer i bygningerne kunne rede sig ud. Man kunne heller ikke beregne, hvordan konstruktioner ville svækkes ved påvirkning af realistiske brande. Alt dette er der siden udviklet metoder og data til i et sådant omfang, at de funktionsbaserede brandkrav nu indføres i mange landes bygningslovgivning. Hidtil har man hovedsageligt dimensioneret konstruktioner for standardiserede brandforløb, der ikke er relateret til aktuelle bygninger. Det kan man stadig, da erfaringen viser, at funktionskravene opfyldes derved. Funktionskravene kan også eftervises i forhold til de fuldt udviklede brande, der kan forekomme, så sikkerheden dokumenteres for den konkrete bygning.

Da Danmark er langt fremme med udvikling af metoder til branddimensionering af konstruktioner, vil fordelene ved en mere præcis eftervisning af brandsikkerheden kunne bidrage til en fortsat vækst af byggeeksporten.



En 120 min Standardbrand
og en fuldt udviklet brand

Standardbrand

For hundrede år siden fandtes en del forskellige standardiserede brande, som man kunne anvende til prøvningsformål for at give en ikke særligt veldefineret idé om bærende konstruktioners brandsikkerhed. Der var for det meste tale om krybbebål eller kulbækkener, og brandforløbene, afhang meget af brændslets kvalitet og af, hvordan vinden blæste på brandtidspunktet.

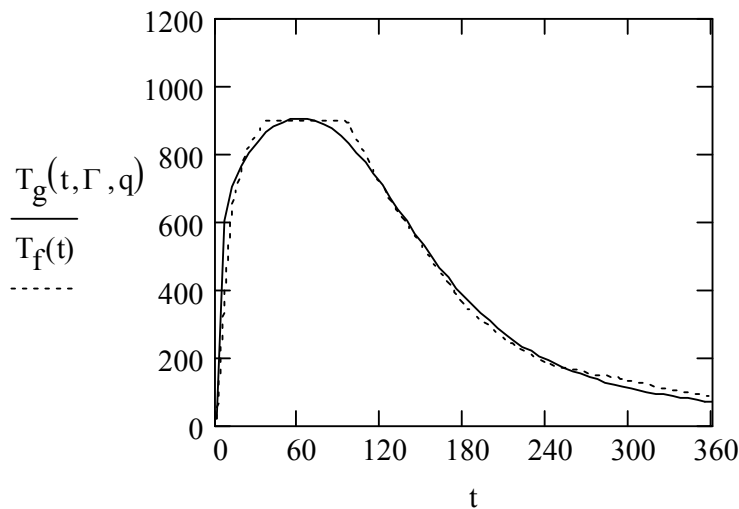
Det var derfor en forbedring, da Ira Woolson indførte gasfyrede ovne til sin søjletest på Columbia University omkring år 1900. Den brandkurve, som han udviklede blev til amerikansk standard ASTM E119 [2] for brandprøvning og siden dansk standard DS1051 [3] og den internationale standard ISO834 [4], der svarer til den europæiske DS/EN1363 [5].

Denne brandpåvirkning kendes i dag som standardbranden og gives som en temperatur tids kurve for gassen i en brandprøvningsovn med formlen

$$T_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}], \quad \text{hvor } t \text{ er tiden i min.}$$

I de første udgaver af den danske prøvningsstandard var det krævet, at den statiske last skulle påføres 24 timer før- og forblive påført 24 timer efter brandpåvirkningen. Dette krav er siden fjernet for at harmonisere med den internationale standard ISO834, hvor en lineær afkølingskurve kan benyttes, hvis man ønsker det. Det betyder at man gerne må aflaste, når den krævede tid er gået.

Standardbranden samt en standardiseret brand til olieindustrien – den såkaldte hydrokarbonbrand – udgør hvad den danske lastnorm DS410 [6] kalder ”nominelle” brandforløb i modsætning til de fuldt udviklede brandforløb, der betegnes ”parametriske” i normen.



Åbningsfaktorkurve bestemt med udtrykket side 9 (fuldt optrukket) ud fra en finere beregnet kurve eksempelvis fra en to-zone- eller CFD beregning (stiplet).

Åbningsfaktorbrand

I forbindelse med genopbygningen af Japan efter krigen udførte dr. Kunio Kawagoe et systematisk arbejde med at undersøge fuldt udviklede brande i rum. Gennem sine brandforsøg fandt han, at de voldsommeste brande blev begrænset af hvor meget luft, der kunne trækkes ind ad åbningerne til at underholde forbrændingen, og at den varme, som branden udviklede, skulle ses i forhold til den varme, som blev ledet bort gennem de omgivende overflader. Dette førte til, at fuldt udviklede brandforløb i dag oftest beskrives ved en åbningsfaktor og en brandbelastning.

Åbningsfaktoren udtrykkes som $O = \frac{A\sqrt{h}}{A_t} \quad [m^{1/2}]$

Den udviklede varme pr. tidsenhed er proportional med åbningsarealet A gange kvadratroden af åbningens højde h , og den bortledte varme pr tidsenhed er proportional med de omgivende overfladers samlede areal A_t .

Dette areal beregnes som det samlede indvendige areal af loft, gulv og vægge incl. åbningerne i væggene, da varmen også kan forsvinde igennem dem.

Åbningsarealet er summen af åbningernes areal og højden findes som gennemsnittet af åbningshøjderne vægtet med åbningsarealerne altså

$$A = \sum A_i \quad [m^2] \quad \text{og} \quad h = \frac{\sum (A_i * h_i)}{A} \quad [m]$$

Brandbelastningen q bestemmes som den energi Q i Mega-Joule MJ, der i alt kan frigives af alle materialer i brandcellen divideret med de omsluttende overfladers areal A_t , hvorigennem varmen kan forsvinde, altså beregnes den som

$$q = \frac{Q}{A_t} \quad \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right].$$

Med disse to parametre beskrives et fuldt udviklet brandforløb.

Man kan beregne disse forløb ved at opstille energibalancen for rummet dvs. sammenholde den energi, som branden udvikler med den energi, som bortledes. Det er veldokumenteret, at de således beregnede brandforløb stemmer overens med forsøg såvel dr. Kawagoe's oprindelige forsøg som mange senere, der eksempelvis er udført i Sverige af Kai Ödeen og ved DTU af Sven Hadvig.

Det er indlysende, at de grundlæggende betragtninger for åbningsfaktorbrandene kun vil give korrekte temperaturforløb i brandceller af begrænset størrelse, hvor den udviklede varme kan tænkes at fordele sig til hele brandcellen. Derfor ser man især i normsammenhænge ofte begrænsninger på anvendelsesområdet for metoden. Den danske lastnorm DS410 angiver eksempelvis 200 m² gulv og 4 m lofthøjde som grænsen for dens udtryk, der specielt også omfatter muligheden for vandrette åbninger i loftet af brandcellen.

Derfor er det værd at overveje, hvad der sker, hvis grænserne overskrides, og man forudsætter, at der ikke er vandrette åbninger i loftet.

Hvis lofthøjden øges, vil de varme gasser kunne fordele sig ved strømning i et større volumen pr m², og finere beregninger og forsøg bekræfter det umiddelbart indlysende forhold, at en større lofthøjde resulterer i lavere temperaturer.

Det vil derfor være på den sikre side for en konstruktionsberegning, hvis man anvender samme temperatur- tidskurve for et højere rum, som for det lave med rumhøjden 4 m såfremt mindst 50% af åbningerne er placeret inden for de nederste 4 m. Åbningerne under de 4 m og højden 4 m medregnes da i åbningsfaktoren.

Hvis åbningerne hovedsageligt er placeret over en højde på 4 m, må der foretages en mere nuanceret vurdering af temperaturerne.

Hvis brandcellens gulvareal bliver større, vil den geometrisk beregnede åbningsfaktor falde for en given tæthed af åbninger langs periferien. På et tidspunkt bliver brandcellen så stor, at en brand kan anses for at begynde på et givet delareal. For gulvarealer på over 200 m² må der jfr DS 410 [6] foretages en mere nuanceret vurdering af temperaturerne. Dette gøres i Appendix 2, som viser, at åbningsfaktormetoden kan anvendes på sådanne brandceller. Branden beregnes for hele det store rum. Ved lange kontorlandskaber, kan branden eksempelvis beregnes for en del af rummet, idet det tænkes opdelt af symmetrilinier på tværs af længderetningen og på midten, hvis der er ens facader til to sider.

Symmetrisnittene medregnes da ikke som vægge i den omsluttende overflade.

Ydervægge og åbninger medregnes svarende til hvad der afskæres af symmetrilinierne.

I den danske lastnorms brandafsnit gives temperatur-tidskurven for et fuldt udviklet brandforløb ved et udtryk, som er videreudviklet af forfatteren på basis af udtrykket i den europæiske lastnorm EN1991 [7]

$$T_g = 20 + \frac{345 \log_{10}(8\Gamma t + 1)}{1 + 0.04 \left(\frac{t}{t_d} \right)^{3.5}} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad \text{hvor}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b} \right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160} \right)^2}, \quad t_d = 7.80 \cdot 10^{-3} \frac{q}{O} \quad [\text{min}]$$

Her er t tiden i minutter, O åbningsfaktoren, q brandbelastningen pr m² omsluttende overflade, t_d er tiden for maksimal temperatur og b er berøringstallet, der bestemmer hvor meget varme den omgivende konstruktion optager ud fra dens termiske egenskaber.

b bestemmes som

$$b = \sqrt{\rho c_p \lambda} \quad [\text{J/m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}]$$

hvor ρ er massefylden, c_p den specifikke varmekapacitet og λ varmeledningsevnen for materialet.

To-zone modeller og CFD beregninger

Virkelighedstro brandforløb kan beregnes med finere beregningsmetoder såsom to-zone modeller, hvor brandrummet tænkes opdelt i en varm zone for oven og en kold for neden og CFD modeller (Computational Fluid Dynamics), hvor brandrummet opdeles i kasser med luft, hvorimellem der holdes regnskab med luft- og varmestrømme, medens beregningen foregår i tidsskridt.

Hvis man har en pålidelig kurve fra en sådan finere beregning eller fra en måling ved en aktuel brand eller et realistisk brandforsøg, kan den omsættes til en åbningsfaktorkurve ved at sammenholde den første med kurven fra ovenstående udtryk og justere åbningsfaktor og brandbelastning, til der er overensstemmelse. Jo finere modellen er, jo flere inddata kræver den, og dette gør det sværere at sikre sig, at man dækker de brandforløb, der er dimensionsgivende for konstruktionerne. Endvidere er nøjagtigheden af de finere beregningsmetoder endnu mest eftervist for evakuering, og ikke for de parametre, der er af betydning for konstruktioner. Derfor kan det endnu ikke generelt anbefales at basere en konstruktionsdimensionering på disse beregningsmetoder.

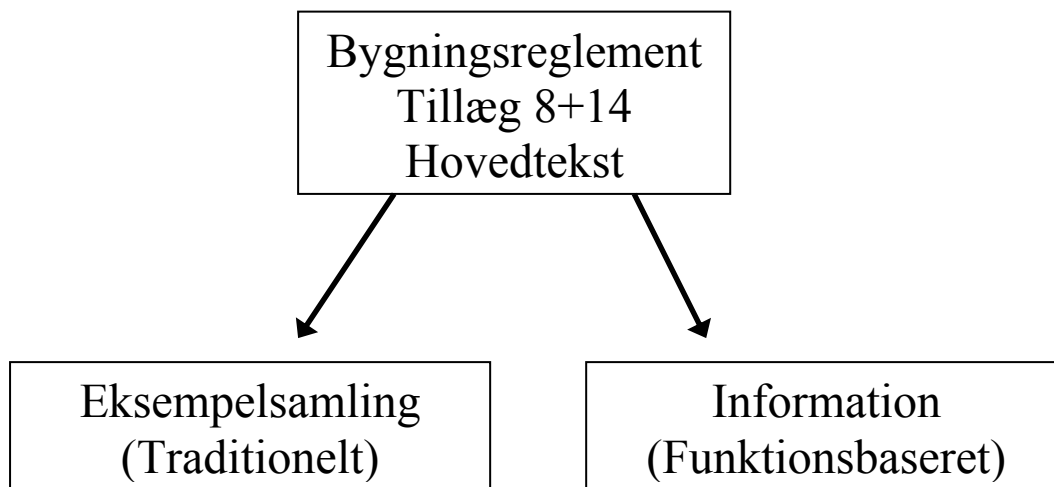
Ved evakueringseftersyn findes tiden til kritiske forhold med hensyn til temperatur og røg og helst også toksikologi, hvori det forhold, at bygningen falder sammen, normalt ikke medtages i den samlede vurdering.

Dvs. man forudsætter en langt mindre sandsynlighed for kollaps af konstruktionen, end for at de øvrige kritiske forhold optræder.

Derfor beregnes konstruktionerne for de værst tænkelige brandforløb, dvs bl.a. for overtændingsbrande.

Hvis man i fremtiden fastlagde brandpåvirkninger til konstruktionsbrug ved to-zone modeller eller CFD beregninger eller konkrete forsøg, bør de derfor repræsentere brande, hvor overtænding optræder med det samme. Dette kan i praksis forekomme eksempelvis ved udsivning af gas, ved fyldning af de pågældende rum med brændbare gasser fra brand andre steder i bygningen, ved udflydning af brændbart materiale, ophængt letantændeligt materiale i udsmykning, gardiner eller uhensigtsmæssige beklædninger osv.

Indtil CFD beregninger er blevet udviklet og bedre dokumenteret som grundlag for dimensionering af bærende konstruktioner, kan man anvende veldokumenterede forsøg og beregninger for overtændingsbrande i form af de simple parametriske brande, der er beskrevet under åbningsfaktormetoden.



Bygningsreglementets opbygning

I juni 2004 udkom Tillæg 8 til det danske bygningsreglement, hvorved funktionsbaserede brandtekniske krav blev indført.

Samtidig udkom to vejledninger "Eksempelsamling" og "Information". Vedr. bærende konstruktioner henviser Informationen til normerne og Eurocodes.

Selve tillægget og de senere tillæg såsom 14 er den egentlige tekst, som opregner myndighedernes krav til bygningernes brandsikkerhed.

Informationen omhandler baggrundsmateriale, formler og data, som kan benyttes ved en funktionsbaseret brandteknisk projektering.

Eksempelsamlingen blev justeret i forbindelse med Tillæg 14 april 2006. Den indeholder eksempler, som kan anvendes uden yderligere dokumentation.

Eksemplerne i denne samling er stort set identiske med de gamle detaljerede krav fra bygningsreglementets brandafsnit, der for konstruktionernes vedkommende hovedsageligt formuleres i brandmodstandstider ved standardbrandpåvirkning.

Da man har mange års erfaring med anvendelsen af denne dimensionering, anser man funktionskravene for opfyldt, hvis den anvendes. Bygningsreglementet kap 6.3 stk. 1 tillader at bæreevnen under brand kan eftervises med både standardbrand, parametrisk brand og anden dokumenteret brandpåvirkning.

Dermed vil det altid være tilstrækkelig dokumentation af konstruktioners brandmodstandsevne, hvis den eftervises for et fuldt udviklet brandforløb.

Hovedteksten i Tillæg 8 og 14 indeholder selve kravene i modsætning til vejledningerne, der kan opfattes som tekster til hjælp for fortolkningen. Kravene i hovedteksten er meget generelt formuleret med hensyn til de bærende konstruktioner.

Den siger i det væsentlige at:

”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 og slukningsarbejde.”

Hvis man udfører en simulering af, hvordan bygningen evakueres, kan man finde den tid, som bygningskonstruktionerne skal bevare deres stabilitet, for at personer skal kunne bringe sig i sikkerhed.

Ordet ”slukningsarbejde” kan derimod ikke konkretiseres. Det kan, som det står, være både en fuldstændig slukning og en slukning, der understøtter evakueringen. Bygninger inddeles som regel i brandsektioner for at sikre at branden begrænses inden for sektionen, således at beredskabet kun behøver at koncentrere sig om slukning inden for sektionsgrænserne. Det er derfor oplagt, at sektionsafgrænsende vægge bør bevare deres stabilitet under hele brandforløbet.

Tillæg 14 til Bygningsreglementet af 1. april 2006 [24] indfører en vejledningstekst til 6.3 stk.1, der siger at

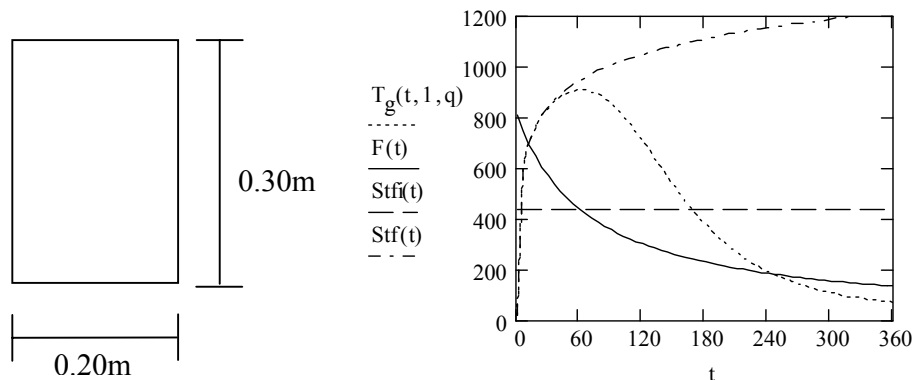
”Andre brandpåvirkninger kan anvendes, hvis de behandles som parametriske brande iht. DS409 og brandbelastningen er dokumenteret.”

I DS409 står der (i 5(15)P i version 2.1 fra 1998 [25] og i 5.1.4(3)P i høringsudgaven fra 2006 [26]): ***”Bestemmes påvirkningen ud fra et parametrisk brandforløb, skal konstruktionen have tilstrækkelig bæreevne under hele brandforløbet.”***

Det betyder, at bæreevnen enten kan dokumenteres for en standardbrandpåvirkning efter eksempelsamlingen eller for en fuld parametrisk brand med afkøling.

