

Bærende konstruktioners brandmodstandsevne vurderet ved beregning

Af civilingeniør P. J. Knudsen, Birch & Krogboe K/S

Bærende bygningsdele, til hvilke der stilles krav om en vis brandmodstandsevne (det tidsrum målt i minutter i hvilket en brandpåvirket bygningsdel kan bære en nærmere defineret servicelast uden at svigte) skal gøres til genstand for en brandteknisk vurdering.

Denne har indtil fremkomsten af de nye konstruktionsnormer hovedsageligt været fortaget på grundlag af

1. Bygningsreglementets eksempelsamling. Boligministeriets mk-godkendelser.
2. Egentlig brandprøvning.
3. Vurderinger på basis af 1 og 2 i samråd med de godkendende myndigheder.

Der har også tidligere i et vist omfang været foretaget brandtekniske vurderinger af konstruktioners brandmodstandsevne ved beregning. Ved disse beregninger har man dog savnet et normmæssigt grundlag. Dette foreligger nu, bortset fra betonnormen, der forventes at foreligge i løbet af foråret 1984.

Normgrundlaget, oversigt

Dette er:

for så vidt angår sikkerhed og last:
DS 409 sikkerhed, kap. 1, 3, 4 og 5
DS 410 last, kap. 17.4

for så vidt angår materialer:

DS 411 vedr. Beton, kap. 9 særlige forhold
DS 412 vedr. Stål, kap. 9 særlige forhold
DS 413 vedr. Træ, kap. 9 særlige forhold

På basis af dette grundlag kan der, om det ønskes, ved hjælp af sædvanlige beregningsmetoder og teorier foretages en beregningsmæssig vurdering af en given bygningsdels brandmodstandsevne, blot man tager hensyn til bygningsdelens »varme« materialeegenskaber.

Et vigtigt beregningstrin er derfor bestemmelsen af temperaturer i bygningsdelen (konstruktionen).

Normernes indhold, kort gennemgang

I det følgende angives ganske kort det normmæssige grundlag, der har relevans ved en beregningsmæssig vurdering af en bygningsdels brandmodstandsevne samt kommentarer og eksempler på re-

sultater af dets anvendelse i praksis.

DS 409 Sikkerhed

I kap. 1 er forklaret de grundlæggende brandtekniske begreber.

I kap. 4 er defineret, hvad der forstås ved den termiske brandlast, en bygningsdel skal forudsættes påvirket af. Den er i tid-temperaturforløbet i brandrummet bestemt ved:

Enten

Standardbrandkurven (i h.t. DS 1051.1) suppleret med et brandmodstandsevnekrav (t_b minutter), idet bygningsdelen skal bevare sin bæreevne i mindst t_b minutter.

Eller

Afbrænding af den i DS 410 definerede brandbelastning ($q = 12 \times t_b$ MJ/m² gulv), idet temperaturforholdene i brandrummet til ethvert tidspunkt afledes af kravet om balance i energiomsætningen, og idet bygningsdelen skal bevare sin bæreevne i det fulde tid-temperaturforløb.

Et eksempel på hver af de to brandforløb fremgår af fig. 1.

I kap. 5 angives, at lastkombination 4 gælder for konstruktioner for hvilke, der kræves en brandmodstandsevne.

Det angives også at:

Den termiske brandlast bestemmes efter kap. 4.

Brandforårsagende laster og deformationer skal medtages ved dimensionering.

Vind- og vandret masselast kan negligeres.

Der anvendes de samme karakteristiske laster, som er virkende inden branden.

Bygningsdelens isolationsevne og integritet skal desuden vurderes, hvis bygningsdelen også har en adskillende funktion.

Partialkoefficienter på alle laster er 1 (en variabel last $\gamma_f = 1$, øvrige variable laster $\gamma_f = \psi$).

Temperaturens indflydelse på materialeegenskaber skal medtages.

Værdier på materialeegenskaber svarer til korttidsbelastning.

Partialkoefficienter på alle materialeparametre er 1.

Der skal tages hensyn til ændringer af geometrien herunder evt. tværsnitsreduktioner.

