



# LUND UNIVERSITY

## Träkonstruktioner och brand. Kunskapsöversikt och forskningsbehov

Jönsson, Robert; Pettersson, Ove

1983

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Jönsson, R., & Pettersson, O. (1983). *Träkonstruktioner och brand. Kunskapsöversikt och forskningsbehov.* (LUTVDG/TVBB--3015--SE; Vol. 3015). Division of Building Fire Safety and Technology, Lund Institute of Technology.

*Total number of authors:*

2

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

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

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

BYGGNADSTEKNISKT BRANDSKYDD

RAPPORT LUTVDG/(TVBB-3015)

ROBERT JÖNSSON - OVE PETTERSSON

# TRÄKONSTRUKTIONER OCH BRAND

KUNSKAPSÖVERSIKT  
OCH FORSKNINGSBEHOV

LUND MAJ 1983





Innehållsförteckning

	FÖRORD	5
1	DIMENSIONERINGSPRINCIPER. FUNKTIONSKRAV OCH KRITERIER	9
1.1	Inledande översikt	9
1.2	Internationellt konventionell dimensionering	16
1.3	Analytisk dimensionering, baserad på verklig brandförloppspåverkan	18
1.4	Dimensionering, baserad på begreppet ekvivalent brandvaraktighet	20
1.5	Brandteknisk bärverksdimensionering enligt sannolikheteoretiska metoder	21
1.6	Angelägna forskningsprojekt inom det övergripande området för bärande och avskiljande konstruktioner vid brand	26
2	ANTÄNDNING	35
2.1	Inledning	35
2.2	Olika typer av antändning	36
2.3	Faktorer, som påverkar antändningen	37
2.4	Matematiska modeller	43
2.5	Slutsatser	46
3	TERMISKA EGENSKAPER	49
3.1	Inledning	49
3.2	Specifika värmekapaciteten	49
3.3	Värmeledningsförmågan	50
3.4	Entalpiinnehåll och fasomvandlingsenergi	51
3.5	Slutsatser	52

4	KOLSKIKTSTILLVÄXT, TEMPERATUR- OCH FUKTILL- STÄND	55
4.1	Inledning	55
4.2	Termisk nedbrytning	57
4.3	Processer för kolskiktstillväxt	59
4.4	Matematiska modeller	65
4.5	Slutsatser	67
5	MEKANISKA EGENSKAPER	71
5.1	Inledning	71
5.2	Hållfasthets- och deformationsegenskaper	72
5.3	Slutsatser	76
6	KONSTRUKTIONSELEMENTS OCH KONSTRUKTIONERS BRANDBETEENDE	79
6.1	Massiva träbärverk	80
6.1.1	Kolskiktets tillväxt	84
6.1.2	Balkar med gränstillstånd i form av böjbrott	88
6.1.3	Balkar med gränstillstånd i form av instabili- tetsbrott	90
6.1.4	Pelare med gränstillstånd i form av knäckning	93
6.1.5	Slutsatser	95
6.2	Lätta och sammansatta träkonstruktioner	96
6.3	Skarvar, infästningar och förband	101
7	EFFEKT AV BRANDFÖRDRÖJANDE TILLSATSER	109
7.1	Inledning	109
7.2	Kemiska mekanismer	110
7.3	Fysikaliska mekanismer	111
7.4	Samverkan mellan olika mekanismer	112
7.5	Olika typer av flamskyddsmedel	112
7.6	Slutsatser	114

8	SAMMANFATTANDE PROJEKTBEKRIVNINGAR. PRIORITERING	117
8.1	Projekt, kopplade till komponenter i dimensioneringsprocessen	117
8.2	Övergripande projekt, som berör hela dimensioneringsprocessen	127
8.3	Projektens inbördes sammanhang och prioritering	131



## FÖRORD

Trä är ett naturligt och förnyelsebart material med en lång tradition inom byggnadstekniken. Ur energisynpunkt är det överlägset de icke förnyelsebara byggnadsmaterialen. Energiförbrukningen för produktion av trävirke är t ex endast cirka 10% av motsvarande för stål. Trä ger långt mindre skadeeffekter på miljön än flertalet andra byggnadsmaterial och restprodukterna från trähanteringen är endast 1/4 till 1/2 av motsvarande restprodukter från gruv- och mineralproduktionen.

Av den svenska produktionen av trävirke går ungefär hälften till prefabricerade hus, byggkomponenter och limträ - i dominerande omfattning till olika typer av bärande och avskiljande konstruktioner och ytbeklädnader. Härtill kommer en produktionsandel av cirka 15% till byggnadssnickerier.

Traditionellt har trä och träbaserade produkter använts i stor omfattning till småhus och för närvarande byggs mer än 90% av de svenska småhusen i trä. Fram till för cirka 20 år sedan var därvid byggnadssättet relativt enhetligt med stammen utförd i form av ett regelsystem i lösvirke och pre-cut och i vissa fall av prefabricerade väggblock, ofta monterade utan innerbeklädnad och isolering.

Under de senaste decennierna har sätten att bygga småhus vuxit i antal i takt med den ökade prefabriceringen av stomsystemen och i dag förekommer ett tiotal systemgrupper från pre-cut till volymbyggeri. Utvecklingen indikerar en fortsatt ökning av antalet system.

Förändrade villkor för byggandet - framför allt de energirelaterade problemen och bristen på facklärd arbetskraft ute på byggplatserna - har initierat nya utvecklingslinjer för byggnader och byggnadsdelar, i vilka trä och träbaserade produkter ingår. Exempel härpå utgör tunna och sammansatta träbärverk, samverkanskonstruktioner med trä och plåt som kraftupptagande element och sandwichkonstruktioner med kraftupptagande ytmate-



rial av träbaserade skivor i kombination med distansmaterial av cellplast.

Trä och träbaserade produkter, särskilt limträ- och sandwich-element, är väl lämpade också för olika typer av större bärverk för t ex hall- och flervåningsbyggnader. I Sverige är dock traditionen ringa och konstruktörserfarenheterna begränsade inom detta användningsområde. I länder som Kanada, Schweiz, Tyskland och USA däremot används trä och träbaserade produkter i betydande omfattning för sådana bärverkstyper med tillämpning på lantbruksbyggnader, industri-, sport- och utställningshallar, flervåningshus upp till fem våningar, kyrkor och landsvägsbroar.

Träbyggnadsteknik har under lång tid varit ett forskningsmässigt eftersatt område med satsningar, som i jämförelse med forskningen inom stål- och betongbyggnadsområdena har varit av mycket liten omfattning. Nyligen har emellertid Styrelsen för teknisk utveckling (STU) tillsammans med träindustrin beslutat att göra en kraftfull satsning på träteknisk forskning och utveckling under en femårsperiod och träbyggnadsteknik har därvid bedömts som ett viktigt ämnesområde för kompetensuppbyggnad och kunskapsutveckling. Som underlag för verksamheten har på uppdrag av STU två programskrifter utarbetats, nämligen JOHANNESSON, C M, "Träbyggnadsteknik - forsknings- och utvecklingsbehov". STU-information nr 207, 1981 och GIRHAMMAR, U A, "Hallbyggnader i trä - forsknings- och utvecklingsinsatser för stora träbärverk". STU-information nr 293, 1982. Avsikten med skrifterna är att initiera projekt och att tjäna som underlag vid planering av forskningsverksamhet inom området för träbyggnadsteknik.

Det är angeläget, att brandfrågorna ges en central plats i en framtida satsning på träbyggnadsteknisk forskning. Detta understryks i det av Styrelsen för svensk brandforskning (BRANDFORSK) fastställda nationella, kollektiva brandforskningsprogrammet för 1982-84. För att få ett planeringsinstrument för en sådan nationellt sammanhållen, brandteknisk forskningsinsats har BRANDFORSK givit avdelningen för byggnadstekniskt brandskydd vid tekniska högskolan i Lund i uppdrag att utarbeta ett forsk-

ningsprogram för ämnesområdet träkonstruktioner och brand.

I det följande presenteras ett sådant program mot bakgrunden av en summarisk kunskapsöversikt av området. Kapitel 1 behandlar därvid dimensioneringsmetoder och därtill relaterade funktionskrav och kriterier i ett internationellt nuläges- och utvecklingsperspektiv och slutsatser dras beträffande angelägna forskningsprojekt av övergripande karaktär. I kapitlen 2-7 ges därpå en motsvarande kunskapsöversikt för dimensioneringsprocessens olika komponenter och därur härledda forskningsprojekt av mer begränsad ämnesomfattning redovisas. I kapitel 8 sammanställs slutligen de olika projekten med sammanfattande beskrivningar och uppskattad erforderlig personinsats och ekonomisk ram. Projektens inbördes sammanhang belyses och en översiktlig strategisk planering presenteras för en integrerad, nationellt sammanhållen forskningsåtgärdsplanering.

Ett varmt tack riktas till BRANDFORSK, som initierat och finansierat programarbetet. Ett varmt tack går också till Gunilla Ljungquist, som svarat för rapportens utskrift, och Lilian Johansson, som ritat rapportens figurer.

Lund i maj 1983

Robert Jönsson

Ove Pettersson



# 1 DIMENSIONERINGSPRINCIPER. FUNKTIONSKRAV OCH KRITERIER

## 1.1 Inledande översikt

Internationellt tillämpade metoder för dimensionering av brandpåverkade bärverk kan översiktligt beskrivas i anslutning till den i figur 1.1 visade matrisen /1.1/. Denna är uppbyggd med tre typer av termisk påverkan ( $H_1$ ,  $H_2$  och  $H_3$ ) och tre typer av bärverksstruktur ( $S_1$ ,  $S_2$  och  $S_3$ ) som ingångsstorheter. Därvid gäller följande typdefinitioner.

Bärverks- modell		$S_1$	$S_2$	$S_3$
		Element	Sub-struktur	Hel struktur
Modell för termisk påverkan				
$H_1$	ISO-834 	provning eller beräkning (deterministisk)	beräkning, i undantags- fall provning (deterministisk)	
$H_2$	ISO-834 	provning eller beräkning (probabilistisk)	beräkning, i undantags- fall provning (probabilistisk)	beräkning (probabilistisk) bör undvikas
$H_3$	verkligt brandförlopp 	beräkning (probabilistisk)	beräkning (probabilistisk)	beräkning (probabilistisk) i speciella fall och för forskning

Figur 1.1 Schema för beskrivning av olika metoder för dimensionering av brandpåverkade bärverk

$S_1$  - en förenkling av verklig bärverksstruktur genom en uppdelning i enskilda element av typen balkar och pelare med som regel fritt upplagda ändar.

$S_2$  - en förenkling av verklig bärverksstruktur genom en uppdelning i sub-strukturer, t ex balk-pelarsystem.

$S_3$  - verklig bärverksstruktur.

$H_1$  - termisk påverkan enligt standarden ISO 834 eller dess nationella motsvarigheter /1.2/. Denna påverkan är den internationellt dominerande i praktisk dimensionering, baserad på resultat av standardiserad brandteknisk provning och tillhörande klassificering. I några länder tillåts, att en sådan klassificering alternativt får baseras på resultat av analytiska beräkningar. Påverkan definieras genom sambandet

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1) \quad (1.1)$$

varvid

$t$  = tid, i min,

$T$  = ugnstemperatur vid tiden  $t$ , i  $^{\circ}\text{C}$ ,

$T_0$  = ugnstemperatur vid tiden  $t = 0$ , i  $^{\circ}\text{C}$ .

Krävd tid  $t_{fd}$  för den termiska påverkan vid en provning eller motsvarande beräkning varierar med tillämpnings-situation och anges i t ex Svensk Byggnorm.

$H_2$  - samma termiska påverkan som enligt  $H_1$ , ekv (1.1). Tiden för den termiska påverkan  $t_e$  bestäms i den enskilda tillämpningen av brandcellens verkliga brandförlopp. Praktiskt sker detta över begreppet "ekvivalent brandvaraktighet"  $t_e$ , definierat som den tid för en termisk påverkan enligt ISO 834, som ger samma utslagsgivande effekt på aktuellt bärverk som ett verkligt brandförlopp. För stålbärverk kan

approximativt följande formel användas /1.3/

$$t_e = 0,067 \frac{f}{\left(\frac{A\sqrt{h}}{A_{\text{tot}}}\right)^{1/2}} \quad (\text{min}) \quad (1.2)$$

varvid

$f$  = brandcellens brandbelastning, i MJ/m<sup>2</sup> omslutningsyta,

$A$  = total fönster- och dörröppningsyta, i m<sup>2</sup>,

$h$  = medelvärde av öppningarnas höjd, vägt med hänsyn till respektive öppnings yta, i m,

$A_{\text{tot}}$  = brandcellens totala inre omslutningsyta, inklusive öppningar, i m<sup>2</sup>.

$H_3$  - påverkan från ett verkligt brandförlopp. Påverkan kan därvid beskrivas som en tidkurva för antingen brandcellens gastemperatur eller värmeflödet mot bärverket. I den enskilda tillämpningen kan aktuell tidkurva bestämmas över brandcellens värme- och massbalansekvationer eller ur tillgängligt handboksunderlag. Figur 1.2 ger exempel på sådant underlag, hämtat från Kommentar till Svensk Byggnorm 1976:1.

