

**FORSLAG TIL
BEREGNINGSMETODE TIL BRANDTEKNISK
DIMENSIONERING AF KONSTRUKTIONER I
LETKLINKERBETON**

Kristian Hertz



**RAPPORT
R-017
1997**

ISSN 1396-4011
ISBN 87-7877-016-5

**INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET**



INDHOLDSFORTEGNELSE

	Indledning	side 2
1.1	Generelt	side 2
1.2	Materialeegenskaber	side 2
	1.2.1 Letklinkerbetons materialeegenskaber	side 2
	1.2.2 Armerings materialeegenskaber	side 5
1.3	Bestemmelser af temperaturfordelinger ved prøvning	side 6
1.4	Bestemmelser af temperaturfordelinger ved beregning	side 7
1.5	Eftervisning af bæreevne ved prøvning	side 9
1.6	Eftervisning af bæreevne ved beregning	side 9
1.7	Konstruktionsudformning	side 12
	1.7.1 Samlinger og vederlag	side 12
	1.7.2 Afskalning	side 12

INDLEDNING

Nærværende rapport er udarbejdet som en vejledning i brandteknisk beregning af konstruktioner af letklinkerbeton. Grundlaget derfor er dels en metodik udarbejdet til konstruktioner af beton med tunge tilslag vurderet med hensyn til de afvigelser, som ændringen i tilslag kan give anledning til og dels beregningsmæssige eftervisninger af metoderne i forhold til enkelte udvalgte brandtest i fuld skala. De anførte materialeegenskaber hidrører dels fra prøvningsserier afprøvet i litteraturen og dels fra prøvninger af aktuelle letklinkerbetoner. Trækstyrkevariationen er ansat konservativt.

1.1 GENERELT

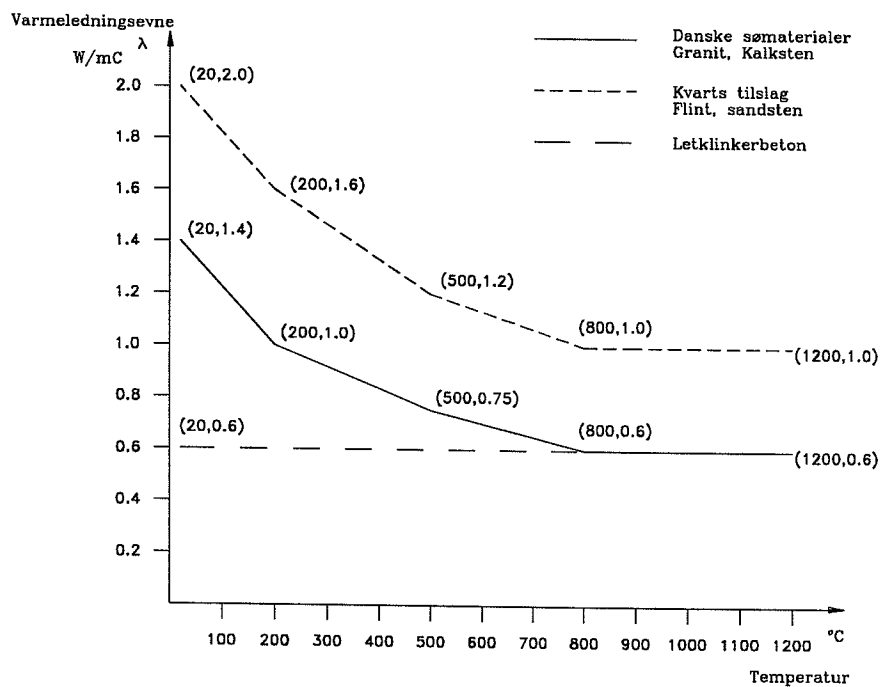
- (1)p Konstruktioner, hvortil der stilles krav om brandmodstandsevne, skal udformes således, at bæreevnen er tilstrækkelig under brandpåvirkning i overensstemmelse med DS 409 og DS 410.
- (2)p Det skal sikres, at konstruktionen bevarer sin sammenhæng under brand i det omfang, som er nødvendigt for dens funktion og samlede bæreevne.

1.2 MATERIALEEGENSKABER

- (1)p Der skal tages hensyn til, at såvel styrke, stivhed som termiske egenskaber ændres, når materialerne opvarmes.
- (2) Hvis der ikke foreligger veldokumenterede målinger af materialeegenskaberne, kan de i det følgende angivne variationer af mekaniske og termiske parametre anses for at være på den sikre side for de anførte typer af materialer.