Bemærk, at kravet ikke er absolut i alle lande, og at man visse steder i udlandet stadig kan se bygninger, der kan kollapse umiddelbart efter evakueringen.

Udenlandske producenter og rådgivere kan derfor have svært ved at forstå, at dette ikke er muligt i Danmark.



Tværsnit af en betonsøjle og dens bæreevne $F(t)$ i kN som funktion af tiden ved et fuldt udviklet brandforløb med åbningsfaktor $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 300 MJ/m^2 .

Konstruktioners bæreevne ved brand

For at kunne forstå konsekvenserne af en fuldt udviklet brand, er det nødvendigt at overveje, hvilke forhold ved brandmodellerne, der betyder noget for konstruktionernes bæreevne. Ved gennemregning af et stort antal konstruktioner af træ, stål og beton, viser det sig, at den tid, som konstruktionen påvirkes af varme ofte er af større betydning, end den maksimale temperatur, der forekommer i brandrummet, og at afkølingsfasen har en afgørende betydning for de fleste konstruktioner. Dette skyldes bl.a., at det tager tid for varmen at trænge ind i et tværsnit og gøre skade. Som et eksempel betragtes en betonsøjle med det viste tværsnit. Søjlen er 4 m høj, centralt belastet og lavet af en beton af hovedgruppen jfr. Hertz [8] med granit tilslag og en trykstyrke på 20 MPa. Den påvirkes af en fuldt udviklet brand beskrevet ved en åbningsfaktor på $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og en brandbelastning på 300 MJ/m^2 (m^2 omsluttende overflade), der svarer til 1 times standardbrand med en afkølingsfase, og dette kan være en relevant påvirkning for eksempel i en butik i stueetagen i en bygning.

Før branden kunne denne søjle bære 807 kN (karakteristisk).

Efter 1 time er temperaturen i midten af tværsnittet 28°C , og betonen er uskadt her.

De yderste dele af tværsnittet er noget skadede, og bæreevnen er faldet til 436 kN.

Efter 3 timer, når temperaturen i midten et maximum på 365°C og betonens trykstyrke i midtpunktet er da reduceret til 67% i afkølingsfasen, og bæreevnen når et minimum på 228 kN.

Disse resultater er vist som funktion af tiden på figuren i kN i samme koordinatsystem som brandkurven i $^\circ\text{C}$ (...) og standard brandkurven (-.-.). Den stiplede kurve (---) markerer bæreevnen i kN efter 1 times standardbrand.

Eksemplet viser det generelle billede, at mange brandpåvirkede trykzoner af beton får reduceret deres bæreevne til ca. halvdelen af den oprindelige (karakteristiske) værdi, når branden er på sit højeste i brandrummet, og yderligere halveret

bæreevnen efter afkølingen. (Store tværsnit og tung armering kan gøre dette billede mindre udtalt).

Tilsvarende resultater ses ofte for slanke søjler og bjælker med slanke trykzoner og for bjælker og plader med indspændinger ved understøtningerne, hvor trykzonerne brandpåvirkes.

Derfor konkluderes det i Hertz [8], at det er nødvendigt at tage afkølingsfasen i regning, hvis betonkonstruktioner designs for et fuldt udviklet brandforløb, og materialeleværdierne er derfor givet både i varm og afkølet tilstand i Hertz [8], [9], [10].

Denne effekt demonstreres klart af virkelige brande.

Et eksempel er en 12 etagers bygning, som styrtede sammen i Cairo den 27 januar 2004, med det resultat at 15 døde og 45 blev såret. Bygningen var opført ulovligt, som så mange andre i byen, men dette er ikke væsentligt for eksemplet. Det, som betyder noget er, at bygningen klarede en brand i en butik i stueetagen, og beboerne var blevet evakueret. Det betyder, at bygningen netop ved den bedst tænkelige fuldskalatest har bevist, at den levede op til et funktionskrav med hensyn til evakuering.

Kollapset kom i afkølingsfasen, hvor folk var på vej ind i bygningen igen, og hvor varmen fra branden trængte videre ind i de centrale dele af søjlerne i stueetagen og reducerede deres bæreevne yderligere.

Dette og andre tilsvarende eksempler bekræfter det generelle billede, som man ser klart ved beregninger, at et design for en begrænset tid af et fuldt udviklet brandforløb eller af en standardbrand uden afkøling er utilstrækkeligt til at sikre, at en konstruktion har den fornødne bæreevne ved et fuldt udviklet brandforløb.

For trækonstruktioner vil den maksimale indbrændingsdybde ofte først nås langt inde i afkølingsfasen, og isolerede stålkonstruktioner vil opnå deres højeste ståltemperatur et stykke inde i afkølingsfasen især, hvis tværsnittet er stort i forhold til det eksponerede areal. Så generelt er afkølingen afgørende for bygningskonstruktioners bæreevne. (Se endvidere det følgende afsnit om designbrande).

Fastsættelse af designbrande for konstruktioner

Hvis man har besluttet at følge ”Eksempelsamling” anvendes standardbranden som beskrevet deri.

Resultatet er at brandsikkerheden bliver, som man er vant til fra tidligere, hvor konstruktioner afhængigt af forholdene ofte modstår brande, men hvor man ikke har nogen direkte eftervisning af at bygningen bliver stående.

Hvis man ønsker at sikre sig dette, kan man anvende et fuldt parametrisk brandforløb inklusive afkølingsfasen til enten prøvning eller beregning.

Designbranden kan bestemmes som en åbningsfaktorbrand, der kaldes en parametrisk brand i den danske lastnorm [6].

Åbningsfaktormetoden angiver den voldsommeste brand, der fysisk kan forekomme i en given brandcelle, og den er derfor accepteret som designgrundlag i de lande, hvor fuldt udviklede brande indgår i lastnormerne herunder de europæiske lande inden for CEN.

Den svarer til det tilfælde, at en pyroman eller terrorist har antændt alt brændbart materiale i rummet på en gang, eller at der sker en hurtig spredning af branden i rummet på grund af det brandbare materiales fordeling og natur.

De foreliggende metoder forudsætter, at konstruktionerne vil bevare deres stabilitet under evakueringen, og i den sammenhæng skal de beregnes for de voldsommeste brande, der kan forekomme i de enkelte rum med fuld overtænding og ventilationskontrolleret brand.

De simpleste brandmodeller til formålet er de parametriske.

Fastsættelse af designbrande for industrialiseret byggeri

Industrialiseret byggeri er kendetegnet ved, at metoder og processer er fastlagt på forhånd. Elementfabrikker kan derfor med fordel overveje, hvilke brande, der kan være relevante for planlægningen af produktionen, og vælge nogle, der kan dække et stort antal tilfælde.

Brandbelastninger er fundet for et stort antal bygningstyper ud fra statistiske undersøgelser foretaget i Sverige af Nilsson [11], Berggren og Erikson [12] og Forsberg og Thor [13] i forbindelse med udarbejdelsen af den omfattende svenske brandtekniske design guide for stålkonstruktioner Pettersson et al [14], [15]. Statistikken, skønnes også at gælde for danske forhold, og er benyttet ved mange byggesager i Danmark.

Alternative kilder til værdier for brandbelastning er behandlet i **Appendix 1**, og som det fremgår, underbygger de blot de svenske værdier.

Statistikken viser at 80% af lejligheder med 3 rum har en brandbelastning på under 148 MJ/m^2 , lejligheder med 2 rum 168 MJ/m^2 , tekniske kontorer 140 MJ/m^2 ,

hospitaller 140 MJ/m^2 , skoler 110 MJ/m^2 , og hoteller 80 MJ/m^2 . Enhederne er som tidligere Mega Joule per kvadratmeter omsluttende overflade.

Ud fra disse værdier har forfatteren indført en simpel regel i den danske lastnorm [6] om at man kan anvende en brandbelastning på **200 MJ/m^2** uden yderligere dokumentation for boliger, kontorer, hospitaller, skoler og hoteller.

Den termiske inerti, der ovenfor udtrykkes ved faktoren b , kan variere betragteligt. Ofte benyttes værdien $b = 1160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, der svarer til standardbrandcellen, som er den værdi, man vil finde i det traditionelle murede byggeri og i standardbrandprøvningsovnene. Producenter af højisolerende elementer bør anvende en værdi for b , der tager i regning at den varme, en brand kan producere i bygninger udført med disse elementer, har sværere ved at blive ledet bort gennem konstruktionerne, hvorfor designbrandene vil blive væsentligt mere alvorlige. Hvis alle overflader var indvendigt isoleret med mineraluld vil b nærme sig $100 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.

For betonkonstruktioner er situationen den modsatte. Hvis en bygning er lavet udelukkende af tunge betonelementer, kan b øges til omkring $1400 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$.

Imidlertid benytter man ofte betonelementer i forbindelse med lette elementer og murværk, og derfor fås ofte en værdi som $b = 1160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, der svarer til standardbrandcellen. Betonkonstruktioner kan naturligvis også forekomme i højisolerede omgivelser, hvor b bør indrettes derefter. Et eksempel er isolerede betondæk og lette facader, der giver ca $b = 560 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Forskellene i temperatur tids kurver ses på figuren.

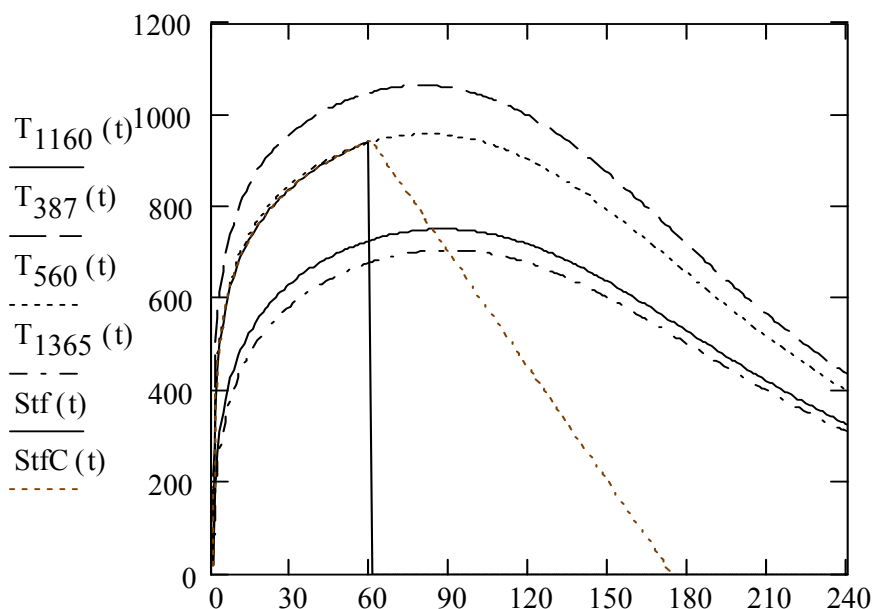


Illustration af indflydelsen af den termiske inert i for brandrummet. Kurve T_{1160} er en brand med brandbelastning 200 MJ/m^2 omsluttende overflade og åbningsfaktor $0.02 \text{ m}^{1/2}$. T_{387} er samme brand i et rum med berøringsstal $b=387$ svarende til en højt isoleret brandcelletype H, T_{560} for $b=560$ svarer til isolerede betondæk og lette facader, og T_{1365} for $b = 1365$ svarer til beton brandcelle type B. Stf er en times standardbrand og StfC er med standardens frivillige afkøling.

Det ses at et brandrum med isolerede betondæk får væsentligt højere brandtemperaturer, til gengæld er betonen i dækket da isoleret og beskyttet mod branden. Ved beregning for fuldt udviklede brande tages dette korrekt i regning, og man får automatisk denne effekt af at isolere med i resultatet. Derimod vil effekten

slet ikke fremgå af en standardbrandprøvning. Grunden er at man ved standardbrandprøvningen bruger en fast temperatur tids kurve, og når dækkets underside isoleres, bruger man mindre brændstof for at opnå kurven. Derved overvurderer man effekten af en isolering og man forledes til at tro, at den vil være til gavn i virkeligheden, hvad der meget vel kan være forkert. Den forøgelse af den virkelige brand, som isoleringen giver anledning til vil dels reducere gevinsten for pladearmringens temperatur og dels være til skade for væggenes stabilitet. Altså er dette endnu et eksempel på, at standardbrandprøvninger kan føre til løsninger, der ikke nødvendigvis er fordelagtige i praksis.

En lidt alternativ måde at tage hensyn til brandcellens inert i på er fremsat i forbindelse med den svenske vejledning for stålkonstruktioner [14]. Metoden gengives her, da den giver et billede af, hvad variationen i termisk inert i kan betyde og da den viser, hvordan man kan tage hensyn dertil for bl.a. trækonstruktioner. Den består i at man anvender en ækvivalent åbningsfaktor og en ækvivalent brandbelastning, der begge fremkommer ved at de oprindelige størrelser multipliceres med en faktor k_f som afhænger af brandcellens opbygning jfr. nedenstående brandcelletyper.

Af formlerne for åbningsfaktorbranden ses, at relationen mellem berøringsstallet b i $Ws^{1/2}/m^2K$ og k_f er at $b = 1160/k_f$.

Type	Beskrivelse	Geometrisk åbningsfaktor:						$b \text{ s}^{1/2}/m^2K$
		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	$0.12m^{1/2}$	
A	Standardbrandcelle							
	Beton, tegl, letbeton	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1160
B	Beton	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1365
C	Letbeton ($500kg/m^3$)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.50	387
D	50% beton + 50% letbeton	1.35	1.35	1.35	1.50	1.55	1.65	859
E	33% beton + 50% letbeton + 17% let konstruktion	1.65	1.50	1.35	1.50	1.75	2.00	773
F	20% beton + 80% Stål (uisoleret stål)	0.85	0.85	0.70	0.65	0.65	0.65	1365
G	20% beton +80% gips, luft, gips (2*13, 100, 2*13 mm)	1.50	1.45	1.35	1.25	1.15	1.05	800
H	100 mm mineraluld med stålplade	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.50	387
I	Isoleret betondæk med let facade	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07	560

I tabellen er vist værdier af k_f og b for forskellige typer brandceller.

Variationen med af k_f med åbningsfaktoren skyldes at de termiske egenskaber kan ændres med temperaturen og med påvirkningen, hvad man normalt ikke indregner i formelen for brandforløbet, der bruger et fast b . Bortset fra denne finesse, er der altså tale om to forskellige måder at beskrive den samme metode på. I Appendix 2 er Test 8 for en brandcelle type G og de øvrige tests for lidt tungere celler end type H. Ved dimensionering efter en standardbrand tager man ikke disse variationer i regning men bruger standardbrandcellen hver gang.

Åbningsfaktoren varierer med den anvendte geometri. For nogle få lette, ikke isolerede konstruktioner vil en høj åbningsfaktor være den, der giver de største skader, fordi disse konstruktioner er følsomme for høje temperaturer. Men for tunge elementer og for de fleste isolerede lette konstruktioner, vil en lav åbningsfaktor være farligst, fordi lang påvirkningstid er farligere end høj brandrumstemperatur i disse tilfælde.

Ydermere har moderne vinduesruder med flere lag glas evt. med laminering sværere ved at springe ved varmepåvirkning, end tidligere tiders ruder, hvorfor man konservativt bør ansætte åbningsfaktoren lavt eller foreskrive et bestemt glas med velkendte egenskaber. Ved anvendelse af hærdet glas i adskillelser kan man eksempelvis opnå, at hele det berørte glasparti falder ud.

Indflydelse af åbningsfaktoren for betonkonstruktioner

For at bestemme en designbrand, der kan anvendes på den sikre side for en betonelementproduktion, kan man udføre analyser af hvordan forskellige brande vil påvirke typiske konstruktioner. Resultatet vises i Tabel 1.

Maximum temperaturen bestemmes for en armeringsstang i en brandpåvirket loftplade med en typisk dæklagstykkelse på 30 mm regnet til stangens centrum. Desuden bestemmes den gennemsnitlige reduktion af trykstyrken i en trykzone eksempelvis i en bjælke med bredde 150 mm påvirket af brand på begge sider. Endelig viser tabellen bæreevnen af den tidligere omtalte 4 m høje betonsøjle med tværsnit på $200 \times 300 \text{ mm}^2$ og betontrykstyrke 20 MPa.

Til beregningen er benyttet forfatterens simple beregningsmetode, der bl.a. findes i Annex B2 i CEN [16] og i DS [17] og Hertz [18], og resultaterne fremgår i det væsentlige af Hertz [19].

Reduktionen af betonens trykstyrke angives for en hovedgruppe, der omfatter de fleste konstruktionsbetonkvaliteter herunder beton produceret med danske sø- eller bakkematerialer eller eksempelvis granit jfr. Hertz [8]. Styrkerne findes for varm tilstand, hvor armeringen er varmest og svagest, og for en kold tilstand i slutningen af afkølingsfasen, hvor betonen er svagest.

Beregningen udføres for et udvalg af fuldt udviklede brande med brandbelastning 200 MJ/m^2 (pr. kvadratmeter omsluttende overflade) og åbningsfaktorer fra $0.02 \text{ m}^{1/2}$ til $0.12 \text{ m}^{1/2}$ og termisk inertitet som en standardbrandcelle, og der anvendes

samme strålingsforhold mellem brand og plade, som man vil have i en standardbrandcelle.

Tabellen viser til orientering de samme værdier for en standardbrand på 60 og 120 minutter og for de samme standardbrande, hvis der blev anvendt en afkølingsfase. Endelig er beregningen udført for en fuldt udviklet brand med åbningsfaktor $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 300 MJ/m^2 , der blev benyttet for søjle eksemplet, og det ses at give næsten det samme, som en times standardbrand med afkøling. Resultaterne i Tabel 1 viser, at den mindste åbningsfaktor er farligst for en betonkonstruktion, fordi tiden er væsentligere for ødelæggelsen end temperaturen. Da de valgte eksempler er typiske for betonkonstruktioners virkemåde ses, at man generelt på den sikre side kan anbefale at benytte en åbningsfaktor på $0.02 \text{ m}^{1/2}$ og en brandbelastning på 200 MJ/m^2 omsluttende overflade ved design af elementer og in-situ betonkonstruktioner for beboelsesbygninger, kontorer, hospitaler, skoler og hoteller.

