

Aalborg Universitet



**AALBORG  
UNIVERSITY**

## **Træ og brand**

*brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner*

Olesen, Frits Bolonius

*Publication date:*  
2002

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Olesen, F. B. (2002). *Træ og brand: brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. U/ Nr. U0205

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

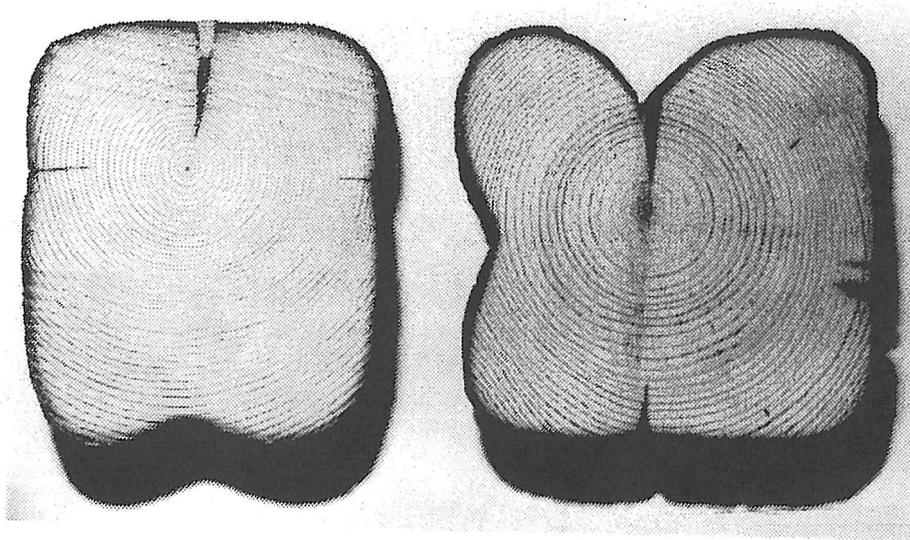
### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Frits Bolonius**

# **Træ og brand**

**Brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner**





# **Træ og brand**

**Brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner**

**Aalborg Universitet · Arkitektur & Design · Bygningsteknik**  
**April 2002**

## **Forord**

Dette kompendium er primært udarbejdet til brug ved undervisningen i Konstruktionsdesign for bygningsingeniørstuderende ved Aalborg Universitet. Det vil tillige kunne benyttes af universitetets arkitekturstuderende og andre med interesse for fagområdet. I kompendiet gives en oversigtlig fremstilling af det teoretiske grundlag for brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner, således som det bl.a. er formuleret i det danske konstruktionsnormkompleks.

I kompendiets afsnit 1 præsenteres de generelle principper for brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner. Afsnit 2 omhandler bestemmelsen af det effektive resttværnsnit for beskyttede og ubeskyttede trækonstruktioner ved resttværnsnitsmetoden og styrkereduktionsmetoden. Afsnit 3 omhandler træs styrke- og stivhedsegenskaber under brandpåvirkning, og der gives en række eksempler på de praktiske dimensioneringsberegninger. Endelig gives en kort præsentation af forenklede metoder til brandteknisk dimensionering af trækonstruktionssamlinger.

Aalborg, april 2002

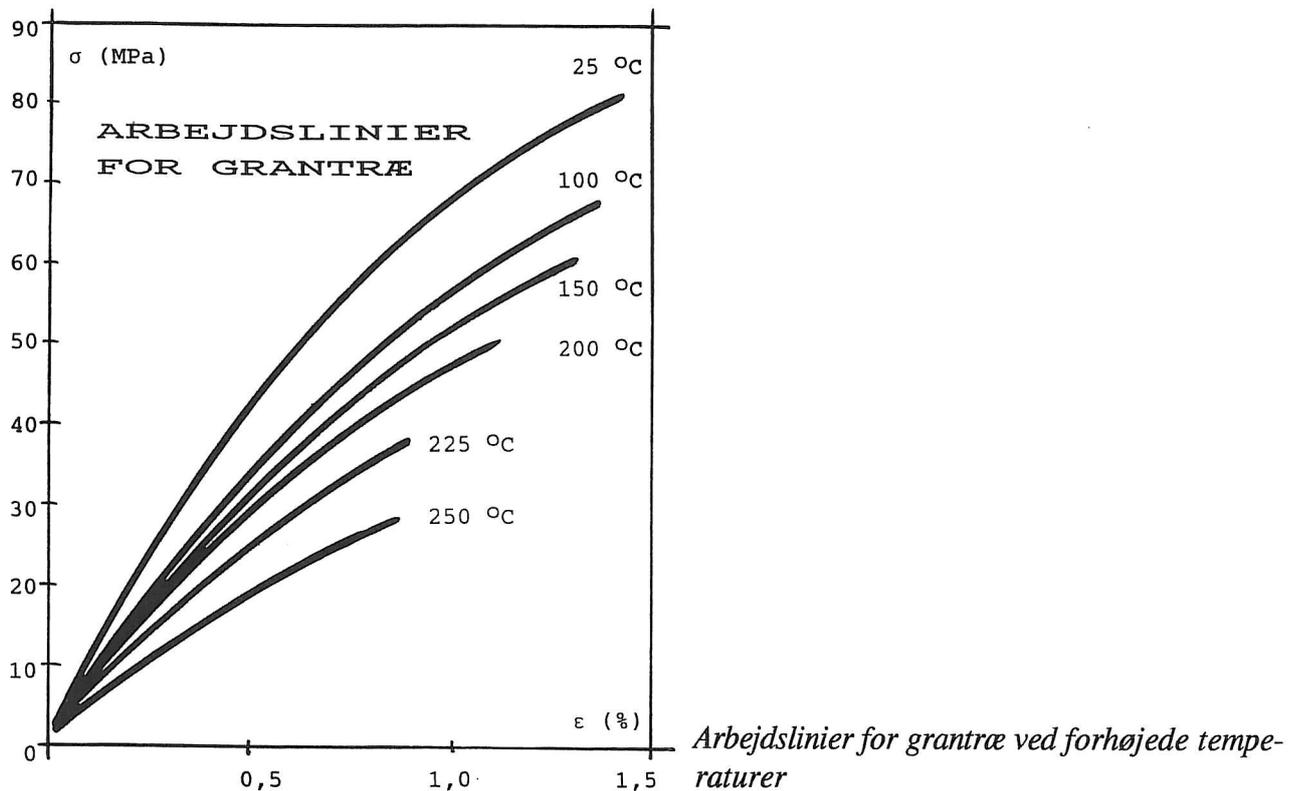
Frits Bolonius

# Afsnit 1

## Træ og brand

### Brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner

Når en trækonstruktion udsættes for brandpåvirkning, påvirkes den foruden af de mekaniske laster af en *termisk brandlast* i form af varmetilførsel på grund af de forhøjede temperaturer i brandrummet (karakteriseret ved *brandforløbet*). Herved stiger træets temperatur, og som følge heraf ændres træets fugtindhold og dets styrke- og stivhedsegenskaber, jvf figur 1.1, der viser et eksempel på træs arbejdslinier ved forhøjede temperaturer. Ved stigende temperatur bliver træet blødere, og ved omkring 300 °C *forkuller* det og mister sin styrke fuldstændigt.



Ved dimensionering af en bærende trækonstruktion må der derfor tages hensyn *såvel til* temperatur- og fugtforholdenes variation over konstruktionen og de deraf følgende ændrede styrke- og stivhedsegenskaber *som til* konstruktionens ændrede geometriske dimensioner som følge af indbrænding.

Skønt trækonstruktioner derved adskiller sig væsentligt fra bærende konstruktioner af ubrændbare materialer - stål, beton, letbeton, murværk etc - kan beregningsmæssig eftervisning af en trækonstruktionens bæreevne foretages efter de generelle principper for brandteknisk dimensionering, dvs ved beregningsmæssig bestemmelse af temperaturforløbet i den intakte del af konstruktionen og eftervisning af, at bæreevnen er tilstrækkelig. Dimensioneringen omfatter således en *termisk del*, bestemmelse af temperaturforløbet, og en *styrkemæssig del*, bestemmelse af bæreevnen.

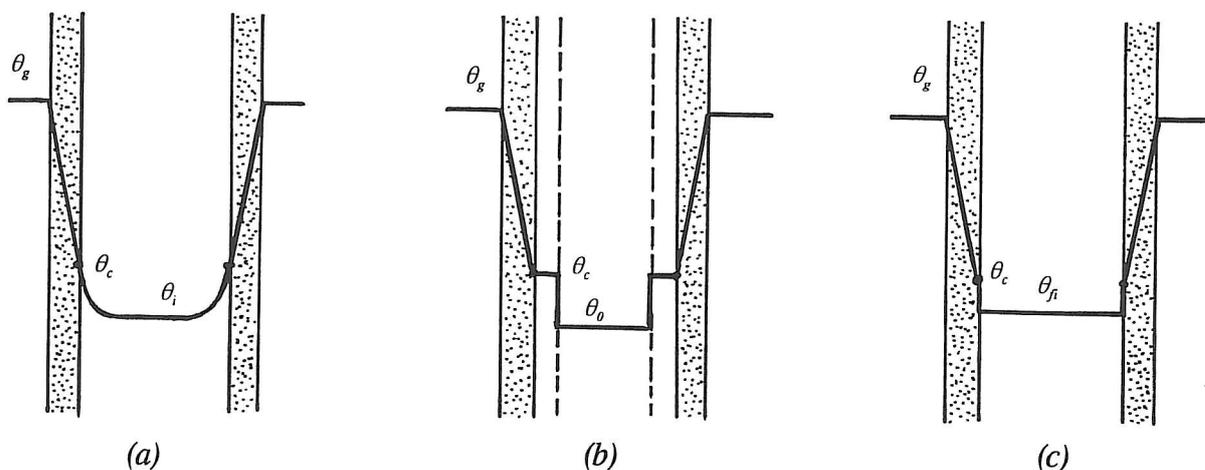
## Forenklede beregningsmetoder

Bestemmelsen af temperaturforholdene i en trækonstruktion under brandpåvirkning er ifølge sagens natur en ganske kompliceret opgave, da der på grund af problemets instationære karakter principielt må foretages en bestemmelse af temperaturen til ethvert tidspunkt af brandforløbet i ethvert punkt af konstruktionen. Problemet kompliceres yderligere af, at fugtforholdene ændres som følge af opvarmningen, og at træet ved omkring 300 °C omdannes til et *forkullingslag* med en ganske betydelig varmeisoleringssevne, der sinker temperaturfeltets indtrængning i konstruktionen. En nøjagtig bestemmelse af temperaturforløbet i konstruktionen er derfor ikke mulig ved praktiske dimensioneringsopgaver i almindelighed, så beregningsmetoder til praktisk brug må baseres på stærkt forenklede beregningsforudsætninger.