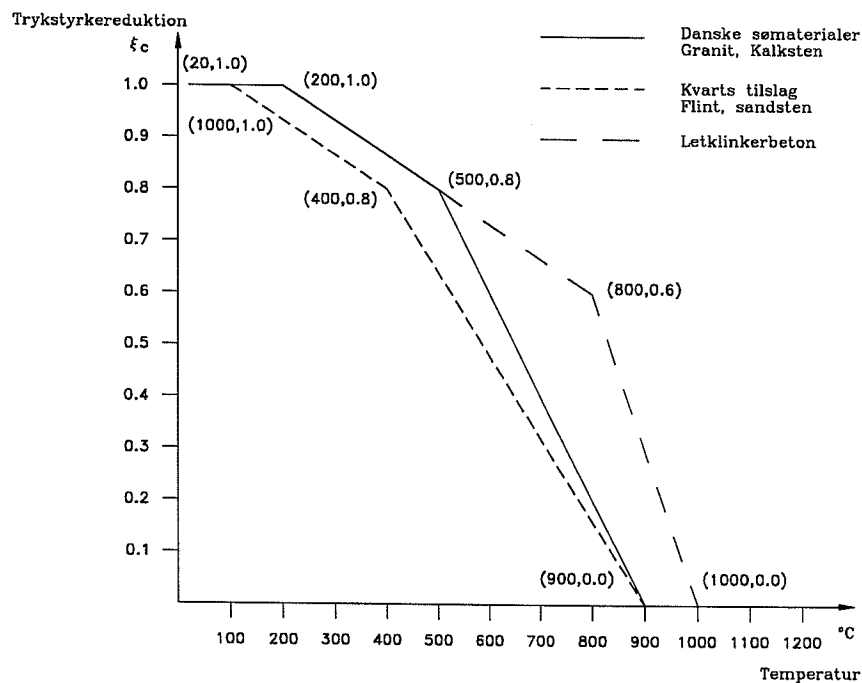
1.2.1 Letklinkerbetons materialeegenskaber

- (1) Varmekapaciteten kan sættes til $c_p = 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.
- (2) Varmeledningsevnen som funktion af temperaturen kan bestemmes i henhold til figur 1.2.1 a.

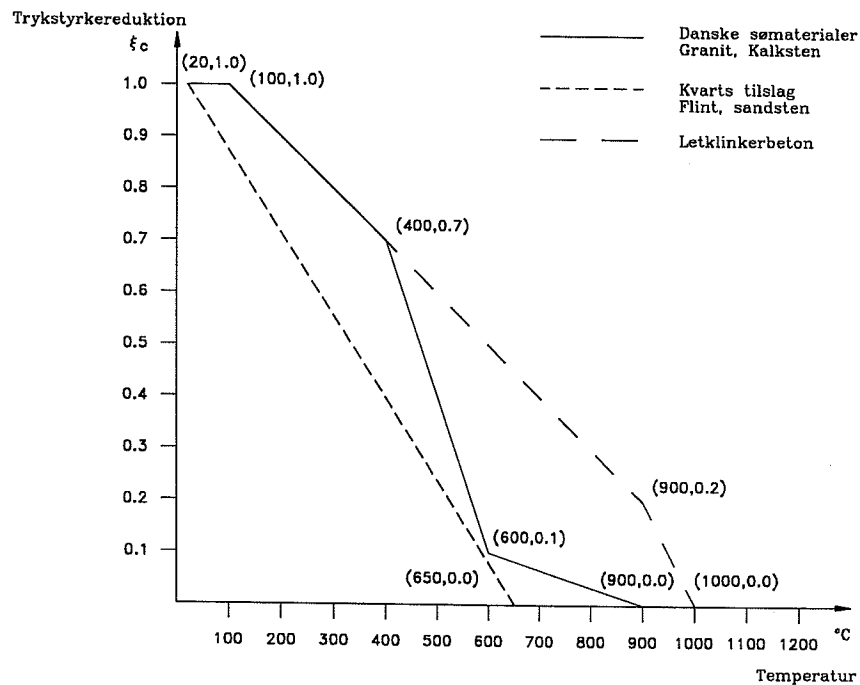


Figur 1.2.1 a. Værdier af varmeledningsevne for forskellige typer af beton under opvarmning.

- (3) Reduktion af betonens trykstyrke under opvarmning henholdsvis afkøling kan bestemmes i henhold til figur 1.2.1 b og 1.2.1 c.