Denne gruppe omfatter en stor del af produktionen i det industrialiserede byggeri. Hvis en fabrik også producerer elementer til andre anvendelser såsom industribyggeri, butikcentre og øvrige byggerier, hvor en øget brandbelastning kan forekomme, må design programmet suppleres med specielle varianter med en større brandmodstandsevne. Det samme gælder, hvis elementerne skal anvendes i brandceller med mindre termisk inertie. Beregningerne, der ligger til grund for tabellen er udført for brande i den såkaldte standardbrandcelle, der svarer til forholdene i en standardbrandprøvningsovn eller en brandcelle i en bygning, hvor de omsluttende overflader er udført af blandede materialer. Denne brandcelle er grundlaget for anvisningerne i Eksempelsamlingen, da den i sin tid blev anset for repræsentativ. En brandcelle på 120 m^2 med dæk af beton og alle vægge af ren mineraluld har eksempelvis denne inertie. Hvis en betonkonstruktion eksempelvis en søjle eller en bjælke optræder i en brandcelle med både højisolerede vægge og dæk, vil temperaturerne blive højere end vist, og det skal der naturligvis tages hensyn til ved dimensioneringen. Hvis det omvendt vides, at en dimensionerende fuldt udviklet brand optræder i en brandcelle med samtlige omsluttende konstruktioner af beton, vil brandpåvirkningen være mindre ødelæggende, end vist.

Det ses umiddelbart af tallene, at det fuldt udviklede brandforløb med brandbelastning 200 MJ/m^2 og åbningsfaktor $0.02 \text{ m}^{1/2}$ vil være mindre ødelæggende i en standardbrandcelle, end en 60 minutters standardbrand med afkøling. Det vil derfor være på den sikre side, hvis man i stedet dimensionerer for en 60 minutters standardbrand, når den forsynes med en afkølingsfase.

Brandforløb	Åb- nings faktor	T _{max} i plade med 30 mm dæklag	Reduktion af beton styrke 150 mm tværsnit		Reduktion af søjle styrke 200x300x4000 mm	
			Varm	Kølet	Varm	Kølet
200 MJ/m ²	0,02	413	0.75	0.43	0.61	0.33
200 MJ/m ²	0,04	378	0.81	0.53	0.63	0.38
200 MJ/m ²	0,08	320	0.83	0.63	0.64	0.40
200 MJ/m ²	0,12	280	0.84	0.67	0.65	0.44
300 MJ/m ²	0,04	459	0.73	0.40	0.53	0.29
60 min. Standard Brand	(0,04)	350	0.81	-	0.54	-
60 min. St. Brand m. afkøling	(0,04)	464	0.70	0.37	0.52	0.28
120 min. Standard Brand	(0,04)	528	0.56	-	0.33	-
120 min. St. Brand m. afkøling	(0,04)	613	0.36	0.00	0.26	0.04

Tabel 1 Typiske eksempler på indvirkning af varierende brandforløb på betonkonstruktioner i en standardbrandcelle.

Det ses, at temperaturen på et armeringsjern med 30 mm dæklag i en plade bliver 413°C med den foreslåede åbningsfaktordesignbrand, hvor temperaturen ved en 120 min standardbrand vil være 528°C.

For de tidligere anførte bygningskategorier, vil denne brand være den statistisk set værste, der kan forekomme, hvorfor anvendelse af åbningsfaktormetodens muligheder for at komme tættere på den forekommende brandbelastning resulterer i et lempeligere krav til konstruktionen, samtidigt med at man opnår en bedre dokumentation for konstruktionens stabilitet gennem hele brandforløbet.

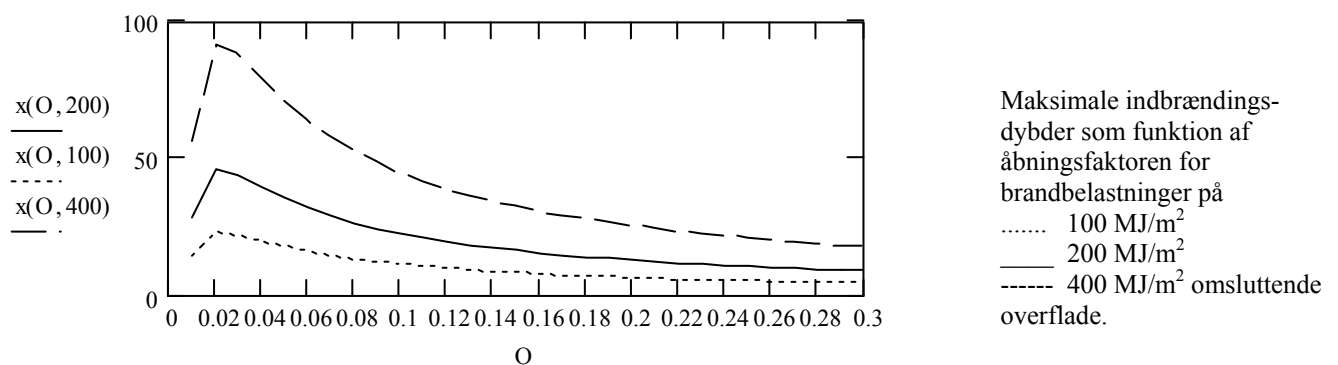
Hvis man forestiller sig at store dele af dæk og vægge er isolerede, kan brandcellen som nævnt blive lettere. Hvis en betonkonstruktion befinder sig i en højisoleret brandcelle af type H jfr afsnittet om termisk inert, bliver temperaturerne i dybden 30 mm 579°C for åbningsfaktoren 0.02 m^{1/2} og 510°C for 0.04 m^{1/2}. Konklusionen om, at 0.02 er værst ses således stadig at være gældende uanset hvor let eller tung, brandcellen bliver.

Indflydelse af åbningsfaktoren for trækonstruktioner

Når en trækonstruktion udsættes for et fuldt udviklet brandforløb, vil indbrændingshastigheden aftage sidst i forløbet, hvorpå indbrændingen stopper helt forudsat at tværsnittet er stort nok til at indbrændingen fra en side påvirkes af indbrændingen fra den anden.

For at bestemme en designbrand, der kan anvendes på den sikre side for en trækonstruktion, findes den maksimale indbrændingsdybde $x(O, q)$ for en række forskellige åbningsfaktorer O og brandbelastninger q ved hjælp af et udtryk, som fremgår af Hadvig [28], og som er optaget bl.a. i den danske norm for trækonstruktioner [27].

$$x(O, q) = \left(1.25 - \frac{0.035}{O + 0.021}\right) \frac{8}{12} \cdot 0.0175 \cdot \frac{q}{O}$$



Det ses, at de alle har en top for åbningsfaktoren $0.02 \text{ m}^{1/2}$, der skyldes forekomsten af tallet 0.021 i nævneren i udtrykket. Dette hænger sammen med, at indbrændingen foregår nogenlunde roligt, når tværsnittet påvirkes med brand udefra, hvorfor den længste brand, som giver en passende bestråling, er værst. Derfor kan en brand med åbningsfaktoren $0.02 \text{ m}^{1/2}$ også anses for at være på den sikre side i forhold til andre brande med samme brandbelastning, når man dimensionerer en trækonstruktion. Da trækonstruktioner ofte optræder i lette brandceller, er det væsentligt, at der tages hensyn til for brandcellens termiske inertie ved dimensioneringen.

Indflydelse af åbningsfaktoren for stålkonstruktioner

De maksimale temperaturer på stålkonstruktioner påvirket af fuldt udviklede brande er tabelleret i Pettersson, Magnusson og Thor [15]. Anvendes en opskummende maling med forhold mellem ækvivalent tykkelse og varmeledningsevne på $0.086 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$, ser man for en brandbelastning på $210 \text{ MJ}/\text{m}^2$ at temperaturen er højest for åbningsfaktoren $0.02 \text{ m}^{1/2}$ op til et forhold mellem eksponeret overflade og volumen på 200 m^{-1} . Dette interval omfatter alle HEB bjælker, alle HEA bjælker ned til og med HEA 160 og IPE bjælker ned til og med IPE 300. For slankere profiler vil højere åbningsfaktorer give større maksimaltemperaturer. Kraftigere isolering vil øge intervallet, hvor $0.02 \text{ m}^{1/2}$ er på den sikre side. Uden isolering vil temperaturen følge branddrummet tættere med en lille forsinkelse.

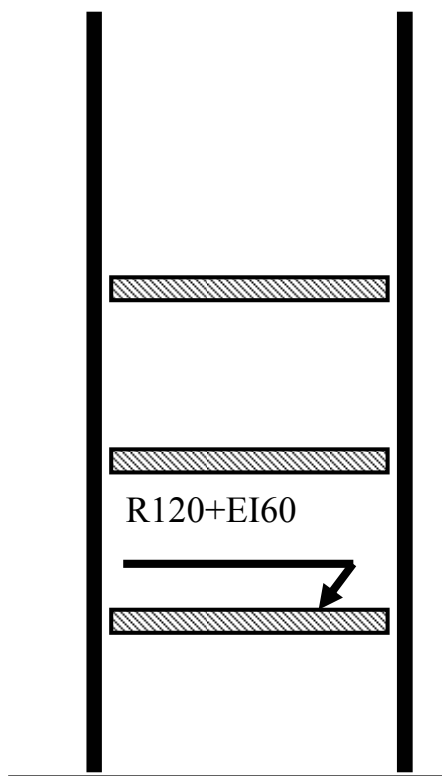
Også for stålkonstruktioner vil ændringer i brandcellens termiske inertie ændre på designtemperaturerne, og lette højisolerede brandceller vil også her give de højeste ståltemperaturer.

Indflydelse af afkølingskurvens form

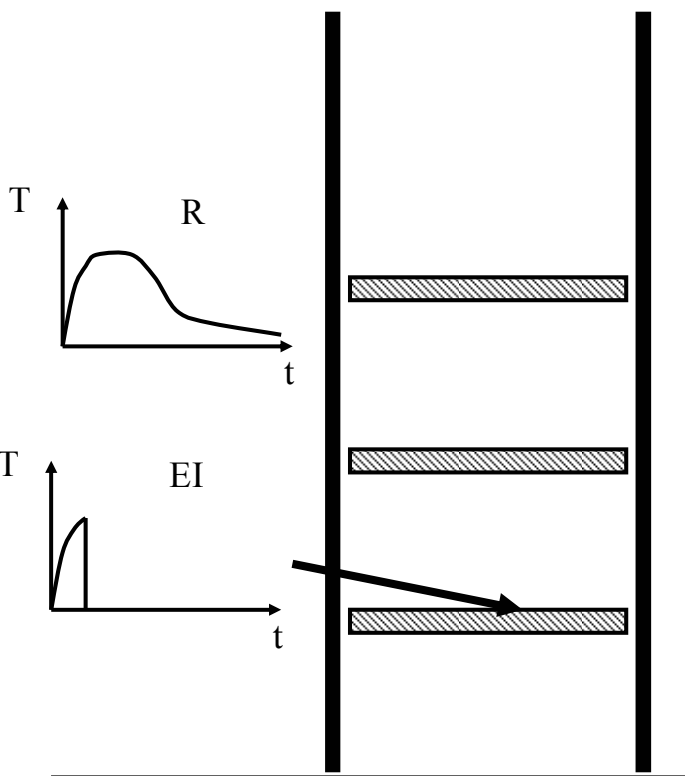
Den naturlige afkølingskurve for en brandcelle og for en brandprøvningsovn adskiller sig fra den rette linie, der er beskrevet i standarderne for standard brandprøvning [3] og [4]. Imidlertid er afkølingskurvens form stort set uden betydning for resultatet, som det fremgår af Appendix 3. Det, der betyder noget, er at afkølingen er med, og at varmen fra opvarmningsfasen derved får tid til at trænge ind og svække konstruktionen. Det kan derfor være hensigtsmæssigt at benytte brandprøvningsovnens naturlige afkølingskurve i stedet for den rette linie, hvis man vil teste en konstruktion med en afkøling. Da afkølingen slet ikke er krævet ved en standard brand dimensionering, er den formelle overholdelse af afkølingskurven fra standarden ikke relevant. Derimod vil en naturlig afkølingskurve være mere oplagt for dimensionering for et fuldt udviklet brandforløb, og da kurvens form som sagt praktisk taget ingen betydning har, anbefales det at anvende den naturlige afkølingskurve i stedet for standardens.

Integritet og Isolering

Eksempelsamling



Fuldt udviklet brand



Konstruktioner, der har en adskillende funktion skal dimensioneres derfor, og det skal dokumenteres, at den krævede funktion kan opfyldes.

I brandmæssig sammenhæng anvendes to kriterier for konstruktionens adskillende funktion.

Integritet betyder at konstruktionen ikke får så store revner eller huller, at de brændbare gasser kan trænge igennem. Ved prøvning kontrolleres, at et stykke vat ikke antændes ved sprækker bag konstruktionen.

Isolering betyder at temperaturen på bagsiden ikke bliver så høj, at der kan antændes en ny brand bag konstruktionen. Ved prøvning kontrolleres, at **temperaturen ikke stiger mere end 140°C i gennemsnit på bagsiden og ikke mere end 180°C i noget enkelt punkt.**

Krav til integritet og isolering betegnes med standardbrandprøvning som brandmodstandstider for E og I, hvor krav til bæreevne betegnes R.

Hvis man efterviser alle tre krav ved samme brandprøvning i eksempelvis 60 minutter, klassificerer man konstruktionen som REI 60.

Kravene til bæreevne og adskillelse følges ikke ad, hvad der er logisk, da der er tale om forskellige hensyn. Mange konstruktioner såsom søjler og bjælker er eksempelvis kun bærende og ikke adskillende, hvorfor der kun kræves bæreevne af dem.

Dog vil kravene til integritet "E" og isolering "I" normalt følges ad, da de begge tjener til at hindre branden i at brede sig gennem konstruktionen.

Eksempelvis kan kravene til et dækelement i et højt hus formuleres i standard-brandmodstandstider i Eksempelsamlingen som R 120 for bæreevnen, men EI 60 for den adskillende funktion.

Det skyldes, at dækket virker som vandret brandcelleadskillelse eller brandsektionsadskillelse, hvorimod R 120 kravet er knyttet til funktionen som afstivende konstruktion for væggene, der skal opfylde et krav om R 120.

Ligesom ved dimensionering for standardbrand er krav til integritet og isolering ved dimensionering for fuldt udviklede brandforløb enten relateret til brandcelleadskillelser eller sektionsadskillelser.

For **sektionerende konstruktioner** kræves, at de skal opfylde deres adskillende funktion i den tid, det tager at evakuere sektionen og slukke branden. Det betyder, at konstruktionen **skal bevare sin integritet og isolering i hele det fuldt udviklede brandforløb.**

For **brandcelleadskillende konstruktioner** kræves, at de skal opfylde deres adskillende funktion i den tid, det tager at evakuere brandcellen og nabobrandcellerne. Det betyder, at konstruktionen **skal bevare sin integritet og isolering i den tid, det tager at evakuere den del af bygningen, hvor brandcellen er og søge efter personer.**

Hvor adskillende bygningskonstruktioner er brandprøvede for **EI-60** kan bygningsdelene anvendes som **brandcelleadskillelse** uden yderligere undersøgelser. Hvis bygningsdelene endvidere er udført af materialer godkendt som A2, s1-d0 og stabiliteten er eftervist, kan bygningsdelene anvendes som **brandsektionsadskillelser** jfr. Eksempelsamling.

Eftervisning af krav om **isolering** kan ske ved **prøvning**, hvor temperaturerne måles på bagsiden af konstruktionen og det vurderes, om temperaturstigningerne ikke overskrider de maximalt acceptable værdier, der er nævnt ovenfor.

Alternativt kan man udføre en **beregning**, der viser, at maksimumstemperaturerne ikke overstiger kravene, inden for den krævede tid.

Eftervisningen af krav om **integritet** kan ske ved **prøvning**, hvor den fuldt belastede konstruktion vises ikke at give anledning til gennemtrængning af brændbare gasser. Jfr. prøvningsstandarderne skal samlinger og vederlag være udført på samme måde ved prøvning som ved anvendelserne.

En beregningsmæssig eftervisning af dette er ofte mere vanskelig. I nogle tilfælde vil det være muligt at udføre beregninger af udbøjninger, der viser, at de vil være så små, at det er oplagt, at der ikke vil dannes revner og sprækker, som kan give anledning til gennemtrængning af brandbare gasser i den krævede tid. Sådanne betragtninger kan endvidere støttes af erfaringer med de pågældende konstruktioner fra virkelige brande.

