

## Beton og brand

Finn R. Gottfredsen, Projektchef

1 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI

## Emner

- > Indledning
- > Krav og standarder
  - Brandforløb (Nominelle brandkurver/parametriske brandforløb)
  - Betons egenskaber under og efter brand
- > Betons egenskaber under brand
- > Dimensionering
- > Eksempler på brande
- > Undersøgelse af beton efter brand
- > Afskalning
- > Brandbeskyttelse
- > Afslutning

2 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI

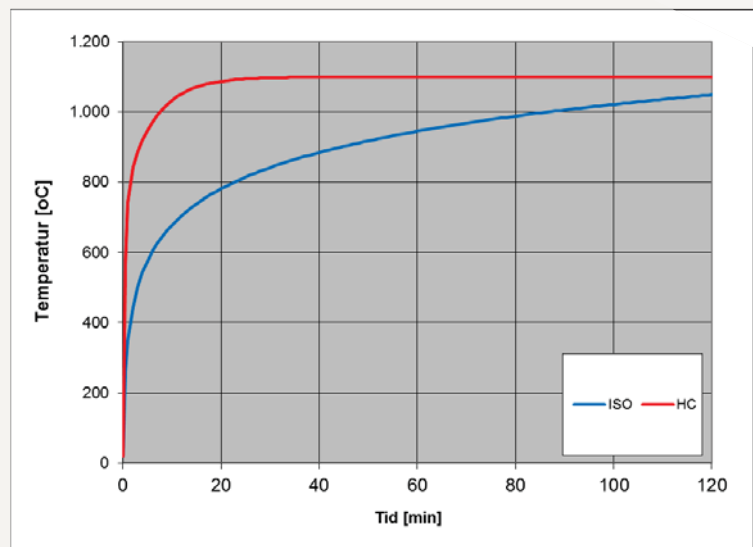
# Indledning

- > Har arbejdet med brand siden slutningen af 90'erne
- > To milepæle:
  - flere tilfælde af alvorlige tunnelbrande i alperne
  - indførelse af funktionsbaserede brandkrav i Danmark
- > Arbejder primært med
  - tunnelkonstruktioner (design for brand)
  - undersøgelse af brandudsatte konstruktioner

# Nominelle brandforløb I

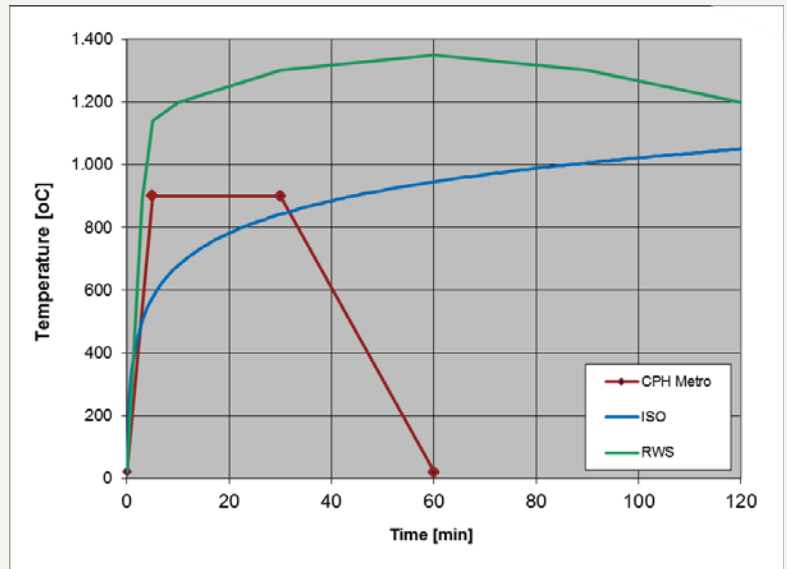
DS/EN 1991-1-2:2007

- > Standardbrandkurven (ISO)  
cellulosebrand – bruges i  
husbygning  
(Bruges til klassificering)
- > Hydrocarbonkurven (HC)  
"oliebrand" – karakteriseret ved  
hurtig brandudvikling