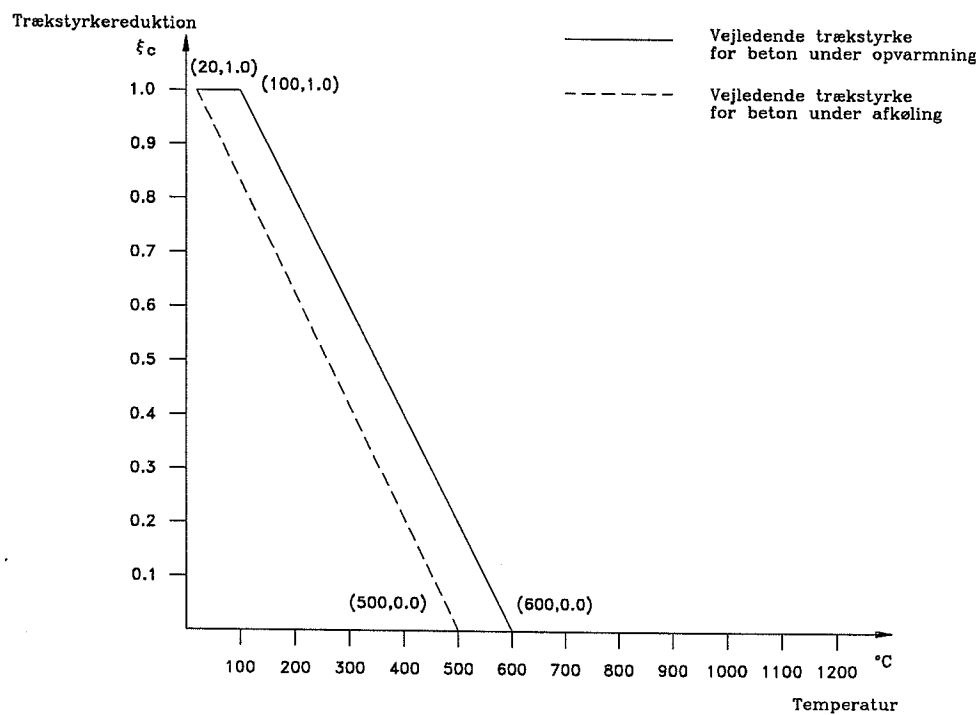


Figur 1.2.1 b. Værdier for reduktionen ξ_c af trykstyrke for forskellige typer af beton under opvarmning.



Figur 1.2.1 c. Værdier for reduktionen ξ_c af trykstyrke for forskellige typer af beton efter afkøling som funktion af betonens maksimale temperatur. Værdierne kan benyttes ved slutningen af og efter parametriske brandforløb.

- (4) Reduktion af betonens trækstyrke kan bestemmes i henhold til figur 1.2.1 d.



Figur 1.2.1 d. Værdier for reduktionen ξ_{ct} af betons trækstyrke under opvarmning og efter afkøling.

- (5) Et punkt (ϵ, σ) på arbejdskurven svarende til 20°C kan afbildes i et punkt på den varme arbejdskurve $(\epsilon/\xi_c, \xi_c \cdot \sigma)$, hvor ξ_c er reduktionsfaktoren for trykstyrken af den varmepåvirkede beton.
- (6) Reduktionen af betonens E-modul kan sættes til ξ_c^2 .
- (7) Brudtøjningen for beton kan sættes til $\epsilon_{cu} = \epsilon_{cu20}$, hvor ϵ_{cu20} er brudtøjningen før brand.
- (8) Temperaturudvidelseskoefficienten kan for beton sættes til:

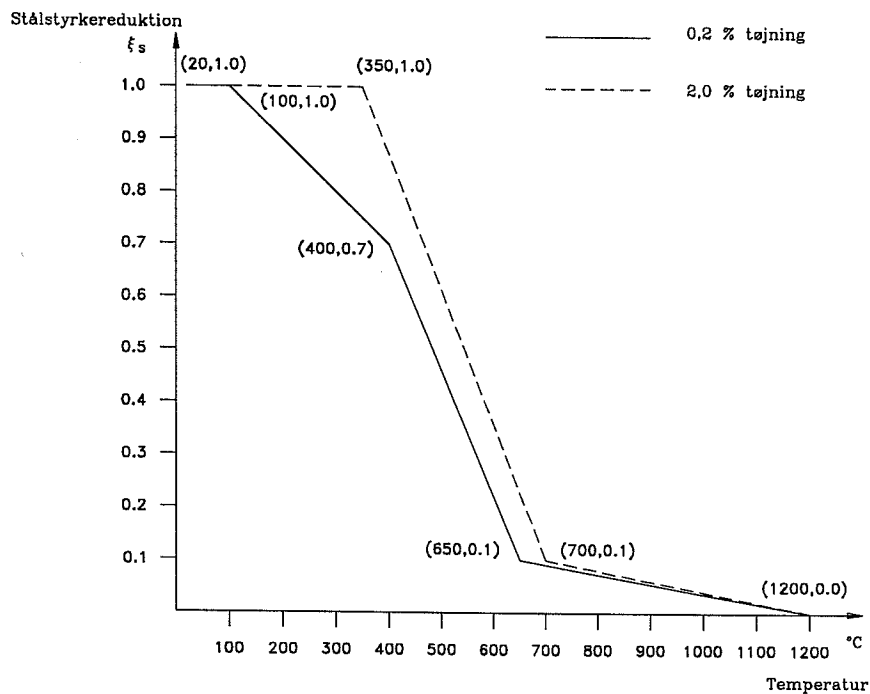
$$\Delta l / l = 1.1 \cdot 10^{-5} \left(1 - 2.35 \frac{\sigma}{f_{cd}(20^\circ C)} \right) K^{-1}, \Delta l / l \geq 0,0$$