Till dessa typdefinitioner bör här följande tilläggskommentarer ges, vad gäller modellerna för termisk påverkan - H-modellerna.

Bärande och avskiljande konstruktioner av brännbart material kan själva ge ett betydande effekttillskott vid en brand. Detta beaktas ej vid en ugnsprovning enligt standarden ISO 834, vid vilken ugnens tillförda effekt regleras så, att den föreskrivna tidkurvan för ugnstemperaturen  $T$  följer ekv (1.1). I en given ugn fordrar detta en tillförd effekt som är väsentligt mindre vid provning av en konstruktion av brännbart material än vid provning av en obrännbar konstruktion, särskilt om denna är starkt effektkonsumerande.

Termiskt avgörande för en konstruktions brandbeteende är tidkurvan för det värmeflöde, som tillförs konstruktionen. Internationellt diskuteras därför inom ISO en eventuell övergång till att styra den termiska påverkan vid en ugnsprovning enligt en föreskriven sådan tidkurva för värmeflödet till den provade byggnadsdelen. Sannolikheten för en sådan övergång är dock för närvarande svårbedömd.

För en förenklad beskrivning av den termiska påverkan mot en bärande och/eller avskiljande konstruktion av obrännbart material vid brand har Harmathy infört begreppet "normalized heat load", definierat genom sambandet /1.4, 1.5/

$$H_n = \frac{1}{\sqrt{k\rho C}} \int_0^{\tau} q \, dt \quad (s^{1/2} \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (1.3)$$

Därvid är

$q$  = det värmeflöde, som tillförs brandcellens omslutande konstruktioner vid tiden  $t$ , i  $\text{W/m}^2$ ,

$\tau$  = varaktigheten av brandpåverkan, i s,

$\sqrt{k\rho C}$  = de omslutande konstruktionernas termiska tröghet, i  $\text{J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ } ^\circ\text{C}$ , med  $k$  = värmeledningsförmågan,  $\rho$  = densiteten och  $C$  = specifika värmekapaciteten.

Begreppet kan användas för att kvantifiera den termiska påverkanspotentialen vid såväl påverkan enligt standarden ISO 834 ( $H_1$ ) som påverkan från ett verkligt brandförlopp ( $H_3$ ). För konstruktioner med hög termisk tröghet, t ex oisolerade stålkonstruktioner, leder en tillämpning av begreppet "normalized heat load" normalt till en alltför grov approximation.

De gastemperatur-tidkurvor för verkligt brandförlopp, som exemplifieras genom figur 1.2, förutsätter en brandcell av sådan storlek, som gäller för t ex bostäder, ordinära kontor, skolor, sjukhus, hotell och bibliotek. För brandcell med mycket stor

volym - t ex industri- och idrottshallar - ger kurvorna en dålig beskrivning av verklig brandpåverkan. Detta gäller också för den gastemperatur-tidkurva ( $H_1$ ), som tillämpas vid normenlig brandprovning.

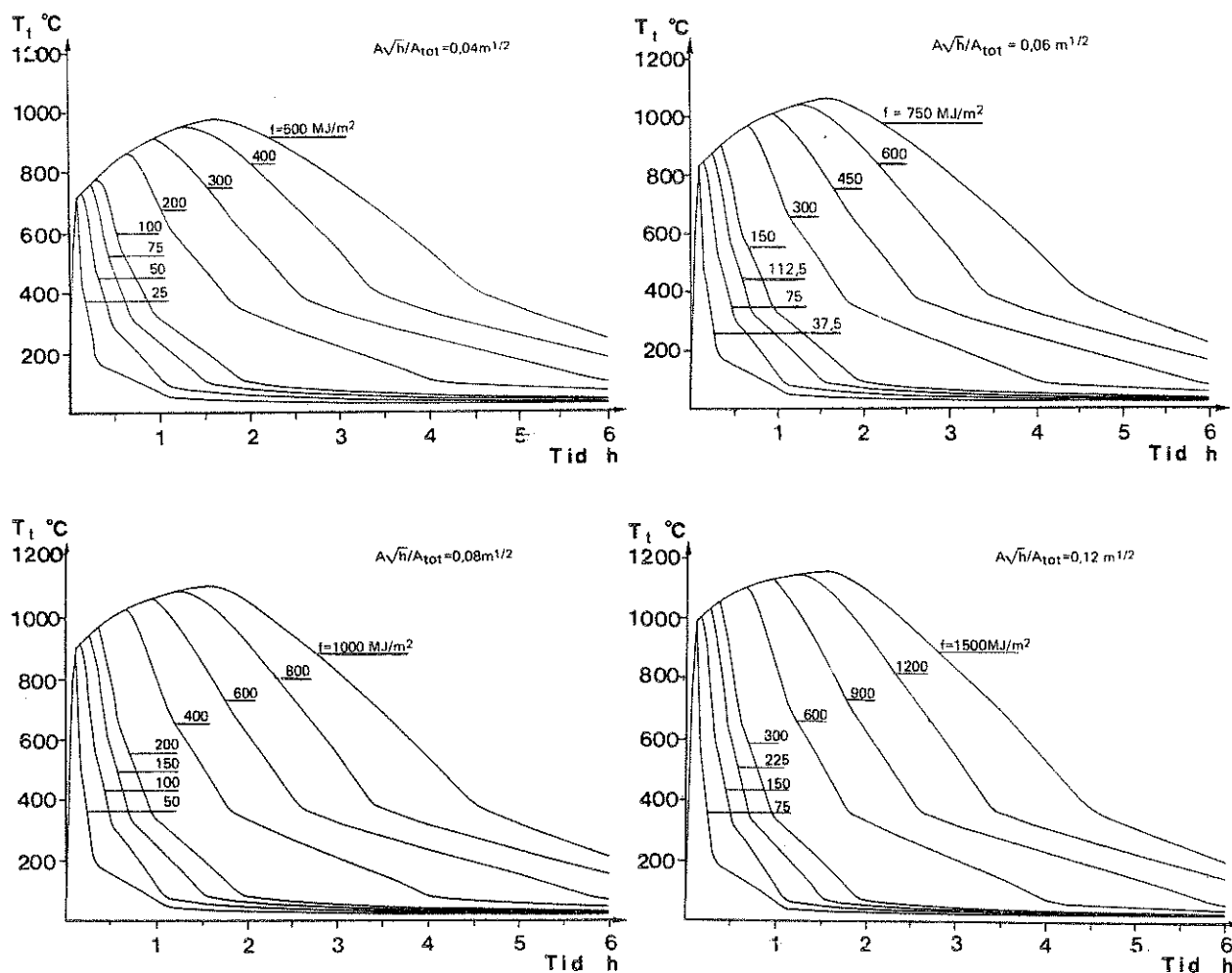
Vid en brand i stora lokaler kan en bärande konstruktion bli utsatt för en lokal påverkan, som är kraftigare än den, som beskrivs av gastemperatur-tidkurvan enligt figur 1.2. I första hand kan detta få aktualitet för bärverk eller bärverksdelar, som är placerade i hörn av lokalen eller som genom stor konstruktionshöjd bildar "skärmar" med mellanliggande utrymmen. Från reella bränder är det känt - t ex från diskoteksbranden vid Stardust Club i Dublin den 14 februari 1981 - att bärande och avskiljande konstruktioner i sådana sammanhang kan bli utsatta för mycket höga påverkansnivåer - i storleksordningen upp till  $250 \text{ kW/m}^2$ .

För närvarande finns ingen analytisk simuleringsmodell utvecklad, som på ett tillfredsställande sätt beskriver brandförloppet i brandceller med stor volym. Forskningsinsatser inom området har därför hög prioritet. Detta framhålls också i bl a det av styrelsen för svensk brandforskning (BRANDFORSK) antagna brandforskningsprogrammet för perioden 1982-1984, som innehåller ett projekt B.17 "Brandspridning och brandförlopp i stora lokaler", vars primära syfte är att sammanställa och utvärdera det brandfysikaliska kunskapsläget, identifiera behoven av forskning och föreslå lämpliga insatser. Brandfysikaliskt omfattar ett sådant programarbete två delar. Den första avser därvid brandens spridnings- och tillväxtprocess och är huvudsakligen av förbrännings-teknisk natur. Den andra är mer renodlat fluid-mekanisk och omfattar en bestämning av massflöden, temperatur- och hastighetsprofiler i brandplymer och gasflöden under tak.

Med dessa kommentarer kring de termiska påverkansmodellerna som bakgrund sammanfattas avslutningsvis den inledande översikten med några synpunkter på den praktiska relevansen av olika kombinationer av H- och S-modeller.



Som nämnts, bygger det internationellt förhärskande dimensioneringsförfarandet på en termisk påverkan enligt typ  $H_1$ . Normalt bestäms därvid bärverkets brandmotstånd  $t_{fr}$  genom ugnsprovning enligt ISO 834, men en analytisk beräkning av  $t_{fr}$  börjar nu att accepteras i allt fler länder som ett alternativ  $-1.6/-1.11/$ . ISO-standarden är begränsat tillämpbar för byggnadsdelar av typen balkar, pelare, väggar, bjälklag och takbärverk. Strängt taget begränsas därigenom det tillhörande dimensioneringsförfarandet till kombinationen  $H_1-S_1$ .



Figur 1.2 Exempel på gastemperatur-tid-kurvor för verkligt brandförlopp som funktion av brandbelastningen  $f$  och brandcellens öppningsfaktor  $A\sqrt{h}/A_{tot}$ . Enligt kommentarer till Svensk Byggnorm 1976:1, brandcellstyp A

I ett fåtal länder har förfarandets tillämpning dock utsträckts till kombinationen  $H_1-S_2$  med primär koppling till en analytisk bestämning av brandmötståndet. Kombinationen  $H_1-S_3$  innebär en alltför stor obalans i beskrivningen av termisk påverkan och bärverksstruktur för att vara praktiskt försvarbar.

En dimensionering baserad på en naturlig brandpåverkan - påverkanstyp  $H_3$  - kännetecknas generellt av en analytisk behandling. För en snabb praktisk tillämpning krävs tillgång till ett systematiserat dimensioneringsunderlag av t ex handboks-karaktär. Normalt blir därvid kombinationen  $H_3-S_2$  aktuell, i vissa fall kombinationen  $H_3-S_1$ . En dimensionering enligt kombinationen  $H_3-S_3$  kräver som regel tillgång till en dator för sin praktiska tillämpning. Kombinationen har en central roll i forsknings-sammanhang.

En dimensionering för en termisk påverkan enligt typ  $H_2$  utgår indirekt från verkligt brandförlopp, beskrivet genom temperatur-tid-kurvan enligt ISO 834, ekv (1.1), över begreppet ekvivalent brandvaraktighet  $t_e$ . Ett bärverks beteende, beräknat för en sådan påverkan, skiljer sig från beteendet i den verkliga brandsituationen i de fall, då upphettningshistorien har betydelse. I kombinationen  $H_2-S_1$  kan dimensioneringen utföras antingen analytiskt eller med utgångspunkt från resultat från en ugnsprovning enligt ISO 834. I kombinationen  $H_2-S_2$  är en analytisk dimensionering det normala och en experimentell verifiering utgör undantag. Kombinationen  $H_2-S_3$  är närmast en omväg till en dimensionering enligt kombinationen  $H_3-S_3$  och bör därför undvikas.

## 1.2 Internationellt konventionell dimensionering

Den internationellt konventionella metoden för en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande byggnadsdelar följer sammanfattat flödesschemat enligt figur 1.3.

Byggnadsdelens brandmotstånd  $t_{fr}$  bestäms genom den nordiskt standardiserade provningsmetoden NORDTEST FIRE 005, som är identisk med ISO 834. Byggnadsdelen utsätts därvid i en ugnsprovning för en termisk påverkan enligt ekv (1.1) - typ H<sub>1</sub> - inom föreskrivna toleranser. Uppvärmningen fortgår till dess att byggnadsdelen inte längre uppfyller ställda funktionskrav och den tid, vid vilken detta inträffar, definierar byggnadsdelens brandmotstånd  $t_{fr}$ .

För en bärande byggnadsdel innebär funktionskravet, att byggnadsdelen ej får kollapsa för  $t \leq t_{fr}$  vid aktuell last, vald enligt SBN 1980, kap 21:234. För en avskiljande byggnadsdel innebär funktionskravet, att byggnadsdelen skall kunna förhindra en spridning av branden till angränsande brandcell för  $t \leq t_{fr}$ . Funktionskravet innehåller provningstekniskt ett delkrav på täthet mot genomsläpp av eldslågor och heta gaser (integritetskravet) och ett delkrav på begränsning av temperaturökningen på den från branden vända sidan av byggnadsdelen (isoleringskravet).