## Nominelle brandforløb II

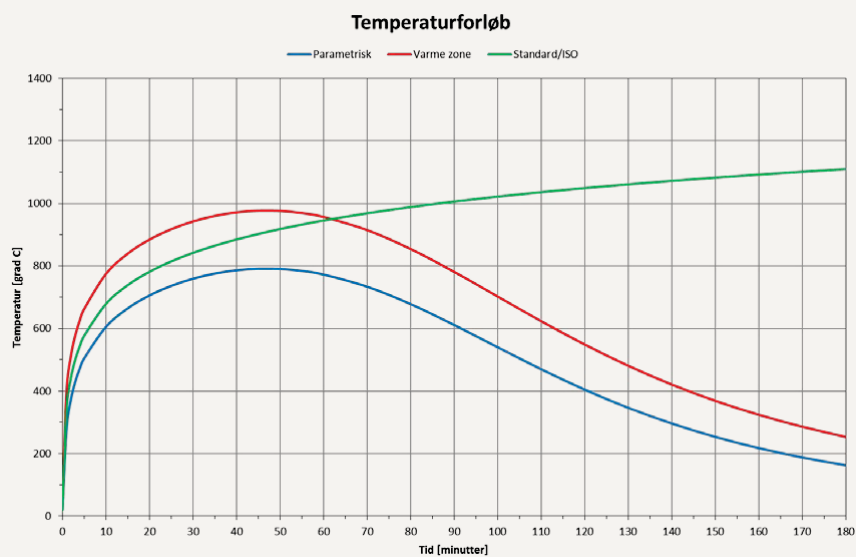
- > RWS-kurven  
Stammer fra Holland –  
anvendes for vej-tunneler  
Voldsom brand, f.eks. i  
tankbil
- > Særlige brandkurver  
F.eks. Metro-kurven



## Parametriske brandforløb

- > Åbningsfaktormetoden  
Tager hensyn til faktiske forhold, herunder
  - størrelse og placering af åbninger
  - brandrummets størrelse
  - type af materialer
  - mængde af brændbart materiale

## Eksempel på parametriske brandforløb



## Norm



Dansk standard

DS/EN 1992-1-2 + AC

2. udgave

2013-11-22

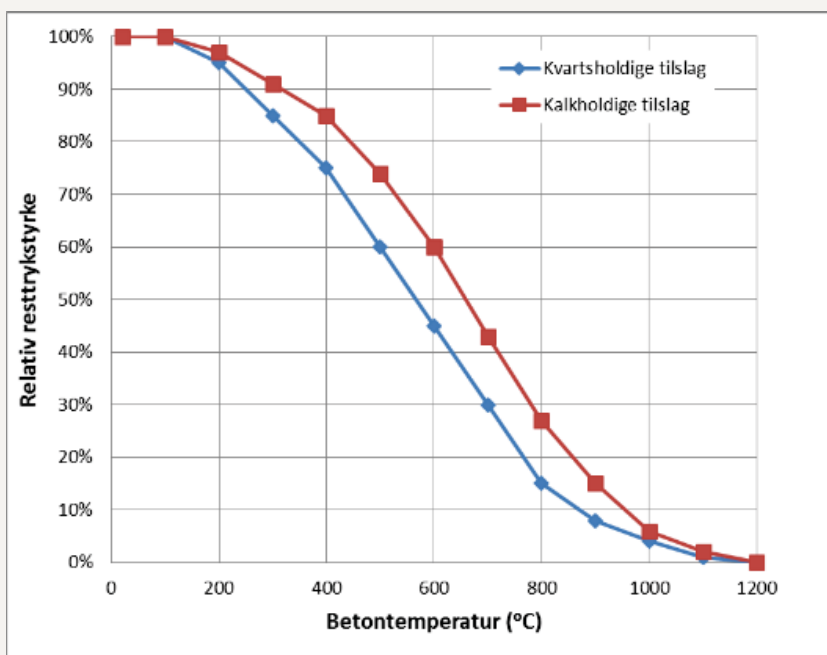
### **Eurocode 2: Betonkonstruktioner – Del 1-2: Generelle regler – Brandteknisk dimensionering**

Eurocode 2: Design of concrete structures –  
Part 1-2: General rules – Structural fire design