hvor

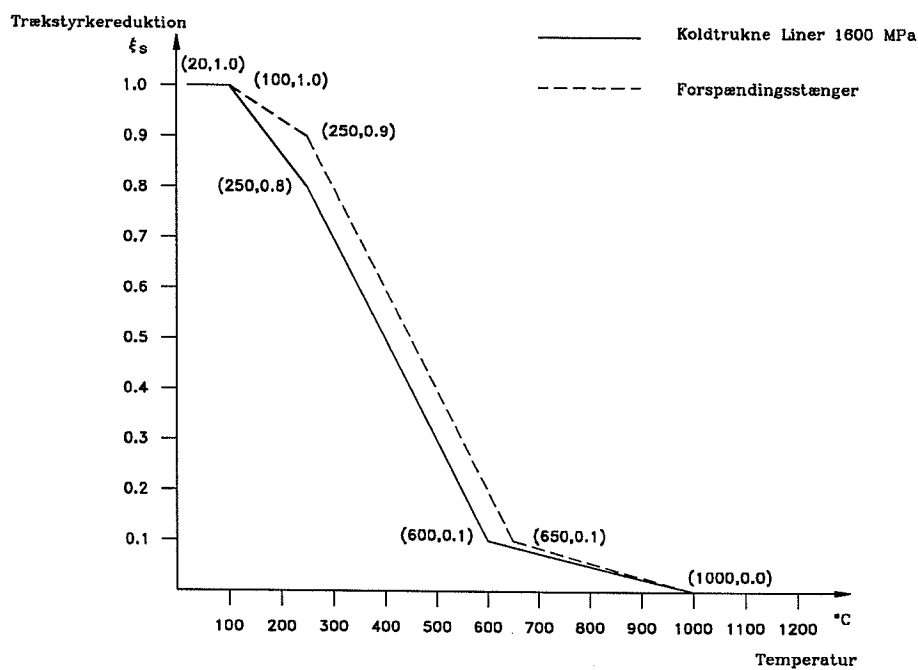
- σ er betontrykspænding
- $f_{cd}(20^\circ C)$ er betontrykstyrken bestemt ved 20°C.

1.2.2 Armerings materialeegenskaber

- (1) Reduktion af slap armeringsståls flydespænding kan bestemmes i henhold til figur 1.2.2 a. Kurven for 2.0 % tøjning kan anvendes, hvis det kan eftervises, at træktøjningen er mindst 2.0 %. Ved tøjningsniveauer mellem 0,2% og 2,0% kan der interpoleres lineært mellem de to kurver. Hvor tøjningen ikke undersøges, benyttes kurven for 0,2%.
- (2) Reduktion af forspændingsståls trækbrudstyrke kan bestemmes i henhold til figur 1.2.2 b.
- (3) Kolddeformeret stål kan have en større reduktion af 0,2% spændingen end armeringsstål, der ikke er kolddeformeret. Denne reduktion genvindes ikke ved afkøling.
- (4) Ved forspændte konstruktioner kan forspændingskraften mistes helt eller delvist på grund af brand.
- (5) Som en tilnærmelse kan det antages, at alle spændinger i arbejdskurven og elasticitetsmodulen reduceres med samme faktor som 0.2 % spændingen.
- (6) Temperaturudvidelseskoefficienten kan sættes til $\Delta l / l = 1.1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$.



Figur 1.2.2 a. Værdier for reduktioner ξ_s af varm- og koldtvalsede armeringsståls styrker ved tøjninger på 0,2 % og 2,0 %.



Figur 1.2.2 b. Værdier for reduktioner ξ_s af nogle typer forspændingsståls trækbrudstyrke som funktion af temperaturen.

1.3 BESTEMMELSE AF TEMPERATURFORDELINGER VED PRØVNING

- (1) Prøvning for standardbrandpåvirkning kan ske i overensstemmelse med DS1051.1.