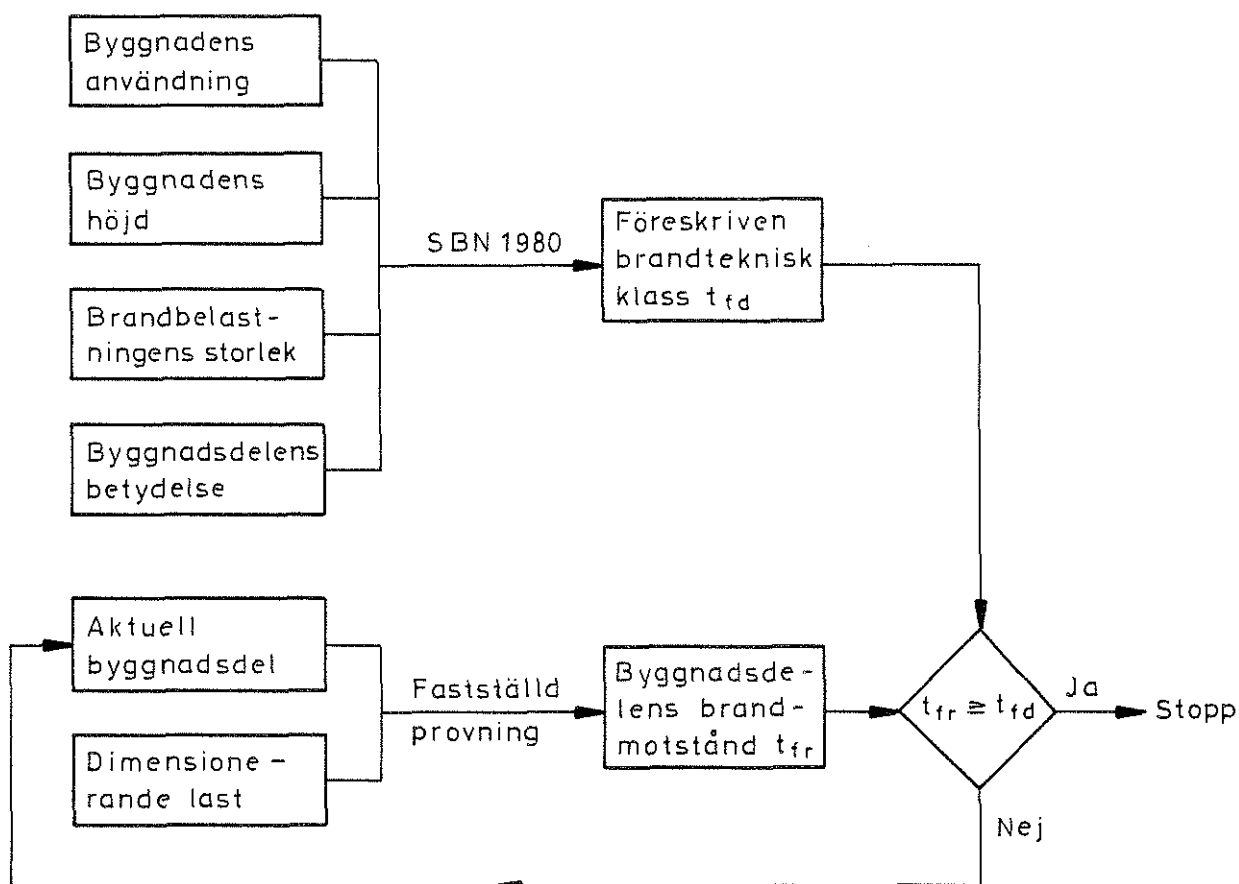
För en byggnadsdel, som samtidigt skall vara bärande och avskiljande, måste alla tre funktionskraven - bärighets-, integritets- och isoleringskraven - vara uppfyllda för  $t \leq t_{fr}$ . Vid dimensioneringen skall enligt figur 1.3 den aktuella byggnadsdelens brandmotstånd  $t_{fr}$  ställas mot den i SBN 1980 föreskrivna brandtekniska klassen  $t_{fd}$ . Dimensioneringskravet är därvid, att

$$t_{fr} > t_{fd} \quad (1.4)$$

För bärande byggnadsdelar anges den föreskrivna brandtekniska klassen i SBN 1980, kap 37:32. Kraven är därvid differentierade med hänsyn till

- \* typ av byggnad,
- \* brandbelastningens storlek,
- \* våningsantal och byggnadsdelens nivå i byggnaden,
- \* konsekvenserna av ett brott för byggnadsdelen.

För avskiljande byggnadsdelar anges analogt den föreskrivna brandtekniska klassen i SBN 1980, kap 37:422.



Figur 1.3 Internationellt konventionell dimensioneringsmetod för brandpåverkade byggnadsdelar

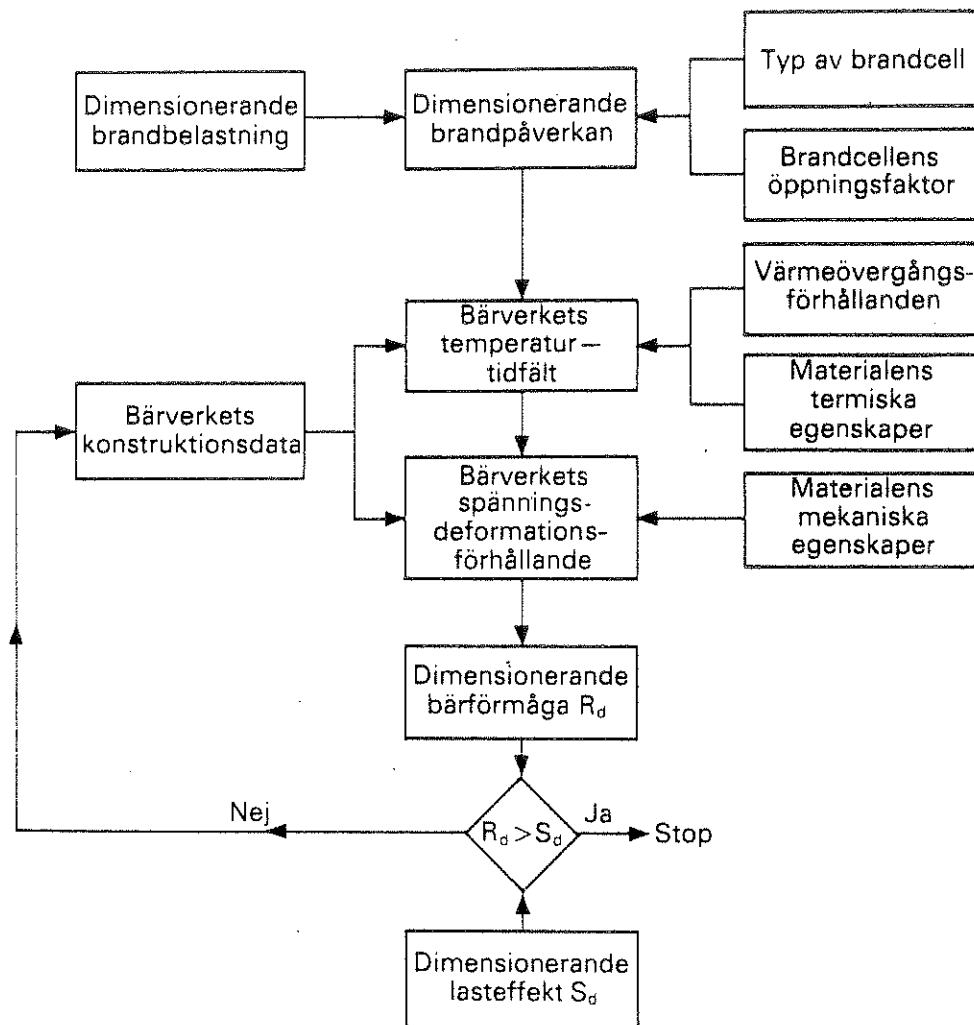
### 1.3 Analytisk dimensionering, baserad på verklig brandförloppspåverkan

Under de senaste årtiondena har stora framsteg gjorts inom området för en analytisk brandteknisk dimensionering av bärande konstruktioner. Målet är därvid att ta fram ett dimensioneringsförfarande, som bygger på det verkliga brandförloppets egenskaper - påverkan typ  $H_3$  - och som till sin struktur överensstämmer med den dimensioneringsteknik, som normalt tillämpas för bärande konstruktioners verkningssätt och bärförmåga vid ordinära temperaturförhållanden.

Figur 1.4 illustrerar beräkningsgången översiktligt. Vid dimensioneringen beräknas bärverkets minsta bärförmåga  $R_d$  under ett brandförlopp och denna jämförs med den dimensionerande lasteffekten  $S_d$  under branden.

Den dimensionerande termiska påverkan, som ett bärverk blir utsatt för vid en brand i en brandcell, bestäms dels av den dimensionerande brandbelastningen  $f$ , dels av brandcellens egenskaper. Avgörande inverkan från brandcellen är därvid dels öppningsfaktorn, som beror av fönster- och dörröppningarnas höjd och yta, dels de termiska egenskaperna för brandcellens omslutande konstruktioner, dvs typen av brandcell - jfr figur 1.2.

För ett bärverk med specificerade data ger den dimensionerande brandpåverkan tillsammans med uppgifter om bärverksmaterialets termiska egenskaper och värmeövergångsförhållandena för bärverkets fria ytor det underlag, som behövs för en bestämning av bärverkets temperaturfält som funktion av tiden. Via kunskap om bärverksmaterialets mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur kan detta temperaturfält beräkningsmässigt översättas till en beskrivning av det brandpåverkade bärverkets spännings-deformationsförhållande vid varierande temperatur- och lastnivå. Kopplat till ett brottkriterium, kan härur tidsvariationen av bärverkets bärförmåga beräknas.



Figur 1.4 Flödesschema för en analytisk brandteknisk dimensionering av bärande konstruktioner, baserad på verklig brandförloppspåverkan

Dess minsta värde under brandförloppet definierar den dimensionerande bärförmågan  $R_d$ , som skall jämföras med den dimensionerande lasteffekten  $S_d$  vid branden. Dimensioneringskravet är därvid, att

$$R_d \geq S_d \quad (1.5)$$

SBN 1980 tillåter generellt en analytisk brandteknisk dimensionering av bärande konstruktioner enligt det genom figur 1.4 beskrivna förfarandet som ett alternativ till den internationellt konventionella dimensioneringen enligt avsnitt 1.2. De detaljerade föreskrifterna för en sådan analytisk dimensionering

beskrivs därvid i Kommentar till SBN 1976:1 "Brandteknisk dimensionering". Tillhörande föreskrifter för brandbelastning, last och bärförmåga anges i SBN, kap 21:234 och 37:332 b.

Den praktiska tillämpningen av dimensioneringsmetoden underlättas genom av Statens planverk typgodkända handböcker /1.12/, /1.13/.

#### 1.4 Dimensionering, baserad på begreppet ekvivalent brand varaktighet

Som närmare utvecklats i avsnitt 1.3, tillåter Svensk Byggnorm en analytisk dimensionering av bärande och avskiljande byggnadskonstruktioner med utgångspunkt från karakteristika för verkligt brandförlopp som ett alternativ till det internationellt konventionella dimensioneringsförfarandet, baserat på resultat från brandtekniska provningar enligt ISO 834. I de ännu så länge sällsynta fall, då en motsvarande analytisk dimensionering accepterats i andra länder, har denna som regel kopplats till begreppet ekvivalent brandvaraktighet - termisk påverkan typ H<sub>2</sub>. Ekvivalensen definieras därvid ur kriteriet, att det verkliga brandförloppet och en termisk påverkan enligt ISO 834, ekv (1.1), för den aktuella konstruktionen skall ge samma utslagsgivande effekt med hänsyn till relevant gränstillstånd.

För en dimensionering över begreppet ekvivalent brandvaraktighet  $t_e$  gäller som generellt kravkriterium, att

$$t_{fr} > t_e \quad (1.6)$$

varvid  $t_{fr}$  är byggnadsdelens brandmotstånd, bestämt genom en brandteknisk provning enligt ISO 834 eller en motsvarande beräkning.

Kravkriteriet gäller för såväl bärande som avskiljande byggnadsdelar.

I en noggrann behandling beror den ekvivalenta brandvaraktigheten  $t_e$  av dels brandförloppets parametrar, dels byggnadsdelens konstruktiva detaljutformning /1.3/. För en mer approximativ behandling kan närmeformler av den typ, som exemplifieras genom ekvation (1.2) och som är oberoende av bärverksutformningen, användas. Tillgängliga sådana formler har verifierats som rimliga för stålbärverk och för armerade betongbalkar med böjbrott, inlett genom flytning i armeringen. För andra bärverkstyper och för avskiljande byggnadsdelar är begreppet ekvivalent brandvaraktighet för närvarande bristfälligt eller inte alls studerat.

#### 1.5 Brandteknisk bärverksdimensionering enligt sannolikhets-teoretiska metoder

Sedan några år pågår en utveckling av existerande dimensioneringsmetoder för brandpåverkade bärverk för anpassning till moderna säkerhetsteoretiska metoder av den typ, som nu börjat tillämpas vid en dimensionering av bärverk för ordinära temperaturförhållanden /1.14/-/1.20/.