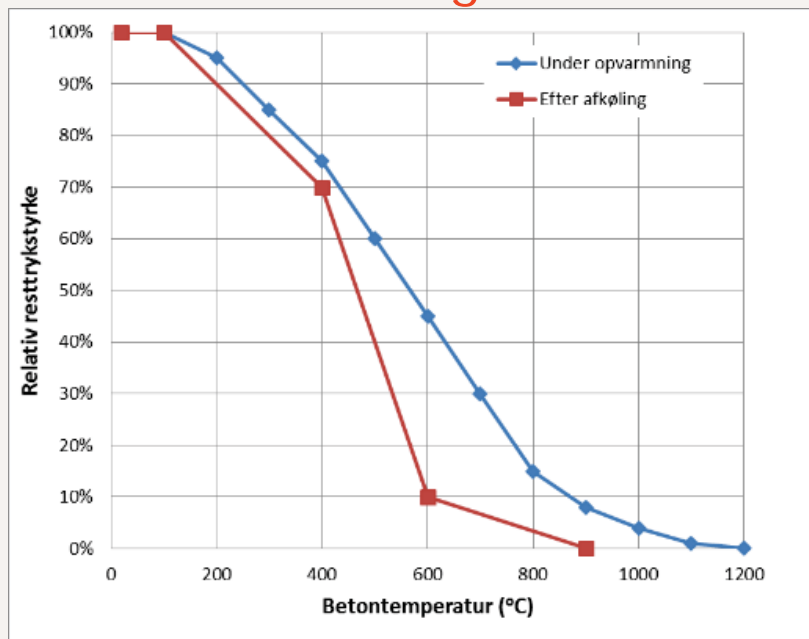
## Dimensionering

- > Under branden  
Falder huset sammen, inden det kan rømmes?  
Personsikkerhed (brugere + brandfolk)
- > Efter afkøling  
Bliver huset stående?  
(Værdisikring)
- > Minimering af skader => brandbeskyttelse

## Styrkereduktion under brand



## Styrkereduktion efter afkøling iht. DS 411



## Beregning af bæreevne under og efter brand

DS/EN 1992-1-2 + AC:2013

### 4.2.3 Reduceret tværsnit

(1) Forenklede metoder baseret på et reduceret tværsnit kan anvendes.

NOTE – Det informative anneks B angiver to metoder, som anvender et reduceret tværsnit.

Metoden beskrevet i anneks B.1 er baseret på hypotesen om, at der ved beregningen af bæreevnen ikke tages hensyn til beton opvarmet til temperaturer på over 500 °C, hvorimod beton ved en temperatur på under 500 °C antages at genvinde sin fulde styrke. Denne metode kan anvendes på et armeret eller forspændt betontværsnit med hensyn til normalkraft, bøjningsmoment og kombinationer deraf.

Metoden beskrevet i anneks B.2 er baseret på princippet, at tværsnittet reduceres ved at se bort fra en beskadiget zone ved de brandpåvirkede overflader. Beregningen bør følge en bestemt fremgangsmåde. Metoden kan anvendes på et armeret eller forspændt betontværsnit med hensyn til normalkraft, bøjningsmoment og kombinationer deraf.

# 500 °C- isoterm- metoden

## Anneks B (informativt) Forenklete beregningsmetoder

### B.1 500 °C-Isotermmetode

#### B.1.1 Princip og anvendelsesområde

(1) Denne metode kan anvendes på en standardbrandpåvirkning og ethvert andet tid-varme-forløb, som giver lignende temperaturfelter i den brandpåvirkede konstruktionsdel. Tid-varme-forløb, som ikke opfylder disse kriterier, kræver en særskilt omfattende undersøgelse, som tager hensyn til betons relative styrke som funktion af temperaturen.

(2) Denne metode gælder for mindste tværsnitbredde angivet i tabel B.1:

- For en standardbrandpåvirkning afhængigt af brandmodstandsevnen
- For en parametriske brandpåvirkning med en åbningsfaktor  $O \geq 0,14 \text{ m}^{1/2}$  (se EN 1991-1-2, anneks A).