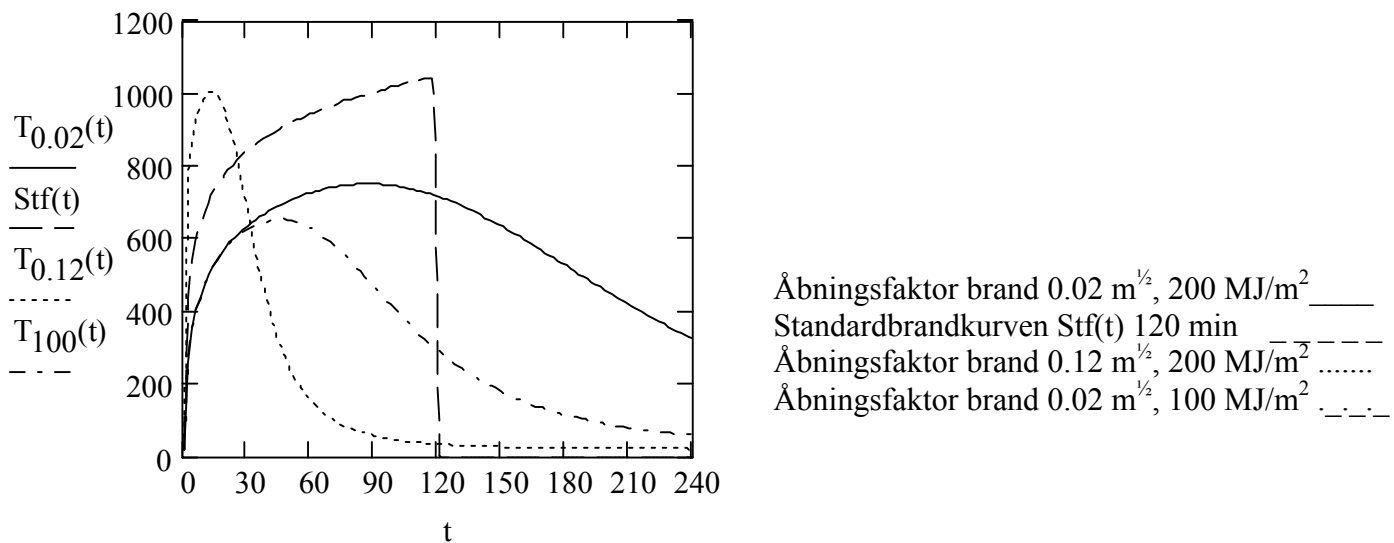
Det vil dog være en forudsætning, at der ikke kan ske lokal nedbrydning af konstruktionen som følge af andre forhold eksempelvis svigt af forbindelser i sammensatte konstruktioner eller eksplosiv afskalning af beton. I sådanne tilfælde bør en eftervisning af disse forhold indgå i dokumentationen.

Hvis der forligger forsøgsresultater for enkelte brande kan man ved enkle overvejelser og evt. supplerende beregninger **anvende resultaterne på flere tilfælde**. For standardbrandprøvninger er det almindeligt at udstrække anvendelserne til flere spændvidder, understøtningsformer og belastningstilfælde ved sådanne argumenter.

Ved fuldt udviklede brande kan man naturligvis gøre det samme med samme argumentation.

Specielt for de fuldt udviklede brandforløb, er dog, at de er forskellige, og det vil naturligvis være urealistisk at gennemføre prøvninger for et stort antal brandbelastninger og åbningsfaktorer.

Imidlertid kan man forholdsvis enkelt reducere antallet af tilfælde betragteligt. En af måderne at gøre dette på er at anvende betragtninger om **indhylningsbrandkurver**. Det betyder, at hvis man ved en prøvning eller en beregning kan påvise, at en konstruktion opfylder nogle krav til bæreevne, integritet eller isolering i en given tid af et fuldt udviklet brandforløb, kan man umiddelbart slutte, at den også vil opfylde de samme krav i den samme tid, når den påvirkes af en brand, hvis temperatur-tidskurve falder inden for den prøvede eller beregnede i det givne tidsrum.



At dette er rigtigt ses umiddelbart, idet alle temperaturer ethvert sted i konstruktionen vil være mindre end ved prøvningen til ethvert tidspunkt. Derfor vil bæreevnen være større i alle snit og de termiske tøjninger og krumninger være mindre, ligesom tilvæksten i de spændingsrelaterede tøjninger og krumninger som følge af brandpåvirkningen vil være mindre i ethvert snit til ethvert tidspunkt. Derfor vil deformationer som følge af branden være mindre overalt i konstruktionen.

Deraf følger at hverken bæreevne eller isolering eller integritet kan blive ringere end ved prøvningen, hvis temperatur-tidskurven for branden ligger inden for prøvningskurven. Det betyder at:

Hvis krav til bæreevne, isolering eller integritet er opfyldt til en given tid eller for et helt parametrisk brandforløb, vil de samme krav også være opfyldt for alle parametriske brande med lavere temperaturer frem til den samme tid eller i hele brandforløbet.

På figuren er kurven for $0.02 \text{ m}^{1/2}$, 200 MJ/m^2 et eksempel på en indhylningskurve for branden bestemt ved $0.02 \text{ m}^{1/2}$, 100 MJ/m^2 .

Ved brandteknisk dimensionering vil brandbelastningen typisk fastsættes ud fra en statistik, hvorimod flere åbningsfaktorer kan være mulige for samme brandcelle. Ændringer kan ske som følge af ombygning f.eks. montering af skodder, men også som følge af, at glas i moderne ruder er tykkere og har flere lag end tidligere, hvorfor forudsætningen om, at alt glas springer ved brand begynder at være mere tvivlsom.

Betonkonstruktioners isolering og integritet

Som vist andetsteds i notatet, vil bæreevnen for betonkonstruktioner altid være mest påvirket af brande med de mindste åbningsfaktorer, og derfor anbefales at man anvender værdien $0.02 \text{ m}^{1/2}$, hvis man ikke kan dokumentere andet.

Af beregningerne ses også, at de maksimale temperaturer i beton i dybder på bare 30 mm og derover altid vil være størst for de mindste åbningsfaktorer.

Det betyder at, hvis et krav til isolering er eftervist for en betonkonstruktion for et helt parametrisk brandforløb, vil det også være opfyldt for alle hele brandforløb med større åbningsfaktorer og samme brandbelastning.

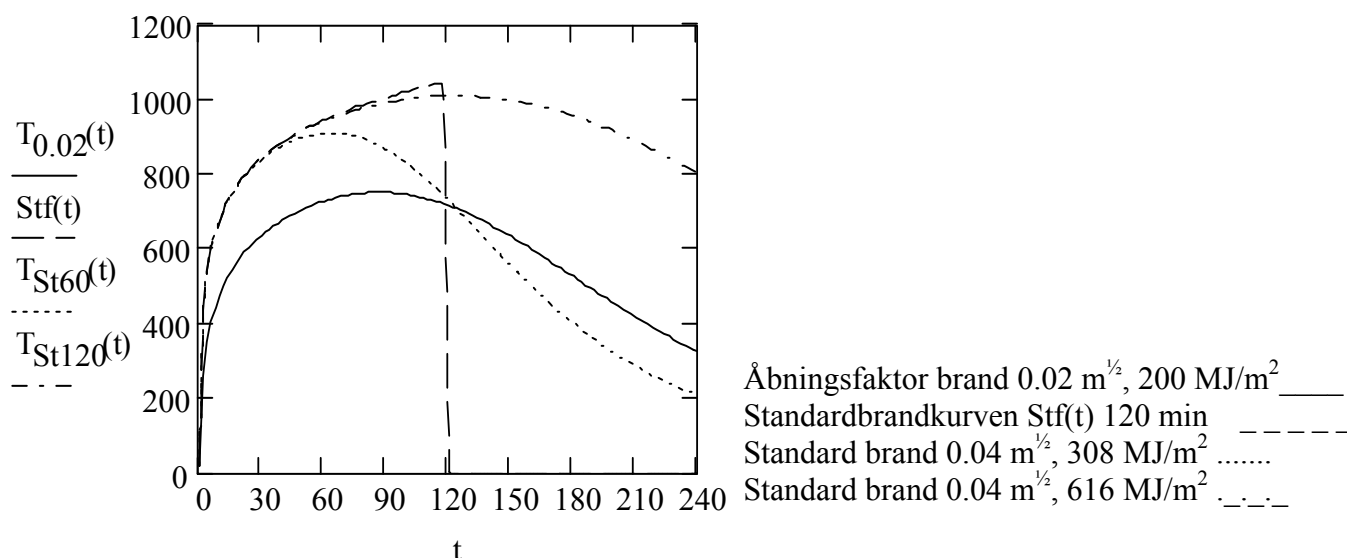
Derimod kan man ikke altid slutte noget om relationen ved faste tidspunkter, da de maksimale temperaturer i de enkelte punkter forekommer tidligere jo større åbningsfaktoren er.

Dog kan man umiddelbart se, at for en betonkonstruktion kan et krav til isolering anses for eftervist ved prøvning eller beregning for et helt parametrisk brandforløb, hvis det udstrækkes mindst til det tidspunkt, hvor de maksimale temperaturer forekommer på konstruktionens bagside. Eftervisningen gælder samtidig for alle brande med større åbningsfaktorer og samme brandbelastning.

Med hensyn til integritetskrav kan en hurtig brand med stor åbningsfaktor forårsage en eksplosiv afskalning, der kan betyde et integritetssvigt for en betonkonstruktion, hvor en langsom brand med lille åbningsfaktor ikke vil føre til dette. Man må derfor forudsætte, at konstruktionen ikke er udført af et materiale, der har risiko for eksplosiv afskalning, hvis man skal slutte noget om integritet ved større åbningsfaktorer. Dette kan man forudsætte for indendørs konstruktioner for alle traditionelle betonkvaliteter, der ikke er tætnet med partikler mindre end cementkornene såsom mikrosilica eller kalkfiller. For andre betonkvaliteter kan man udføre en afskalningstest som beskrevet af f.eks. Hertz og Sørensen [29] for et fugtindhold på 3 vægt % svarende til det maksimale for indendørs konstruktioner. Evt. kan man søge at afhjælpe problemet ved at tilføre plastfibre og dokumentere effekten med afskalningstesten.

Hvis man på denne måde kan forudsætte, at eksplosiv afskalning ikke er et problem, kan man slutte, at de maksimale temperaturer gennem hele brandforløbet vil være størst for de mindste åbningsfaktorer i de dybder, hvor betonen ikke er skadet.

Da konstruktionernes termiske deformationer skyldes termisk udvidelse og spændinger som følge af hindret termisk udvidelse, kan det slutes, at bidraget til udbøjninger fra de termiske deformationer vil være størst for de mindste åbningsfaktorer.



Tilsvarende kan man slutte, at svækkelserne og reduktionerne i elasticitetsmoduler samt de transiente tøjninger vil øges med temperaturen. Og da temperaturen er størst for de mindste åbningsfaktorer i alle punkter af konstruktionen inden for den yderste skadede zone, vil forøgelsen af de statiske udbøjninger som følge af brandpåvirkningen være størst for de mindste åbningsfaktorer. Derfor kan man konkludere, at:

Et krav til isolering eller integritet for en betonkonstruktion kan anses for eftervist ved prøvning eller beregning for et helt parametrisk brandforløb, hvis det udstrækkes mindst til det tidspunkt, hvor de maksimale temperaturer forekommer på konstruktionens bagside.

Eftervisningen gælder samtidig for alle brande med større åbningsfaktorer og samme brandbelastning såfremt det eftervises, at betonen ikke kan skades af eksplosiv afskalning.

Der findes et stort antal dokumenterede resultater fra standardbrandforsøg, fordi standardbrandkravene har været fremherskende i mange år. En standardbrandpåvirkning på 60 minutter svarer til de første 60 minutter af en åbningsfaktorbrand med åbningsfaktor $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 308 MJ/m^2 omsluttende overflade. Og en standardbrandpåvirkning på 120 minutter svarer til åbningsfaktor $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 616 MJ/m^2 .

I nogle få tilfælde, er der gennemført standardbrandforsøg med afkøling, idet prøvningsstandarden f.eks. ISO834 definerer en sådan. Før 1979 skulle alle prøvninger i Danmark udføres med fuld afkøling, fordi den danske prøvningsstandard DS1051 foreskrev dette.

Hvis det ved prøvning for **60 minutters standardbrand med afkøling** er vist, at kravene til integritet og isolering er opfyldt, vil disse krav dermed også være opfyldt for åbningsfaktorer på $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og derover for alle brandbelastninger op til 308 MJ/m^2 omsluttende overflade.

En parametriske brand med åbningsfaktor $0.02 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 200 MJ/m^2 omsluttende overflade vil ligge inden for denne brandkurve frem til lidt over 120 minutter, hvor den vil skære kurven, men dette er så sent i afkølingsfasen, at maksimaltemperaturerne vil være lavere i alle punkter af en betonkonstruktion, end de tilsvarende for standardbranden med afkøling. Denne sidste påstand ses af tabellen nedenfor.

	60 min St. brand		$0.02 \text{ m}^{1/2}$ 200 MJ/m^2		$0.12 \text{ m}^{1/2}$ 200 MJ/m^2		120 min St. brand
Dybde m	Max T inden for 60 min °C	Max T for hele branden °C	Max T inden for 60 min °C	Max T for hele branden °C	Max T inden for 60 min °C	Max T for hele branden °C	T efter 120 min °C
0.00	846	849	635	688	858	858	975
0.02	476	558	352	483	385	385	653
0.04	256	393	186	356	212	212	427
0.06	131	291	92	273	131	134	276
0.08	64	223	48	213	74	94	174
0.10	36	175	30	171	42	72	105
0.15	21	106	20	107	21	46	35
0.20	20	74	20	76	20	36	22
0.25	20	55	20	54	20	31	20

Temperaturer som funktion af dybden i en dansk betonkonstruktion af hovedgruppen jfr ConTemp Users Guide [32]. Temperaturerne vises som de maksimale, der forekommer inden for 60 minutter og inden for hele brandforløbet for h.h.v en 60 min standardbrand med afkøling og to parametriske brande med brandbelastning 200 MJ/m^2 omsluttende overflade og åbningsfaktorer $0.02 \text{ m}^{1/2}$ og $0.12 \text{ m}^{1/2}$ samt temperaturer efter 120 min standardbrand uden afkøling.

Derfor vil en eftervisning af krav om integritet og isolering for en 60 min standardbrand med afkøling samtidigt være en eftervisning af kravene for alle parametriske brande med brandbelastning 200 MJ/m^2 uanset åbningsfaktor.

Af tabellen kan man endvidere se, at bort set fra afvigelser i dybderne 0.06 m og 0.08 m på højest 10°C , der er uden betydning for betragtningen, så giver en standardbrand på 60 minutter uden afkøling højere eller samme temperaturer i alle punkter, end nogen af de parametriske brande inden for 60 minutter uanset åbningsfaktor.

Det betyder, at

En eftervisning af integritet og isolering ved en 60 minutters standardbrand uden afkøling dokumenterer kravene om brandcelleadskillelse, dvs. integritet og isolering i op til 60 minutter for enhver parametriske brand med brandbelastning 200 MJ/m^2 omsluttende overflade uanset åbningsfaktor.

Endvidere betyder det at

En eftervisning af integritet og isolering ved en 60 minutters standardbrand med afkøling dokumenterer de praktiske krav til en sektionsadskillelse, dvs. integritet og isolering i hele brandforløbet for enhver parametriske brand med brandbelastning 200 MJ/m^2 omsluttende overflade uanset åbningsfaktor.

Ifølge Eksempelsamling kan man ”med erfaringens vægt” eftervise krav om integritet og isolering for såvel brandcelleadskillelse som sektionsadskillelse ved hjælp af en højst 60 minutters standardbrandprøvning uden afkøling. Ovenstående analyse er blot udtryk for, at der er god overensstemmelse for brandcelleadskillelse mellem eksempelsamling og en direkte eftervisning for en brand på 200 MJ/m^2 og åbningsfaktor $0.02 \text{ m}^{\frac{1}{2}}$. Ifølge Eksempelsamlingen er afkøling dog ikke nødvendig for eftervisning af sektionsadskillelser. Beregningen viser at kravet fra tidligere udgaver af BR på 120 minutter stemmer bedre med funktionskravet end det nuværende på 60 minutter, men det er pr. definition lovligt at anvende en 60 minutters eftervisning, også selv om erfaringen her mest kendes for 120 minutter.

Trækonstruktioners isolering og integritet

For træ bliver indbrændingshastigheden (jfr. formlen for limtræ nedenfor) større ved større åbningsfaktorer, hvorfor store åbningsfaktorer giver størst risiko for svigt af integritet og isolering inden for en begrænset tid, i modsætning til hvad der gælder for betonkonstruktioner

$$\beta_L = 1.25 - \frac{0.035}{O + 0.021}$$

Derimod bliver den maksimale indbrændingsdybde som tidligere nævnt størst for de mindste åbningsfaktorer.

Integritetssvigtet sker for trækonstruktioner ved indbrænding, som kan forårsage revner og sprækker samt ved svigt af samlinger og understøtninger. En eftervisning ved beregning eller prøvning i en given tid kortere end den maksimale indbrændingstid, vil også gælde for alle mindre åbningsfaktorer.

Eftervisningen kan endvidere ske ved standardbrandprøvning efter kravene i Eksempelsamling.

Stålkonstruktioners isolering og integritet

For stålkonstruktioner er der typisk tale om et system af bærende ståldele og isolering samt evt. beklædning og fastholdelse deraf. Svigt af isolering og integritet kan typisk forekomme fordi beklædning og isolering falder af eller på grund af nedbøjninger. Eftervisning kan ske ved en beregning eller prøvning, hvor samlinger og understøtninger og isolering og beklædning udføres som i praksis.

Konklusionen er derfor for alle konstruktionsmaterialer

Krav til integritet og isolering kan eftervises med en troværdig beregningsmodel eller ved hjælp af en EI-60 test for både brandcelle- og sektionsadskillelse eller evt. ved en test for den pågældende fuldt udviklede brand.
I alle tilfælde skal forholdene ved vederlag og samlinger, isolering og beklædning være i overensstemmelse med forholdene i praksis.

For at en beregningsmodel skal være ” troværdig ” skal den dels tage alle relevante parametre i regning og dels være evalueret enten ved en logisk sammenhængende udledning eller ved sammenligning med fuldskala observationer.

Alle relevante parametre omfatter specielt ved integritet at der redegøres for kraftforløbet hele vejen fra belastning til understøtning og at udbøjninger og sammenhænge af komponenter og samlinger vurderes.