Den mest nærliggende forenkling er at betragte konstruktionen som et stangformet element uden temperaturgradienter i længderetningen, altså at betragte linier parallelle med længdeaksen som *isotermer*. Temperaturbestemmelsen reduceres dermed til en *tværsnitsundersøgelse*, altså et instationært 2-dimensionalt varmetransmissionsproblem.

Denne antagelse er kun delvis opfyldt ved virkelige brande i trækonstruktioner. På grund af brandgassernes turbulens kan der - især ved vertikale flader som søjler, vægge og høje bjælker - forekomme betydelige variationer i den termiske påvirkning og dermed også i indbrændingen. Forudsættes der derfor ens forhold ved alle brandeksponerede flader på konstruktionen, må der på anden vis kompenseres for den simple models afvigelser fra virkeligheden.

I figur 1.2(a) er vist et tværsnit af en plan trækonstruktion som for eksempel en væg eller en høj bjælke, der er brandeksponeret på begge sider. Gennem konstruktionen foregår en 1-dimensional varmestrømning, og temperaturen kan altså karakteriseres ved det viste temperaturforløb, idet alle planer parallelle med konstruktionens plan er isotermer. Gennem forkullingslaget varierer temperaturen fra brandrummets temperatur  $\theta_g$  til temperaturen  $\theta_c$  i forkullingsfeltet (forbrændingsplanen). Inden for denne varierer temperaturen fra  $\theta_c$  til  $\theta_i (= \theta_{i(y)})$  i afstanden  $y$  fra konstruktionens overflade). På grund af forkullingslagets og det intakte træes relativt store varmeisoleringssevne trænger temperaturstigningen kun langsomt ind i træet, således at der i begyndelsen af brandforløbet

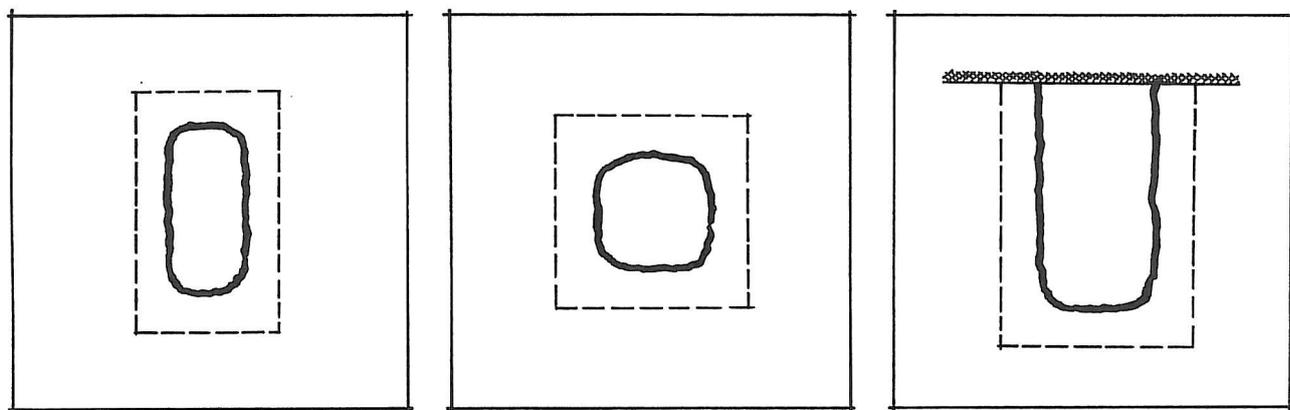


Figur 1.2: Temperaturforløb gennem plan konstruktion ved 1-dimensional, dobbeltsidig eksponering  
 (a) Det virkelige temperaturforløb  $\theta_i = \theta_{i(y)}$   
 (b) Forenklet temperaturforløb  $\theta_i = \theta_0$  inden for den svækkede zone (punkteret)  
 (c) Forenklet temperaturforløb  $\theta_i = \theta_f$  inden for indbrændingszonen

ikke forekommer nogen mærkbare temperaturstigninger i de inderste dele af konstruktionen, altså  $\theta_i \sim \theta_0$  (normal temperatur). Efterhånden som brandforløbet skrider frem, trænger temperaturstigningen længere og længere ind i konstruktionen.

Den del af tværsnittet (umiddelbart inden for indbrændingszonen), hvor temperaturen  $\theta_i$  varierer mellem  $\theta_c$  og  $\theta_0$ , benævnes den *svækkede zone*, da styrke- og stivhedsegenskaberne tilsvarende varierer fra nul til næsten uændrede værdier, alt afhængig af, hvor dybt temperaturstigningen trænger ind. Som forenklede beregningsmodeller til praktisk brug kan der *enten* ses helt bort fra den svækkede zone af tværsnittet, medens resten af tværsnittet regnes intakt med uændrede styrke- og stivhedsegenskaber, *eller* der kan regnes med en vis gennemsnitstemperatur  $\theta_{fi}$  over hele den ikke forkullede del af tværsnittet, over hvilket der regnes med konstante styrke- og stivhedsegenskaber, der er reducerede svarende til  $\theta_{fi}$ , jvf henholdsvis figur 1.2(b) og 1.2(c)

Såfremt et 2-dimensionalt tværsnit med skarpe hjørner (for eksempel rektangulære tværsnit) er brandeksponeret på flere sider, sker der i hjørnerne indbrænding fra begge de tilstødende sider, hvorved der sker kraftige en indbrænding, som bevirker en gradvis *afrunding* af hjørnerne, som vist i eksemplerne i figur 1.3. Især ved kompakte tværsnit, der er eksponeret på alle sider, kan denne ekstra tværsnitsreduktion på grund af *hjørneeffekter* være ganske betydelig og må tages i regning.



Figur 1.3: Hjørneeffekt. Afrunding af hjørner på grund af flersidig eksponering

Disse forenklede metoder ligger til grund for bestemmelserne i *Norm for trækonstruktioner*, Dansk Standard 413, hvis kapitel 9 indeholder grundlaget for brandteknisk dimensionering af bærende trækonstruktioner, jvf lastkombination 3.3 i DS 409. Dette kapitel i normen omhandler konstruktioner af konstruktionstræ og limtræ med eller uden brandbeskyttelsessystemer, for eksempel beklædning af gips, træ eller træbaserede pladematerialer.

I normens afsnit 9.1.3(3) er angivet to forenklede beregningsmetoder:

\* *Resttværsnitsmetoden*

en beregningsmetode, ved hvilken der regnes med uændrede styrke- og stivhedsegenskaber i et *effektivt resttværsnit*, der beregnes ud fra det oprindelige tværsnit med fradrag af såvel indbrændingszonen som en svækket zone uden hensyntagen til hjørneeffekter.

\* *Styrkereduktionsmetoden*

en beregningsmetode, ved hvilken der regnes med *reducerede styrke- og stivhedsegenskaber* i et *effektivt resttværsnit*, der beregnes ud fra det oprindelige tværsnit med fradrag af indbrændingszonen og med eller uden hensyntagen til hjørneeffekter.

Resttværnsnitsmetoden må udelukkende anvendes, hvor den termiske brandlast beregnes ud fra et nominelt brandforløb - *standard-brandforløbet*. Styrkereduktionemetoden kan tillige anvendes, hvor den termiske brandlast er bestemt ud fra et *parametrisk brandforløb*.

Normens bestemmelser om brandteknisk dimensionering af trækonstruktioner ligger tæt op ad principperne og metoderne i den fælleseuropæiske konstruktionsnorm Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design 1997.

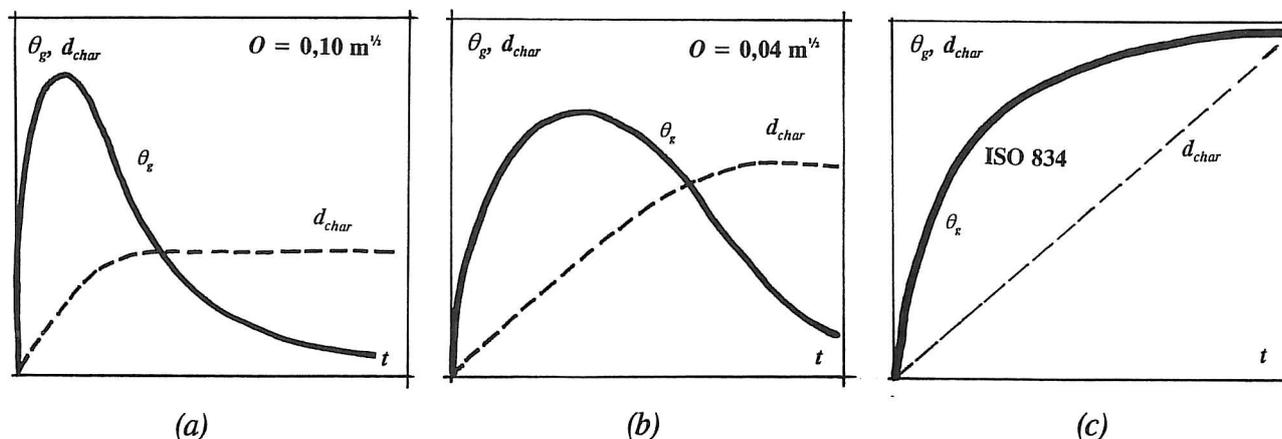
## Afsnit 2

# Termisk dimensionering

### Indbrænding i træ

Foretages den brandtekniske dimensionering efter de i afsnit 1 nævnte forenklede metoder, resttværnsnitmetoden eller styrkereduktionsmetoden, indskrænker den termiske dimensionering sig til bestemmelse af *det effektive resttværnsnit*, dvs den del af det oprindelige konstruktionstværnsnit, som ikke er bortbrændt, og som stadig kan regnes aktivt, omend eventuelt med reducerede styrke- og stivhedsegenskaber. Efter disse metoder er det således ikke nødvendigt eksplicit at beregne temperaturerne i konstruktionen og herudfra fastsætte de reducerede styrke- og stivhedsegenskaber. Det skyldes, at der er en nogenlunde entydig sammenhæng mellem indbrændingsdybden og temperaturfeltets indtrængning i konstruktionens indre, således at man alene ud fra indbrændingsdybden og tværnittets geometri med god tilnærmelse har et mål for, hvor varmt der er i konstruktionen, og dermed også, hvor meget styrken og stivheden er svækket. I de nævnte forenklede metoder er der på denne måde indirekte taget hensyn til temperaturens reduktion af styrke- og stivhedsegenskaberne, således at det kun er nødvendigt at bestemme det effektive resttværnsnit.