DS 410 Last

I kap. 17 er standardbrandkurven nærmere defineret ved formeludtrykket:

$$T_g - T_o = 345 \times \log_{10}(8t + 1) \text{ } ^\circ\text{C, hvor}$$

T_g er temperaturen i brandrummet

T_o er temperaturen i brandrummet til begyndelsestidspunktet $t = 0$

t er tiden målt i minutter

I samme kapitel vejledes der om, at man ved det alternative tid-temperaturforløb (jf. DS 409 kap. 4) kan anvende den svenske »Åbningsfaktormetode« med indgangsparametre:

åbningsfaktor = dimensionerende åbningsfaktor

$$\text{brandbelastning} = q = 12 \times t_b \times \frac{\text{Vinduesareal}}{\text{Omg. fladers areal}}$$

Et eksempel på hver af de to brandforløb fremgår som foran nævnt af fig. 1.

DS 411 Beton

Temperaturbestemmelse:

Temperaturfordelingen i bygningsdelen bestemmes ved at løse Fourier' s varmeledningssligning.

Dette kan kun lade sig gøre analytisk i meget få specialtilfælde, hvorfor det er nødvendigt at bruge computere med tilhørende elementmetode- eller differensmetodeprogrammer.

Vil man ikke det, kan varmeledningssligningen i det endimensionale tilfælde tilnærmes ved et håndberegningssudtryk som angivet i vejledningsafsnittet herom, idet bygningsdelene må forudsættes at have visse mindste tværsnitsdimensioner således, at hver brandpåvirket flade i tilstrækkelig grad kan siges at opfylde betingelserne for, at der er tale om halv- uendeligt legeme. Isothermerne forudsættes at forløbe med cirkulære overgangsstykker med radius 30-35 mm ved tværsnittets hjørner, hvilket medfører at armeringsstængerne ved tværsnits hjørner vil have en temperatur, der svarer til den isotherm, der ligger ca. 10 mm nærmere den eksponerede overflade.

Det skal også her bemærkes, at tilnærmelsesudtrykket forudsætter en brandpåvirkning som standardbrandkurven og faste værdier af varmeledningsevne, hhv. specifik varmekapacitet for betonen.

Vil man beregne bygningsdelen for et alternativt brandforløb som f.eks. en »åbningsfaktorbrand« må man udvikle et andet tilnærmelsesudtryk eller tage computere i anvendelse.

Bruges tilnærmelsesudtrykket, kan tempera-

turfordelinger i bygningsdelens tværsnit for en række forud valgte tidspunkter (30, 60, 90 og 120 min) lade sig beregne en gang for alle og resultaterne tegnes ind på en graf som vist på fig. 2, hvor x er armeringens afstand til eksponeret overflade.

Betonens og armeringens »varme« styrker:

I normens vejledningsstof er vist følgende grafer, der kan anvendes, såfremt der ikke foreligger nøjagtigere information om de omhandlede materialeparametre:

Betonens trykstyrke hhv. trækstyrke jf. fig 3

Armeringens flydespænding jf. fig. 4

Desuden kan forskydningsstyrker for betonen i bjælker efter samme vejledning multipliceres med en reduktionsfaktor k , så der på den måde tages hensyn til de dele af tværsnittet, hvis temperaturer er under 200 °C (svarende til fuld styrke), mellem 200 °C og 600 °C (svarende til halv styrke) og over 600 °C (uden nogen styrke).

Bæreevnebestemmelse:

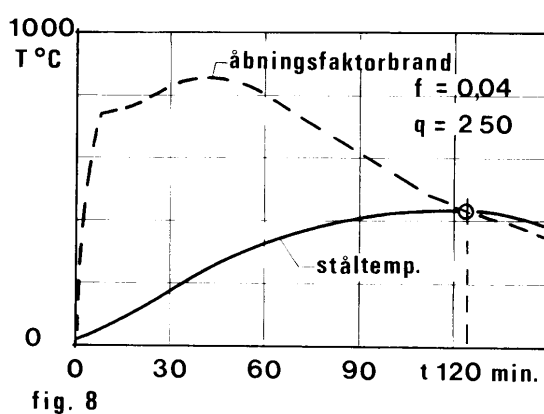
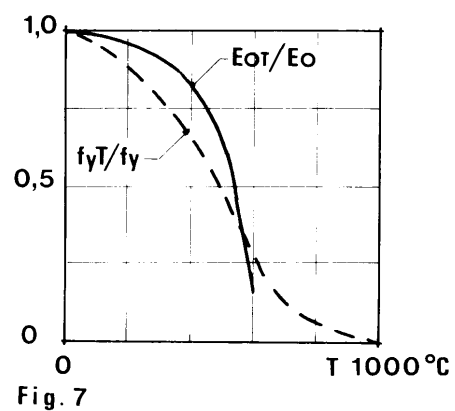
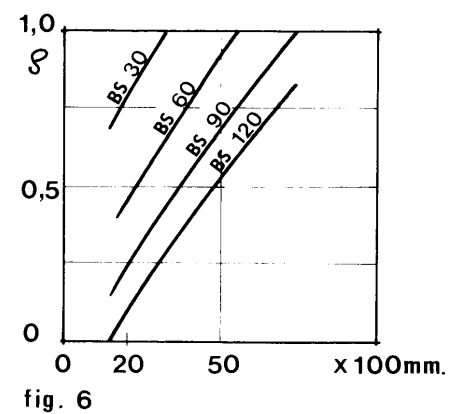
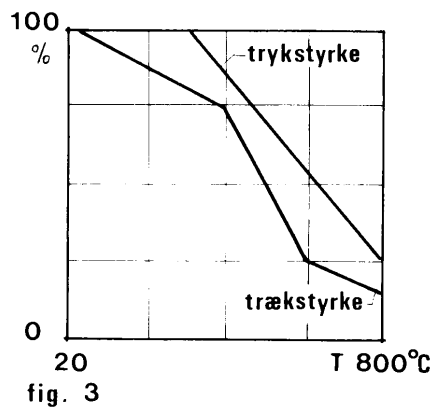
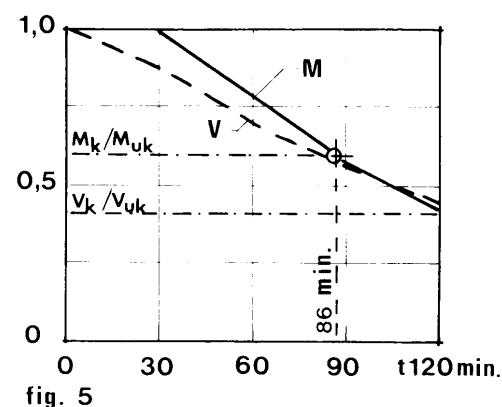
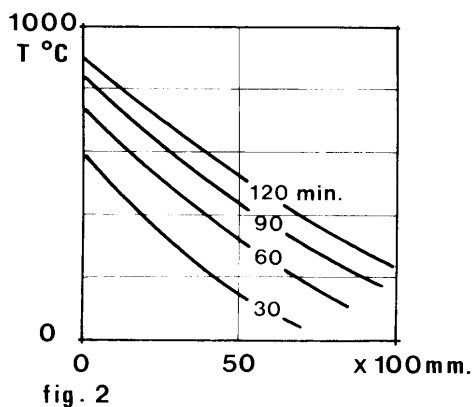
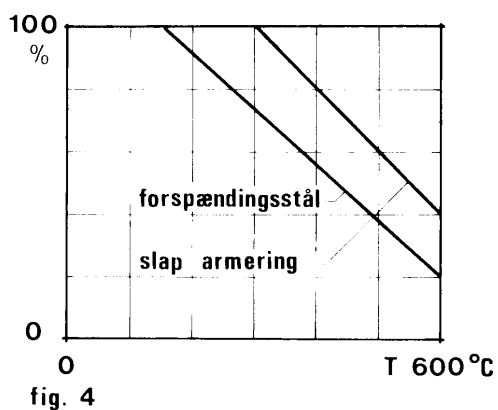
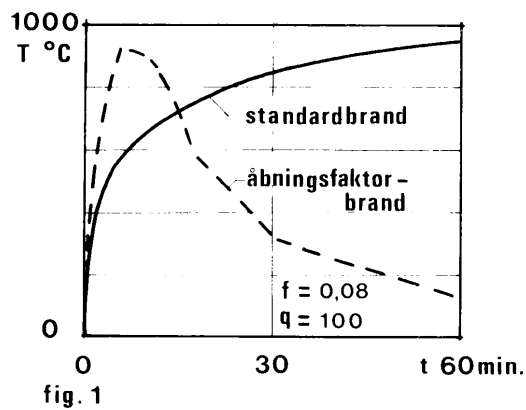
Gennemføres der en beregning pr. tidspunkt af en jernbetonbjælkes »varme« momentbæreevne, hhv. forskydningsbæreevne i brandtilstanden, hvor foran nævnte tilnærmede temperaturbestemmelse kombineres med de i fig. 3 og 4 m.v. angivne »varme« styrker, kan disse afsættes i en graf som vist på fig. 5, idet de i grafen anvendte tidspunkter er 30, 60, 90 og 120 min.