Referencer

- 1 Erhvervs- og Boligstyrelsen: Bygningsreglement Tillæg nr. 8. juni 2004 og 14 af 1. april 2006 samt vejledningerne Information og Eksempelsamling.
- 2 ASTM: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials ASTM E119.
- 3 Dansk Standard: Brandprøvning. Bygningsdeles modstandsevne mod brand DS1051.
- 4 International Standardisation Organisation: Fire-resistance tests - Elements of building construction. ISO 834.
- 5 CEN: Fire resistance tests. EN 1363.
- 6 Dansk Standard: Norm for last på konstruktioner. DS 410.
- 7 CEN: Eurocode 1: Actions on structures. EN 1991.
- 8 Hertz, K.D.: "Concrete Strength for Fire Safety Design." Magazine of Concrete Research. Vol.57, No.8. October 2005, pp.445-453.
- 9 Hertz, K.D.: "Reinforcement Data for Fire Safety Design." Magazine of Concrete Research. Vol.56, No.8, October 2004, pp. 453-459.
- 10 Hertz, K.D.: "Quenched Reinforcement Exposed to Fire." Magazine of Concrete Research. Vol.58, No.1. February 2006, pp.43-48.
- 11 Nilsson, L.: "Brandbelastning i bostadslägenheter," Statens Institut för Byggnadsforskning, Rapport R34, 1970. Dtockholm 1970.
- 12 Berggren, K. Erikson, U.: "Brandbelastning i kontorhus. Statistisk inventering och utvärdering." Stålbyggnadsinstitutet, Rapport 18:1. Stockholm 1970.

- 13 Forsberg, U. Thor, J.: "Brandbelastningsstatistik för skolor och hotell." Stålbyggnadsinstitutet, Rapport 44:1. Stockholm 1971.
- 14 Pettersson, O. Magnusson, S.E. Thor, J.: "Brandteknisk dimensionering av stålkonstruktioner." (Swedish edition of [15]). Publikation 38, Stålbyggnadsinstitutet. Stockholm 1974.
- 15 Pettersson, O. Magnusson, S.E. Thor, J.: "Fire Engineering Design of Steel Structures." (English edition of [14]). Bulletin 52, Publication 50. Swedish Institute of Steel Construction. Stockholm 1976.
- 16 CEN: ENV 1992-1-2. Design of Concrete Structures; General Rules, Structural Fire Design. CEN Management Centre, Brussels 1994 and March 2004.
- 17 Dansk Standard: Norm for betonkonstruktioner. DS411, version 4.1. Danish Standardisation Organisation, 1999.
- 18 Hertz, K.D.: "Analyses of Prestressed Concrete Structures Exposed to Fire." Report 174. Institute of Building Design now: Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. Lyngby 1985, 152 p. CIBW14/88/49(DK). CIB Conference in Kyoto, June 1988
- 19 Hertz, K.D.: Assessment of Performance-based Requirements for Structural Design. Proceedings of the 8th International Symposium on Fire Safety Science, Beijing 18-23 September 2005. pp. 315-326. International Association for Fire Safety Science, Baltimore 2005.
- 20 DS/ISO/TR 13387:2000: Funktionsbaserede brandkrav (Fire Safety Engineering). ISO 2000.
- 21 BSI DD240 Part 1:1997 Fire Safety Engineering in Buildings Part 1. Guide to the application of fire safety engineering principles. British Standards 1997.

- 22 CIB W14 Workshop: A Conceptual Approach towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety, 1983.
- 23 CEN: EN 1991-1-2 Actions on Structures. Part 1-2 General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire. November 2002.
- 24 Erhvervs- og Byggestyrelsen: Bygningsreglement Tillæg nr. 14. April 2006.
- 25 Dansk Standard: DS409 Norm for sikkerhedsbestemmelser for konstruktioner. ver. 2.1. 1999.
- 26 Dansk Standard: DS409 Norm for sikkerhedsbestemmelser for konstruktioner. Høringsudgave 2005.
- 27 Dansk Standard: Norm for trækonstruktioner. DS413, version 5.1. Danish Standardisation Organisation, 1999.
- 28 Hadvig, S.: Charing of Wood in Building Fires. Technical University of Denmark Press, Lyngby 1981.
- 29 Hertz, K.D. Sørensen, L.S.: Test Method for Spalling of Fire Exposed Concrete. Fire Safety Journal Vol.40, No.5, pp.466-476. Elsevier Science Ltd. July, 2005.
- 30 Hertz, K.D.: Application of Idealized Materials Data for Calculation of Fire Exposed Concrete Constructions. Proceedings of ASCE-SFPE Conference "Designing Structures for Fire" Baltimore September 2003. pp.147-153.
- 31 Kirby, B.R. Wainman, D.E. Tomlinson, T.L. Kay, T.R. Peacock, B.N.: Natural Fires in Large Scale Compartments. June 1994.
- 32 Hertz, K.D.: Users Guide for the program ConTemp. 2. Edition December 2006. 20p.

Appendix 1.

Brandbelastninger fra forskellige kilder.

Som nævnt i afsnittet ”Fastlæggelse af designbrande for konstruktioner” anvendes i denne vejledning værdier fra statistiske undersøgelser foretaget i Sverige af Nilsson [11], Berggren og Erikson [12] og Forsberg og Thor [13] i forbindelse med udarbejdelsen af den omfattende **svenske brandtekniske design guide** for stål konstruktioner Pettersson et al [14], [15].

Herudfra kan man se, at 80% af lejligheder med 3 rum har en brandbelastning på under 148 MJ/m^2 , lejligheder med 2 rum 168 MJ/m^2 . Værdierne er som følger:

Boliger 2 rum	168 MJ/m^2
Boliger over 3 rum	148 MJ/m^2
Tekniske kontorer	140 MJ/m^2
Hospitaler	140 MJ/m^2
Skoler	110 MJ/m^2
Hoteller	80 MJ/m^2

Ud fra disse værdier har forfatteren indført en simpel regel i den danske lastnorm [6] om at man kan anvende en brandbelastning på **200 MJ/m^2** uden yderligere dokumentation for boliger, kontorer, hospitaler, skoler og hoteller, der er anvendt i denne vejledning.

Imidlertid kan man forskellige steder se forskellige bud på brandbelastninger, hvorfor dette emne diskuteres i dette appendix.

Bagest i **Information til Bygningsreglementet** fra 2004 findes som Bilag 1.12 Inddata en tabel over brandbelastninger opgjort som gennemsnitlige værdier og som 80- 90- og 95% fraktiler.

Tabellen stammer fra DS/ISO/TR 13387:2000: Funktionsbaserede brandkrav [20], der igen stammer fra BSI DD240 Part 1:1997 ”Fire Safety Engineering in Buildings Part 1. [21], der viser den samme tabel med angivelse af, at den viser værdier for fuldstændig forbrænding og fastslår, at man skal bruge 80% fraktilen som den karakteristiske værdi til design formål. Endelig oplyses det, at tabellen stammer fra CIB W14 Workshop rapporten ”A Conceptual Approach towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety” fra 1983 [22].

Hvis man omregner tabellens værdier fra m^2 gulv til m^2 omsluttende overflade, og husker på, at for boliger vil de mindste lejligheder være mest kompakt indrettede og have den største brandbelastning pr. m^2 omsluttende overflade, får man følgende overensstemmelse mellem tabelværdierne og den svenske statistik:

Boliger: $870/3.95 = 220 \text{ MJ/m}^2 \sim 200 \text{ MJ/m}^2$,
(et værelses bolig $3.6 \times 7.8 \times 2.40 \text{ m}^3$)
Kontorer: $570/3.95 = 144 \text{ MJ/m}^2 \sim 140 \text{ MJ/m}^2$,
Hospitaller: $350/2.46 = 142 \text{ MJ/m}^2 \sim 140 \text{ MJ/m}^2$,
(Brandcelle som f.eks. $18 \times 48 \times 3 \text{ m}^3$).
Skoler: $360/3.6 = 100 \text{ MJ/m}^2 \sim 110 \text{ MJ/m}^2$,
(Brandcelle som f.eks. $6 \times 12 \times 3.2 \text{ m}^3$)
Hoteller: $400/3.95 = 101 \text{ MJ/m}^2 \sim 80 \text{ MJ/m}^2$.

Hvilket er en tilfredsstillende overensstemmelse.

I Eurocodens lastnorm EN1991-1-2 [23] findes også værdier for brandbelastningen pr. m^2 gulv til $948 \times 1.1 \times 1.0 \times 0.8 = 834 \text{ MJ/m}^2$ gulv for små lejligheder på 25 m^2 , der svarer meget godt til de foreslåede 200 MJ/m^2 omsluttende overflade, hvor faktoren 1.1 (der kaldes " δ_{q1} " i normen) øges med størrelsen af brandcellen. Denne faktor tager hensyn til at risikoen for antændelse øges med størrelsen, hvilket er irrelevant for en åbningsfaktormetode, da man her har forudsat overtænding og således på den sikre side har antaget at alt antændes med det samme. Faktoren 0.8 kaldes " m " og tager hensyn til, at ikke alt forbrænder fuldstændigt. Eurocoden har ikke opdaget, at små lejligheder generelt er mere kompakt indrettet end de store, men også den angiver 80% fraktilen som designværdien.

Belastningerne fra EN1991-1-2 bliver derefter i MJ/m^2 gulv hvor der er sammenlignet med tallene i informationen:

Boliger $834 < 870 \text{ MJ/m}^2$ gulv
Kontorer $495 < 570 \text{ MJ/m}^2$ gulv
Hospitaller $271 < 350 \text{ MJ/m}^2$ gulv
Skoler $336 < 410 \text{ MJ/m}^2$ gulv
Hoteller $365 < 400 \text{ MJ/m}^2$ gulv

For at få en holdning til de angivne værdier og for at kontrollere, om de stadig vil være aktuelle, har forfatteren iværksat en **mini statistik** ved at stille opgaven at beregne brandbelastningen hjemme hos deltagerne i kurset Anvendt Brandteknik i foråret 2006 på Masteruddannelsen i Brandsikkerhed.

Ved den lejlighed er der gennemregnet 15 boliger, og de studerende fik indtryk af, hvor stort et arbejde, det er at opgøre en brandbelastning. Desværre er der kun to resultater for 2 rums boliger, hvoraf den ene i kommentarerne anfører, at han er en "minimalist" med meget få ubrændbare møbler boligen. Dette opvejes tilfældigvis af det andet eksempls forholdsvis store brandbelastning.

Rooms	Floor	Enclosure	Opening Factor	Fire Load Total	Fire Load /Floor	Fire Load /Enclosure	80% Fractile
	m ²	m ²	m ^{1/2}	MJ	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²
2	46	139	0.06	28.400	617	204	174
2	65	244	0.08	13.122	202	54	
3	52	194	0.07	17.970	346	93	
3	58	250	0.04	22.300	384	89	
4	80	256	0.04	31.500	394	123	
4	120	369	0.06	24.022	200	65	
4	154	530		79.853	519	151	
5	82	574	0.09	84.600	1.032	147	
5	100	304		20.520	205	68	
5	148	304	0.07	41.000	277	135	
5	150	430	0.07	24.120	161	56	
5	165	289	0.09	40.150	243	139	
6	220	323	0.07	65.000	295	201	
7	234	498	0.07	46.430	198	93	
8	200	446		85.940	430	193	149
15	Average Fire Load				367	121	159
	Standard deviation				218	50	

Resultat af opgørelse af brandbelastning i 15 boliger i Danmark foråret 2006.

Selv om det statistiske grundlag er lille, ses en god overensstemmelse med de svenske værdier for 80% fraktilen på 174 MJ/m² mod de svenske 168 MJ/m² for 2 rums boliger og for større boliger 149 MJ/m² mod de svenske 148 MJ/m².

Baseret på de foreliggende data kan man umiddelbart konkludere, at værdierne, som de fremgår af den svenske statistik også er relevante for situationen i Danmark i dag, og at der ikke er væsentlige afvigelser mellem disse og de øvrige tilgængelige data om emnet.

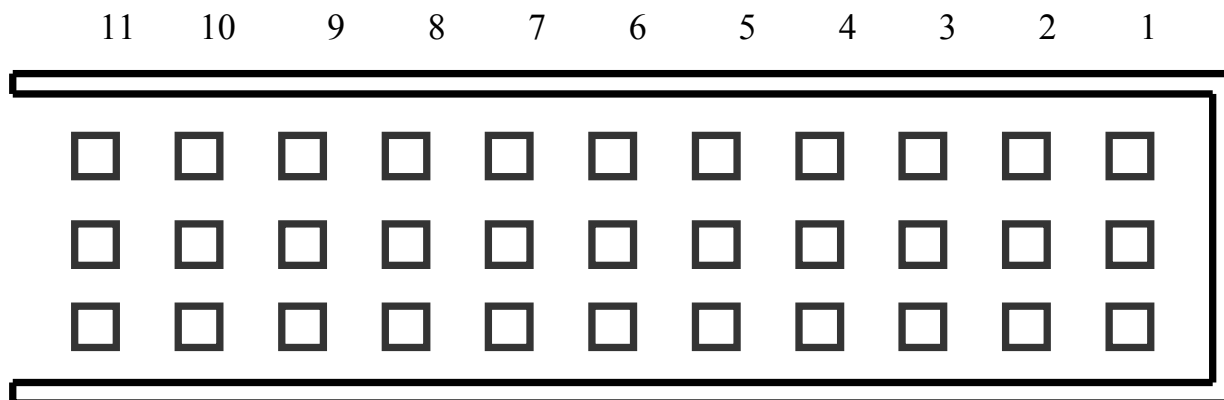
Derfor er det holdbart at anbefale en konservativ designværdi på 200 MJ/m² omsluttende overflade for boliger, kontorer, hospitaler, skoler og hoteller.

Appendix 2

Fuldt udviklede brande i store flade brandceller

Som omtalt under åbningsfaktormetoden er dens grundlag kun umiddelbart indlysende for begrænsede gulvarealer, der i denne sammenhæng angives for op til 200 m². Det er imidlertid nødvendigt at forholde sig til, hvad der sker for større arealer med begrænset lofthøjde, da sådanne arealer ofte benyttes til kontorlandskaber og til produktionsvirksomheder.

For at eftervise, hvad der sker, har British Steel og Fire Research Station udført 9 fuldskalatest i faciliteten i Cardington. Forsøgene er beskrevet detaljeret i rapporten "Natural Fires in Large Scale Compartments" [31].



Der er bygget et rum med indvendig længde 22.855 m, bredde 5.595 og højde 2.750 m bestående af letbeton vægge og loft beklædt indvendig med keramisk fiber uld. Ved et enkelt forsøg nr. 8 blev der opsat gipsbeklædning i stedet.

Rummet er udformet således, at det med sine velisolerede vægge kan tænkes at udgøre den halve bredde af en etage i en 46 m bred og uendelig lang bygning.

På gulvet ligger løst sand og en brandbelastning bestående af 11 rækker med 3 krybbe bål på 1m x 1m i hver række. Brandbelastningen varieredes mellem 20 og 40 MJ/m² gulv. Åbningen i enden er enten helt fri eller reguleres med letbeton blokke til halv, kvart eller en ottendedel størrelse.

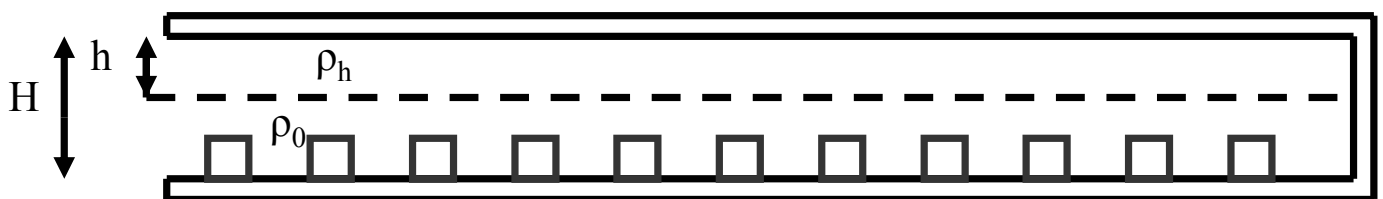
Ved forsøgene på nær 7 og 9 antænder man krybbe bålene inderst i brandrummet, for at se, hvordan brandforløbet bliver, når det breder sig på midten af et stort areal, og temperaturerne måles 30 cm fra loftet ved række 2 inderst, 6 på midten og 10 yderst. Ved alle disse forsøg blusser branden op kortvarigt inderst, hvorved den antænder bålene længere ude samtidig med at den dør ud inderst. Efter at de yderste rækker er brændt ud, kan ilten fra åbningen nå længere ind, og her breder branden sig så indad igen, indtil disse områder er brændt. Dette forekommer at være et signifikant resultat. Ved forsøg nr. 9 antændtes alle bålene med det

samme. Der skete det forventelige, at branden hurtigt dør ud inderst på midten af bygningen og brænder færdig yderst, hvorpå den breder sig indad mod midten.

Ved forsøg nr. 7 afskar man brandrummet til en kvadratisk grundplan, for at se afvigelsen mellem den idealiserede åbningsfaktorbrand og forsøgets brand.

Åbningsfaktorbranden beregnes ud fra en forudsætning om, at temperaturen er konstant i brandrummet, hvor den naturligvis vil være højere 30 cm under loftet, hvor temperaturerne målt ved forsøget.

For at se overensstemmelsen mellem forsøg og teori, beregnes temperaturen af de varme gasser ved en overtændingsbrand.



Tværsnit i forsøg med højde af varm zone h.

Højden h af den varme zone bestemmes ud fra hele højden H som

$$h + h \frac{\rho_h}{\rho_0} = H \Leftrightarrow h = \frac{H}{\left(1 + \frac{\rho_h}{\rho_0}\right)}$$

hvor ρ_h og ρ_0 er densiteten af luften i den varme og den kolde zone, hvor

$$\rho_0 = 1.20 \text{ kg/m}^3 \quad \text{og} \quad \rho_h = \frac{353}{(273 + T_h)} \text{ kg/m}^3$$

og hvor T_h er temperaturen i den varme zone. T_h findes da af T_d for hele brandrummet af ligningen

$$T_h = T_d \left(1 + \frac{353/1.20}{273 + T_h}\right)$$

der efter nogen reduktion giver udtrykket

$$T_h = \frac{T_d - 273 + \sqrt{T_d^2 + 1718T_d + 74529}}{2}$$

I det følgende er både design temperaturen T_d beregnet for åbningsfaktorbranden og varmzonetemperaturen T_h vist til sammenligning med de målte temperaturer.