**Tabel B.1 – Mindste tværsnitbredde som funktion af brandmodstandsevnen (ved standardbrandpåvirkning) og brandbelastning (ved parametriske brandpåvirkning)**

#### a) Brandmodstandsevne

Brandmodstandsevne	R 60	R 90	R 120	R 180	R 240
Mindste tværsnitbredde mm	90	120	160	200	280

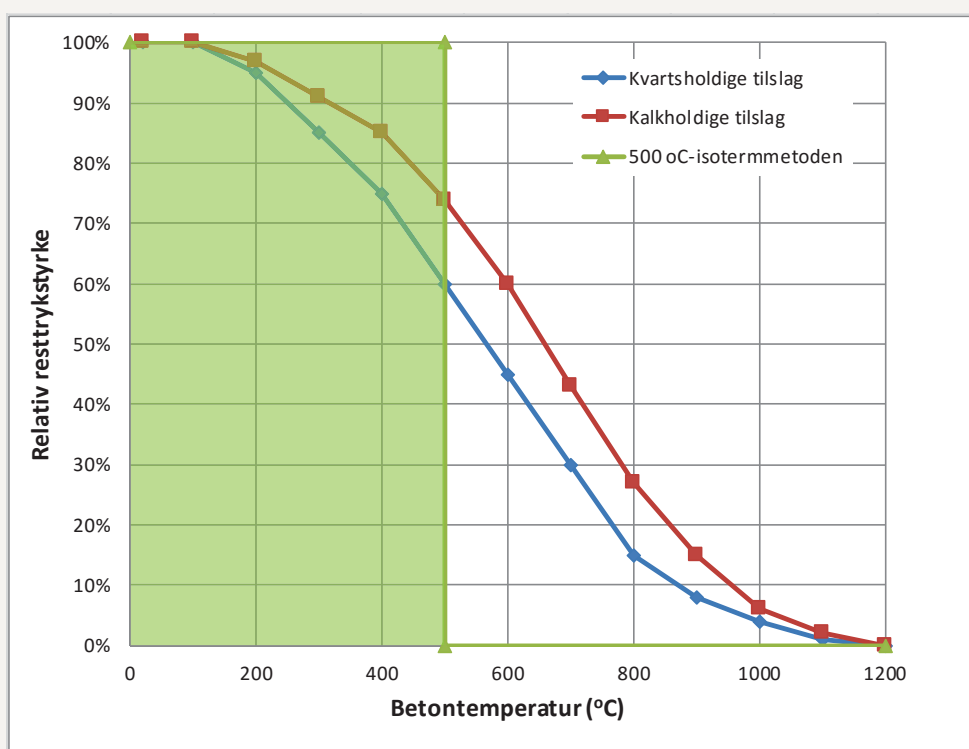
#### b) Brandbelastning

Brandbelastning MJ/m <sup>2</sup>	200	300	400	600	800
Mindste tværsnitbredde mm	100	140	160	200	240

(3) Den forenklete beregningsmetode omfatter en generel reduktion af tværsnitstørrelsen med hensyn til en varmebeskadiget zone ved betonoverflademe. Tykkelsen af den beskadigede beton,  $a_{500}$ , sættes lig med den gennemsnitlige dybde af 500 °C-isotermen i tværsnitets trykzone.

(4) Beskadiget beton, dvs. beton med temperaturer på over 500 °C, antages ikke at bidrage til konstruktionsdelens bæreevne, mens resttværsnittet bevarer sine oprindelige værdier for styrke og elasticitetsmodul.

(5) For en rektangulær bjælke, som udsættes for brandpåvirkning på tre sider, vil det reducerede tværsnit under brandpåvirkning være i overensstemmelse med figur B.1.



# DS/EN 1992-1-2+AC:2013

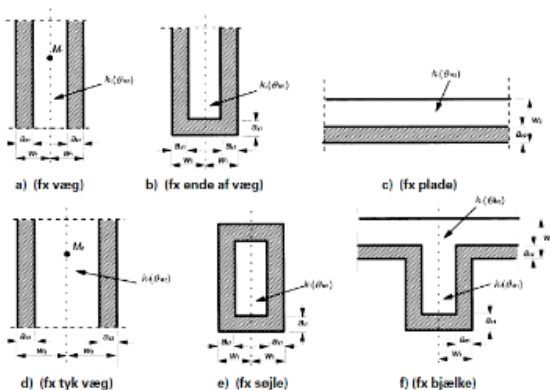
## B.2 Zonemetode

(1) Metoden med underinddeling af tværsnittet i flere zoner er beskrevet nedenfor. Selv om der er mere arbejde forbundet med denne metode, er den mere præcis end 500 °C-isotermmetoden, især for søjler. Denne metode kan anvendes for en hvilken som helst fuldt udviklet brandkurve, men denne standard indeholder kun data for standardbrandforløbet.