For at kunne bestemme det effektive resttværnsnit skal indbrændingsdybden  $d_{char}$  beregnes. Indbrændingsdybden  $d_{char}$  er bestemt af brandens *varighed* og af *indbrændingshastigheden*  $\beta$ . Indbrændingshastigheden afhænger af træets densitet (let træ brænder hurtigere end tungt træ) og - i meget høj grad - af den termiske brandlast og dermed af brandrummets ventilationsforhold. For en termisk brandlast svarende til et *parametrisk brandforløb* er indbrændingshastigheden  $\beta$  nogenlunde konstant, indtil brandrummets temperatur  $\theta_g$  har nået sit maksimum, hvorefter  $\beta$  aftager nogenlunde jævnt mod nul, indtil brandrummets temperatur er reduceret til omkring 300 °C. På dette tidspunkt ophører indbrændingen, og indbrændingsdybden har nået sin endelige størrelse  $d_{char}$ .



Figur 2.1: Indbrændingsforløb  $d_{char(t)}$  (den tidsmæssige variation af  $d_{char}$ ) for forskellige brandforløb (a) og (b) Parametriske brandforløb (c) Standard-brandforløb

I figur 2.1 er vist et indbrændingsforløb for to forskellige parametriske brandforløb (a) og (b) med samme brandbelastning. Ved det hurtige brandforløb (a) er indbrændingshastigheden næsten halv-

anden gange så stor som ved det langsomme brandforløb (b). Omvendt varer det langsomme brandforløb (b) 2,5 gange så længe som det hurtige (a), således at indbrændingsdybden  $d_{char}$  ved den hurtige brand kun er omtrent 60 % af  $d_{char}$  ved den langsomme brand.

På baggrund af eksperimentelle undersøgelser af indbrændingen i træ under forskellige *parametriske brandforløb* kan indbrændingsforløbet i *limtræ* med god tilnærmelse beskrives som et ret liniestykke med konstant indbrændingshastighed  $\beta_{par}$  i tidrummet  $0 \leq t \leq t_0$  og en andensgrads parabel med vandret tangent i toppunktet  $t = 3 \cdot t_0$  og tangenthældningen  $\beta_{par}$  i  $t = t_0$ .

$$\text{Her er } t_0 = 0,006 \cdot q_{id} / O \quad (t_0 \leq 40) \quad [\text{min}] \quad (2.1)$$

$q_{id}$  den regningsmæssige brandbelastning  $[\text{MJ}/\text{m}^2]$

$$\beta_{par} = (5 \cdot O_b - 0,04) / (4 \cdot O_b + 0,08) \quad [\text{mm}/\text{min}] \quad (2.2)$$

$O$  brandrummets åbningsfaktor  $[\text{m}^{1/2}]$

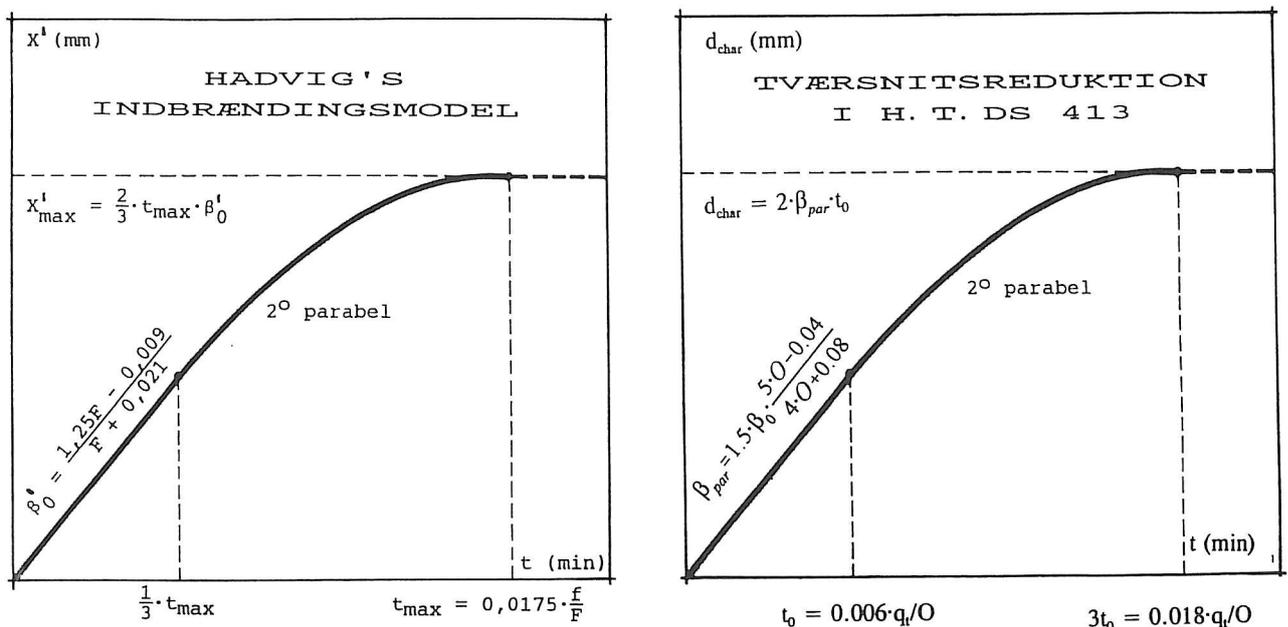
$O_b$  den brandrumskorrigerede åbningsfaktor  $O \cdot 1160/b$  ( $0,02 \leq O_b \leq 0,30$ )  $[\text{m}^{1/2}]$

$b$  brandrummets termiske inertie  $[\text{J}/\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}]$

Af dette indbrændingsforløb bestemmes indbrændingsdybden

$$d_{char} = \beta_{par} \cdot t_0 + \frac{1}{2} \cdot \beta_{par} \cdot t_0 \cdot 2 = 2 \cdot \beta_{par} \cdot t_0 \quad (2.3)$$

Disse udtryk for  $t_0$ ,  $\beta_{par}$  og  $d_{char}$  er baseret på en modificeret udgave af *Hadvig's indbrændingsmodel*, der er gengivet i sin originale version i figur 2.2.



Figur 2.2 Modeller for indbrændingsforløb og tværsnitsreduktion ved parametrisk brandforløb  
Tv: Hadvigs model for indbrændingsdybden  $x'$  [mm]. Th: Model for tværsnitsreduktionen  $d_{char}$  jvf DS 413. Brandbelastningen er i Hadvigs formel benævnt  $f$ , i DS 413 benævnt  $q_{id}$   $[\text{MJ}/\text{m}^2]$ . Åbningsfaktoren er i Hadvigs formel benævnt  $F$ , i DS 413 benævnt  $O$   $[\text{m}^{1/2}]$ .

Et eksempel: Brandbelastning  $q_{id} = 200 \text{ MJ}/\text{m}^2$ , åbningsfaktor  $O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$ , termisk inertie  $b = 1160 \text{ J}/\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}$ :

$$\beta_{par} = (5 \cdot O + 0,04) / (4 \cdot O - 0,08) = (5 \cdot 0,04 + 0,04) / (4 \cdot 0,04 - 0,08) = 0,67 \text{ mm}/\text{min}$$

$$t_0 = 0,006 \cdot q_{td} / O = 0,006 \cdot 200 / 0,04 = 30 \text{ min}$$

$$d_{char} = 2 \cdot \beta_{par} \cdot t_0 = 2 \cdot 0,67 \cdot 30 = \underline{40 \text{ mm}}$$

Denne værdi af begyndelsesindbrændingshastigheden  $\beta_{par}$  er i DS 413 benævnt  $\beta_0$  (for limtræ). For at generalisere udtrykket for  $\beta_{par}$  til også at omfatte andre typer af træ er (2.2) omskrevet til den generelle form

$$\beta_{par} = 1,5 \cdot \beta_0 \cdot (5 \cdot O + 0,04) / (4 \cdot O - 0,08) \quad [\text{mm/min}] \quad (2.4)$$

De i eksemplet benyttede parametre, åbningsfaktoren  $O = 0,04 \text{ m}^2$  og den termiske inert  $b = 1160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ , svarer til det standard-brandrum, der ligger til grund det nominelle brandforløb, *standard-brandforløbet*. Under dette brandforløb er indbrændingshastigheden da også erfaringsmæssigt i god overensstemmelse med begyndelsesindbrændingshastigheden  $\beta_{par}$  i den indledende fase af det parametriske brandforløb (for  $0 \leq t \leq t_0$ ), altså for limtræ  $\beta_0 \sim 0,65 \text{ mm/min}$ . Men denne indbrændingshastighed forekommer ikke blot i brandens indledende fase, men holder sig stort set uændret, så længe brandrummets temperatur stiger i overensstemmelse med standard-brandforløbet, således at den med god tilnærmelse kan regnes konstant, som vist i figur 2.1(c).

## Effektivt resttværsnit

Det effektive resttværsnit beregnes ved at reducere det oprindelige tværsnit svarende til en reduktion fra alle brandpåvirkede sider. Foretages beregningen ved *styrkereduktionsmetoden*, er reduktionens størrelse lig med *indbrændingsdybden*  $d_{char}$ . Ved *resttværnsnitsmetoden* bestemmes reduktionen ved til  $d_{char}$  at addere en størrelse svarende til den svækkede zones tykkelse.

Bestemmelserne i DS 413 gælder både *brandbeskyttede* og *ubeskyttede* trækonstruktioner. For *ubeskyttede* konstruktioner bestemmes  $d_{char}$  ved at regne med indbrænding fra *brandens starttidspunkt*. Konstruktioner, hvis overflader er beskyttet af et *brandbeskyttelsessystem*, kan regnes efter *additionsprincippet*, i henhold til hvilket der skal regnes med indbrænding af konstruktionens overflade fra *brandbeskyttelsessystemets svigtetidspunkt*.

### Resttværnsnitsmetoden

Indbrændingsdybden bestemmes som

$$d_{char} = \beta_0 \cdot t \quad (2.5)$$

hvor  $t$  er tiden, og  $\beta_0$  er indbrændingshastigheden, for eksempel  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$  for limtræ (densitet  $\geq 380 \text{ kg/m}^3$ ). Værdier af  $\beta_0$  for andre typer af træ og træbaserede materialer er angivet i tabel 9.2.1.2a i DS 413.