För att en sådan utveckling skall vara meningsfull, måste dimensioneringsmetoden vara uppbyggd av funktionellt väldefinierade och verifierade, analytiska modeller, vars osäkerhet och tillförlitlighetsnivåer kan specificeras. Det internationellt konventionella dimensioneringsförfarandet, baserat på resultat från brandtekniska provningar enligt ISO 834 eller på motsvarande beräkningsresultat -  $H_1$ -metoder - uppfyller inte detta grundläggande krav. Däremot är de i avsnitten 1.3 och 1.4 beskrivna metoderna, direkt eller indirekt baserade på karakteristika för verkligt brandförlopp -  $H_3$ - respektive  $H_2$ -metoder - vidare utvecklingsbara i detta avseende.



För metoder, som skall användas i normal praktisk tillämpning, är därvid den naturliga ambitionsnivån att sikta till en utveckling av sådana sannolikhetsteoretiska metoder, vid vilka de statistiska inverkningarna beaktas genom att karakteristiska värden och partialsäkerhetsfaktorer specificeras för ingående storheter - laster, brandbelastning, geometriska storheter, termiska egenskaper, hållfasthetsegenskaper. För en härledning av värden för partialsäkerhetsfaktorerna fordras en probabilistisk analys, baserad på någon första ordningens metod - First Order Reliability Method (FORM).

I en sådan analys är dimensioneringskriteriet, att en specificerad minsta säkerhetsmarginal skall innehållas under brandpåverkan med hänsyn till minsta bärförmåga för en bärande konstruktion och med hänsyn till högsta temperatur på icke exponerad sida för en avskiljande konstruktion. Uttryckt i ett säkerhetsindex - definierat som kvoten mellan säkerhetsmarginalens medelvärde och standardavvikelse - får dimensioneringskriteriet formen

$$\beta_{fm} - \beta_r \geq 0 \quad (1.7)$$

varvid  $\beta_{fm}$  är säkerhetsindex' minsta värde under aktuellt brandförlopp och  $\beta_r$  är krävt värde för säkerhetsindex.

Exemplifierat för ett brandpåverkat träbärverk, dimensionerat enligt en  $H_3$ -metod (figur 1.4) kan en säkerhetsindex-analys översiktligt beskrivas enligt figur 1.5.

Med utgångspunkt från brandbelastningens storlek och egenskaper och från brandcellens geometri, ventilation och termiska karakteristika bestäms brandpåverkan - beskriven genom t ex tidkurvan för brandgastemperaturen T-t. I nästa steg beräknas för denna brandpåverkan bärverkets reducerade tvärsnitt och tillhörande transienta temperatur- och fuktillstånd med data för bärverkets utformning och för bärverksmaterialets termiska, fuktmekaniska och förbränningstekniska egenskaper som ingångsstorheter. Med

bärverksmaterialets hållfasthets- och deformationsegenskaper som ytterligare ingångsdata överförs därpå det transienta temperatur- och fuktillståndet till en tidsvariation för bärförmågan, uttryckt genom t ex böjmomentet  $M_R(t)$  i ett avgörande bärverkssnitt.

Den för brandsituationen statistiskt representativa lasten ger en maximal lasteffekt med ett tillhörande böjmoment  $M_S(t)$  i bärverkssnittet för  $M_R(t)$ . Därigenom definieras säkerhetsmarginalen

$$Z(t) = M_R(t) - M_S(t) \quad (1.8)$$

brotrrisken

$$P(t) = \int_{-\infty}^0 f_Z[Z(t)] dz \quad (1.9)$$

och säkerhetsindex

$$\beta_f(t) = \phi^{-1}[1 - P(t)] \quad (1.10)$$

varvid

$f_Z(Z(t))$  = fördelningsfunktionen för säkerhetsmarginalen  $Z(t)$   
 $\phi^{-1}$  = den standardiserade normalfördelningens invers.

Vid bestämning av  $Z(t)$ ,  $P(t)$  och  $\beta_f(t)$  måste därvid följande inverknings beaktas

- \* osäkerheten vid brandbelastningens specificering,
- \* osäkerheten vid beskrivningen av brandcellens ventilations-egenskaper och termiska karakteristika för brandcellens omslutande konstruktioner,

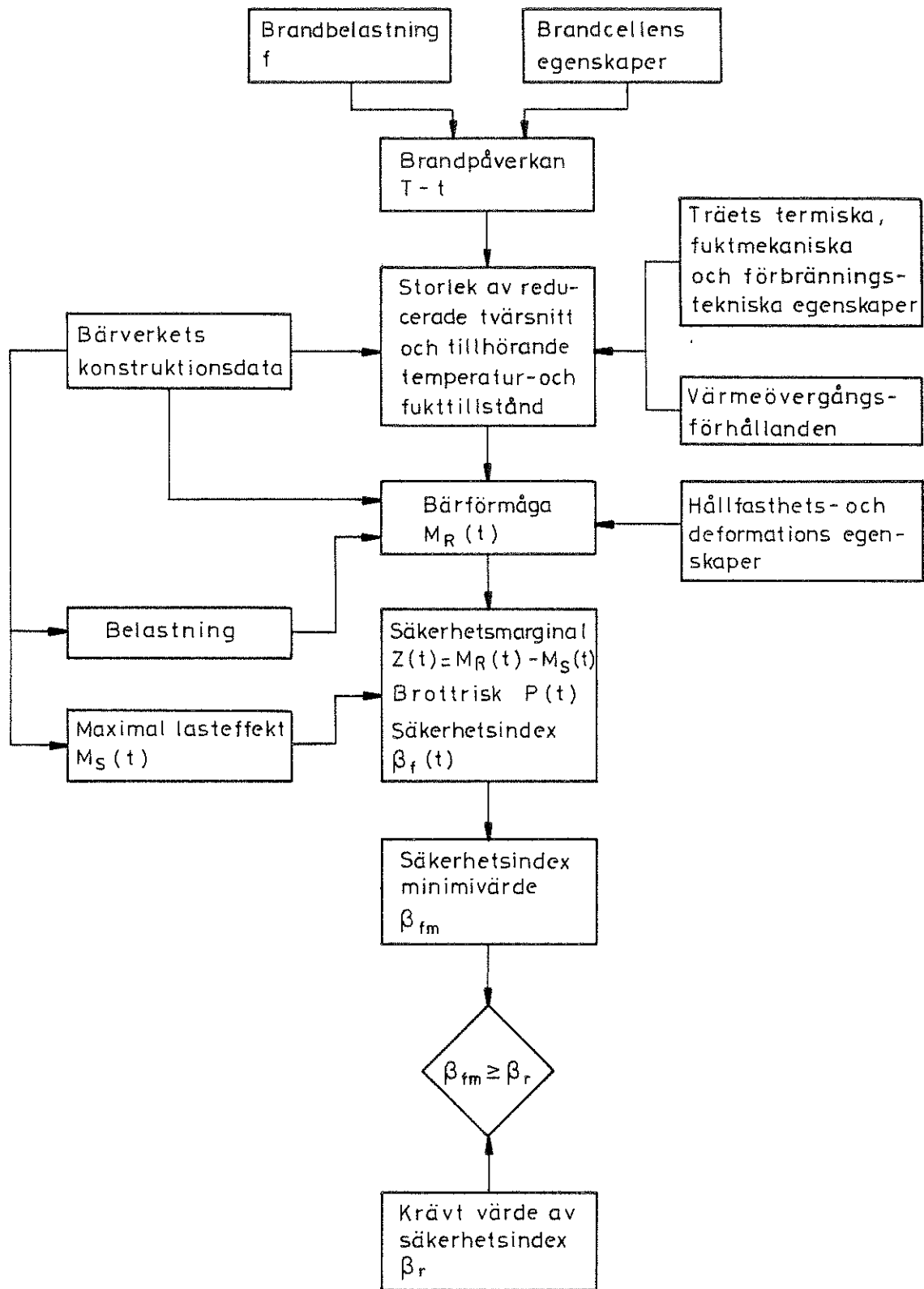
- \* osäkerheten i den analytiska modellen för en bestämning av brandförloppet och dess termiska påverkan på bärverket,
- \* osäkerheten vid specificeringen av bärverkets geometri och imperfektioner,
- \* osäkerheten vid specificeringen av bärverkets materialens termiska, fuktmekaniska, förbränningstekniska och mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur,
- \* osäkerheten i de analytiska modellerna för en bestämning av bärverkets transienta temperatur- och fukttillstånd samt bär-förmåga,
- \* osäkerheten vid lastens specificering,
- \* osäkerheten i modellen för en bestämning av lasteffekten på bärverket.

Det krävda värdet för säkerhetsindex  $\beta$  beror av konsekvenserna av ett brott i bärverket, sannolikheten för att ett övertänt brandförlopp skall uppkomma, brandkårens släckinsats och effekten av ett eventuellt automatiskt släcksystem.

För en dimensionering enligt någon  $H_2$ -metod kan ett på partialsäkerhetsfaktorer uppbyggt förfarande sammanfattas i dimensioneringskriteriet

$$\frac{t_f}{\gamma_f} \geq \gamma_n \gamma_e t_e \quad (1.11)$$

varvid  $t_f$  är bärverkets eller den avskiljande konstruktionens brandmotstånd, bestämt experimentellt enligt ISO 834 eller genom en motsvarande beräkning, och  $t_e$  är den ekvivalenta brandvaraktigheten, bestämdt ex ur ekv (1.2).  $\gamma_f$ ,  $\gamma_n$  och  $\gamma_e$  är partialsäkerhetsfaktorer, som tillsammans täcker dimensioneringsprocessens samtliga osäkerheter.



Figur 1.5 Härledning av partialsäkerhetsfaktorer för brandpåverkat träbärverk över en säkerhetsindex-analys

Naturligen tilldelas därvid partialsäkerhetsfaktorn  $\gamma_e$  osäkerheterna från specificeringen av brandbelastningens och brandcellens karakteristika och i den analytiska modellen för en bestämning av tillhörande brandpåverkan. Partialsäkerhetsfaktorn  $\gamma_f$  täcker osäkerheterna från specificeringen av lasten och bärverksmaterialets termiska, fuktmekaniska, förbrännings- tekniska och mekaniska egenskaper och i de analytiska modeller, som bestämmer lasteffekt, transient temperatur- och fuktförlopp samt bärförmåga för bärverket. Partialsäkerhetsfaktorn  $\gamma_n$  tar hänsyn till konsekvenserna av ett brott och till sannolikheten för ett övertänt brandförlopp och inverkan härpå från brandkårens släckinsats och ett eventuellt automatiskt släcksystem.

#### 1.6 Angelägna forskningsprojekt inom det övergripande området för bärande och avskiljande konstruktioner vid brand

Av beskrivningen ovan framgår

- \* att i successivt allt fler länder börjar nu en brandteknisk klassificering av byggnadsdelar att tillåtas, som bygger på en analytisk behandling i stället för på resultat av ugnsprovningar enligt ISO 834 - figur 1.3,
- \* att i Sverige sedan lång tid godtagits en analytisk brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande konstruktioner, baserad på verklig brandförloppspåverkan, som ett alternativ till det internationellt förhärskande dimensioneringsförfarandet med en standardiserad termisk påverkan enligt ISO 834 - figur 1.4 med brandpåverkan exemplifierad genom figur 1.2. Metoden börjar nu också vinna insteg i andra nordiska länder och behandlas i undervisningen vid flera utländska universitet .

- \* att en utveckling pågår internationellt av sådana på verkligt brandförlopp baserade, analytiska dimensioneringsmetoder för anpassning till modern säkerhetsfilosofi - figur 1.4 och 1.5 i kombination,
- \* att därvid utvecklingen i Sverige är relaterad till ett direkt dimensioneringsförfarande enligt flödesschemat i figur 1.4, medan i några icke-nordiska länder utvecklingen genomförs i anslutning till en indirekt dimensioneringsmetod, vid vilken verkligt brandförlopp och termisk påverkan enligt ISO 834 kopplas över begreppet ekvivalent brandvaraktighet.

En analytisk bestämning av bärande byggnadskonstruktioners verknings sätt och bärförmåga vid brand är idag praktiskt genomförbar - som regel med en relativt liten arbetsinsats - för flertalet typer av stålkonstruktioner. För bärande konstruktioner av armerad betong och spännbetong är det nuvarande dimensioneringsunderlaget påtagligt ofullständigt. Vid avdelningen för byggnadstekniskt brandskydd, LTH, pågår emellertid sedan några år ett forsknings- och utvecklingsarbete för framtagna av en handbok för analytisk dimensionering av brandpåverkade betongbärverk, som förutses bli färdigställd under 1983. I handboken ges ett systematiserat underlag dels för en bestämning av byggnadsdelars brandmotstånd vid termisk påverkan enligt ISO 834, dels för en analytisk bärverksdimensionering, baserad på verkligt brandförlopp och anpassad till moderna last- och säkerhetsnormer /1.21/. För en motsvarande anpassning, vad gäller den 1974 publicerade handboken för brandteknisk dimensionering av stålkonstruktioner /1.12/, har Stålbyggnadsinstitutet tilldelats forskningsmedel från BRANDFORSK. För de dimensioneringsberäkningar, som gäller för bärande och avskiljande konstruktioner i stora lokaler, hänvisas till de i avsnitt 1.1 givna kommentarerna.