Grafen hører til en jernbetonbjælke, om hvilken følgende er forudsat:

bredde 300 mm, højde 500 mm, spændv. 5 m, betondæklag 30 mm på al armering, længdearmering 3 tentor 20, bøjlemarmering rundjern 7 pr. 200 mm, normal sikkerhedsklasse og kontrolklasse, last $g = 20 \text{ kN/m}$, $q = 20 \text{ kN/m}$, brand påvirket på sider og underside af en standardbrand.

Erfaringen viser, at bøjningsarmeringens styrkereduktion i de fleste tilfælde foregår hurtigere end betontrykzonens således, at man med god tilnærmelse kan antage, at den »varme« momentbæreevne reduceres med samme hast som armeringens »varme« trækflydespænding. Udnytter man denne erfaring og kombinerer den med grafen, fig. 2 og grafen, fig. 4 kan der f.eks. for slap armering fremstilles en graf som vist på fig 6.

Går man i denne graf ind med forholdet mellem det karakteristiske snitmoment og den karakteris-



tiske ultimale momentbæreevne ved 20 °C som den ene parameter (q) og armeringens middelfasthed til undersiden (x) (husk specielle forhold vedr. armeringsstængerne ved hjørnerne) som den anden parameter, kan en bjælkes brandmodstandsevne (i min.) bestemmes lynhurtigt for så vidt angår brudmomentet.

Hvis et jernbetontværsnits trykzone er brandpåvirket, er det trykzonens styrkereduktion, der er afgørende.

DS 412 Stål

Temperaturbestemmelse:

Som ved jernbeton skal der foretages en temperaturbestemmelse som funktion af tiden.

Denne er enklere end for et betontværsnit, idet det tillades, at man ser bort fra temperaturgradienter i stålet.

Normen skelner mellem tre tilfælde, idet der for hvert af disse er angivet håndberegningssudtryk for temperaturbestemmelsen:

1. Uisoleret stålprofil
2. Stålprofil med »let isolering«
3. Stålprofil med »tung isolering«

Isoleringsmaterialernes termiske egenskaber skal være dokumenteret ved prøvning (Dantest metode 100.01/01).

Stålets densitet og specifikke varmekapacitet fikseres til de i normens vejledning angivne konstante værdier.

Ad. 2 negligeres isoleringsmaterialets varmekapacitet, og temperaturen på isoleringsmaterialets eksponerede overflade sættes lig brandtemperaturen. En kvalificeret middelværdi for isoleringens varmeledningsevne anvendes.

Ad. 3 tages der hensyn til isoleringsmaterialets varmekapacitet gennem et »korrektionsled« i formelen for temperaturstigningen i stålet pr. tidsstep. I øvrigt er forudsætningerne som ved 2.

Alle tre formler er håndberegningssudtryk.

Erfaringerne ved anvendelse af disse viser følgende forhold, der bør tages højde for:

Ad. 2

Anvendes der ved beregningen konstante termiske materialeegenskaber gennem hele brandforløbet, kan man risikere at få relativt store fejl til den usikre side i temperaturbestemmelsen.

Variere et isoleringsmateriales varmeledningsevne meget med temperaturen, må man, selv om det bevrælliggør håndberegningen, sørge for i hvert tidsstep at korrigere for nævnte variation.

Eller også må man udvikle sig et lille computerprogram, der kan anvendes i alle tilfælde.

Ad. 3

Beregningssudtrykket vil i starten ofte give numerisk ret store negative temperaturtilvækster i stålprofillet således, at det for et stålprofil omstøbt med beton ikke er ualmindeligt at se ståltemperaturer på nogle få hundrede minusgrader.

Ulempen kommer man let til livs ved at negligere alle negative temperaturtilvækster i stålprofillet medens tidsregningen ikke ændres. Erfaringen viser, at der opnås tilstrækkelig gode resultater derved, omend de er noget på den sikre side.