Fradraget  $x$  til bestemmelse af det effektive resttværsnit bestemmes som

$$x = d_{char} + k_0 \cdot d_0 \quad (2.6)$$

hvor  $d_0$  regnes lig med 7 mm, og  $k_0$  regnes lig med 1,0 for ubeskyttede flader. For flader, der er beskyttet af et brandbeskyttelsessystem, regnes med andre værdier af  $k_0$ , jvf tabel 9.2.1.2b i DS 413.

Metodens forudsætninger med hensyn til temperaturfeltets indtrængning i konstruktionen er kun

opfyldt for værdier af  $d_{char}$ , der ikke overstiger en fjerdedel af konstruktionens dybde. Metoden kan derfor kun anvendes for  $d_{char} \leq b/4$  og  $\leq h/4$ , hvor  $b$  og  $h$  er bredde og højde af det oprindelige tværsnit.

Et eksempel: Limtræbjælke  $h \cdot b = 400 \cdot 160$  mm; krævet brandmodstandsevne  $t_{fi,req} = 30$  min, beskyttet på oversiden.

Indbrænding:  $d_{char} = \beta_0 t_{fi,req} = 0,65 \cdot 30 = 19,5$  mm

Tværsnitsreduktion:  $x = d_{char} + k_0 \cdot d_0 = 19,5 + 1,0 \cdot 7 \sim 27$  mm

Effektivt tværsnit:  $(h - x) \cdot (b - 2 \cdot x) = (400 - 27) \cdot (160 - 2 \cdot 27) = 373 \cdot 106$  mm

Bjælkens modstandsmoment er således reduceret til  $(373/400)^2 \cdot (106/160) = 0,576 \sim 58$  %.

### Styrkereduktionsmetoden

Den brandtekniske dimensionering af trækonstruktioner kan foretages efter styrkereduktionsmetoden, uanset om den termiske brandlast er fastsat ud fra et parametrisk eller et nominelt brandforløb (standard-brandforløbet). Benyttes metoden ved standard-brandpåvirkning, kan der ved bestemmelsen af det effektive enten tages hensyn til effekten af hjørneafrundinger, eller der kan ses bort fra dem. Ved visse konstruktioner kan der dog ikke ses bort fra effekten af afrundede hjørner. Det gælder især trykstænger som for eksempel fritstående søjler eller trykstænger i gitterkonstruktioner, der må påregnes at kunne blive brandeksponeret på alle sider, og som derfor er særlig følsomme over for effekten af den øgede indbrænding i hjørnerne.

Ved *standard-brandpåvirkning* kan indbrændingsdybden  $d_{char}$ , såfremt der *ses bort fra* afrundede hjørner, bestemmes efter (2.5). Såfremt *der tages hensyn* til afrundede hjørner, bestemmes  $d_{char}$  af

$$d_{char} = \beta t \quad (2.7)$$

hvor  $\beta$  er indbrændingshastigheden, for eksempel  $\beta = 0,55$  mm/min for limtræ (densitet  $\geq 380$  kg/m<sup>3</sup>). Værdier af  $\beta$  for andre typer af træ er angivet i tabel 9.2.1.3 i DS 413. Også for (2.7) gælder, at  $d_{char}$  ikke må overstige  $b/4$  eller  $h/4$ .

*Hjørneafrundingerne* antages at have form som en cirkelbue med en radius  $r$ , der afhænger af tiden. DS 413 angiver  $(r, t)$  [mm/min] = (0,0), (20/30), (50,120) og retliniet interpolation mellem disse værdier (figur 9.2.1.3 i DS 413).

Ved *parametrisk brandforløb* kan indbrændingsdybden  $d_{char}$  bestemmes af (2.3) og (2.4). Også for (2.3) gælder, at  $d_{char}$  ikke må overstige  $b/4$  eller  $h/4$ . Hjørneafrundinger regnes som en cirkelbue med radius  $r = d_{char}$ .

### Eksempel 2.1

Bestemmelse af det effektive resttværsnit for en limtræbjælke, der understøtter en etageadskillelse i et boligbyggeri. Bjælken har tværsnittet  $h \cdot b = 300 \cdot 160$  mm. Den krævede brandmodstandsevne er  $t_{fi,req} = 60$  minutter. Bjælken regnes 3-sidigt brandeksponeret i et brandrum med følgende brandtekniske parametre: Brandbelastning:  $q_{t,d} = 240$  MJ/m<sup>2</sup>, åbningsfaktor:  $O = 0,090$  m<sup>1/2</sup>, termisk inertie:  $b = 1000$  J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K.

**Resttværnsnitsmetoden (Standard-brandpåvirkning)**

Indbrændingshastighed:  $\beta_0 = 0.65$  mm/min (tabel 9.2.1.2.a i DS 413)

Indbrændingsdybde:  $d_{char} = \beta_0 \cdot t = 0.65 \cdot 60 = 39$  mm for  $t = t_{fi,req} = 60$  minutter

Tværsnitsreduktion  $x = d_{char} + k_0 \cdot d_0 = 39 + 1.0 \cdot 7 = 46$  mm (9.2.1.2(5)P i DS 413)

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 46) \cdot (160 - 2 \cdot 46) = \underline{254 \cdot 68}$  mm

**Styrkereduktionsmetoden ved standard-brandpåvirkning uden hensyntagen til hjørneafrundning**

Indbrændingshastighed:  $\beta_0 = 0.65$  mm/min (tabel 9.2.1.2.a i DS 413)

Tværsnitsreduktion = indbrændingsdybde:  $d_{char} = \beta_0 \cdot t = 0.65 \cdot 60 = 39$  mm for  $t = t_{fi,req}$

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 39) \cdot (160 - 2 \cdot 39) = \underline{261 \cdot 82}$  mm

**Styrkereduktionsmetoden ved standard-brandpåvirkning med hensyntagen til hjørneafrundning**

Indbrændingshastighed:  $\beta = 0.55$  mm/min (tabel 9.2.1.3 i DS 413)

Tværsnitsreduktion = indbrændingsdybde:  $d_{char} = \beta \cdot t = 0.55 \cdot 60 = 33$  mm for  $t = t_{fi,req}$

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 33) \cdot (160 - 2 \cdot 33) = \underline{267 \cdot 94}$  mm ( $A'_{fi} = 25,100$  mm<sup>2</sup>)

Hjørneafrundning:  $r = 30$  mm (figur 9.2.1.3 i DS 413)

Hjørneafrundningernes areal  $A_h = 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot 30^2 = \underline{386}$  mm<sup>2</sup> Kantafstand  $a_h = \underline{7}$  mm

**Styrkereduktionsmetoden ved parametriske brand**

Brandrumskorrigeret åbningsfaktor  $O_b = O \cdot 1160/b = 0.090 \cdot 1160/1000 = 0.104$  m<sup>1/2</sup>

Begyndelsesindbrændingshastigheden bestemmes i h.t. 9.2.1.4(1)P i DS 413 af udtrykket

$\beta_{par} = 1.5 \cdot \beta_0 \cdot (5 \cdot O_b - 0.04) / (4 \cdot O_b + 0.08) = 1.5 \cdot 0.65 \cdot (5 \cdot 0.104 - 0.04) / (4 \cdot 0.104 + 0.08) = 0.94$  mm/min

Tværsnitsreduktion = indbrændingsdybde:  $d_{char} = 2 \cdot \beta_{par} \cdot t_0 = 2 \cdot 0.94 \cdot 16 = 30$  mm, idet

$t_0 = 0.006 \cdot q_{t,d} / O = 0.006 \cdot 240 / 0.090 = 16.0$  minutter

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 30) \cdot (160 - 2 \cdot 30) = \underline{270 \cdot 100}$  mm ( $A'_{fi} = 27,000$  mm<sup>2</sup>)

Hjørneafrundning:  $r = d_{char} = 30$  mm (9.2.1.4(4)P i DS 413)

Hjørneafrundningernes areal  $A_h = 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot 30^2 = \underline{386}$  mm<sup>2</sup> Kantafstand  $a_h = \underline{7}$  mm

## Afsnit 3

# Bæreevnebestemmelse

### Styrke- og stivhedsegenskaber under brandpåvirkning

Grundlaget for forenklet beregning af bæreevnen under brandpåvirkning er indeholdt i normens afsnit 9.3, i henhold til hvilket der overalt i det effektive resttværnsnit regnes med samme regningsmæssige styrke- og stivhedstal. Dette gælder, uanset om resttværnsnitsmetoden eller styrkereduktionsmetoden anvendes.

Ved bæreevneberegningen anvendes følgende regningsmæssige styrke- og stivhedstal:

$$f_{fi,d} = k_{mod,fi} \cdot f_k / \gamma_{m,fi}$$

$$E_{fi,d} = k_{mod,fi} \cdot E_{0,05} / \gamma_{m,fi}$$

Her er  $\gamma_{m,fi}$  materialepartialkoefficienten for ulykkeslast (= 1,0)  
 $f_k$  og  $E_{0,05}$  de ved normale temperaturer gældende karakteristiske styrke- og stivhedstal  
 $k_{mod,fi} = 1,00 - k_{fi} \cdot p / A_r$   
 $p$  perimenteren for det brandeksponerede resttværnsnit [m]  
 $A_r$  arealet af resttværnsnittet [m<sup>2</sup>]

Ved resttværnsnitsmetoden regnes med uændrede styrke- og stivhedsegenskaber, hvorfor  $k_{mod,fi} = 1$ , dvs  $k_{fi} = 0$ .

For styrkereduktionsmetoden regnes:

$$k_{fi} = 1/125 \text{ for trykstyrken}$$

$$k_{fi} = 1/200 \text{ for bøjningsstyrken}$$

$$k_{fi} = 1/330 \text{ for trækstyrken, forskydningsstyrken og stivhedstallet}$$

Udtrykket for  $k_{mod,fi}$  er kun gyldigt for  $t \geq 20$  minutter. For lavere værdier interpoleres retliniet mellem 1 og værdierne for  $t = 20$  minutter.

### Trækonstruktionssamlings brandmodstandsevne

Når et stykke træ bringes i direkte kontakt med et stykke stål med en temperatur, der er højere end træets antændelsestemperatur  $\theta_c$  (~ 300 °C), vil træet forkulle. Men forkullingslaget vil også vokse hurtigere, såfremt der samtidig er en trykspænding i kontaktfladen mellem træ og stål. Bortbrændingen vil være større, jo større kontaktspændingen er.