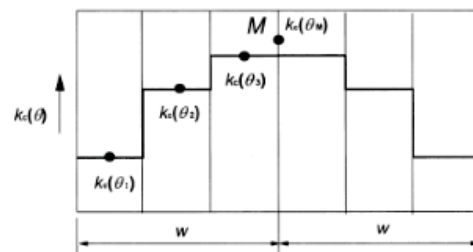
(2) Tværsnittet inddeles i et antal ( $n \geq 3$ ) parallelle zoner med samme tykkelse (rektangulære konstruktionsdele), hvor middeltemperaturen og den tilsvarende gennemsnitlige trykstyrke  $f_{cd}(\theta)$  og elasticitetsmodul, hvis det er relevant, fastlægges for hver zone.

(3) Det brandpåvirkede tværsnit er repræsenteret af et reduceret tværsnit ved fradrag af en påvirket zone af tykkelsen  $a_z$  på de brandpåvirkede sider, se figur B.3. Der henvises til en ækvivalent væg (se figur B.3(a) og (d)). M-punktet er et vilkårligt punkt på midterlinjen af den ækvivalente væg, som anvendes til at fastlægge den reducerede trykstyrke for hele det reducerede tværsnit. Når to modstående sider er brandpåvirkede, antages bredden at være  $2w$  (se figur B.3(a)). For et rektangulært tværsnit brandpåvirket på kun én side antages bredden at være  $w$  (se figur B.3(c)).

## Zonemetoden



Figur B.3 – Reduktion af styrke og tværsnit for profiler under brandpåvirkning



Figur B.4 – Inndeling af væg, hvor begge sider er brandpåvirkede, i zoner til anvendelse ved beregning af styrkereduktion og  $a_z$ -værdier

(6) Middelreduktionskoefficienten for en bestemt zone, der inkorporerer en faktor  $(1 - 0,2/n)$ , der tager hensyn til variationer i temperaturen inden for hver zone, kan beregnes ved hjælp af ligning (B.11).

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n) \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i)}{n} \quad (B.11)$$

hvor

- $n$  er antallet af parallelle zoner over tykkelsen  $w$
- $w$  er halvdelen af den totale tykkelse
- $m$  er zonen nummer.

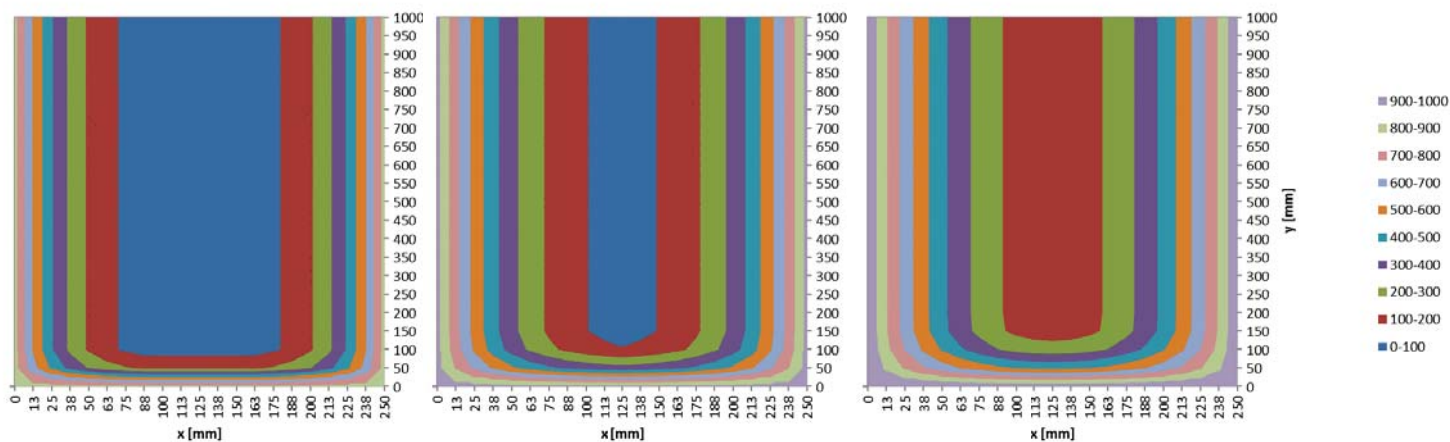
(7) Tykkelsen af den beskadigede zone for bjælker, plader eller skiver kan beregnes ved hjælp af ligning

$$a_z = w \left[ 1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad (B.12)$$

Hvor  $k_c(\theta_M)$  betegner reduktionskoefficienten for beton ved M-punktet.