1.4 BESTEMMELSE AF TEMPERATURFORDELINGER VED BEREKNING

- (1)P Ved bestemmelse af temperaturfordeling i en konstruktion skal variationen af materialernes termiske egenskaber tages i regning.
- (2) Beregning af temperaturfordelinger i en konstruktion sker principielt ved løsning af varmeledningsligningen.
- (3) Der kan ses bort fra armeringens indflydelse på temperaturfordelingen.
- (4) Følgende tilnærmede beregningsmetode kan anvendes for beregning af fordelingen af temperaturstigningen i rektangulære tværsnit eller tværsnit sammensat af rektangulære dele ved påvirkning af en standardbrand.
- (5) For en *ensidet påvirket væg* eller plade vil til tiden t (i min.) i dybden x fra den eksponerede overflade kunne sættes til:

$$\Theta_1(t, x) = 312 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) e^{-1,9k(t) \cdot x} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - k(t) \cdot x\right) ^\circ \text{C} \quad \text{for } x < \frac{\pi}{2 \cdot k(t)}$$

$$\text{og } \Theta_1(x, t) = 0^\circ \text{C} \quad \text{for } x \geq \frac{\pi}{2 \cdot k(t)}$$

$$\text{hvor } k(t) = \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_p}{750 \cdot \lambda \cdot t}},$$

Θ_1 er temperaturstigningen i $^\circ\text{C}$

x er afstanden fra overfladen i m,

t er tiden i minutter,

λ er varmeledningsevnen i $\text{W/m}^\circ\text{C}$

ρ er densiteten i kg/m^3 og

c_p er den specifikke varmekapacitet i $\text{J/kg}^\circ\text{C}$

Varmeledningsevnen sættes konstant til $0,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	mm
30	743	512	340	217	132	75	38	20	20	20	20	20	20	20	20	20	$^\circ\text{C}$
60	837	645	489	364	265	188	130	87	55	33	20	20	20	20	20	20	$^\circ\text{C}$
120	931	776	641	525	426	342	272	213	165	126	94	68	48	32	20	20	$^\circ\text{C}$

Tabel 1.4 a. Temperaturstigningen for 30, 60 og 120 minutter ved ensidig standardbrandpåvirkning af letklinkerbeton bestemt med varmeledningsevnen sat konstant til $0,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Til sammenligning er i tabel 1.4 b. og 1.4 c. vist temperaturstigningen af beton med tilslag af hhv. granit og kvarts.

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	mm
30	743	491	310	186	104	53	23	20	20	20	20	20	20	20	20	20	°C
60	837	627	460	329	229	155	101	62	35	20	20	20	20	20	20	20	°C
120	931	760	615	491	388	303	233	176	131	95	67	45	28	20	20	20	°C

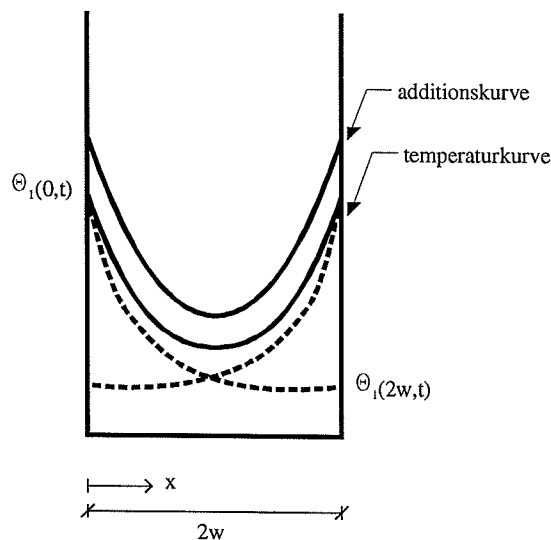
Tabel 1.4 b. Temperaturstigningen for 30, 60 og 120 minutter ved ensidig standardbrandpåvirkning af beton med tilslag af granit bestemt med varmeledningsevnen sat konstant til værdien for 500°C.

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	mm
30	743	537	378	260	170	107	64	35	20	20	20	20	20	20	20	20	°C
60	839	667	525	407	311	234	172	124	87	59	37	22	20	20	20	20	°C
120	931	794	673	473	393	323	264	213	170	134	105	80	60	44	30	20	°C

Tabel 1.4 c. Temperaturstigningen for 30, 60 og 120 minutter ved ensidig standardbrandpåvirkning af beton med tilslag af kvarts bestemt med varmeledningsevnen sat konstant til værdien for 500°C.

- (6) For en *tosidet påvirket væg eller plade* med tykkelsen $2w$ kan temperaturstigningen Θ_2 bestemmes tilnærmet ved superposition af to kurver for ensidet påvirkning fra hver side på følgende vis:

$$\Theta_2(x, t) = (\Theta_1(x, t) + \Theta_1(2w - x, t)) \cdot \frac{\Theta_1(0, t)}{\Theta_1(0, t) + \Theta_1(2w, t)}$$

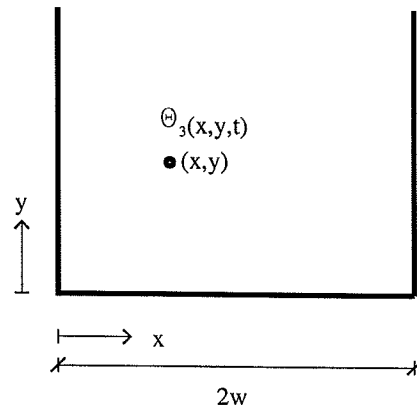


Figur 1.4 c. Temperaturforhold i en tosidet påvirket væg eller plade.