För begreppet ekvivalent brandvaraktighet verifierar dagens kunskapsläge en praktisk tillämpning endast för stålbärverk och för armerade betongbalkar med viss brotttyp.

För brandpåverkade träbärverk kan idag brandmotstånd och bärförmåga beräknas överslagsmässigt för balkar och pelare av massivt tvärsnitt. För lätta och sammansatta träbärverk saknas även denna möjlighet. Sannolighetsteoretisk brandteknisk dimensionering och begreppet ekvivalent brandvaraktighet är forskningsområden, som för träbärverk är närmast obearbetade för närvarande.

Det är angeläget, att kunskapen om träkonstruktioners verkningssätt och dimensionering vid brand utvecklas till en likvärdig nivå som för stål- och betongkonstruktioner. Detta är en nödvändig förutsättning för att stål, betong och trä i framtiden skall kunna konkurrera på lika villkor som material i bärande och avskiljande byggnadskonstruktioner.

En utveckling mot ett sådant, kunskapsmässigt balanserat tillstånd kan till problemtyp uppdelas på följande övergripande forskningsprojekt:

(1) Utveckling av metod för en analytisk bestämning av träbyggnadsdelars brandmotstånd vid termisk påverkan enligt ISO 834,

(2) Utveckling av metoder för en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande träkonstruktioner med utgångspunkt från verkligt brandförlopp,

(3) Framtagning av underlag för en bestämning av ekvivalent brandvaraktighet för träbyggnadsdelar,

(4) En vidare utveckling av dimensioneringsmetoden enligt (2) för anpassning till moderna last- och säkerhetsnormer, baserade på ett sannolighetsteoretiskt angreppssätt.

Projekten (1) och (2) innehåller därvid i stort närliggande delforskningsprojekt och bör därför bearbetas parallellt. Projektet (3) bygger på resultaten av projekten (1) och (2). Projektet (4) förutsätter som bas en dimensioneringsmetod, som är uppbyggd av funktionellt väldefinierade och verifierade analy-

tiska modeller av den typ, som gäller för projektet (2).

I en internationell bedömning har samtliga fyra forskningsprojekt hög angelägenhet. Nationellt har projektet (3) lägre prioritet än de övriga som en följd av den brandtekniska dimensioneringsfilosofi, som valts i Svensk Byggnorm.

De övergripande forskningsprojekten (1), (2) och (3) innehåller i sig ett antal delprojekt med väldefinierade områden. Dessa är - i den ordning, som de möts i en dimensioneringsprocess enligt figur 1.4:

- \* Utveckling av analytisk modell för beräkning av kolskiktets tillväxt vid varierande termisk påverkan och framtagning av materialdata för en sådan modell,
- \* utveckling av analytisk modell för beräkning av transienta temperatur- och fuktillstånd för icke förkolnad tvärsnittsdel och framtagning av materialdata med hänsyn till värme- och fukttransport för en sådan modell,
- \* utveckling av analytisk materialmodell för träets spänningsdeformationsbeteende vid transient temperatur- och fuktillstånd och framtagning av materialdata för en sådan modell,
- \* analys av fysikaliska och kemiska mekanismer för flamskyddsmedels verkan och av möjligheterna för optimal samverkan mellan olika mekanismer,
- \* utveckling av analytisk modell för beräkning av verknings sätt och bärförmåga vid brand för massiva, lätta och sammansatta träbärverk med ovan beskrivna modeller för kolskiktstillväxt, värme- och fukttransport samt träets mekaniska beteende som ingående komponenter,



\* utveckling av analytiska modeller för skarvars och förbands termiska och mekaniska verkningsätt vid brand.

Flertalet av dessa projekt kan behandlas som fristående forskningsuppgifter. Om så sker, är det viktigt, att de enskilda uppgifterna planeras med utgångspunkt från att de i den praktiska tillämpningen skall vara integrerade komponenter i en total dimensioneringsprocess. I samtliga projekt ingår en experimentell verifiering i modell- eller fullskala som en nödvändig och självklar del. Angeläget är därvid, att möjligheterna ingående prövas för att utnyttja publicerade experimentella resultat för en sådan verifiering.

I det övergripande forskningsprojektet (4) ingår som specifikt för träkonstruktioner i en process för härledning av partialsäkerhetsfaktorer en analys av

\* osäkerheterna i de analytiska modellerna för beräkning av kolskiktstillväxt, värme- och fukttransport samt mekaniskt verkningsätt och bärförmåga,

\* osäkerheten i specificeringen av de förbränningstekniska, termiska, fuktmechaniska och spänningsmekaniska materialegenskaperna,

\* den inbördes betydelsen av de olika dimensioneringskomponenternas osäkerheter för att därigenom få en anvisning om inom vilka delar av dimensioneringsprocessen, som forskningsinsatserna bör koncentreras.

De övergripande forskningsprojektens delforskningsuppgifter beskrivs mer ingående i följande avsnitt.

## REFERENSER

- /1.1/ WITTEVEEN, J, "A Systematic Approach Towards Improved Methods of Structural Fire Engineering Design". ISO/TC92/SC2/WG2 Document N37, 1982
- /1.2/ ISO 834 "Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction". Genève 1975-11-01
- /1.3/ PETERSSON, O, "The Connection between a. Real Fire Exposure and the Heating Conditions according to Standard Fire Resistance Tests". European Convention for Constructional Steelwork, Chapter II, CECM-III-74-2E
- /1.4/ HARMATHY, T Z, "The Fire Resistance Test and its Relation to Real-World Fires". Fire and Materials, Vol. 5, No.3, 1981
- /1.5/ MEHAFFEY, J R, HARMATHY, T Z, "Assessment of Fire Resistance Requirements". Fire Technology, Vol. 17, No. 4, 1980
- /1.6/ BARTHÉLÉMY, B, KRUPPA, J, "Resistance au Feu des Structures - Béton, Acier, Bois". Édition Eyrolles, Paris, 1979
- /1.7/ CSTB, "Méthode de Prevision par le Calcul du Comportement au Feu des Structures en Béton". Document Technique Unifié, Paris, 1980
- /1.8/ TWILT, L, WITTEVEEN, J, "Brandveiligheid Staalconstructies". Staalcentrum Nederland, 1980
- /1.9/ ACI, "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements". Concrete International, February 1981

- /1.10/ ECCS, "European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures - Level 1: Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire". Elsevier, 1982
  
- /1.11/ CEB, "Design of Concrete Structures for Fire Resistance". Appendix to the CEB Model Code, Bulletin d'Information No 145, Paris, 1982
  
- /1.12/ MAGNUSSON, S E, PETTERSSON, O, THOR, J, "Brandteknisk dimensionering av stålkonstruktioner". Handbok, Stålbbyggnadsinstitutet, Stockholm 1974 (engelsk upplaga 1976)
  
- /1.13/ PETTERSSON, O, ÖDEEN, K, "Brandteknisk dimensionering - principer, underlag, exempel". Liber förlag, Stockholm 1978
  
- /1.14/ MAGNUSSON, S E, PETTERSSON, O, "Functional Approaches - An Outline". CIB Symposium on Fire Safety in Buildings: Needs and Criteria, held in Amsterdam 1977-06-02/03, Publication 48, CIB Proceedings, 1978
  
- /1.15/ DIN 18230, "Baulicher Brandschutz im Industriebau". Vornorm, Teil 1 und 2, Berlin 1982
  
- /1.16/ MAGNUSSON, S E, PETTERSSON, O, "Rational Design Methodology for Fire Exposed Load Bearing Structures". Fire Safety Journal, Vol. 3, No. 4, March 1981
  
- /1.17/ PETTERSSON, O, "Reliability Based Design of Fire Exposed Concrete Structures". Contemporary European Concrete Research, Stockholm, June 9-11, 1981

- /1.18/ CIB W14, "A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design Guide on Structural Fire Safety". CIB W14 Workshop "Structural Fire Safety", to be published in Fire Safety Journal
- /1.19/ BROZZETTI, J, LAW, M, PEITERSSON, O, WITTEVEEN, J, "Safety Concept and Design for Fire Resistance of Steel Structures". IABSE Surveys S-22/83, Zürich, February 1983
- /1.20/ PEITERSSON, O, JÖNSSON, R, "Fire Design of Wooden Structures". International Seminar "Three Decades of Structural Fire Safety", held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts, UK, 22/23 February 1983, pp 229-246
- /1.21/ ANDERBERG, Y, PEITERSSON, O, THELANDERSSON, S, WICKSTRÖM, U, "Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner". Handbok, under framtagning



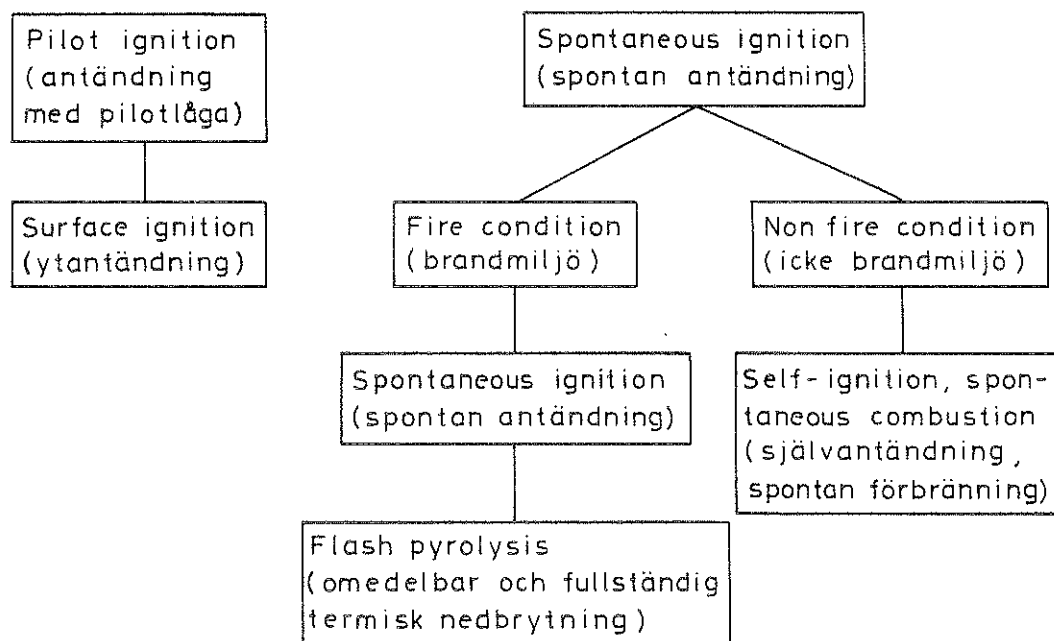
## 2.1 Inledning

Att förutsäga om antändning kommer att ske eller inte för olika yttre termiska påverkningar är ett mycket komplext problem. En mängd faktorer inverkar på de förlopp, som leder till antändning, och att finna entydiga antändningskriterier, som är giltiga för alla fall, är omöjligt. Definitionen av antändning varierar dessutom mellan olika undersökningar, vilket gör det svårt att jämföra experimentella data. NBS definierar antändningstemperaturen som den lägsta temperatur, från vilken under gynnsamma förhållanden ett material värms upp spontant, tills glöd eller flamma uppstår. Enligt Graf /2.1/ definieras antändning "when the rate of heating in the substrate exceeds the rate of external heating and has visible flaming or glowing as a result". Ytterligare definitioner förekommer.

Det viktigaste målet med studier av antändning är att utveckla verifierade teorier och metoder för att kunna avgöra, om antändning kommer att ske för en specifik påverkan och om efter en antändning materialet kommer att fortsätta att brinna (sustained flaming). Utförda experiment har syftat till att fastställa tiden till antändning för material, som utsatts för en extern termisk påverkan. Man har därvid undersökt olika faktorerers inverkan på antändningstiden och också försökt bestämma en specifik antändningstemperatur. Teorier för antändningen har presenterats, men problemets höga svårighetsgrad har lett till komplicerade resultat med många osäkra faktorer. Den främsta orsaken till detta är, att trä vid termisk påverkan ständigt förändras. Teorierna har visat sig vara mest användbara, när man studerat flamspridning, som uppbyggd av en serie successiva antändningar. De antändningstemperaturer, som man funnit för trämaterial är tillämpbara i t ex klassificeringssyften. De är däremot ej användbara för att med precision förutse ett materials uppträdande i en verklig brandsituation.