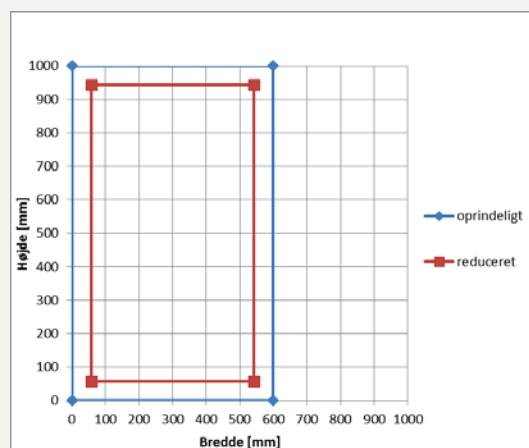
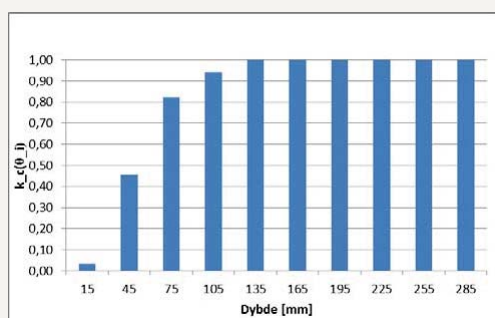


## 3-sidet brandbelastet bjælke – efter 60, 120 og 180 min.



## Zonemetoden – Eksempel Bjælke/søjle 1000 x 600 mm, 4-sidet påvirket, 3 t.

	zone	Center dybde	Center temp.	$K_c(\theta, M)$
Ydre (varm)	1	15	798	0,03
	2	45	482	0,46
	3	75	279	0,82
	4	105	157	0,94
	5	135	89	1,00
	6	165	62	1,00
	7	195	58	1,00
	8	225	58	1,00
	9	255	58	1,00
Midte	10	285	58	1,00
				$K_{c,m}$ : 0,81 57,34341



## Eksempler på brande

- > Storebæltstunnelen, 11. juni 1994
- > Brand under bro i Ohio, USA
- > Brand i KB-hallen

## Brand under bro i Ohio

- > Lastbil med ca. 43.000 l ethanol vælter på I-270, idet den passerer under I-70 i Columbus, Ohio d. 1. juli 2015 kl. 6 om morgenen og bryder i brand:

<http://www.10tv.com/content/sections/video/index.html?video=/videos/2015/07/01/raw-traffic-camera-captures-blaze.xml>



21

## Efter branden



22 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

## KB-hallen

- > Brand opstod i KB-hallen d. 28. september 2011
- > Hallen udbrændte totalt:



23 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI



24 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI



COWI



COWI



27 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND



COWI



COWI



29 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI



30 | 2. FEBRUAR 2016  
BETON OG BRAND

COWI

## Undersøgelse af skadet beton

- > Visuelt
- > Rekylværdibestemmelse (Schmidt hammer)
- > Impulse Response (s'MASH)
- > Udborede kerner
  - planslib
  - tyndslib
  - trykprøvning af cylindre



## Farve og klang efter opvarmning

Temperatur [°C]	Farve
0-300	Normal, grå
300-600	Rosa, rødlig
600-950	Grå, grøn
950-1200	Brun, gul med brune pletter

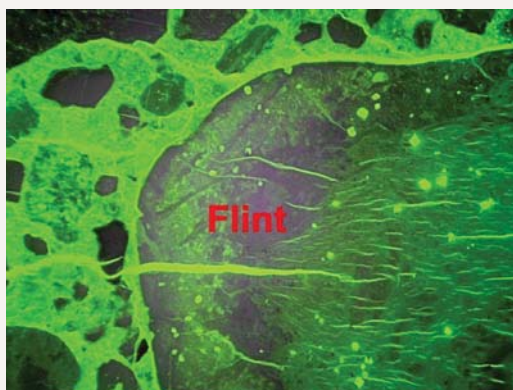
Temperatur [°C]	Klang
100	Klinker
200	Porcelæn
300	Krystal
400	Glas
500	Stentøj
600	Revnet tegl
700	Træ
800	Papmache