Trykkes for eksempel en opvarmet, belastet stældorn mod et stykke træ, vil dornen trænge ind i træet mange gange hurtigere end svarende til indbrændingshastigheden i et stykke ubelastet træ, såfremt spændingerne i kontaktfladerne mellem træ og stål svarer til, hvad der normalt forekommer i træ-

konstruktionssamlinger med *mekaniske forbindelsesmidler*. Indtrængningshastigheden er stigende for stigende kontaktpænding og for stigende dorntemperatur og er tillige stærkt afhængig dorndiameteren og kraft/fiber-vinklen.

Af denne årsag vil konstruktionssamlinger med mekaniske forbindelsesmidler sædvanligvis være brandmæssigt kritiske detaljer i en trækonstruktion, dels som følge af, at stålet hurtigt leder varmen fra brandrummet ind i træet, dels fordi det sker netop i de kontaktflader, hvor der sædvanligvis forekommer de største spændingskoncentrationer. Den stærkt øgede indtrængningshastighed bevirker tillige, at samlingerne får betydelige deformationer inden for kort tid, således at konstruktionens funktionsevne er udtømt efter relativt kort tids brandpåvirkning (for ubeskyttede konstruktioner sædvanligvis inden for 10 - 15 minutter).

Som følge heraf må trækonstruktioner, hvortil der stilles krav om brandmodstandsevne, almindeligvis udføres med *beskyttede forbindelser*, dvs forbindelser, der er dækket af enten et brandbeskyttelsessystem (for eksempel gipsplader) eller af træpropper, træ eller træplader. På grund af de komplicerede temperatur-, spændings- og deformationsforhold i sådanne samlinger er det ikke muligt at eftervise deres brandmodstandsevne beregningsmæssigt. Der er imidlertid foretaget omfattende eksperimentelle undersøgelser af både ubeskyttede og beskyttede samlinger under brandpåvirkning, fortrinsvis standard-brandpåvirkning.

På grundlag af sådanne erfaringsresultater er der i 9.3.2 i DS 413 angivet retningslinier for brandteknisk dimensionering af forbindelser i trækonstruktioner. Til karakteristik af et brandbeskyttelsessystems evne til at forhale en konstruktions eller konstruktionssamlings antændelse defineres størrelsen *brandbeskyttelsestiden*  $t_p$ , der bestemmes ved en standardiseret prøvning (DS/INSTA 411).

*Forbindelser med stålplader* med en tykkelse mindre end 6 mm som sidestykker (sømplader eller tandplader) skal dækkes af et brandbeskyttelsessystem med beskyttelsestiden  $t_p \geq t_{fi,req}$  (den krævede brandmodstandsevne).

*2-snitsforbindelser* kan antages at have en standard-brandmodstandsevne på mindst 15 minutter. For forbindelser med  $t_{fi,req} > 15$  minutter kan kravet til brandmodstandsevne opfyldes ved, at de enten udføres som *beskyttede forbindelser* eller som *ubeskyttede forbindelser*. I sidstnævnte tilfælde skal en række særlige vilkår være opfyldt, for eksempel ved at forøge antallet af forbindelsesmidler eller deres dimensioner i forhold til, hvad der er nødvendigt ved dimensionering ved normal temperatur jvf 9.3.2.3 i DS 413.

*Beskyttede 2-snitsforbindelser* skal udføres enten med et brandbeskyttelsessystem med beskyttelsestiden  $t_p \geq t_{fi,req} - 15$  eller med træpropper, træ eller træplader med en tykkelse  $a_{fi}$ , der bestemmes af

$$a_{fi} \geq \beta_0 \cdot (t_{fi,req} - 15) \quad (3.1)$$

hvor  $\beta_0$  er indbrændingshastigheden i henhold til 9.2.1.2 i DS 413. I 9.3.2.2 i DS 413 er tillige angivet en række yderligere krav med hensyn til pladernes befæstelse, kant- og endestande.

### Eksempel 3.1

Bæreevneeftervisning for en statisk bestemt limtræbjælke, der understøtter en etageadskillelse i et boligbyggeri.

**Forudsætninger:**

Simpelt understøttet bjælke med spændvidde  $l = 4.0$  m

Normal kontrolklasse, normal sikkerhedsklasse

Anvendelsesklasse 1 (jvf 1.4.1 i DS 413)

Laster: Egenlast:  $g = 14.0$  kN/m

Nyttelast:  $q = 6.0$  kN/m

Bjælkeprofil:  $h \cdot b = 300 \cdot 160$  mm

Trækvalitet: L 36 (karakteristisk bøjningsstyrke  $f_{m,k} = 36$  MPa)

Den krævede brandmodstandsevne er  $t_{fi,req} = 60$  minutter.

Det effektive bjælketværsnit er beregnet i eksempel 2.1, dels ved resttværnsnitsmetoden, dels ved styrkereduktionsmetoden for henholdsvis standard-brandpåvirkning (med eller uden hensyntagen til hjørneeffekter) og parametriske brandforløb.

**Lastkombination 2.1: Brudgrænsetilstand** ( $f_{m,d} = 36/1.5 \cdot 0.8 = 19.2$  MPa)

$$p_{d(2.1)} = g \cdot 1.0 + q \cdot 1.3 = 14.0 \cdot 1.0 + 6.0 \cdot 1.3 = 21.8 \text{ kN/m}$$

$$M_{max} = 1/8 \cdot 21.8 \cdot 4.0^2 = 43.6 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{max} = M_{max}/W_y = 43.6 \cdot 10^6 / (1/6 \cdot 160 \cdot 300^2) = \underline{18.2 \text{ MPa}} < 19.2 \text{ MPa} = f_{m,d} \rightarrow \text{OK}$$

**Lastkombination 3.3: Ulykkeslast - brand**

$$p_{d(3.3)} = g \cdot 1.0 + q \cdot 0.5 = 14.0 \cdot 1.0 + 6.0 \cdot 0.5 = 17.0 \text{ kN/m}$$

$$M_{fi,max} = 1/8 \cdot 17.0 \cdot 4.0^2 = 34.0 \text{ kNm}$$

**Resttværnsnitsmetoden (Standard-brandpåvirkning)**

$$\text{Effektivt resttværsnit: } h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 46) \cdot (160 - 2 \cdot 46) = 254 \cdot 68 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,fi,max} = M_{fi,max}/W_{y,fi} = 34.0 / (1/6 \cdot 68 \cdot 254^2) = 46.5 \text{ MPa} > f_{m,fi} = f_{m,k}/1.0 = 36 \text{ MPa} \rightarrow \text{ej OK}$$

**Styrkereduktionsmetoden ved standard-brandpåvirkning uden hensyntagen til hjørneafrundning**

$$\text{Effektivt resttværsnit: } h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 39) \cdot (160 - 2 \cdot 39) = 261 \cdot 82 \text{ mm}$$

$$\sigma_{m,fi,max} = M_{fi,max}/W_{y,fi} = 34.0 / (1/6 \cdot 82 \cdot 261^2) = 36.5 \text{ MPa}$$

Idet resttværnsnittets perimeter er  $p = 2 \cdot 0.261 + 0.082 = 0.604$  og arealet er  $A_r = 0.261 \cdot 0.082 = 0.0214 \text{ m}^2$ , er  $k_{mod,fi} = 1.00 - 0.604 / 0.0214 \cdot 1/200 = 0.859$ , hvoraf (jf. 9.2.2(1)P i DS 413)

$$f_{m,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{m,k} / \gamma_{m,fi} = 0.859 \cdot 36 / 1.0 = 30.9 \text{ MPa} < \sigma_{m,fi,max} = 36.5 \text{ MPa} \rightarrow \text{ej OK}$$

### Styrkereduktionsmetoden ved standard-brandpåvirkning med hensyntagen til hjørneafrundning

Effektivt resttværsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 33) \cdot (160 - 2 \cdot 33) = 267 \cdot 94 \text{ mm}$  ( $A'_{fi} = 25,100 \text{ mm}^2$ )

Hjørneafrundningernes areal  $A_h = 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot 30^2 = 386 \text{ mm}^2$  Kantafstand  $a_h = 7 \text{ mm}$

Resttværsnittets tyngdepunkt har afstanden  $\eta_{fi} = [25,100 \cdot 267/2 - 386 \cdot (267 - 7)] / [25,100 - 386] = 131 \text{ mm}$  fra tværsnittets øverste kant, hvoraf fås inertimomentet om y-aksen:

$$I_{y,fi} = 1/12 \cdot 267^3 \cdot 94 + 25,100 \cdot (267/2 - 131)^2 - 386 \cdot (267 - 131 - 7)^2 = 142.7 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,fi,min} = I_{y,fi} / y_{max} = 142.7 \cdot 10^6 / (267 - 131) = 1.049 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,fi,max} = M_{fi,max} / W_{y,fi,min} = 34.0 / 1.049 = 32.4 \text{ MPa}$$

Idet resttværsnittets perimeter er  $p = 2 \cdot 0.267 + 0.094 - 0.030 \cdot (4 - \pi) = 0.602 \text{ m}$ , og arealet er  $A_r = (25,100 - 386) \cdot 10^{-6} = 0.0247 \text{ m}^2$ , er  $k_{mod,fi} = 1.00 - 0.602 / 0.0247 \cdot 1/200 = 0.878$ , hvoraf fås

$$f_{m,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{m,k} / \gamma_{m,fi} = 0.878 \cdot 36 / 1.0 = 31.6 \text{ MPa} < \sigma_{m,fi,max} = 32.4 \rightarrow \text{ej OK}$$

### Styrkereduktionsmetoden ved parametriske brand

Effektivt resttværsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (300 - 30) \cdot (160 - 2 \cdot 30) = 270 \cdot 100 \text{ mm}$  ( $A'_{fi} = 27,000 \text{ mm}^2$ )

Hjørneafrundningernes areal  $A_h = 2 \cdot (1 - \pi/4) \cdot 30^2 = 386 \text{ mm}^2$  Kantafstand  $a_h = 7 \text{ mm}$

Resttværsnittets tyngdepunkt har afstanden  $\eta_{fi} = [27,000 \cdot 270/2 - 386 \cdot (270 - 7)] / [27,000 - 386] = 133 \text{ mm}$  fra tværsnittets øverste kant, hvoraf fås inertimomentet om y-aksen:

$$I_{y,fi} = 1/12 \cdot 270^3 \cdot 100 + 27,000 \cdot (270/2 - 133)^2 - 386 \cdot (270 - 133 - 7)^2 = 157.5 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y,fi,min} = I_{y,fi} / y_{max} = 157.5 \cdot 10^6 / (270 - 133) = 1.15 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,fi,max} = M_{fi,max} / W_{y,fi,min} = 34 / 1.15 = 29.6 \text{ MPa}$$

Idet resttværsnittets perimeter er  $p = 2 \cdot 0.270 + 0.100 - 0.030 \cdot (4 - \pi) = 0.614 \text{ m}$ , og arealet er  $A_r = (27,000 - 386) \cdot 10^{-6} = 0.0266 \text{ m}^2$ , er  $k_{mod,fi} = 1.00 - 0.614 / 0.0266 \cdot 1/200 = 0.885$ , hvoraf fås

$$f_{m,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{m,k} / \gamma_{m,fi} = 0.885 \cdot 36 / 1.0 = 31.8 \text{ MPa} > \sigma_{m,fi,max} = 29.6 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK}$$

### Eksempel 3.2

Brandteknisk dimensionering af træ søjle, der indgår i den bærende hovedkonstruktion i en bygning i 1 etage. Søjlerne, der er 3.0 meter høje, er udført af 150·150 mm konstruktionstræ af kvalitet K 24 i henhold til DS 413 og regnes simpelt understøttede og centralt belastede med et belastningsareal på 25 m<sup>2</sup> pr. søjle. De er dimensioneret for følgende karakteristiske laster:

Permanent last (tagkonstruktionen)	1.5 kN/m <sup>2</sup>
Variabel last (snelast)	0.8 kN/m <sup>2</sup>

Kravet til konstruktionens brandmodstandsevne er  $t_{fi,req} = 30$  minutter.