De termiske egenskaber for overfladerne beregnes for de inderste overflader, idet det er dem, der væsentligst har betydning for brandens udvikling. I den Europæiske lastnorm [7] beregnes berøringstallet "b" fejlagtigt som middelværdien for alle lag i en væg, hvorfor testrapportens beregning af berøringstallet er forkert, og de beregnede parametriske brande er fejlagtige. Desuden anvender testrapporten også de åbenlyst forkerte udtryk for afkølingsfasen, som også findes i [7], hvorfor de beregnede afkølingsfaser er helt misvisende. I denne vejledning anvendes i stedet forfatterens udtryk fra den danske lastnorm [6], som også er vist i afsnittet om åbningsfaktormetoden. De termiske egenskaber for overfladerne er opgivet i testrapporten til:

	Densitet	Varmeledn	Varekapacitet	Berøringstal
	ρ	λ	c_p	b
	kg/m ³	W/mK	J/kgK	Ws ^{1/2} /m ² K
Keramisk fiber	128	0.020	1130	53.8
Gipsplader	900	0.24	1250	520
Løst sand	1750	1.00	800	1183

Brandrummet er meget velisoleret ved de fleste test, hvor der bruges keramisk fiber på vægge og loft set i forhold til normale kontorlandskaber, hvis forhold må antages at svare bedre til Test 8, hvor der er anvendt gipsbeklædning. .

I Test 7 er der etableret et mindre brandrum med en kvadratisk grundflade på 5.6 x 5.6 m med en åbning på 1/4 af bredden og brandbelastningen 20 kg træ pr m² gulv. Denne test kan derfor tjene som en reference, idet den kan opfattes som en brandcelle på 31 m², der klart vil kunne beregnes med en parametrisk brand jfr. alle normer.

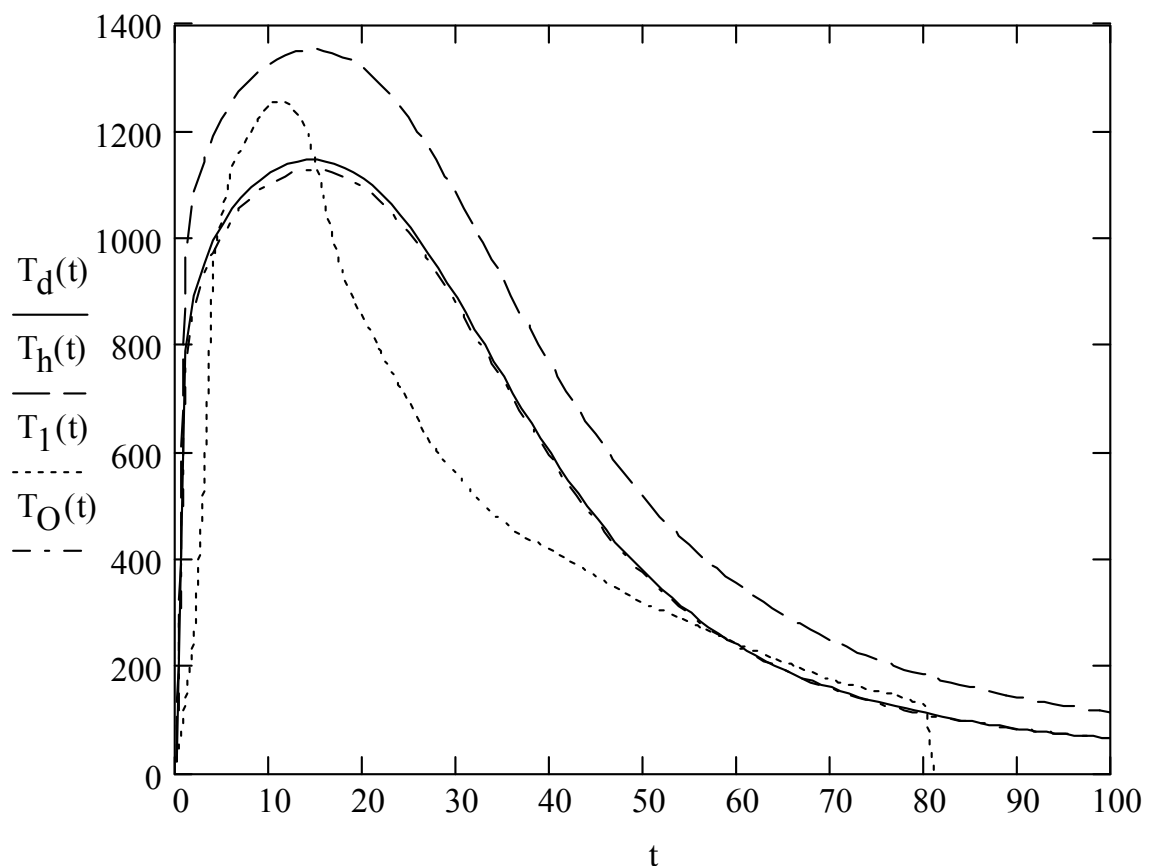
Den parametriske brand $T_O(t)$ bestemmes for dette brandrum, hvor den omsluttende overflade bliver 124 m², brandbelastningen pr m² heraf 96 MJ/m², åbningsfaktoren 0.05 m^{1/2} og berøringstallet 339 Ws^{1/2}/m²K. Endvidere beregnes den parametriske designbrand $T_d(t)$, som man vil finde for et større fladt rum, hvor man antager at der er symmetri i de tre vægge. I dette tilfælde regnes de spejlende vægge ikke med i hverken berøringstal eller den omsluttende overflade, da væggene ikke ville være der i virkeligheden. Det giver en omsluttende overflade på 78.0 m², en brandbelastning pr m² heraf på 153 MJ/m², åbningsfaktoren 0.08 m^{1/2} og berøringstallet 507 Ws^{1/2}/m²K.

Test 7

20 kg/m² floor 1/4 Opening 1/4 Length Ignition at once

$$L = 5.595 \text{ m} \quad B = 5.595 \text{ m} \quad H = 2.750 \text{ m} \quad w = 1.370 \text{ m} \quad h = 2.750 \text{ m}$$

$$q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 153 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.08 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 507.1 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Det ses, at de to parametriske brande er stort set ens, hvad der også er forventeligt, idet de velisolerede vægge udgør flader med meget ringe varmeudveksling og dermed en god overensstemmelse med forudsætningen om symmetri. For de øvrige tests vises herefter kun designbranden svarende til symmetribetragtningen og svarende til det store flade rum, som ønskes undersøgt med de øvrige tests. Temperaturerne, som målt 30 cm under loftet er vist med den prikkede kurve, og varmzone temperaturerne svarende til det parametriske brandforløb er vist stiplet, hvor designkurven, der regner temperaturen konstant over brandrummet, vises fuldt optrukket. Det ses, at de aktuelle temperaturer falder inden for de beregnede og ligger på et niveau mellem de to kurver. At volumenet af de beregnede kurver forekommer større kan muligvis skyldes, at hele brandværdien på 19 MJ/kg træ sjældent frigøres ved en virkelig brand. Det væsentligste resultat er at vise hvordan

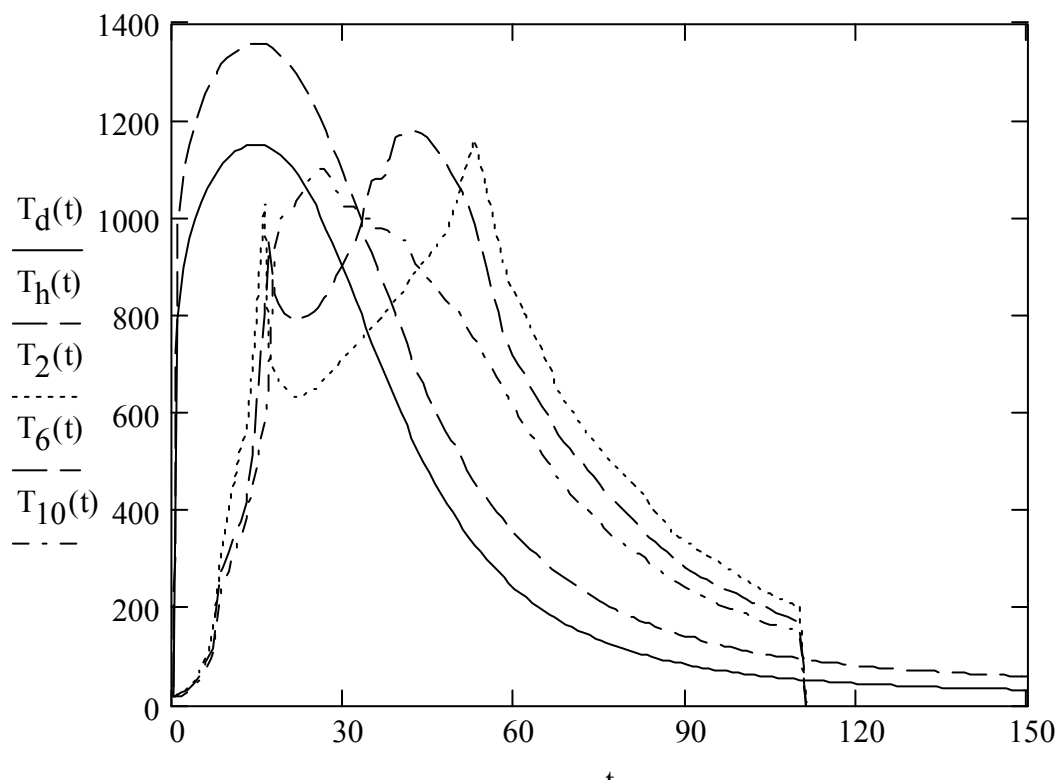
de afvigelser ser ud, som man vil have for temperaturer under loftet og i gennemsnit, når man anvender en parametrisk brand på en brandcelle af normal og acceptabel størrelse. Endvidere ses, at en parametrisk brandpåvirkning i et højisoleret rum kan være noget på den usikre side under loftet for lette ubeskyttede stålkonstruktioner, der let følger brandtemperaturen. Dette er forholdsvis indlysende, og figuren viser, hvor meget det kan dreje sig om.

Test 2

20 kg/m² floor 1/1 Opening

$$L = 22.855 \text{ m} \quad B = 5.595 \text{ m} \quad H = 2.750 \text{ m} \quad w = 5.595 \text{ m} \quad h = 2.75 \text{ m}$$

$$q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 179 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.094 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



For at se effekten af et stort rum, kan Test 7 sammenlignes med Test 2, hvor eneste forskel er at rummet nu er gjort 4 gange dybere og åbningen fire gange bredere til fuld bredde.

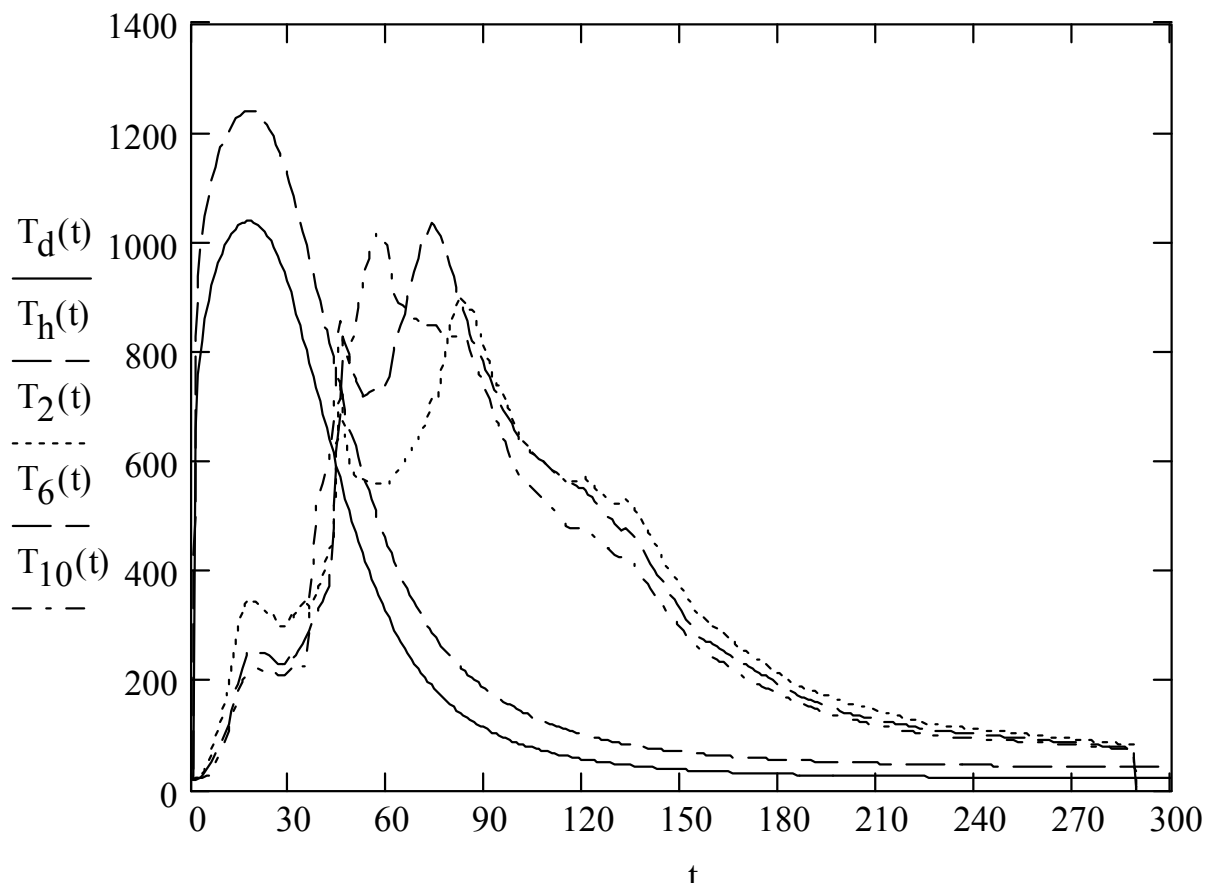
Man ser tydeligt hvordan branden i linie 2 inderst meget hurtigt dør ud, for at blusse op til sidst. Hvis man forestiller sig de parametriske brandkurver for T_d og T_h parallelforskudt, så de begyndte samtidigt med den registrerede brand, ses at det ikke vil være mere usikkert eller unøjagtigt at benytte dem som designmodeller for denne brand, end det vil være for det lille brandrum. Dette gælder for alle tre steder, som er vist hhv. i linie 2, 6 og 10.

Test 8

20.6 kg/m² floor 1/1 Opening, Plaster Board

$L = 22.78 \text{ m}$ $B = 5.465 \text{ m}$ $H = 2.680 \text{ m}$ $w = 5.065 \text{ m}$ $h = 2.68 \text{ m}$

$$q_f = 391.4 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 185 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.0843 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 833 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Test 2 kan med fordel sammenlignes med Test 8, idet eneste forskel er at vægge og lofter nu er beklædt med gipsplader, hvorved berøringstallet er øget fra 587 til 833. Dog er brandbelastningen også øget en smule fra 20 til 20.6 kg træ pr m² gulv fordi brandrummet og dermed gulvarealet er blevet lidt mindre svarende til

tykkelsen af gipsbeklædningen. Man ser nu nogle væsentligt lavere temperatur tids kurver, der alle forekommer sammenlignelige med kurverne for de gennemsnitlige temperaturer T_d , hvis man forestiller sig, at de parallelforskydes. Det betyder, at for en sådan mere normal brandcelle, vil det ikke være på den usikre side at anvende en parametrisk brand for lette uisolerede stålkonstruktioner. For de tungere stålkonstruktioner, trækonstruktioner og betonkonstruktioner vil afhængigheden af de maksimale temperaturer i brandrummet være væsentligt mindre, som det er vist i denne vejledning, hvorfor der for disse konstruktioner ikke kan være noget problem i at anvende de parametriske designkurver for et fladt rum med et stort gulvareal hverken hvis de er velisolerede eller har normale beklædninger.

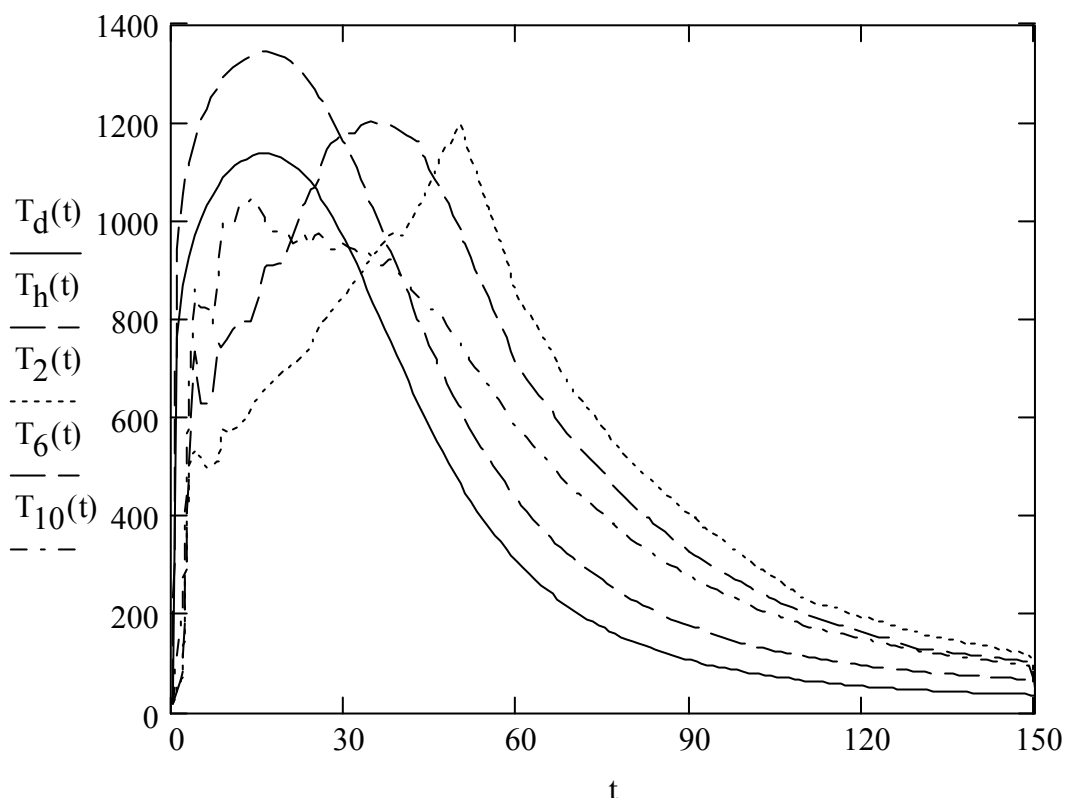
Brandbelastningen ved Test 2 og 8 på omkring 180 MJ/m^2 omsluttende overflade for designbranden har et niveau, som ligger noget over det, man kan regne med i et kontor, hvorfor brandforsøgene, også hvad det angår, dækker forholdene for kontorlandskaber.