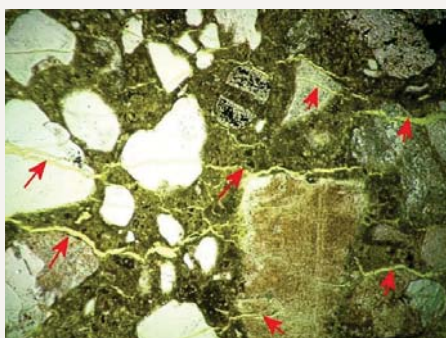
## Karakteristiske omdannelser af beton under opvarmning

Fra ca. 700-900 °C sker omdannelser af $\text{CaCO}_3$ til $\text{CaO}$ (læsket kalk) og $\text{CO}_2$
Ved 573 °C sker en omdannelse af $\alpha$ -kvarts til $\beta$ -kvarts under en ekspansion på ~1 %, med risiko for efterfølgende afskalninger og revnedannelser
Fra ca. 500-700 °C disintegreres CSH-gel
I området ca. 400-600 °C sker dehydrering af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ til $\text{CaO}$ (læsket kalk) + $\text{H}_2\text{O}$ . Ved tilførsel af slukningsvand eller senere opfugtning kan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gendannes med vol. ekspansion til følge
I området ca. 350-450 °C begynder kalcinering af flint, under udvikling af mikrorevner i flinten
Fra temperaturer > 200 °C sker farveforandring (til brunlige nuancer) samt opsprækning af nogle flinttyper
Fra ca. 150-250 °C kan dannes grove, fine eller mikrorevner, sub-parallelt med overfladen
Fra 100-150 °C begynder fordampning af kemisk bundet vand med øget porøsitet til følge
Fra 50-100 °C sker fordampning af fysisk bundet vand i betonen

## Tyndslib



Udsnit i ca. 10 mm dybde, med revnedannelser pga. brand, samt tydelig kalcinering af flint, dvs. temperaturen har her været oppe på 350-450 °C.  
Fotostr.: 1,8 mm x 2,4 mm.  
Fluorescens.



Udsnit lige under overfladen (< 5 mm), med typiske fine revner/ mikrorevner (se pile) opstået pga. brandpåvirkning. Revner ses i både pasta og gennem eller langs tilslag. Fotostr.: 1,8 mm x 2,4 mm. Parallelle nicoller.

# Vurdering af risiko for afskalning

Kilde: ARUP Fire/HSE - Fire resistance of concrete enclosures, 2005

Factor	Risk number	
	Possible	Actual
Design strength > 55 MPa	Unquantified	
Design strength ≤ 55 MPa	1	1
Hydrocarbon/HC_inc fire	5	5
Standard fire	1	
Moisture content > 3%	5	5
Moisture content ≤ 3%	1	
No reinforcement	3	
Reinforcement included	1	1
Cover ≥ 40 mm	3	3
Cover < 40 mm	1	
Siliceous aggregate	3	3
Calcareous aggregate	1	
No. of sides exposed > 1	3	
No. of sides exposed = 1	1	1
Section size < 200 mm	3	
Section size ≥ 200 mm	1	1
Restrained	3	3
Unrestrained	1	
Thermal expansion ≥ 10×10 <sup>-6</sup>	3	
Thermal expansion < 10×10 <sup>-6</sup>	1	1
Loaded in compression	3	3
Unloaded	1	
<b>Sum =</b>		<b>27</b>

Table 7 : Final risk categories with associated spalling quantification

Category	Risk of spalling	Value of Total Risk	Key factors	Spalling level
A	Very low	≤11	Ordinary strength, NWC, Unloaded, Unrestrained, Standard fire exposure, Reinforced, moisture <3%, one side exposure	Zero or minimal
B	Low	12-20	Ordinary strength, NWC, restrained, Standard fire exposure Significant number of key variables* likely to promote spalling	Up to the level of the reinforcement
C	Med	21-28	Ordinary strength, NWC, restrained, Standard hydrocarbon fire exposure :Small number of key variables* likely to promote spalling	3mm/min
D	High	29-37	Ordinary strength, NWC, restrained, Standard hydrocarbon fire exposure Significant number of key variables* likely to promote spalling	7mm/min
E	Very high	>37	High strength (Design strength >55Mpa), standard hydrocarbon fire exposure.	Unquantifiable

# Begrænsning af afskalning

- > Risikoen for og omfanget af afskalning kan reduceres ved at tilsætte polypropylen-fibre (pp-fibre)