Stålmaterialets »varme« egenskaber:

Såvel stålets flydespænding som elasticitetsmodul aftager med voksende temperatur som angivet i normens vejledningsstof, se fig. 7, der gælder for almindelige konstruktionsstålarter.

Beregning og konstruktion:

Beregninger udføres som angivet i kap. 6 under anvendelse af de »varme« materialeegenskaber.

Deformationer og tvangsspændinger som følge af brand skal kunne optages med den foreskrevne sikkerhed. Forspændingskraften i friktionssamlinger skal påregnes at bortfalde ved høje temperaturer. Fig. 8 viser et eksempel på beregning af temperaturforløbet i et stålprofil isoleret med let isolering.

Forudsætninger:

Standardbrandcelle (SBN 1976:1)

Åbningsfaktorbrand på alle sider, hvor brandbelastningen $q = 250 \text{ MJ/m}^2$ omgivende flade

Dimensionerende åbningsfaktor $f = 0,04 \text{ m}^{0.5}$

Stålprofillets profilforhold $U/A = 100 \text{ m}^{-1}$

Isolerings varmeledningsevne $= 0,145 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$

Isolerings tykkelse $d_i = 25 \text{ mm}$

Maksimaltemperaturen nås til tidspunktet $t = \text{ca. } 124 \text{ min.}$

Den er ca. 437 °C og er ikke kritisk for et normalt udnyttet stålprofil.

DS 413 Træ

Dette materiale »kører sit eget løb« rent beregningsmæssigt, idet en beregning af en bygningsdels bæreevne er baseret på det, der i normen kaldes bygningsdelens »effektive resttværsnit«.

Normen vedrører alene konstruktioner af konstruktionstræ eller limtræ.

Anvendes andre træmaterialer eller foretages

der beklædning, maling eller imprægnering af træprofilen skal der udføres prøvning i h.t. DS 1051.1.

Kraftoverførende ståledele skal beskyttes mod brand. I normen er der angivet udtryk, efter hvilke man kan udregne, i hvilket tempo bygningsdeles tværsnit reduceres.

For en standardbrand er reduktionshastigheden konstant, hvorimod den varierer med tiden, kravet om brandmodstandstiden t_b og brandrummets åbningsfaktor for en åbningsfaktorbrand.

I de angivne reduktionsudtryk er såvel forkulning som materialesvækkelse indenfor forkulningszonen medtaget.

Ved brand med hovedsageligt plaststoffer i brand er der angivet korrektionsfaktorer, der muliggør en hensyntagen til sådanne tilfælde.

Ved beregningen af trækonstruktioner udsat for en standardbrand hhv. forskellige åbningsfaktorbrandforløb er det interessant at erfare f.eks. følgende:

Givet en simpelt understøttet limtrædrager med spændvidden 10,5 m og tværsnittet 140 x 667 mm.
Trækvalitet L 40
Egenlast 2,88 kN/m
Snelast 4,68 tN/m

Dragerenderne er alene fastholdt mod udbøjning og vridning ved enderne.

Dragerne skal være kipningsstabil også under brand.

Myndighedskrav BD 30, 3-sidig indbrænding.

Ved en nærmere beregning viser det sig:

at dragerne kun er brandstabil i 28 min. for en standardbrand og altså dumper, når dette krav stilles.

at drageren kan overleve en åbningsfaktorbrand hvis denne har en åbningsfaktor på f.eks. 0,07 $m^{0,5}$, idet tværsnitsreduktionen stopper ved $t_1 = 26$ min. og det effektive resttværsnit stadig er tilstrækkeligt til at sikre dragerens stabilitet.

Branden stopper før kritisk tværsnitsreduktion.

at drageren anbragt i et rum med en betydelig lavere åbningsfaktor f.eks. 0,03 $m^{0,5}$ ikke vil opfylde brandmodstandskravet, idet beregningen skal gennemføres i hele brandforløbet, dvs. indtil $t_1 = 2 \times t_b = 60$ min. samtidig med, at begyndelsesreduktionshastigheden er 0,57 mm/min. Brandmodstandstiden kan beregnes til $t = 37$ min. $< t_1$.

Branden varer populært sagt for længe. Kritisk tværsnitsreduktion nås før branden er stoppet.