Regningsmæssig normalkraft i lastkombination 3.3, Ulykkeslast - brand:

$$P_{fi} = g \cdot A \cdot \gamma_{g,fi} + s \cdot A \cdot \gamma_{s,fi} = 1.5 \cdot 25 \cdot 1.0 + 0.8 \cdot 25 \cdot 0.5 = 47.5 \text{ kN}$$

Simpelt understøttet søjle med søjlelængde  $l = 3.0$  m

Søjleprofil:  $h \cdot b = 150 \cdot 150$  mm

Trækvalitet: K 24 (karakteristisk trykstyrke  $f_{c,0,k} = 20$  MPa,  $E_{0,05} = 7000$  MPa)

### **Resttværnsnitsmetoden (Standard-brandpåvirkning)**

Indbrændingshastighed:  $\beta_0 = 0.75$  mm/min (tabel 9.2.1.2.a i DS 413)

Indbrændingsdybde:  $d_{char} = \beta_0 \cdot t = 0.75 \cdot 30 = 22.5$  mm for  $t = t_{fi,req} = 30$  minutter

Tværsnitsreduktion  $x = d_{char} + k_0 \cdot d_0 = 22.5 + 1.0 \cdot 7 = 29.5$  mm

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (150 - 2 \cdot 29.5) \cdot (150 - 2 \cdot 29.5) = 91 \cdot 91$  mm

$\sigma_{c,0,fi} = P_{fi} / A_{fi} = 47,500 / (91 \cdot 91) = 5.7$  MPa

Geometrisk slankhedstal  $\lambda_{y,fi} = l / i_y = 3000 \cdot \sqrt{12} / 91 = 114$  ( $= \lambda_{z,fi}$ )

Relativt slankhedstal  $\lambda_{rel,y,fi} = 114 \cdot \sqrt{20/7000} / \pi = 1.94$

Da søjlens knækspænding  $\sigma_{euler,fi} = f_{c,0,fi} / (\lambda_{rel,y,fi})^2 = (20/1.0 \cdot 1.0) / 1.94^2 = 5.3$  MPa er  $< \sigma_{c,0,fi} = 5.7$  MPa, er bæreevnen efter resttværnsnitsmetoden utilstrækkelig.

### **Styrkereduktionsmetoden (Standard-brandpåvirkning)**

Da konstruktionen er brandeksponeret på alle sider, skal der tages hensyn til effekten af afrundede hjørner (9.2.1.3(1)P i DS 413).

Indbrændingshastighed:  $\beta = 0.65$  mm/min (tabel 9.2.1.3 i DS 413)

Tværsnitsreduktion = indbrændingsdybde:  $d_{char} = \beta t = 0.65 \cdot 30 = 19.5$  mm for  $t = t_{fi,req} = 30$  minutter

Effektivt resttværnsnit:  $h_{fi} \cdot b_{fi} = (150 - 2 \cdot 19.5) \cdot (150 - 2 \cdot 19.5) = 111 \cdot 111$  mm

Hjørneafrundning:  $r = 20$  mm (figur 9.2.1.3 i DS 413)

Hjørneafrundningernes areal  $A_h = 4 \cdot (1 - \pi/4) \cdot 20^2 = 343$  mm<sup>2</sup> Kantafstand:  $a_h = 4.5$  mm

Resttværnsnittets areal:  $A_r = 111^2 - 343 = 11,978$  mm<sup>2</sup>

$$\text{Spænding: } \sigma_{c,0,\bar{f}_i} = P_{\bar{f}_i}/A_r = 47,500/11,978 = 4.0 \text{ MPa}$$

Resttværsnittets inertimomentet om tyngdepunktsaksen:

$$I_{y,\bar{f}_i} = 1/12 \cdot 1111^4 - 343 \cdot (1/2 \cdot 1111 - 4.5)^2 = 11.76 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (= I_{z,\bar{f}_i})$$

$$\text{Resttværsnittets inertiradius: } i_{y,\bar{f}_i} = \sqrt{I_{y,\bar{f}_i}/A_r} = \sqrt{11.76 \cdot 10^6/11,978} = 31 \text{ mm}$$

$$\text{Geometrisk slankhedstal } \lambda_{y,\bar{f}_i} = 3000/31 = 96$$

$$\text{Relativt slankhedstal } \lambda_{rel,y,\bar{f}_i} = 96 \cdot \sqrt{20/7000}/\pi = 1.63$$

$$k_{y,\bar{f}_i} = 0.5 \cdot (1 + 0.2 \cdot (1.63 - 0.5) + 1.63^2) = 1.94$$

$$k_{c,y,\bar{f}_i} = 1/[1.94 + \sqrt{1.94^2 - 1.63^2}] = 0.334$$

Idet resttværsnittets perimenter er  $p = 4 \cdot 0.111 - 2 \cdot 0.020 \cdot (4 - \pi) = 0.410 \text{ m}$ , og arealet er  $A_r = 11,978 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ , er  $k_{mod,\bar{f}_i} = 1.00 - (0.410/0.012) \cdot (1/125) = 0.726$ , hvoraf fås

$$f_{c,0,\bar{f}_i} = k_{mod,\bar{f}_i} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_{m,\bar{f}_i} = 0.726 \cdot 20 / 1.0 = 14.5 \text{ MPa}$$

Bæreevneeftervisning:

(6.4.2.1(3) i DS 413)

$$\sigma_{c,0,\bar{f}_i} / (k_{c,min,\bar{f}_i} \cdot f_{c,0,\bar{f}_i}) = 4.0 / (0.334 \cdot 14.5) = 0.82 < 1 \quad \rightarrow \quad \text{OK}$$

**Konklusion:** Søjlen har tilstrækkelig bæreevne ved beregning efter styrkereduktionsmetoden, men ikke ved beregning efter resttværnsnitsmetoden.

## Norm for trækonstruktioner, Dansk Standard 413

### 5. udgave 1998

#### (i uddrag)

**Tabel 3.2 Karakteristiske styrke- og stivhedstal i MPa samt densitet i kg/m<sup>3</sup>**

		nåletræ						bøg, eg og ask	azobé	basra- locus	green- heart
		limtræ:	L 40	L 36	L 30	K 30 <sup>1</sup>	K24				
	nåletræ:										
<i>styrketal</i>											
bøjning parallelt m. fibre	$f_{mk}$	40	36	30	24	18	14	30	100	80	125
træk parallelt med fibre	$f_{t,0,k}$	27	24	20	16	10	8	20	65	50	75
træk vinkelret på fibre	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	-	-	-
tryk parallelt med fibre <sup>2</sup>	$f_{c,0,k}$	34	29	26	20	15	12	29	75	60	80
tryk vinkelret på fibre	$f_{c,90,k}$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	10	30	20	30
forskydning	$f_{v,k}$	3	3	3	3	3	3	3	8	5	8
<i>stivhedstal</i>											
elasticitetsmodul parallelt med fibre, middelværdi	$E_0$	14000	13000	12000	10500	9000	7000	16000	27000	19000	28000
elasticitetsmodul parallelt med fibre, 5 % fraktil	$E_{0,k}$	9300	8700	8000	7000	6000	4700	-	-	-	-
elasticitetsmodul vinkelret på fibre, middelværdi	$E_{90}$	500	460	400	350	300	250	-	-	-	-
forskydningsmodul, middelværdi	$G$	1000	920	800	700	600	500	-	-	-	-
<i>densitet i kg/m<sup>3</sup></i>											
densitet, 5 % fraktil	$\rho_{12,k}$	380	380	380	350	320	290	-	-	-	-
densitet, middelværdi	$\rho_{12}$	460	460	460	420	380	350	-	-	-	-

1) For rundtømmer af nåletræ gælder værdierne for K30

2) Ved tryk endetræ mod endetræ skal  $f_{c,0,k}$  multipliceres med 0,6

## 9 Brand

### 9.1 Beregningsgrundlag og -principper

#### 9.1.1 Generelt

(1)P Dette kapitel omhandler beregningsmæssig eftervisning af bærende trækonstruktioners bæreevne under brand, jf. lastkombination 3.3 i DS 409. Det omhandler konstruktioner af konstrukstræ og limtræ med eller uden brandbeskyttelsessystemer, fx beklædning af gips, træ eller træbaserede pladematerialer.

#### 9.1.2 Laster

(1)P Termiske og mekaniske laster skal fastsættes i henhold til lastkombination 3.3, ulykkeslast – brand, jf. DS 409 og 410. Ved beregningen skal den termiske last fastsættes enten ud fra et nominelt brandforløb (standard-brandforløbet) eller ud fra et parametrisk brandforløb.

#### 9.1.3 Beregningsprincipper

(1)P Der skal tages hensyn til

- tværsnitsreduktionen som følge af indbrænding
- temperatur- og fugtforholdenes variation over tværsnittet samt de heraf følgende
- ændrede styrke- og stivhedsegenskaber.

(2)P I denne norm er angivet to forenklede beregningsmetoder:

(3)P Resttværnsnitsmetoden:

en beregningsmetode, ved hvilken der regnes med uændrede styrke- og stivhedsegenskaber i et effektivt resttværnsnit, der beregnes ud fra det oprindelige tværsnit med fradrag af såvel indbrændingszonen som en svækket zone og uden hensyntagen til hjørneeffekter. Denne metode må udelukkende anvendes, hvor den termiske last beregnes ud fra standard-brandforløbet.