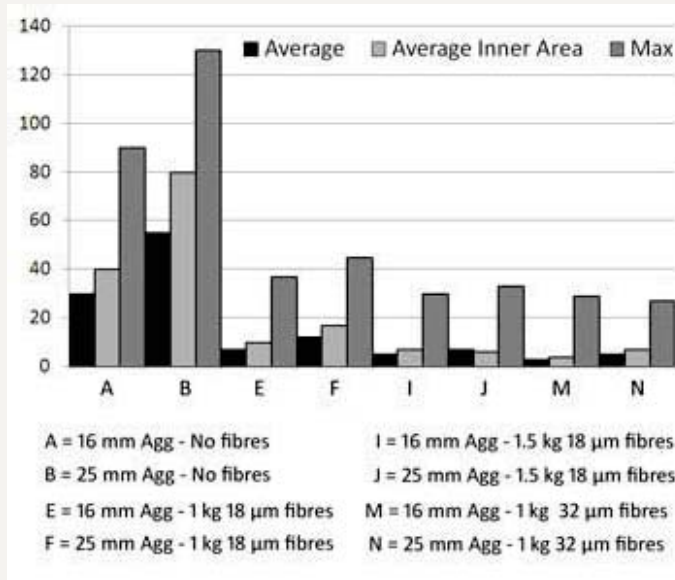
Fig. 9: Segment with 0 kg/m<sup>3</sup> PP-fibres (photo: MFPA Leipzig/D)



Fig. 10: Segment with 2.0 kg/m<sup>3</sup> PP-fibres (photo: MFPA Leipzig/D)

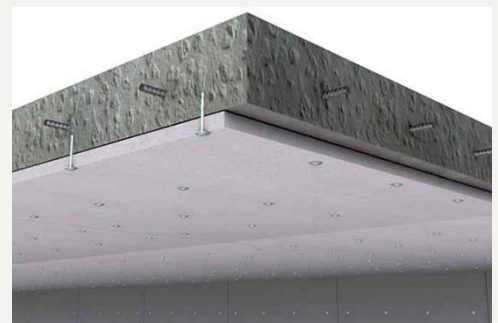


## Afskalning (mm) af prøveelementer efter 30 minutters eksponering til en RWS-brand



## Dimensionering - Brandbeskyttelse

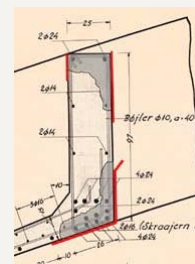
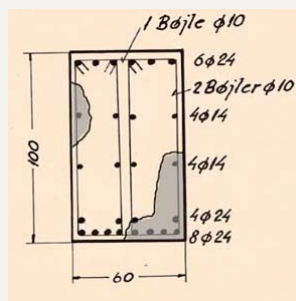
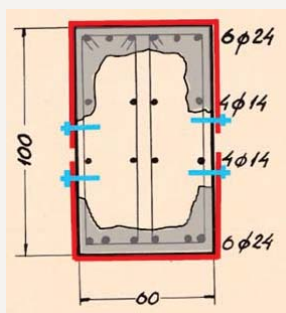
- > Typiske krav til brandbeskyttelse
  - maks. 380°C på betonoverflade
  - maks. 250 °C ved armeringen
  - fastholdt brandbeskyttelse
  - begrænset afskalning
- > Plader eller påsprøjtet
- > Nødvendig tykkelse
  - typisk 20 – 40 mm



Copyright: Promat International

## Reparation af brandskadet beton

- > Principielt som andre reparationer:
  - dårlig/nedbrudt beton fjernes
  - reparationsområdet renses og klargøres
  - reparation udføres
- > Metoder:
  - håndudsætning
  - støbning vha. form
  - sprøjtstøbning



## Sammenfatning

- > Der findes mange gode redskaber til at dimensionere for brand
- > Der findes en række metoder, teoretiske og praktiske til at vurdere skaderne på beton efter brandpåvirkning
- > Beton kan beskyttes effektivt mod brand
- > Vigtigt at tænke på, at
  - konstruktioner skal kunne klare brand i en krævet periode,
  - sikkerhed mod kollaps efter brand kræver særskilt analyse,
  - Minimering af skader som følge af brand kræver særlige tiltag.

## Hvis alt går galt!