Test 9

20 kg/m² floor 1/1 Opening Ignition at once

$L = 22.855 \text{ m}$ $B = 5.595 \text{ m}$ $H = 2.750 \text{ m}$ $w = 5.065 \text{ m}$ $h = 2.75 \text{ m}$

$$q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 179 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.085 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



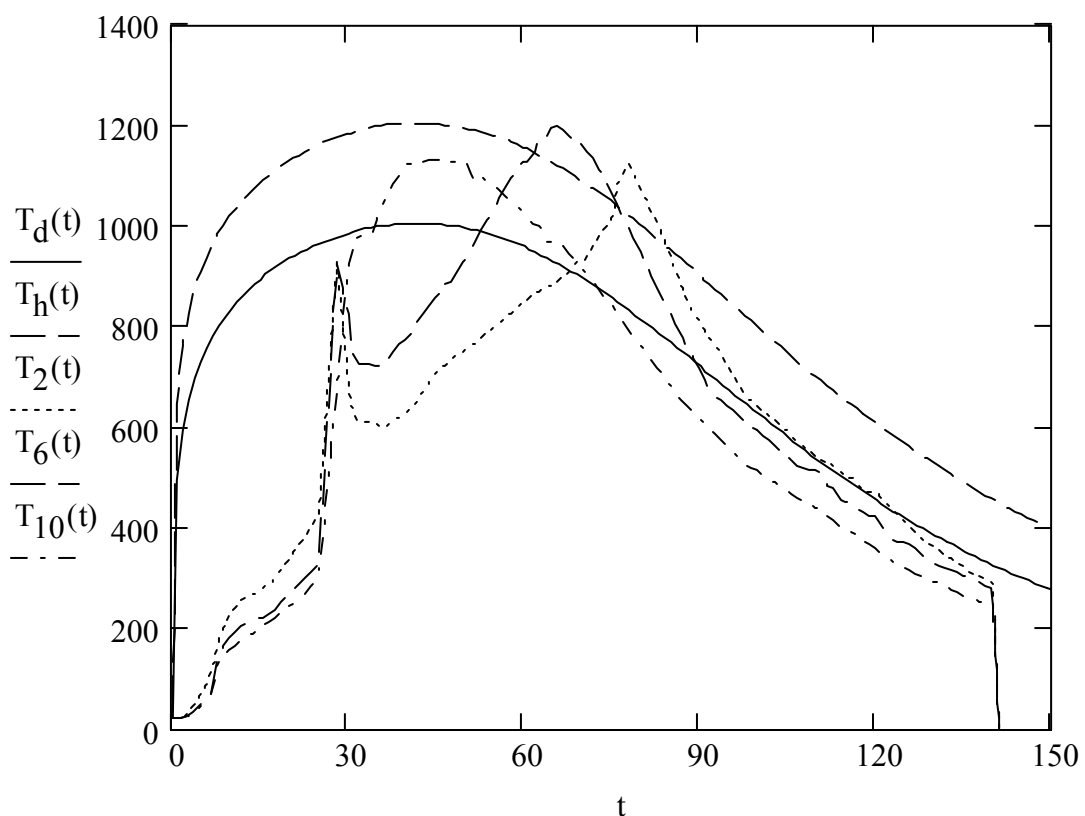
Det kan også være relevant at sammenligne Test 2 med Test 9, hvor forskellen er, at man i Test 9 antænder hele brandrummet med det samme. Man ser klart, at branden først dør ud igen inderst i brandrummet jfr. kurven for linie 2 og midt i rummet jfr. linie 6, hvorpå branden breder sig indad, efterhånden som brandbelastningen opbruges yderst. Det er altså principielt samme billede som for Test 2, blot er de yderste dele antændt noget før. Konklusionen om den parametriske brands egnethed ses ikke at ændres derved.

Test 3

20 kg/m² floor 1/2 Opening

$$L = 22.855 \text{ m} \quad B = 5.595 \text{ m} \quad H = 2.750 \text{ m} \quad w = 5.195 \text{ m} \quad h = 1.47 \text{ m}$$

$$q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 179 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.034 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Test 2 kan endvidere sammenlignes med Test 3, 5 og 6, hvor forskellen er at åbningsarealet varieres fra fuld ved Test 2 over halv og kvart til en ottendedel i Test 6.

Dette svarer til designåbningsfaktorer på 0.094, 0.034, 0.018 og 0.0044 m^{1/2}.

Det ses, at brandforløbene i alle tre positioner i brandrummet bliver langsommere og at maximal temperaturerne især bliver mindre for den helt lille åbning.

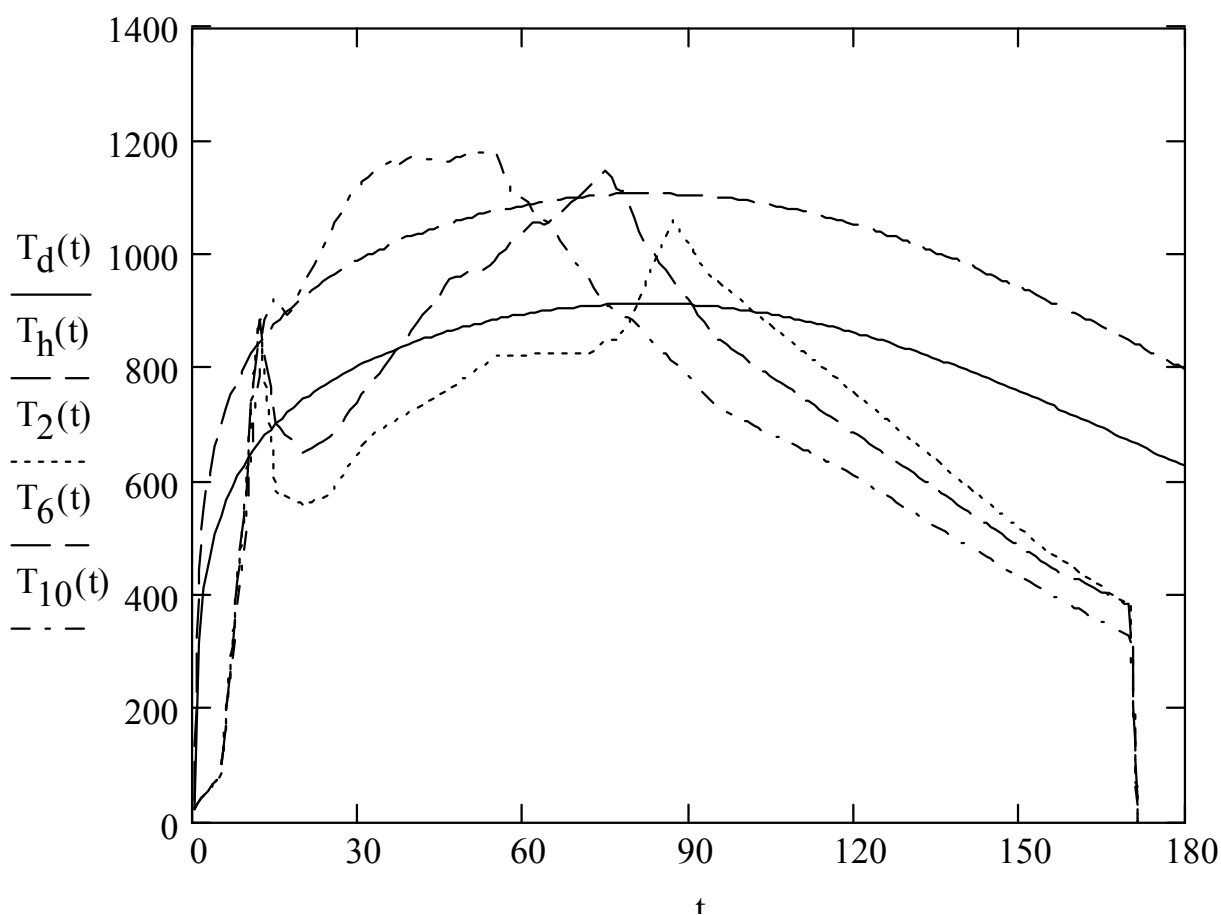
Brandene med de mindste åbningsfaktorer vil, som vist i denne vejledning, være de mest kritiske for alle bærende konstruktioner bort set fra de letteste stålkonstruktioner.

Test 5

20 kg/m² floor 1/4 Opening

$$L = 22.855 \text{ m} \quad B = 5.595 \text{ m} \quad H = 2.750 \text{ m} \quad w = 2.13 \text{ m} \quad h = 1.73 \text{ m}$$

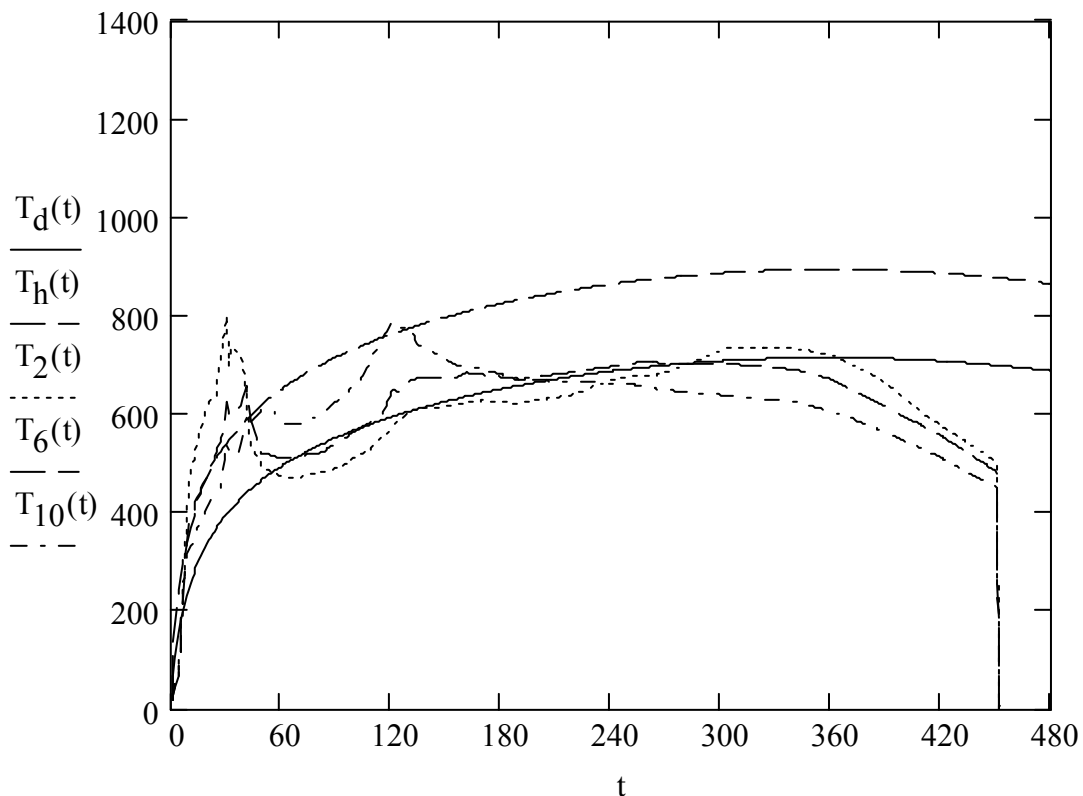
$$q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad q_d = 179 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad O_d = 0.018 \text{ m}^{0.5} \quad b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Test 6

20 kg/m² floor 1/8 Opening

$$\begin{array}{lllll} L = 22.855 \text{ m} & B = 5.595 \text{ m} & H = 2.750 \text{ m} & w = 5.195 \text{ m} & h = 0.375 \text{ m} \\ q_f = 380 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} & q_d = 179 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} & O_d = 0.0044 \text{ m}^{0.5} & b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \end{array}$$



Endelig omfatter testserien to prøvninger med en større brandbelastning på 40 kg træ pr m² gulv i stedet for 20.

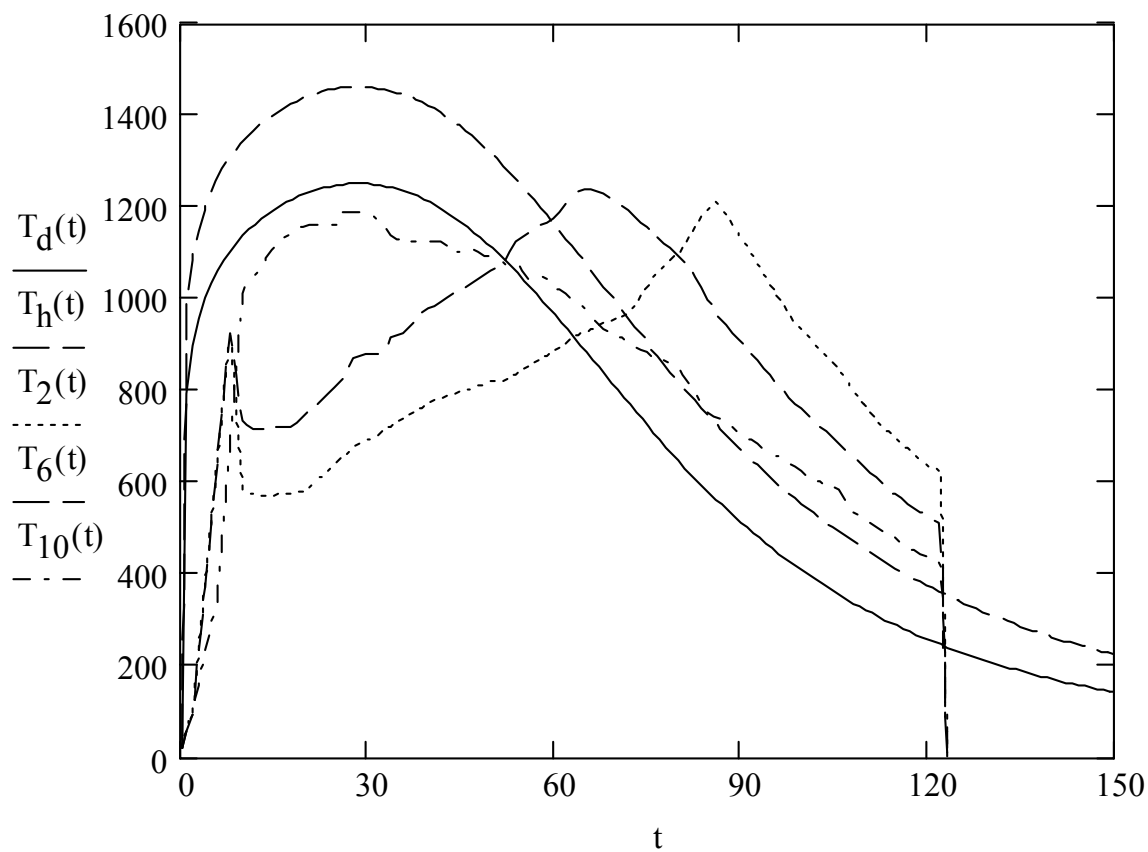
Test 1 er i øvrigt magen til Test 2 og kan sammenlignes med denne, ligesom Test 4 med den halve åbning kan sammenlignes med Test 3. Det ses, at heller ikke en variation af brandbelastningen, så den nu svarer til et erhverv med langt større brandbelastning, end kontor, vil ændre på konklusionen om anvendeligheden af de parametriske brande, da de følger med både hvad angår brandens varighed og forøgelsen af de maksimale temperaturer.