- (7) For *tresidet påvirket bjælke eller søjle* med tykkelsen $2w$ kan temperaturstigningen Θ_3 i et punkt (x, y) , hvor $y \geq w$ bestemmes som for tosidet påvirket væg eller plade og hvor $y \leq w$, kan temperaturen bestemmes som:

$$\Theta_3(x, y, t) = \Theta_2(x, t) + \Theta_1(y, t) - \frac{\Theta_2(x, t) \cdot \Theta_1(y, t)}{\Theta_1(0, t)}$$

- (8) For *firesidet påvirket søjle* med tykkelsen $2w$ og tværsnitshøjden h kan temperaturstigningen i et punkt (x,y) , hvor $h-w \geq y \geq w$ bestemmes som for tosidet påvirket væg eller plade og hvor $y \leq w$, kan temperaturen bestemmes som for tresidet påvirket søjle.



Figur 1.4 d. Definition af koordinater for temperaturberegning i tre- eller firesidet påvirkede konstruktioner.

1.5 EFTERVISNING AF BÆREEVNE VED PRØVNING

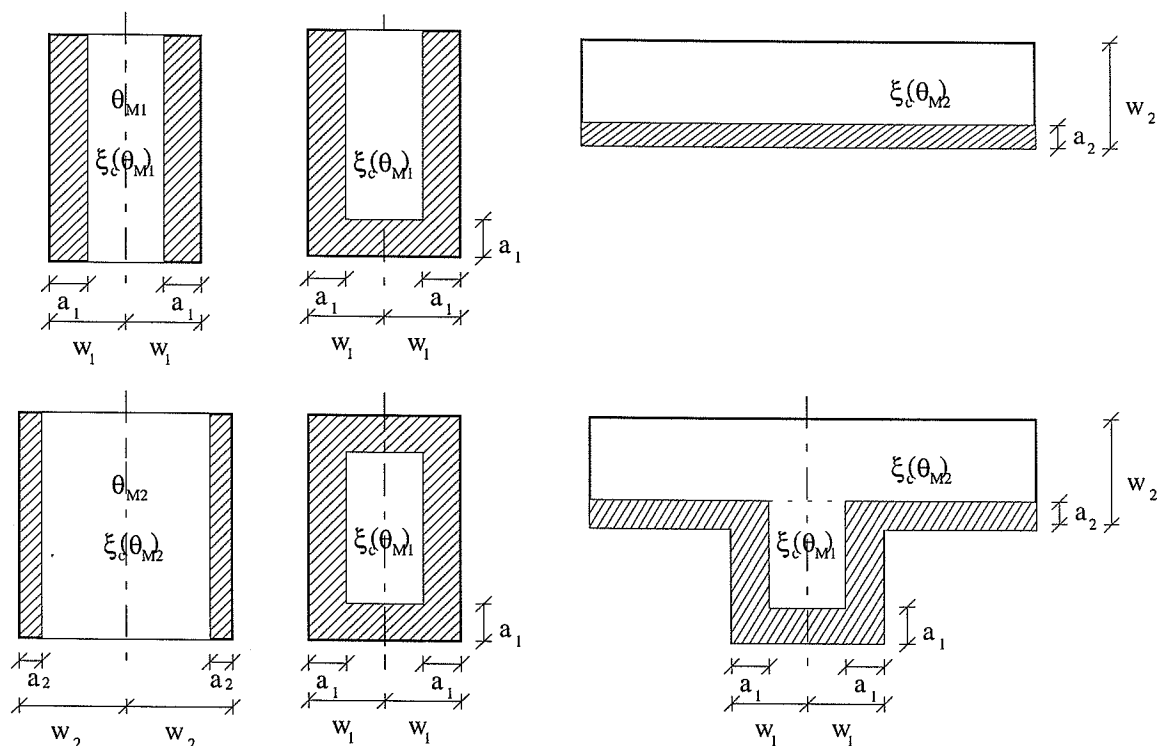
- (1) Prøvning for standardbrandpåvirkning kan ske i overensstemmelse med DS1051.1.