## 2.2 Olika typer av antändning

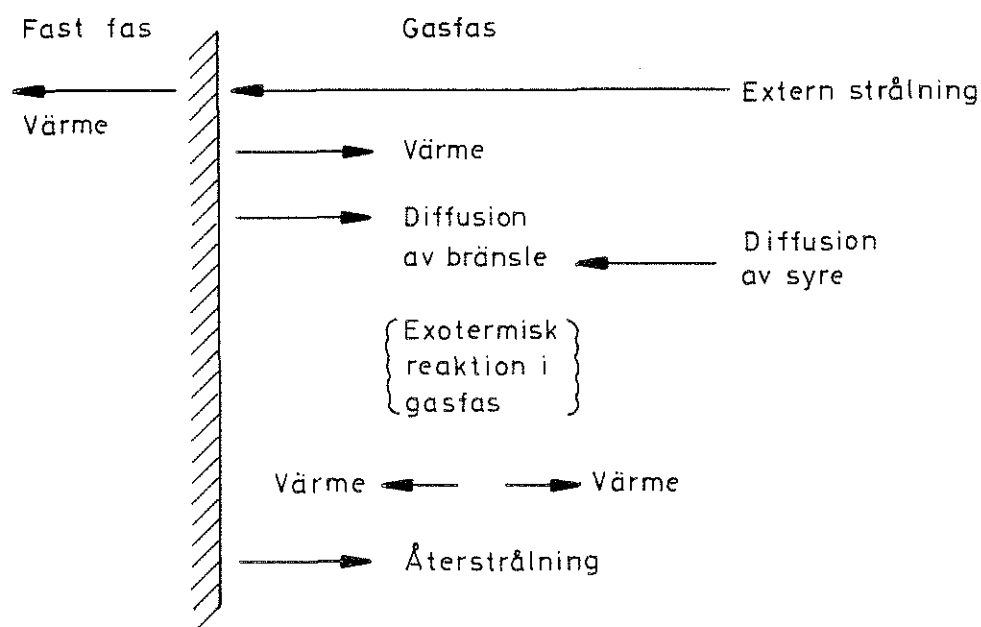
Vid bestämning av antändningskriterier kan man särskilja två typer av antändning, en med och en utan pilotlåga. I fallet med pilotlåga placeras en liten flamma omedelbart framför och ovanför det provade materialet. Antändning sker, då en brännbar gasblandning av pyrolysisprodukter och luft når flaman. En variant är, när flaman står i direktkontakt med ytan. Då benämns fenomenet ytantändning. Dessa typer av antändning återspeglar bäst de förhållanden, som råder i en utvecklad brand. Antändning utan pilotlåga kallas spontan antändning och sker, då gasblandningen i sig själv har tillräcklig temperatur för att kunna antändas. Den spontana antändningen kan ytterligare indelas i två fall beroende på exponeringstiden. De olika typerna av antändning visas i figur 2.1 med deras engelska termer medtagna. Spontan antändning är viktigast, då man studerar brandspridning mellan föremål. Både antändning med och utan pilotlåga uppträder på liknande sätt.



Figur 2.1 Olika typer av antändning

### 2.3 Faktorer, som påverkar antändningen

I figur 2.2 illustreras schematiskt olika händelser i en antändningsprocess för en solid kropp utsatt för en ensidig extern strålningspåverkan. Den del av strålningen, som absorberas, värmer upp träet närmast ytan. Denna uppvärmning förorsakar termisk nedbrytning av träet och emission av brännbara gaser. Mängden energi, som absorberas, beror av strålningsnivå och av träets förmåga att vara genomträngligt för strålning, dvs träets diatermiska egenskaper. Denna förmåga bestäms av strålningens spektrala fördelning, ytans reflektans samt träets våglängdsberoende absorption. Om den effektiva absorptionskoefficienten är stor, kommer det mesta av den externa strålningsenergin att absorberas i ett tunt lager vid ytan. Temperaturen kommer då snabbt upp till nivåer, som krävs för termisk nedbrytning och för emission av brännbara gaser. Träets egenskaper och strålningens spektrala fördelning kommer därför att påverka tiden till antändning och den krävda minsta strålningsnivån för antändning.



Figur 2.2 Antändningsscenario för fast bränsle vid extern strålningspåverkan /2.2/



När träet bryts ner, emitteras gaser från ytan och genom diffusion och konvektion blandar de sig med luftens syre. Exotermiska reaktioner kommer till stånd. Samtidigt kommer gaserna närmast ytan att värmas upp genom konvektion från den varma träytan och genom absorption av den externa strålningsenergin.

Gaserna kan då nå en högre temperatur än yttemperaturen. Allteftersom dessa processer fortgår, ökar mängden exotermiska reaktioner och därmed den kemiska värmeproduktionen. Detta leder till ökad termisk nedbrytning av träet och ökad emission av gaser, vilket i sin tur påskyndar reaktionshastigheten och slutligen leder dessa processer till antändning.

De parametrar, som normalt studeras i antändningstester, är antändningstiden, yttemperatur, temperaturfördelningen i materialet, viktminskningen, absorption av strålningsenergi, fuktkvot och konvektiva effekter. Dessa parametrar beror dels av materialegenskaperna, dels av vald provnings- och mätteknik. Väsentliga faktorer, som avgör antändning, är

- (1) värmekällan,
- (2) strömningsförhållanden,
- (3) ytstruktur och absorption,
- (4) provkroppsstorlek,
- (5) tändlågan,
- (6) materialets densitet och termiska egenskaper,
- (7) materialets initiella fuktkvot,
- (8) materialets termiska sönderdelning.

De olika faktorerna kommenteras vidare i det följande.

- (1) Den viktigaste värmetransportformen i en utvecklad brand utgör strålningen och den har därför också varit den vanligaste värmekällan vid antändningsförsök. Antändning genom konvektivt värme och värmeledning från värmeplattor har också studerats /2.3/. Den senare typen är intressant, då man studerar skarvar och förband. Inverkan av konvektiv

uppvärmning är betydelsefull för antändning också för t ex trä i takkonstruktioner.

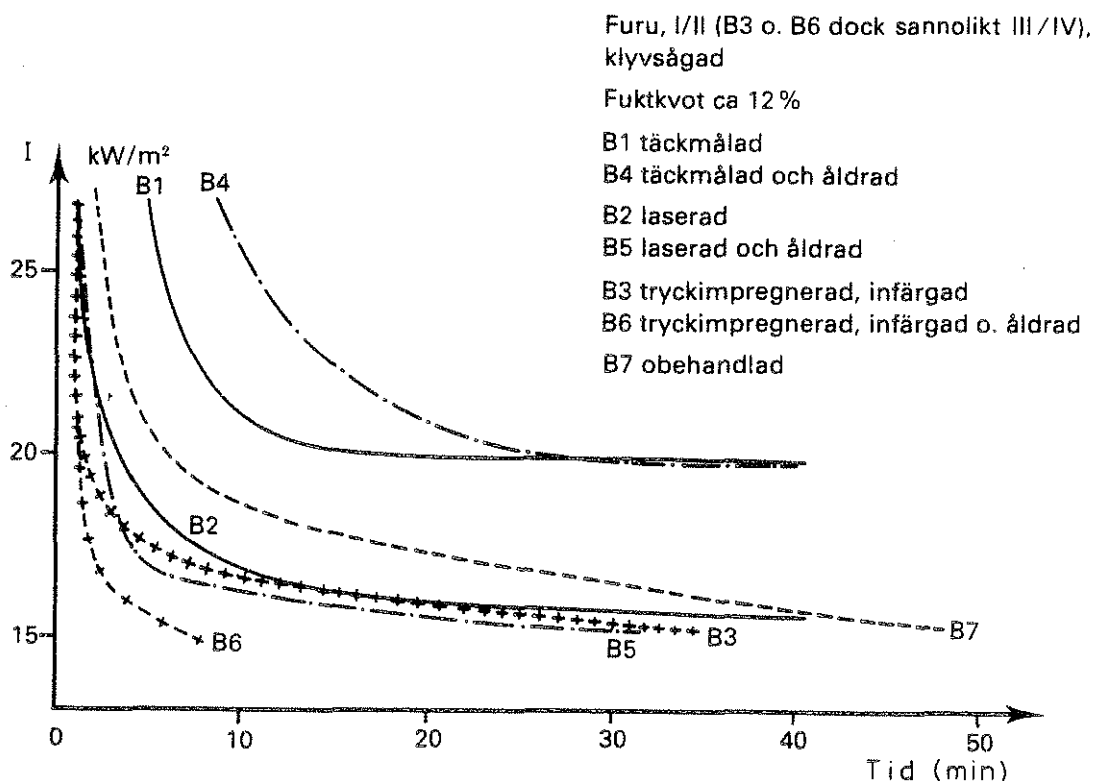
Exempel på strålningspaneler, som använts, är gaseldad strålarare, elektrisk strålningspanel, ljusbåglampa, tungstenstrådlampa och flammor från vätskebrännare. En gaseldad strålarare har en yttemperatur av ca 1000 K och en strålningsnivå  $< 50 \text{ kW/m}^2$ . Ljusbåglampa har använts för att simulera strålning från kärnvapenexplosioner och har en strålningsnivå  $< 4200 \text{ kW/m}^2$ . För att exponera större provkroppar används tungstenstrådlampa med en yttemperatur på ca 2500 K. (En jämförelse mellan dessa strålningspaneler finns redovisad i Simms /2.4, 2.5/). Flammor från vätskebrännare har använts för strålningsnivåer  $< 130 \text{ kW/m}^2$  /2.6/.

De olika strålningspanelerna ger vid samma strålningsnivå olika antändningstider. Det förklaras delvis av att den utsända energins spektrala fördelning är olika och därför absorberas olika mycket energi av det bestrålade materialet. Vidare ger vissa strålningspaneler störningar av strömningsförhållandena vid materialytan. En annan viktig faktor är, att återstrålningen från materialet mot strålningspanel och omgivning varierar mellan olika försöksupställningar.

- (2) En förutsättning för antändning är, att de brännbara gaserna, som lämnar materialet, måste blanda sig med luften så att en antändningsbar gas bildas. Detta kan ske antingen genom turbulent blandning eller vid laminära förhållanden genom diffusion. Antändning inträffar därvid, då gasblandningen har rätt koncentration och temperatur. Antändningen kan ske med hjälp av en flamma (pilotantändning) eller genom gasblandningen själv (spontan antändning). För att gasströmmen skall hinna bli turbulent krävs en minsta provkroppshöjd och för strålningsintensiteter under ett visst värde är antändningstiden beroende av provkroppshöjden upp till en kritisk höjd. För

högre provkroppar påverkas antändningstiden av fri konvektion. (Dessa förhållanden finns redovisade i Alvares et al /2.7/.) Vid låga intensiteter ger måttliga artificiella drag en minskning av antändningstiden. Detta är inte giltigt vid höga strålningsintensiteter. Det finns också indikationer på att ett kraftigt drag höjer antändningstemperaturen, oberoende av strålningsintensiteten /2.1/. Vidare gäller, att antändningstiden minskar om syrekoncentrationen ökar. Eftersom det alltid krävs en minsta strålningsintensitet för att uppnå antändning kan denna miniminivå komma att påverkas av ett eventuellt drag /2.3/.

- (3) I Strömdahl /2.8/ redovisas en experimentell undersökning, som innehåller ett studium av inverkan av olika ytbehandlingar. Exempel på resultat återges i figur 2.3.



Figur 2.3 Sambandet mellan antändningstiden  $t_{ant}$  och nivån för en konstant strålningsintensitet  $P$  vid närvaro av pilotflamma vid variationer i skyddsbehandling och åldring /2.8/

Undersökningen visar bl a, att hyvlat virke har lägre antändningstid än sågat och att en ökad kådhalt leder till kortare antändningstid.

Trä är i viss grad diatermt (genomträngligt för värme-strålning) och ett diatermt material antänds vid lägre yttemperatur än ett icke diatermt. Denna diaterma effekt minskar och blir försumbar, då träets termiska nedbrytning börjar /2.5/. Undersökningar visar, att absorptionstalet (förhållandet mellan den intensitet, som erfordras för antändning av sotad yta, och den, som erfordras för antändning av osotad vid en och samma antändningstid) växer med exponeringstiden och så småningom når ett konstant värde.

- (4) Mindre ytor ( $< 10 \text{ cm}^2$ ) kräver en högre minsta strålningsintensitet än större ytor för att antändas /2.3/ och oftast glöder därvid den mindre ytan, medan den större ger en flamma som resultat. Storleken av ytan påverkar också de strömningsförhållanden, som beskrivits under (2). Förhållandet antyder svårigheter att direkt översätta småskaleresultat till fullskala. Enstaka arbeten anger, att för strålningsnivåer  $> 130 \text{ kW/m}^2$  bör man reducera antändningstiden från småskala genom multiplikation med en faktor 0.8 för att få god överensstämmelse med fullskala. Strålning med så höga nivåer har primärt intresse i t ex civilförsvsarssammanhang.

Trä anses vara termiskt tjockt - dvs en termisk påverkan mot en skivas ena yta ger försumbar inverkan vid den icke exponerade ytan - för tjocklekar över 10-20 mm beroende på strålningsnivån. För tjocklekar över dessa värden påverkas inte antändningstiden av tjockleksvariationer. Vid mindre tjocklek minskar antändningstiden med tjockleken /2.4, 2.9/.