(4)P Styrkereduktionsmetoden:

en beregningsmetode, ved hvilken der regnes med reducerede styrke- og stivhedsegenskaber i et tværsnit, der beregnes ud fra det oprindelige tværsnit med fradrag af indbrændingszonen og med eller uden hensyntagen til hjørneeffekter. Denne metode kan anvendes, uanset hvordan den termiske last fastsættes.

## 9.2 Materialer

### 9.2.1 Indbrændingsdybder

#### 9.2.1.1 Alment beregningsprincip

(1)P Der skal regnes med indbrænding fra brandens starttidspunkt. For overflader beskyttet af et brandbeskyttelsessystem eller af andre konstruktionsdele skal der regnes med indbrænding af overfladen fra brandbeskyttelsessystemets svigtetidspunkt.

#### 9.2.1.2 Resttværnsnitsmetoden

(1)P Indbrændingsdybden  $d_{char}$  skal bestemmes ved:

$$d_{char} = \beta_0 t^i$$

Her er

$t$  brandvarigheden i minutter

$\beta_0$  indbrændingshastigheden i henhold til tabel 9.2.1.2a.

**Tabel 9.2.1.2a – Indbrændingshastigheder**

	$\beta_0$ mm/min
nåletræ med en karakteristisk densitet på mindst 320 kg/m <sup>3</sup>	0,75
limtræ med en karakteristisk densitet på mindst 380 kg/m <sup>3</sup>	0,65
løvtræ med en karakteristisk densitet på mindst 450 kg/m <sup>3</sup>	0,50

Tabellens værdier må kun anvendes for  $d_{char} \leq b/4$  og  $d_{char} \leq h/4$ .

Her er

$b$  og  $h$  bredde og højde af det oprindelige tværsnit.

(2)P For træbaserede plader med en karakteristisk densitet på 450 kg/m<sup>3</sup> og en tykkelse på 20 mm skal der regnes med følgende indbrændingshastigheder:

$$\beta_0 = 1,0 \text{ mm/min for krydsfiner}$$

$$\beta_0 = 0,9 \text{ mm/min for andre træbaserede plader.}$$

(3)P For træbaserede plader med andre karakteristiske densiteter,  $\rho_k$ , og tykkelser,  $t_p$ , skal indbrændingshastigheden findes af:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_t$$

Her er

$$k_p = \sqrt{450/\rho_k}$$

$$k_t = \min \left\{ \sqrt{20/t_p}, 1,0 \right.$$

$\rho_k$  i  $\text{kg/m}^3$  og  $t$  i mm.

(4) Ved flere pladelag i brandteknisk fast forbindelse kan der regnes med den totale tykkelse af alle pladelagene.

(5)P Fradraget  $x$  til bestemmelse af det effektive resttværsnit skal bestemmes som

$$x = d_{char} + k_0 d_0$$

Her er

$d_{char}$  indbrændingsdybden bestemt i henhold til 9.2.1.2 (1)P  
 $d_0$  7 mm for  $t \geq 20$  min. For  $t < 20$  min interpoleres retliniet fra 0 til 7 mm

$k_0$  en reduktionsfaktor, der er angivet i tabel 9.2.1.2b.

Ovenstående må kun anvendes for  $d_{char} \leq b/4$  og  $d_{char} \leq h/4$ .

Tabel 9.2.1.2b – Værdier for  $k_0$

		$k_0$
ubeskyttede flader		1,0
flader beskyttet med træbaseret beklædning	for $t_{fi,req} - t_{pr} < 20$ min	$\frac{t_{fi,req} - t_{pr}}{20}$
	for $t_{fi,req} - t_{pr} \geq 20$ min	1,0
flader beskyttet med andre beklædninger	for $t_{fi,req} - t_{pr} < 10$ min	$\frac{t_{fi,req} - t_{pr}}{10}$
	for $t_{fi,req} - t_{pr} \geq 10$ min	1,0

$t_{fi,req}$  er den krævede brandmodstandsevne i minutter

$t_{pr}$  er beskyttelsestiden i minutter for beklædningen jf. 9.2.1.5

### 9.2.1.3 Styrkereduktionsmetoden ved standard-brandpåvirkning

(1)P Ved beregning af trykpåvirkede konstruktioner, der må påregnes brandeksponeret på alle sider, skal der tages hensyn til effekten af afrundede hjørner. For andre konstruktioner kan der ses bort fra afrundede hjørner, og indbrændingsdybden bestemmes som angivet i 9.2.1.2 (1)P.

(2)P Hvor der tages hensyn til effekten af afrundede hjørner, skal indbrændingsdybden beregnes som

$$d_{char} = \beta t$$

Her er

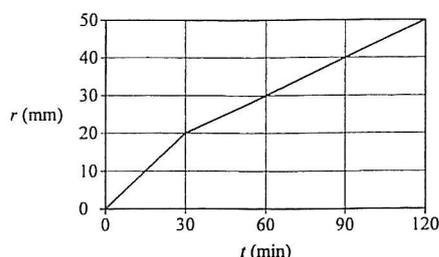
$\beta$  indbrændingshastigheden i henhold til tabel 9.2.1.3.

Tabel 9.2.1.3 – Indbrændingshastigheder for tværsnit, hvor der tages hensyn til afrunding af hjørner

	$\beta$ mm/min
nåletræ med en karakteristisk densitet på mindst 320 $\text{kg/m}^3$	0,65
limtræ med en karakteristisk densitet på mindst 380 $\text{kg/m}^3$	0,55
løvtræ med en karakteristisk densitet på mindst 450 $\text{kg/m}^3$	0,45

Tabellens værdier må kun anvendes for  $d_{char} \leq b/4$  og  $d_{char} \leq h/4$ .

(3)P Afrundede hjørner skal antages at have form som en cirkelbue med en tidsafhængig radius givet ved figur 9.2.1.3. Denne figur er kun gældende for radier mindre end halvdelen af den korteste sidelængde i resttværsnittet.



Figur 9.2.1.3 – Tidsafhængig radius af afrunding ved hjørner

### 9.2.1.4 Styrkereduktionsmetoden ved parametriske brandpåvirkning

(1)P Der skal regnes med en indbrændingshastighed, som afhænger af tiden.

Begyndelseshastigheden  $\beta_{par}$  er givet ved:

$$\beta_{par} = 1,5\beta_0(5O_b - 0,04)/(4O_b + 0,08)$$

Her er

$\beta_0$  indbrændingshastigheden i henhold til tabel 9.2.1.2a  
 $O_b$  den brandrumskorrigerede åbningsfaktor =  $O \cdot 1160/b$  [ $\text{m}^{1/2}$ ]  
 $O$  åbningsfaktoren [ $\text{m}^{1/2}$ ] beregnet iht. DS 410  
 $b$  brandrummets termiske inertie [ $\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ ] beregnet iht. DS 410.

(3)P Den maksimale indbrænding som følge af branden, herunder den del af brandforløbet, hvor brandrummets temperatur er aftagende, skal bestemmes af:

$$d_{char} = 2\beta_{par}t_0$$

Her er

$t_0 = 0,006 q_{t,d}/O$  [min]  
 $q_{t,d}$  = den regningsmæssige brandbelastning i  $\text{MJ/m}^2$  i henhold til DS 410.

Ovenstående formler gælder kun for

$$0,02 \leq O_b \leq 0,30 \text{ m}^{1/2}$$

$$t_0 \leq 40 \text{ min}$$

$$d_{char} \leq b/4$$

$$d_{char} \leq h/4$$

Her er

$b$  og  $h$  bredde og højde af det oprindelige tværsnit.

(4)P Der skal tages hensyn til effekten af afrundede hjørner ved at regne afrundingen som en cirkelbue med radius  $r = d_{char}$ , jf. (3)P.

### 9.2.1.5 Brandbeskyttelse af elementer

(1)P For brandbeskyttelsessystemer skal beskyttelsestiden bestemmes ved prøvning. Indtil anden prøvningsmetode foreligger, skal DS/INSTA 411 benyttes til prøvning af brandbeskyttelsessystemer til trækonstruktioner.

(2)P Brandbeskyttelsestiden  $t_{pr}$  findes som den tid, inden for hvilken der ved prøvning efter DS/INSTA 411 ikke forekommer temperaturstigninger på pladens ikke-eksponerede overflade, som er større end 250 °C i gennemsnit og 270 °C i et enkelt punkt.

(3) For brandbeskyttelsessystemer med beklædning af træ eller træbaserede plader kan beskyttelsestiden bestemmes af:

$$t_{pr} = t_p/\beta_0 - 4 \text{ min}$$

Her er

$\beta_0$  indbrændingshastigheden i henhold til 9.2.1.2

$t_p$  tykkelsen af beklædningen. Hvis der anvendes flere lag, benyttes summen af lagtykkelserne.

(4) Beklædningens enkelte lag forudsættes fastgjort til selve konstruktionsdelen. Afstanden mellem fastgørelsesmidler må højst være 300 mm. Ved pladekant må afstanden ikke overstige 150 mm. Kantafstanden skal være større end pladetykkelsen. Hvor der anvendes flere pladelag, skal hvert pladelag fastgøres hver for sig, og stød i pladelagene skal være indhyrdes forskudt mindst 60 mm.

### 9.2.2 Styrke- og stivhedsegenskaber

(1)P Styrkeeftervisning skal foretages med følgende regningsmæssige styrke- og stivhedstal:

$$f_{fi,d} = k_{mod,fi} f_k \gamma_{m,fi}$$

$$E_{fi,d} = k_{mod,fi} E_{0,05} \gamma_{m,fi}$$

Her er

$\gamma_{m,fi}$  materialepartialkoefficienten for ulykkeslast

$f_k$  og  $E_{0,05}$  de ved normal temperatur gældende karakteristiske styrke- og stivhedstal

$$k_{mod,fi} = 1,00 - k_{fi} p/A_r$$

$p$  perimetren for det brandeksponerede resttværsnit [m]

$A_r$  arealet af resttværsnittet [ $\text{m}^2$ ].

For resttværsnitsmetoden regnes:

$$k_{fi} = 0 \text{ for alle styrke- og stivhedstal.}$$

For styrkereduktionsmetoden regnes:

$$k_{fi} = 1/125 \text{ for trykstyrken}$$

$$k_{fi} = 1/200 \text{ for bøjningsstyrken}$$

$$k_{fi} = 1/330 \text{ for trækstyrken, forskydningsstyrken og stivhedstallet.}$$

Udtrykket for  $k_{mod,fi}$  er gyldigt for  $t \geq 20$  minutter. For  $0 < t < 20$  minutter interpoleres retliniet mellem 1 og de for  $t = 20$  minutter gældende værdier.