Test 1

40 kg/m² floor 1/1 Opening

$L = 22.855 \text{ m}$ $B = 5.595 \text{ m}$ $H = 2.750 \text{ m}$ $w = 5.595 \text{ m}$ $h = 2.75 \text{ m}$

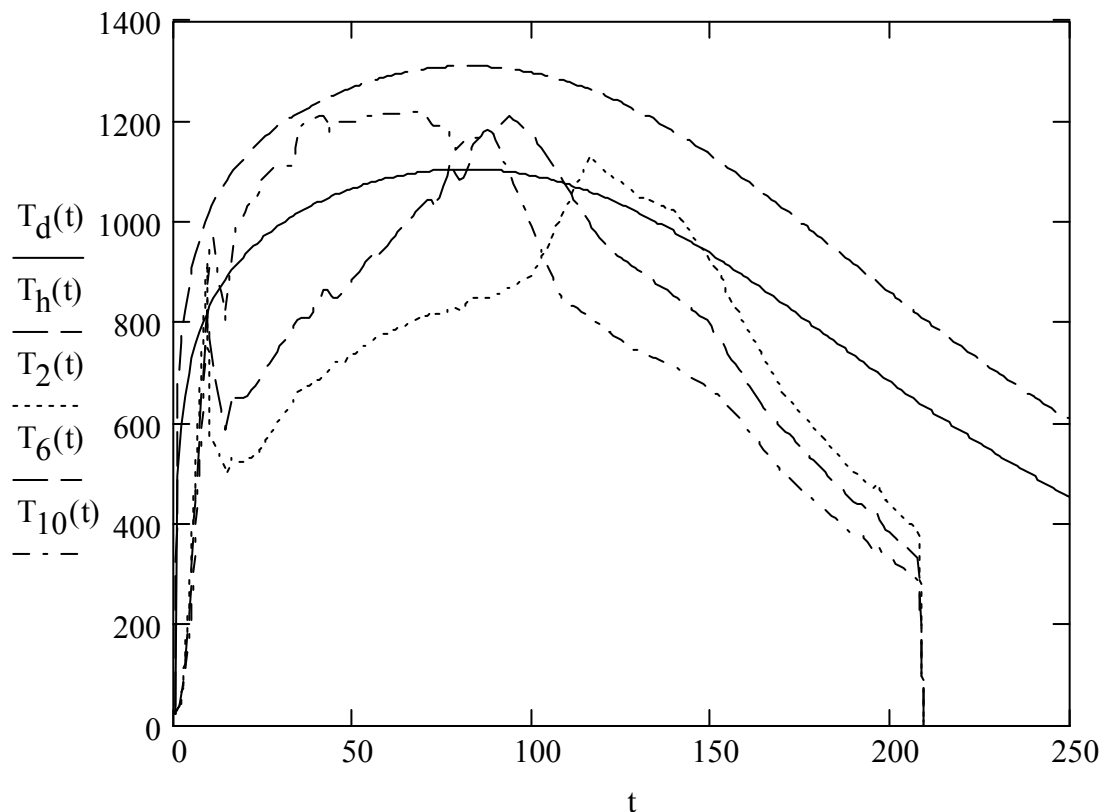
$q_f = 760 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$ $q_d = 358 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$ $O_d = 0.094 \text{ m}^{0.5}$ $b_d = 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$



Test 4

40 kg/m² floor 1/2 Opening

$$\begin{aligned} L &= 22.855 \text{ m} & B &= 5.595 \text{ m} & H &= 2.750 \text{ m} & w &= 5.195 \text{ m} & h &= 1.47 \text{ m} \\ q_f &= 760 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} & q_d &= 358 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} & O_d &= 0.034 \text{ m}^{0.5} & b_d &= 586.5 \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{0.5}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \end{aligned}$$



Af disse analyser ses, at parametriske brande kan anvendes som modeller for dimensionering af bærende konstruktioner for brande i flade rum med en udstrækning på over 200 m², idet afvigelserne i de mest kritiske punkter under loftet mellem målte og beregnede temperaturforløb ikke bliver større ved forøgelse af brandrummets størrelse.

I det følgende vises beregningen for Test 2 for dokumentationens skyld. De øvrige tests er beregnet på samme måde.

De parametriske designbrande er, som det fremgår af beregningerne og udredningen tidligere fundet ved at ikke at medregne vægge i symmetrilinierne der afgrænser brandrummet i forhold til det uendeligt store brandrum. I praksis skal den parametriske brand derfor blot findes for hele rummet eller pr meter af et langt rum.

Test 2

$$h := 3600 \cdot s \quad kJ := 1000 \cdot J \quad MJ := 1000 \cdot kJ \quad t := 0, 1.. 150$$

$$\text{Internal Dimensions: } L := 22.855 \cdot m \quad H := 2.750 \cdot m \quad B := 5.595 \cdot m \quad h := H \quad w := B$$

$$\text{Floor area: } A_f := L \cdot B \quad A_t := 2 \cdot (A_f + H \cdot B + L \cdot H) \quad 1/1 \text{ Opening } H \cdot B$$

$$\text{Fire load per m}^2 \text{ floor: } q_f := 20 \frac{kg}{m^2} \cdot 19 \frac{MJ}{kg} \quad q_f = 380 \frac{MJ}{m^2}$$

$$\text{Fire load per m}^2 \text{ surrounding surface: } q := q_f \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad q = 118 \frac{MJ}{m^2}$$

$$\text{Opening Factor: } O := \frac{H \cdot B \cdot \sqrt{H}}{A_t} \quad O = 0.062 m^{0.5}$$

$$\text{Ceramic fibre properties } \rho_{cf} := 128 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad \lambda_{cf} := 0.02 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \quad c_{pcf} := 1130 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\text{thermal absorptivity } b_{cf} := \sqrt{\rho_{cf} \cdot c_{pcf} \cdot \lambda_{cf}} \quad b_{cf} = 53.78 \frac{W \cdot s^{\frac{1}{2}}}{m^2 \cdot K}$$

Fluid sand properties

$$\rho_{fs} := 1750 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad \lambda_{fs} := 1.00 \cdot \frac{W}{m \cdot K} \quad c_{pfs} := 800 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\text{thermal absorptivity } b_{fs} := \sqrt{\rho_{fs} \cdot c_{pfs} \cdot \lambda_{fs}} \quad b_{fs} = 1183 \frac{W \cdot s^{0.5}}{m^2 \cdot K}$$

$$\text{Average thermal absorptivity } b := \frac{L \cdot B \cdot b_{fs} + (A_t - L \cdot B) \cdot b_{cf}}{A_t} \quad b = 404 \frac{W \cdot s^{0.5}}{m^2 \cdot K}$$

Time for end of heating

$$t_d(q, O) := 7.80 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q}{O} \cdot \frac{min \cdot m^{2.5}}{MJ} \quad t_d(q, O) = 15 min$$

$$T_g(t, \Gamma, O, q) := \frac{345 \cdot \log(8 \cdot \Gamma \cdot t + 1)}{1 + 0.04 \cdot \left(\frac{t \cdot min}{t_d(q, O)} \right)^{3.5}} + 20 \quad \Gamma(O, b) := \frac{\left(\frac{O}{b} \right)^2}{\left(\frac{0.04 \cdot K \cdot m^{2.5}}{1160 \cdot W \cdot s^{0.5}} \right)^2}$$

$$\Gamma_{Ob} := \Gamma(O, b) \quad \Gamma_{Ob} = 19.73$$

$$T_O(t) := T_g(t, \Gamma_{Ob}, O, q) \quad \text{Peak temperature } T_O \left(\frac{t_d(q, O)}{min} \right) = 1138 \text{ C}$$

For design we consider symmetry walls to have b=0

$$A_{td} := 2 \cdot A_f + H \cdot B$$

$$q_d := q_f \cdot \frac{A_f}{A_{td}} \quad q_d = 179 \frac{MJ}{m^2} \quad O_d := \frac{h \cdot w \cdot \sqrt{h}}{A_{td}} \quad O_d = 0.094 m^{0.5} \text{ C}$$

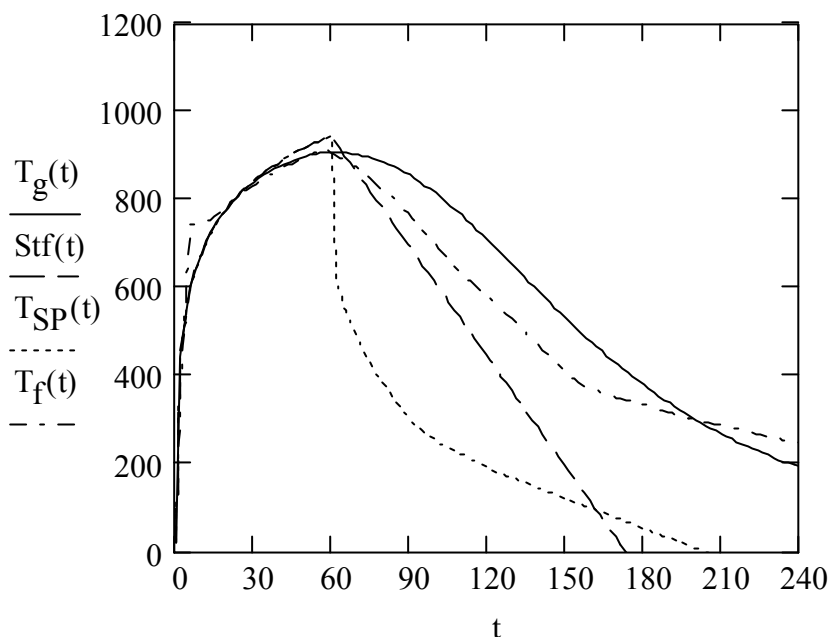
$$b_d := \frac{L \cdot B \cdot b_{fs} + (A_{td} - L \cdot B) \cdot b_{cf}}{A_{td}} \quad b_d = 586 \frac{W \cdot s^{0.5}}{m^2 \cdot K} \quad \Gamma_d := \Gamma(O_d, b_d) \quad \Gamma_d = 21.7$$

$$T_d(t) := T_g(t, \Gamma_d, O_d, q_d)$$

$$T_h(t) := \frac{\left(T_d(t) - 273 + \sqrt{T_d(t)^2 + 1718 \cdot T_d(t) + 74529} \right)}{2}$$

Appendix 3.

Afkølingens betydning for bæreevnen af betonkonstruktioner påvirket af fuldt udviklet brand.



Det er særdeles vigtigt at afkølingsfasen medregnes ved beregning af brandpåvirkede betonkonstruktioners bæreevne, hvis man skal dokumentere, at de ikke bryder ved branden. Men har afkølingskurvens form nogen betydning?

På figuren vises nogle bud på afkølingskurver. T_g er forfatterens simple udtryk i den danske lastnorm for en brand med åbningsfaktor $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 308 MJ/m^2 omsluttende overflade, der svarer til en times standardbrand med afkøling. Stf er standardbranden med den afkøling, der står angivet i prøvningsstandard ISO 834 og som for en times standardbrand har en konstant hastighed på 500°C i minuttet. Denne afkølingskurve, som det er lykkedes prof. Pettersson fra Lund at indføre i standarden, anvendes praktisk taget aldrig, da den er valgfri. Den danske prøvningsstandard er i dag identisk med ISO 834, men før den blev det, havde den en bestemmelse om at lasten skulle hvile på konstruktionen i 24 timer efter ildpåvirkningens ophør. Dvs. at det dengang var obligatorisk at konstruktionen påvirkes med standardprøveovens naturlige afkølingskurve. Denne kurve ses på figuren som T_{SP} da den er taget fra rapporten "Huldæk og brand – Dokumentation vedrørende forskydningskapacitet, Birch & Krogboe A/S 2005-04-29", hvor man hos det svenske brandlaboratorium SP har

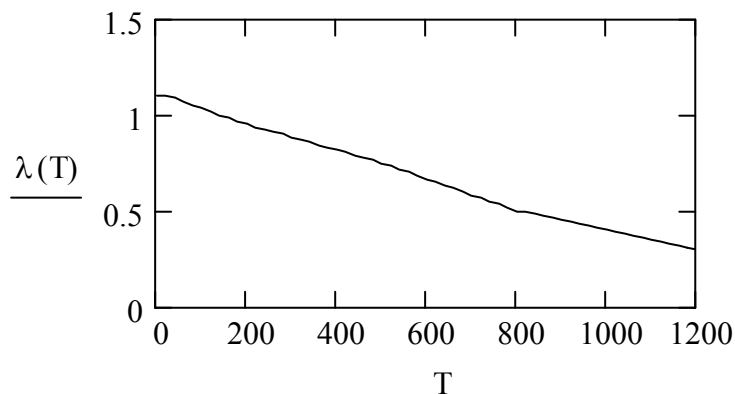
fået foretaget en sådan test. Endelig viser figuren en kurve T_f som er beregnet af Lunds universitet for brandbelastningen 300 MJ/m^2 og åbningsfaktoren $0.04 \text{ m}^{1/2}$.

Som det ses, er de fire kurver ret forskellige. Især er den naturlige afkølingskurve meget anderledes end ISO kurven. Nu kan man jo undre sig over, hvorfor ISO har valgt en så unaturlig kurve. Der er ingen brandceller, der vil afkøle på denne måde i praksis. Svaret er, at det er den enkleste kurve at definere, da formen på kurven er praktisk taget uden betydning for konstruktionens bæreevne.

Betragtes overfladen af en konstruktion - eksempelvis en væg, vil den opnå den maksimale temperatur samtidigt med brandrummet, og den er således ikke afhængig af afkølingskurvens form.

Betragtes et område et godt stykke inde i væggen, tager det lang tid, før varmepulsen på overfladen når derind, hvorfor temperaturudviklingen her i afkølingsfasen er en temperaturstigning, der afhænger af opvarmningsfasen.

Kun i mellemområdet kan maksimaltemperaturen påvirkes en lille smule af afkølingsfasens karakter. For at vise dette betragtes en 10 cm tyk væg af en normal tung beton med massefylde $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, specifik varmekapacitet $c_p = 0.90 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ og en varmeledningsevne, der ved 500°C udgør $\lambda(500^\circ\text{C}) = 75 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ og varierer som vist med temperaturen.



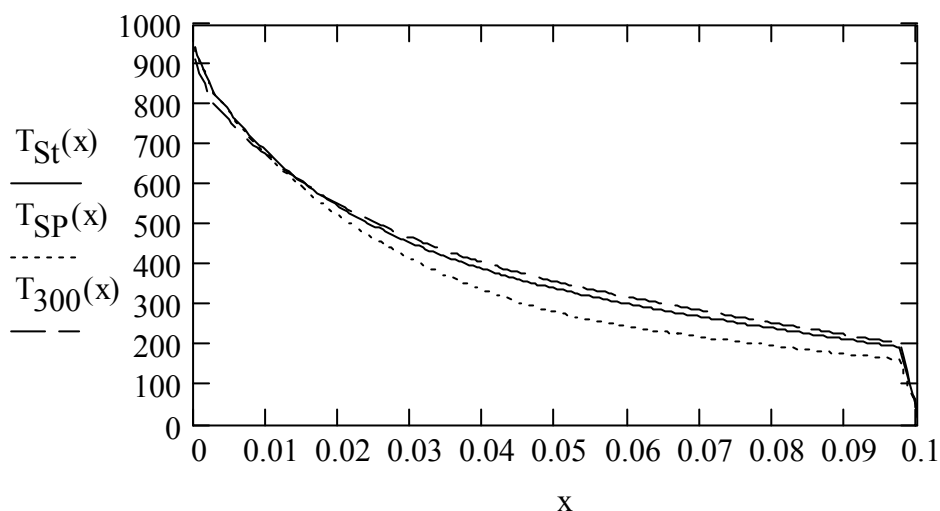
Ved 500°C bliver temperaturledningstallet $350 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, som erfaringsmæssigt svarer til egenskaben for en normal dansk beton.

For denne væg beregnes maksimaltemperaturerne som funktion af dybden for de to brandforløb, der er vist ovenfor St_f , T_{SP} , altså for en times standardbrand med de vidt forskellige afkølingsfaser, der er defineret i ISO 834 og som en standard-brandprøvningsovn vil udvise, når man slukker for den. Endvidere er maksimaltemperaturerne vist for åbningsfaktorbranden T_f , fremkommet ved en detaljeret varmebalanceberegning for åbningsfaktoren $0.04 \text{ m}^{1/2}$ og brandbelastning 300 MJ/m^2 .

Beregningen er foretaget med et finitte differens program, der regner med varmeovergang fra brand til overflade og varmets indtrængning i en dybde bestående af 20 lameller.

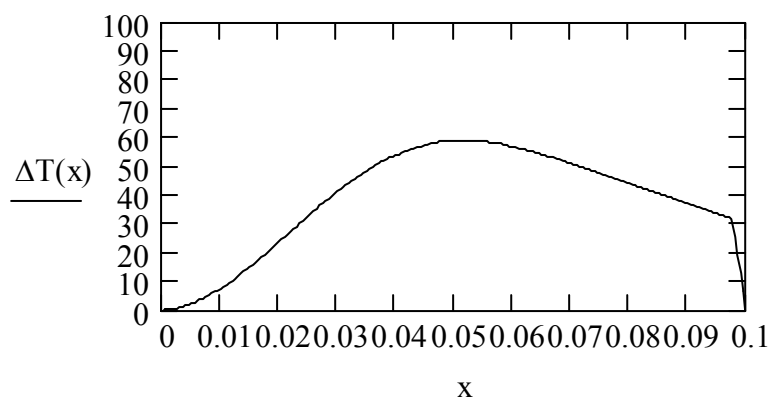
Emissionstallet for samlet virkning af brand og overflade er sat til 0.7.

Resultaterne ses på figuren nedenfor



Kurven viser de maksimale temperaturer i hvert enkelt punkt, og disse optræder senere og senere jo længere man kommer ind i konstruktionen, så kurven viser altså ikke et temperaturprofil til et fast tidspunkt, men et profil af de temperaturer, der vil være ansvarlig for skaderne på beton og armering i konstruktionen og dermed dens svækkelse. Disse temperaturer forekommer senere og senere, jo dybere inde i tværsnittet, man er.

Danner man forskellen på kurverne, som man får fra ISO 834 afkølingen og fra den naturlige afkøling, får man følgende variation af temperaturforskellen.



Det ses, at temperaturforskellen har et maksimum i mellemzonen, som forklaret kvalitativt ovenfor, og i dybden 30 mm andrager den $453 - 412 = 41^\circ\text{C}$, og den

største forskel optræder i dybden 50 mm, hvor den er $339 - 281 = 58^{\circ}\text{C}$, hvilket er ubetydelige forskelle, da de er af størrelsesorden som dem, valget af parametre i temperaturberegningen kan give anledning til. Kurverne er dog her regnet med samme parametre og for samme beton, så de kan sammenlignes.

Konklusionen er altså som forklaret, at afkølingens form er uden praktisk betydning for bæreevnen. Det, der betyder noget, er at afkølingen er med, og at varmen fra branden får tid til at trænge ind og gøre skade.