1.6 EFTERVISNING AF BÆREEVNE VED BEREKNING

- (1)P Ved beregning af bæreevne anvendes sædvanlig anerkendt teori under hensyntagen til materialernes temperaturafhængighed og de temperaturforårsagede deformationer, tvangskræfter og egenspændinger.
- (2)P De parametre, der lægges til grund for en beregningsmæssig eftervisning, skal være bestemt på baggrund af prøvning, hvor brandforløbet svarer til det brandforløb, der anvendes ved beregning.
- (3)P Udover beregningsmæssig eftervisning skal materialer og konstruktiv udformning vælges således, at der ikke kan opstå andre svigtformer.
- (4) Mulige svigtformer kan fx være forskydning, gennemløkning, og afskalning.
- (5)P Armeringsstål, som medregnes i bæreevneeftervisningen, skal sikres at have den fornødne sammenhæng med konstruktionen.
- (6)P Der skal tages hensyn til uens temperaturfordelinger og de deraf følgende variationer af materialeegenskaberne.
- (7) Der kan normalt tages hensyn til den termisk betingede variation af de mekaniske parametre ved at modellere det brandpåvirkede tværsnit som et reduceret tværsnit. Det oprindelige betontværsnit reduceres med en skadet randzone, som ikke tages i beregning, og inden for denne kan de mekaniske parametre betragtes som konstante.

- (8) Bæreevneeftervisningen foretages på det samlede reducerede tværsnit bestående af beton og armering med de metoder, som gælder i kold tilstand under anvendelse af de til tværsnittet hørende mekaniske parametre.
- (9) Er en konstruktion påvirket af et nominelt brandforløb, bestemmes konstruktionens bæreevne til et fast tidspunkt svarende til den krævede brandmodstandstid.
- (10) Er en konstruktion påvirket af et parametrisk brandforløb kan bæreevnen bestemmes som den minimale bæreevne under hele brandforløbet.
- (11) Et reduceret tværsnit kan bestemmes på følgende måde til et givet tidspunkt af et brandforløb.

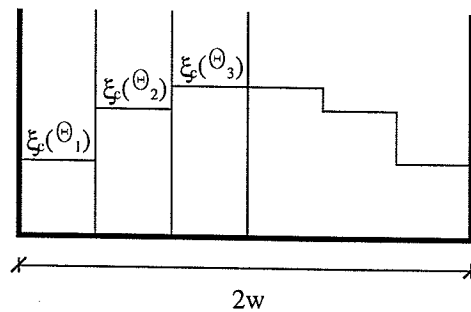
Temperaturfeltet bestemmes i det oprindelige betontværsnit enten ved en beregning med den aktuelle geometri eller tilnærmet ved at opdele tværsnittet i rektangulære deltværsnit, hvor isotermerne forløber parallelt med brandpåvirkede langsider. Bredden betegnes w af et rektangulært deltværsnit påvirket af brand på kun en side og $2w$, hvis to parallelle sider er påvirket. Hvis tre eller fire sider er påvirket, bestemmes w som den mindste af de mulige størrelser efter tilsvarende regler. For hvert rektangulært deltværsnit betragtes en tosidigt påvirket væg af tykkelse $2w$ af samme betonkvalitet. Temperaturen i midtplanet kaldes Θ_M og reduktionen af betonens trykstyrke betegnes $\xi_c(\Theta_M)$. Princippet er vist på figur 1.6 a.



Figur 1.6 a. Reduceret tværsnit, opdeling i deltværsnit og ækvivalente tosidigt påvirkede vægge.

Middelværdien af trykstyrkens reduktion $\xi_{c,middel}$ over væggen udgør

$$\xi_{c,middel} = \frac{1}{w} \int_0^w \xi_c(\Theta(x)) dx$$



Figur 1.6 b. Opdeling af tosidigt påvirket væg i lag.

Hvis halvdelen af den tosidigt påvirkede væg opdeles i n lige tykke lag, hvor $n \geq 3$, kan middelværdien af trykstyrkens reduktion med god tilnærmelse bestemmes ud fra reduktionerne i midten af hver af de n lag ved udtrykket

$$\xi_{c,middel} = \frac{(1 - 0.2/n)}{n} \sum_{i=1}^n \xi_c(\Theta_i)$$

For trykzoner i bjælker eller plader, og for trykpåvirkede konstruktioner, hvor instabilitet ikke er kritisk, bestemmes tykkelsen a af den beskadigede yderzone således, at middelværdien af trykstyrkereduktionen bliver den samme for det reducerede deltværsnit, som for det virkelige brandpåvirkede deltværsnit. Tykkelsen af den beskadigede yderzone a udgør da

$$a = w \cdot \left[1 - \frac{\xi_{c,middel}}{\xi_c(\Theta_M)} \right]$$

Dersom udbøjning eller instabilitet er afgørende bestemmes tykkelsen af den beskadigede yderzone a således, at bøjningsstivheden bliver den samme for det reducerede deltværsnit, som for det virkelige brandpåvirkede deltværsnit. Tykkelsen kan da ansættes til

$$a = w \cdot \left[1 - \left(\frac{\xi_{c,middel}}{\xi_c(\Theta_M)} \right)^{1.3} \right]$$

Trykstyrke og E-modul sættes til 0 i de beskadigede yderzoner, og til

$$f_{cd}(\Theta_M) = \xi_c(\Theta_M) \cdot f_{cd}(20^\circ\text{C}) \quad \text{og} \quad E_{cd}(\Theta_M) = (\xi_c(\Theta_M))^2 \cdot E_{cd}(20^\circ\text{C})$$

i de reducerede tværsnit.