- (5) För att tändlågans utformning ej skall påverka antändningstiden, måste tändlågan placeras så att den ger försumbart energitillskott till materialet. Den skall vidare ha en sådan storlek, att den täcker en ojämn blandning av pyrolysisprodukter och luft. Detta leder till att tändlågan bör vara placerad omedelbart framför och ovan provkroppens övre, främre kant.
- (6) Under en kort tid i början av den termiska exponeringen är träets diatermiska egenskaper viktiga för den mängd energi, som tillförs träet. Därefter försvinner denna effekt på grund av den termiska sönderdelningen av träet och värmeledningen blir den dominerande transporttermen /2.10/. Högre densitet och högre värmeledningstal ger längre antändningstid /2.11, 2.12/.
- (7) Antändningstid och minimistrålningsintensitet för antändning ökar med fuktkvoten. Vid antändning med tändlåga har dock fuktkvoter < 20% ringa inverkan på antändningstiden och för fuktkvoter < 40% har fuktkvotsvariationer liten inverkan på krävd minimistrålningsintensitet. Inverkan av fukt är betydligt större vid spontan antändning. Med ökat fukttinnehåll växer antändningstiden genom att värmeledningstalet ökar, genom att värme transporteras genom diffusion av vatten och genom vattnets förångning /2.12/.
- (8) När trä upphettas, sker en rad olika kemiska reaktioner, som bryter ner träet till enklare komponenter. Beroende på vilken temperaturfördelning som råder, sker olika reaktioner och detta påverkar typen av pyrolysisprodukter, som lämnar materialytan. Därmed påverkas också det blandningsförhållande mellan luft och brännbara gaser, som krävs för antändning. Träet indelas därför i olika karakteristiska zoner beroende på rådande temperatur. Detaljerad beskrivning av dessa ges i kapitel 4.

## 2.4 Matematiska modeller

Existerande matematiska modeller för antändning är utvecklade under förutsättning av att de skall vara lätta att behandla. Detta har medfört, att de i modellerna ingående variablerna är få. De varierar mellan olika författare till följd av en splittrad uppfattning om vilka faktorer, som är av störst betydelse och vilka som kan försummas. Vidare är modellerna oftast utvecklade i samband med en experimentell serie och, detta inverkar också på valet av variabler.

De olika modellerna borde sammantagna på sikt leda fram till en modell, som beskriver förloppet från det att en extern termisk påverkan startar, tills antändning sker. Idealet vore, att modellen kunde hantera en godtyckligt vald värmekälla samt också ta hänsyn till varje förändring, som sker i materialet under tiden till antändning. Den ofullständiga kunskapen för närvarande, då det gäller att identifiera de reaktioner, som inträffar i materialet, kommer sannolikt att kraftigt försvåra formuleringen av en sådan "komplett" modell.

Forskningen är idag inriktad mot att studera enstaka variabler och finna avgörande nivåer för dessa i en mer fullständig matematisk modell.

Vid studier av spontan antändning i brandmiljö är kunskapen om värmebalansen i materialet viktig. Tyvärr är stora delar av denna kunskap dåligt dokumenterad och därigenom ofullständigt utvärderad. Simms /2.10/ nämner följande variabler, som bör ingå i studier av värmebalansen för antändning av torrt trä:

- (1) Den externa värmekällan, vanligtvis strålning som absorberas i ytlagret, om materialet är opakt, eller inuti materialet, om materialet är diatermt,

- (2) värmeledning vinkelrätt mot ytan,
- (3) värmekapaciteten,
- (4) konvektiv värmetransport i materialet genom gastransport,
- (5) uppvärmning från den termiska nedbrytningen,
- (6) ytans avkylning.

Att man begränsat sig till torrt trä beror på de ytterligare svårigheter, som en behandling av de fuktbetingade effekterna innebär. Denna förenkling är fullt acceptabel, då man studerar det "farligaste" fallet /2.12/.

Vid lösning av värmebalansen försummar Simms de diatermiska egenskaperna och värmetillskottet från de kemiska reaktionerna. Eftersom en mängd värmetransportvariabler ingår och det dessutom är svårt att avgöra vilka, som är dominerande, görs en hel rad förenklingar.

Då man på detta sätt erhållit en modell för värmebalansen, skall denna kopplas till ett antändningskriterium. Vanligtvis väljer man då en specifik temperatur eller en lägsta emission av pyrolysisprodukter eller en kritisk koncentration av brännbara gaser och luft /2.3/. Det finns ytterligare förslag på antändningskriterier och även olika förslag till formler för att utifrån en given påverkan bestämma tiden till antändning. Lawson och Simms /2.13/ presenterar en formel för en kvalitativ bedömning av tiden till antändning.

Jentzsch /2.14/ menar att spontan antändning sker, om följande tre tillstånd inträffar samtidigt:

- (1) En minsta temperatur,
- (2) tillräcklig produktion av pyrolysisprodukter,
- (3) tillräcklig syrekoncentration vid denna temperatur för att en brännbar gasblandning skall kunna bildas.

Vid närvaro av pilotlåga ersätter denna tillståndet (1).

Antändning med pilotlåga skiljer sig från den spontana antändningen endast i fråga om antändningskriterierna. Pilotlågan antänder pyrolysisprodukterna tidigare och har annars ingen påverkan. Då pilotlågan är i kontakt med ytan (ytantändning) sker antändningen vid ytterligare lägre strålningsnivåer på grund av pilotlågas påverkan på materialet.

Vid olika gaskoncentrationer har man funnit att en temperatur för gasblandningen på  $350^{\circ}\text{C}$  väl svarar mot antändning vid närvaro av pilotlåga /2.15, 2.16/.

Vid studier av antändning med pilotlåga kan man använda sig av en teori som utvecklats för att beskriva släckning av vätskebränder genom kylning. Teorin definierar en kritisk yttemperatur, "Fire Point", som är tillräcklig för att antända materialet, och leda till en bestående flamma efter det att antändningskällan avlägsnats. Denna temperatur är högre än en vätskas flampunkt.

Tidigare arbeten har visat att när man släcker vätskebränder med vatten genom kylning ner till "Fire Point" är detta en omvänd process till antändning med pilotlåga /2.17/. Rasbash /2.18/ har vidareutvecklat teorin så att den är användbar för solida material och man kan då lättare studera de förhållanden under vilka ett material antänds. Förutom en kritisk yttemperatur måste därvid också följande tre tillstånd råda för att antändning skall ske:

- (1) Tillräcklig konvektiv värmetransport från flaman mot ytan,
- (2) tillräcklig produktion av pyrolysisprodukter,
- (3) tillräcklig flamtemperatur.

Ytterligare antändningskriterier existerar.

Användningen av en kritisk minsta strålningsintensitet har liten relevans i en brandmiljö, där oftast ytantändning dominerar. Tyvärr har studierna av antändning koncentrerats på spontan antändning med få studier av andra antändningsformer.



## 2.5 Slutsatser

En stor mängd experimentella undersökningar har rapporterats, i vilka flertalet av inverkanse faktorer på träets antändning har studerats. En jämförande analys av erhållna data försvåras bl a genom att olika provningsteknik tillämpats vid undersökningarna och genom att olika definitioner av antändning använts.

Matematiska modeller finns utvecklade, ur vilka antändningstiden kan beräknas som funktion av en i tiden konstant strålningsnivå. I verkliga brandsituationer varierar materialets exponering med tiden och en pilotflamma kan nå den exponerade ytan vid olika tidpunkter av ett upphettningförlopp. Det är därför svårt att med hjälp av beräkningsresultat från dessa modeller direkt förutsäga antändningstiden vid verkliga brandförhållanden. Ett matematiskt verktyg för översättning av tidsberoende termiska förhållanden till tidsberoende utgör Duhamels teorem. En tillämpning härav i detta sammanhang förutsätter dels att antändningen styrs genom yttemperaturen, dels att samtliga för beräkningen erforderliga termiska data är kända.

Som ett angeläget forskningsprojekt framstår mot denna bakgrund en utveckling av förenklade modeller, som kan översätta ett kurvsamband mellan strålning och antändningstid, bestämt experimentellt eller analytiskt för konstanta strålningsnivåer, till ett antändningskriterium för en tidsvarierande brandmiljö. En ansats till en sådan modell presenteras i /2.19/.

### REFERENSER

- /2.1/ GRAF, S H, "Ignition Temperatures of Various Papers, Woods and Fabrics". Oregon State College, Engineering Experiment Station, Bulletin No. 26, 1949, p 69

- /2.2/ KASHIWAGI, T, "Radiative Ignition Mechanism of Solid Fuels". Fire Safety Journal, 3(1981), pp 185-200
- /2.3/ FANG, J B, "Ignition Properties of Cellulose Materials". A survey of the literature in wood, fire behaviour and fire retardant treatment. Canadian Wood Council, 1966, p 25
- /2.4/ SIMMS, D L, "Ignition of Cellulosic Materials by Radiation". Combustion and Flame 4(4), 1960, pp 293-300
- /2.5/ SIMMS, D L, "Experiments on the Ignition of Cellulosic Materials by Radiation". Combustion and Flame 5 (4), 1961, pp 369-75
- /2.6/ KOOHYAR, A N, WELKER, J R, SLIEPOEVICH, C M, "The Irradiation and Ignition of Wood by Flame". Fire Technology, Vol. 4, No. 4, 1968
- /2.7/ ALVARES, N J, BLACKSHEAR, P L, MURTY KANURY, A, "The Influence of Free Convection on the Ignition of Vertical Cellulosic Panels by Thermal Radiation". Combustion Science & Technology 1(6), 1970, pp 407-13
- /2.8/ STRÖMDAHL, I, "Träpanelers motståndsförmåga mot värmestrålning". Svenska Brandförsvarsförbundet, Stockholm, 1972
- /2.9/ WESSON, H R, WELKER, J R, SLIEPOEVICH, C M, "The Piloted Ignition of Wood by Thermal Radiation". Combustion and Flame 16(3), 1971, pp 303-10
- /2.10/ SIMMS, D L, "Damage to Cellulosic Solids by Thermal Radiation". Combustion and Flame 6, 1962, pp 303-18

- /2.11/ KOLLMAN, F, COTE, W, "Principles of Wood Science and Technology in Solid Wood". 1968, pp 149-157
- /2.12/ SIMMS, D L, LAW, M, "The Ignition of Wet and Dry Wood by Radiation". Combustion and Flame 11 (5), 1967, pp 377-88
- /2.13/ SIMMS, D L, "The Ignition of Wood by Radiation". British Journal of Applied Physics 3(9), 1952, pp 288-92
- /2.14/ JELLITO, K, "Ignition of Wood. Tests with the Ignition Value Method". Diploma, Reiskbek (cited by Jentzsch 1959, Ref. No. 79), 1953
- /2.15/ SIMMS, D L, "On the Pilot Ignition of Wood by Radiation". Combustion and Flame 7(3), 1963, pp 235-61
- /2.16/ AKITA, K, "Studies on the Mechanism of Ignition of Wood". Report of Fire Research Institute of Japan 9 (1-2), 1959, pp 1-44, 51-54, 77-83, 99-105
- /2.17/ RASBASH, D J, ROGOWSKI, Z W, Combustion and Flame 1 , 1957, p 453
- /2.18/ RASBASH, D J, "Relevance of Fire Point Theory to the Assessment of Fire Behaviour of Combustible Materials". International Symposium. Fire Safety of Combustible Materials, Edinburgh, 1975, pp 169-178
- /2.19/ FREDLUND, B, MAGNUSSON, S E, NILSSON, L, PEJTERSSON, O, STRANDBERG, S, THELANDERSSON, S, "Skydd mot brandspridning inom småhusbebyggelse i lättbetong". Svenska Brandförsvares föreningen, Stockholm, 1977

3.1 Inledning

En noggrann kunskap om de termiska egenskaperna för kolskikt och icke förkolnat trä är nödvändig för en beräkning av en brandpåverkad träkonstruktions instationära temperaturfält. Träets anisotropi, dess biologiska variation inom en konstruktion och de termiska egenskapernas icke försumbara variation med temperatur och fuktkvot utgör därvid komplikationer. Detta förklarar dagens ofullständiga kunskap om träets termiska egenskaper trots ett mycket stort antal rapporterade undersökningar. De aktuella termiska egenskaperna är följande:

<u>Specifika värmekapaciteten</u>	$C_p$ (J/kgK)
<u>Värmeledningsförmågan</u>	$k$ (W/mK)
<u>Entalpiinnehållet</u>	$\Delta H$ (J/kg)
<u>Fasomvandlingsenergin</u>	$Q_L$ (J/kg)

3.2 Specifika värmekapaciteten

Specifika värmekapaciteten kan experimentellt bestämmas enligt följande metoder:

Ordinär kalorimeter,  
 Bunsens iskalorimeter,  
 vakuumkanorimeter,  
 värmeväxlingsmetoder,  
 Differential Scanning Calorimetry (DSC).

För en närmare beskrivning av metoderna hänvisas till litteraturen. Här återges endast en del data erhållna från olika metoder.