9.3 Styrkeeftersvisning

9.3.1 Generelle principper

(1)P Der skal overalt i det effektive resttværsnit regnes med samme regningsmæssige styrke- og stivhedstal.

(2)P Det effektive resttværsnit skal beregnes ved at reducere det oprindelige tværsnit svarende til en reduktion fra alle brandpåvirkede flader. Reduktionens størrelse skal beregnes efter 9.2.1 og afhænger af, om beregningen foretages efter resttværnsnitsmetoden (reduktionen =  $x$ ) eller efter styrkereduktionsmetoden (reduktionen =  $d_{char}$ ) samt af, om der tages hensyn til hjørneafrundning.

(3)P Afstivede tryk- og bøjningspåvirkede konstruktioner skal regnes som uafstivede konstruktioner, såfremt de afstivede konstruktioner må regnes at kunne svigte under brandpåvirkningen.

(4) En afstivende konstruktion kan antages ikke at svigte, når arealet af dens effektive resttværsnit er større end 60 % af det for dimensionering ved normal temperatur nødvendige areal.

9.3.2 Forbindelser

9.3.2.1 Generelle bestemmelser

(1)P Ved eftersvisning af mekaniske forbindelsers bæreevne skal der tages hensyn til temperaturrens indflydelse på materialernes styrke og stivhed.

(2) Forbindelser med stålplader med en tykkelse mindre end 6 mm som sidestykker skal dækkes af et brandbeskyttelsessystem med en beskyttelsestid  $t_{pr} \geq t_{f,req}$ .

(3) 2-snietsforbindelser i konstruktioner, hvor den termiske last er fastsat ud fra standard-brandforløbet, kan antages at have en brandmodstandsevne på mindst 15 minutter. For forbindelser med  $t_{f,req} > 15$  minutter kan kravet til bæreevnen under brand regnes for opfyldt, såfremt de udføres som beskyttede eller ubeskyttede forbindelser efter retningslinjerne i 9.3.2.2 og 9.3.2.3.

9.3.2.2 Beskyttede forbindelser

(1) En forbindelse kan antages at være beskyttet, dersom den er dækket af enten et brandbeskyttelsessystem med en beskyttelsestid  $t_{pr} \geq t_{f,req} - 15$  eller træpropper, træ eller træplader med en tykkelse  $a_f$ , der bestemmes af

$$a_f = \beta_0(t_{f,req} - 15)$$

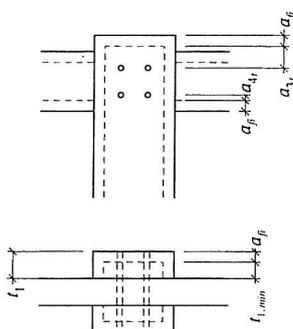
Her er

$\beta_0$  indbrændings hastigheden i henhold til 9.2.1.2  
 $t_{f,req}$  den krævede brandmodstandsevne i minutter.

(2) Udføres brandbeskyttelsen af træplader, skal disse være fastgjort med forbindelsesmidler med en indtrængningsdybde på mindst  $6d$ , kantafstande på mindst  $a_f$  og med mindst et forbindelsesmiddel pr 0,015 m<sup>2</sup> beskyttet overflade.

(3) Såfremt den krævede brandmodstandsevne  $t_{f,req}$  overstiger 15 minutter, skal ende- og kantafstande  $a_1$  og  $a_2$ , jf. figur V 9.3.2.2, øges med  $a_f$  i forhold til de respektive minimumværdier ved normal temperatur.

(4) Forbindelser med stålplader som sidestykker skal på alle eksponerbare flader og kanter udføres som beskyttede forbindelser.



Figur V 9.3.2.2 – Ekstra tykkelser, kant- og endefastande for forbindelser, der er brandeksponerede i mere end 15 minutter

9.3.2.3 Ubeskyttede forbindelser

(1) For forbindelser træ mod træ og forbindelser træ mod stål med sidestykker af træ med forbindelsesmidler som søm, skruer, dome eller bolte samt for bolteforbindelser træ mod stål med sidestykker af mindst 6 mm stålplade skal 9.3.2.2(3) samt følgende tre betingelser være opfyldt:

$$t_1 \geq t_{f,req} / (1,25 - \eta)$$

$$t_1 \geq 1,6 t_{f,req}$$

$$t_1 \geq t_{1,min} + a_f$$

Her er (jf. figur V 9.3.2.2)

$t_1$  sidestykkernes tykkelse i mm  
 $t_{1,min}$  sidestykkernes minimumtykkelse ved normal temperatur  
 $\eta$   $E_{d,n} / R_{d,n}$

$E_{d,n}$  den regningsmæssige lastvirkning på forbindelsesmidlet ved normal temperatur

$R_{d,n}$  forbindelsesmidlets regningsmæssige bæreevne ved normal temperatur.

(2) Såfremt kravet til brandmodstandsevnen er  $30 \leq t_{f,req} \leq 60$  minutter, skal følgende betingelser også være opfyldt:

$$\eta \leq \eta_{30} (30 / t_{f,req})^2$$

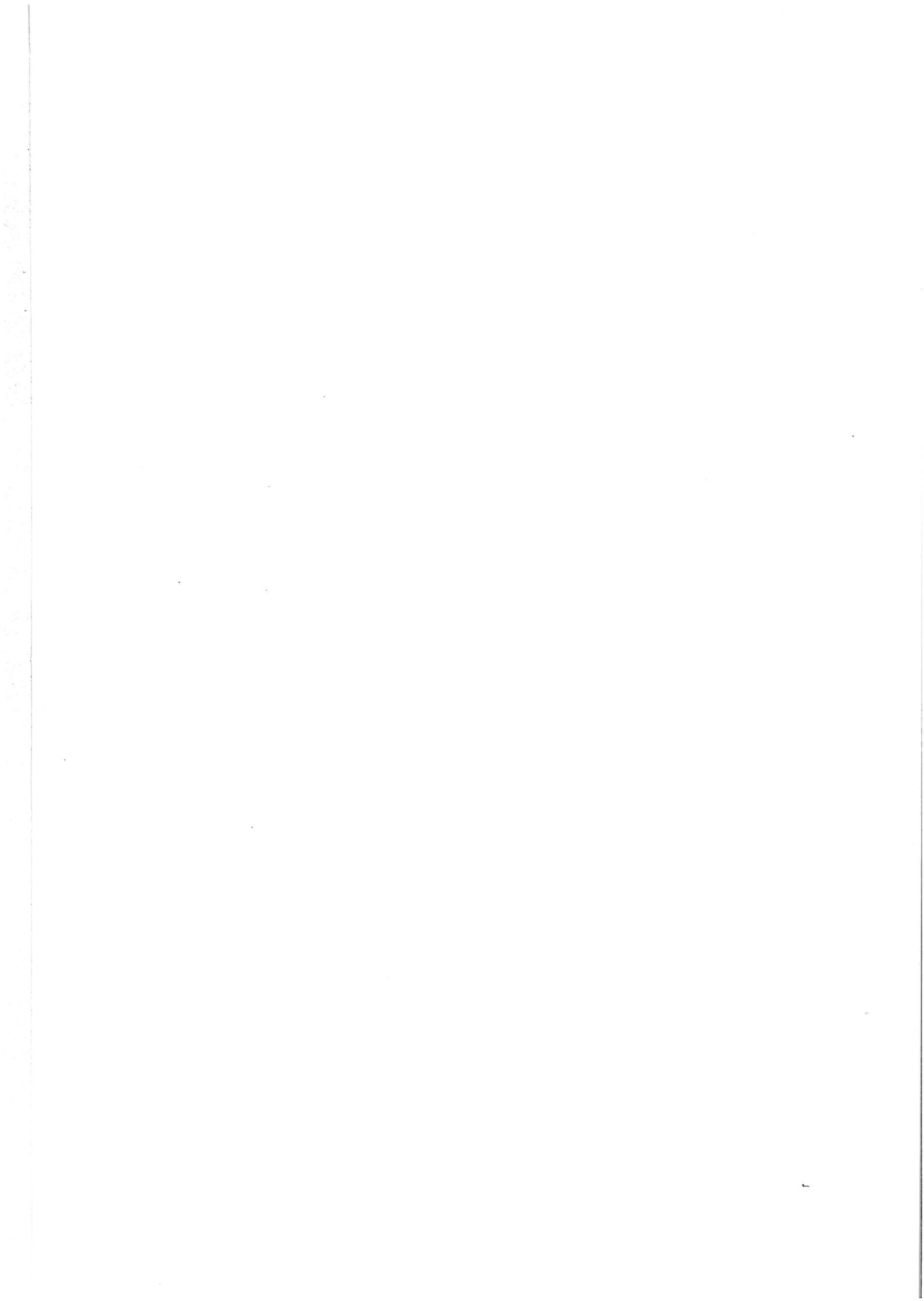
hvor  $\eta_{30}$  fremgår af tabel V 9.3.2.3, hvori tillige er anført, hvilke betingelser forbindelsesmidlernes dimensioner skal opfylde. I tabellen er benyttet følgende symboler:

- $l$  er forbindelsesmidlets længde
- $t_1$  er sidestykkernes tykkelse
- $t_2$  er mellemstykkets tykkelse
- $d$  er forbindelsesmidlets tykkelse

Tabel V 9.3.2.3 – Forholdet  $\eta_{30}$  samt forbindelsesmidlers dimensioner for ubeskyttede forbindelser med standard-brandmodstandsevne 30 minutter

forbindelsesmidler		$\eta_{30}$	dimensioner
søm	i forbindelser træ mod træ	0,80	$l \geq t_1 + t_2 + 8d$ $t_1/d \leq 16$
	i forbindelser træ mod stål	1,00	$l \geq 90$ mm
dome	i forbindelser træ mod træ	0,80	$l \geq 2t_1 + t_2$ $l \geq t_2 + 2 \cdot 3d$
	i forbindelser træ mod stål	1,00	$l \leq 2t_1 + t_2$ $l \geq t_2 + 2 \cdot 3d$
bolte med eller uden		0,45	$t_1 \geq 75$ mm
mellemlæg			$d \geq 12$ mm

(3) Bestemmelserne om  $\eta$  kan opfyldes ved at forøge antallet af forbindelsesmidler eller deres dimensioner i forhold til, hvad der er nødvendigt for dimensionering ved normal temperatur.



**Aalborg Universitet**  
**Instituttet for Bygningsteknik**  
**April 2002**  
**ISSN 1395-8232 U0205**