- (12) Armeringsstål i tværsnittet
Temperaturen bestemmes for hvert armeringsstål som den temperatur et uarmeret tværsnit ville have i det punkt, hvor armeringsstålets centerlinie ligger. Armeringsstålet tildeles flydspænding, elasticitetsmodul og arbejdskurve svarende til temperaturen.
- (13) Bøjningsberegning foretages efter sædvanlige principper for kold eftervisning.
- (14) Ved beregning af søjler og vægge, kan den termiske udbøjning give et bidrag til excentriciteten, som kan bestemmes som

$$e_{\text{termisk}} = \frac{1}{8} \frac{1.1 \cdot 10^{-5} [\Theta_s - \Theta_{r,\text{kant1}} k_{r,\text{kant1}}]}{h_{r,\text{ef}}} \ell^2 \quad \text{for revnede tværsnit og som}$$

$$e_{\text{termisk}} = \frac{1}{8} \frac{1.1 \cdot 10^{-5} [\Theta_{r,\text{kant2}} k_{r,\text{kant2}} - \Theta_{r,\text{kant1}} k_{r,\text{kant1}}]}{h_r} \ell^2 \quad \text{for urevnede tværsnit}$$

hvor

- $k_{r,\text{kant1}} = (1 - 2.35 \sigma_{r,\text{kant1}} / f_{ck}(20^\circ\text{C}))$, dog mindst 0 og
- $k_{r,\text{kant2}} = (1 - 2.35 \sigma_{r,\text{kant2}} / f_{ck}(20^\circ\text{C}))$, dog mindst 0 og
- Θ_s er temperaturen i armeringen,
- $\Theta_{r,\text{kant1}}$ er temperaturen i den mest trykkede kant af det reducerede tværsnit,
- $\sigma_{r,\text{kant1}}$ er trykspændingen i denne kant før en evt. instabilitetsberegning,
- $\Theta_{r,\text{kant2}}$ er temperaturen i den mindst trykkede kant af det reducerede tværsnit,
- $\sigma_{r,\text{kant2}}$ er trykspændingen i denne kant før en evt. instabilitetsberegning,
- ℓ er søjlelængden,
- h_r er højden af det reducerede tværsnit og
- $h_{r,\text{ef}}$ er den effektive højde fra armeringen til den mest trykkede kant af det reducerede tværsnit.

- (15) Armeringsståls forankringsevne kan reduceres med den mindste af følgende værdier:
- reduktionen af trykstyrken af den omgivende beton jf. fig. 1.2.1 a. svarende til temperaturen i armeringsstålet,
 - reduktionen af trækstyrken af tværarmeringen jf. fig. 1.2.2 a.

1.7 KONSTRUKTIONSUDFORMNING

- (1)P Man skal ved konstruktionsudformningen sikre sig, at de forudsætninger, som den brandtekniske vurdering bygger på er opfyldt.
- (2) Ensidig påvirkning af konstruktionselementer kan give instabilitet
- (3) Afstivninger skal kunne bevare deres funktion i den tid der er nødvendig for det pågældende konstruktionselement.

1.7.1 Samlinger og vederlag.

- (1)P Samlinger og vederlag skal udformes således, at de fornødne termiske bevægelser kan finde sted, eller således, at de termiske tvangskræfter forårsaget af manglende bevægelighed kan optages.

1.7.2 Afskalning.

- (1)P Konstruktionen skal udformes således og af sådanne materialer, at afskalning ikke påvirker den bærende funktion.

(12) For letklinkerbeton med matrix af normal tæthed kan der ses bort fra afskalningsrisiko under følgende forudsætninger:

- fugtindholdet er under 4 vægtprocent
- hovedarmeringens dæklag er mindre end 40 mm.

For større dæklag kan der suppleres med armering til sikring mod afskalning.

Ved beton af normal tæthed forstås her beton, hvis hydratiserede cementpasta ikke er tætnet ved anvendelse af partikler mindre end cementkornene. Såfremt der anvendes en betonkvalitet med en tættere struktur bør afskalningsrisikoen undersøges for den aktuelle beton.