För ugnstorrt trä gäller följande värden vid temperaturen  $T^{\circ}\text{C}$

<u>Referens</u>	<u>C kJ/kgK</u>	<u>temperaturintervall</u>	<u>metod</u>
Dunlap /3.1/	$1.11 + 0.0049 T$	0 - 112	Bunsens
Koch /3.2/	$1.11 + 0.0042 T$	60 - 140	DSC

och för trä med fuktkvoten  $m\%$

Volbehr /3.3/	$1.08 + 0.0041 m +$ $0.0025 T + 0.00006 mT$	0 - 100	Bunsens
---------------	--	---------	---------

Mätning av värmekapaciteten möter normalt inga svårbenästrade problem.

För kol existerar få värden för specifika värmekapaciteten och de, som finns, har stor spridning.

Bullen /3.4/ använder  $C = 0.50 \text{ kJ/kgK}$

Perry /3.5/ använder  $C = 1.01 \text{ kJ/kgK}$

För pyrolysgaserna använder Bullen /3.4/  $C = 1.8 \text{ kJ/kgK}$ .

### 3.3 Värmeledningsförmågan

Värmeledningsförmågan kan experimentellt bestämmas enligt följande metoder:

Lee's disc method,

Hot wire method,

Differential Scanning Calorimetry (DSC).

MacLean /3.6/ anger följande ekvation för trä radiellt fibrerna med fuktkvoten  $m\%$  och densiteten  $\rho \text{ kg/m}^3$

$$k = (2.0 + 0.0406 m) \rho \times 10^{-4} + 0.0238 \text{ W/mK} \quad m < 40\%$$

$$k = (2.0 + 0.0544 m) \rho \times 10^{-4} + 0.0238 \text{ W/mK} \quad m \geq 40\%$$

Värmeledningsförmågan är också temperaturberoende och Kollman /3.7/ har funnit, att i temperaturintervallet  $0 - 100^\circ\text{C}$  är värmeledningsförmågan ungefär direkt proportionell mot absoluta temperaturen.

Enligt Griffiths och Kaye /3.8/ är värmeledningsförmågan i den tangentiella riktningen 0.9 - 0.95 ggr den radiella och i den longitudinella 1.75 - 2.25 ggr den radiella.

För kol finns värden för  $k$  mellan 0.076 och 0.94 W/mK redovisade, men utan att det anges, vid vilken temperatur och densitet, som de gäller. Hadvig /3.9/ fann i sina experiment, att för kolskikt  $> 6 \text{ mm}$  är  $k = 0.38 \text{ W/mK}$  ett acceptabelt värde.

### 3.4 Entalpiinnehåll och fasomvandlingsenergi

Entalpiinnehållet mäts generellt i en bombkalorimeter. Information om entalpiinnehåll i trä ges i Harmathy /3.10/, Roberts /3.11/ och Thomas och Nilsson /3.12/ och värdet ligger för torrt trä mellan 18 - 19 MJ/kg.

Thomas/3.13/ har utvecklat en modell för att beräkna gasernas entalpiinnehåll, då entalpiinnehållen för trä och kol är kända tillsammans med temperaturen, värmekapaciteterna och andelen trä, som förgasas.

Det finns en koppling mellan fasomvandlingsenergin, som varierar mellan 0.4 - 5.0 MJ/kg, och entalpiinnehållet, som dock är komplicerad.

Följande exempel är hämtat från Böhm /3.14/ och gäller för torrt trä.

Fasomvandlingsenergi MJ/kg	5.4	2.7	1.35
Entalpiinnehåll för pyrolysgaserna	24.2	21.5	20.15

Under en brand ändras andelen av träet, som pyrolyseras per tidsenhet, och de termiska egenskaperna, vilket gör det svårt att beräkna entalpiinnehållet hos pyrolysgaserna.

### 3.5 Slutsatser

En komplettering av det nuvarande kunskapsunderlaget för träets termiska egenskaper bör i första hand fokuseras mot värmeledningsförmågan och specifika värmekapaciteten för dels förkolnat trä, dels oförkolnat trä inom temperaturområdet över 100°C. Angelägen är också en vidareutveckling av de samband, som krävs för en beräkning av träets reaktionsvärme vid verkliga brandförhållanden med utgångspunkt från data om entalpiinnehåll och fasomvandlingsenergi.

### REFERENSER

- /3.1/ DUNLAP, F, "The Specific Heat of Wood". US Department of Agriculture, Bulletin 110, 1912
- /3.2/ KOCH, P, "Specific Heat of Oven-dry Spruce Pine Wood and Bark". Wood Science 1(1), 203, 1969
- /3.3/ VOLBEHR, B, "Swelling of Wood Fibres". Doctoral Thesis, Kiel, 1896
- /3.4/ BULLEN, M L, "The Burning Rate of Wood Dowels in Small Scale Arrays". Fire Research Station, Note N159/76, 1976

- /3.5/ PERRY, J H, "Chemical Engineers Handbook". 4th Edition, McGraw-Hill, 1963
- /3.6/ MACLEAN, J D, "Thermal Conductivity of Wood". Heating, Piping, Air Conditioning, Vol. 13, No. 6, 1941
- /3.7/ KOLLMAN, F, COTÉ, W, "Principles of Wood Science and Technology in Solid Wood". 1968, pp 149-157
- /3.8/ GRIFFITHS, E, KAYE, G W C, "The Measurement of Thermal Conductivity". Proceedings Royal Society (London), Series A, 104:71-98, London, 1923
- /3.9/ HADVIG, S, "Charring of Wood in Building Fires". Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, 1981
- /3.10/ HARMATHY, T Z, "A New Look at Compartment Fires". Fire Technology, Vol. 8, No. 3 and 4, 1972
- /3.11/ ROBERTS, A F, "Comments on a Letter by J. J. Brenden". Combustion and Flame, 1967
- /3.12/ THOMAS, P H, NILSSON, L, "Fully Developed Compartment Fires. New Correlations of Burning Rates". Fire Research Station, Fire Research Note 979, 1973
- /3.13/ Se HADVIG /3.9/, s 101
- /3.14/ BÖHM, B, "Fully Developed Polyethylene and Wood Compartment Fires". Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, 1977





#### 4.1 Inledning

Vid en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande konstruktioner i trä utgör kännedom om de instationära temperatur-, fukt- och densitetstidfälten för konstruktionen en väsentlig information. Ur densitetstidfältet kan ett reducerat tvärsnitt vid en godtyckligt vald tidpunkt bestämmas. Det reducerade tvärsnittet, temperatur- och fukttidfälten och tillhörande förändringar i träets mekaniska egenskaper ligger sedan till grund för bestämning av statistiskt verkningssätt och bärförmåga för den brandpåverkade konstruktionen.

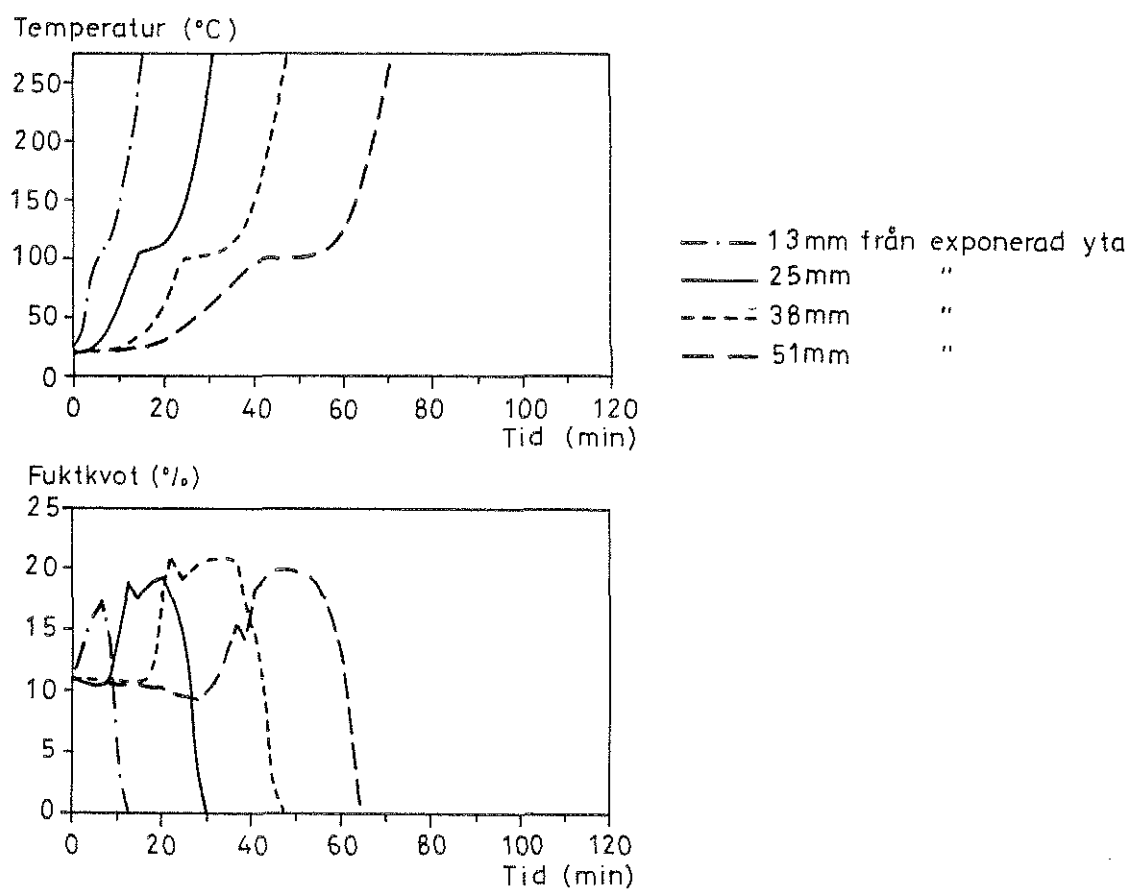
Träets beteende vid termisk påverkan styrs av en mängd fysikaliska och kemiska mekanismer, varav de viktigaste är

- \* det inre konvektiva värmeflödet, dels från gaser och vatten, som bildas vid pyrolysen och som transporteras både längre in i träet och mot den exponerade ytan, dels från transport av initieellt vatten,
- \* värmeledningen och dess påverkan från varierande temperatur och fukthalt,
- \* värmelagringen,
- \* värmeutbytet vid materialytan i form av strålning och konvektion, inklusive effekterna av masstransport,
- \* förångningen av vatten, och
- \* de kemiska reaktioner, som äger rum vid varierande temperatur och fuktinnehåll i träet.

Problemet försvåras av träets biologiska variationer.

Att härleda noggranna matematiska modeller för en bestämning av kolskiktstillväxt, temperatur- och fuktgradienter, som fullständigt inkluderar alla dessa komplexa, fysikaliska och kemiska mekanismer, är en uppgift av ohygglig svårighetsgrad. Praktiskt är uppgiften därutöver ej meningsfull, eftersom information saknas om flertalet ingående materialparametrar. Insatserna har

hittills i stället inriktats på att utveckla approximativa, endimensionella modeller för initieellt torrt trä. Modellerna har verifierats experimentellt. Modellernas tillämpbarhet exkluderar tunnväggiga träkonstruktioner. Bland publicerade modeller må här följande nämnas: Fredlund /4.1/, Roberts /4.2/, Kansa-Perlee-Chaiken /4.3/, White-Schaffer /4.4/, Delichatsios-de Ris /4.15/, och Hädvig /4.5/. I /4.5/ presenteras ett dimensioneringsunderlag i form av diagram och närmeformler för en beräkning av kolskiktets tillväxt för träbärverk, utsatta för ett verkligt brandförlopp med



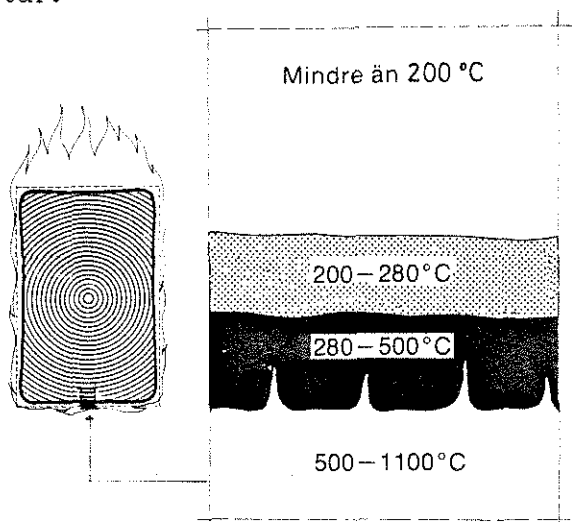
Figur 4.1 Tidkurvor för temperatur (övre figuren) och fuktkvot (undre figuren) för träskiva av furu, ensidigt termiskt påverkad enligt ISO 834 /4.6/

karakteristika enligt figur 1.2. De i /4.1/ och /4.4/ redovisade modellerna inkluderar en bestämning av temperaturfälten inom konstruktionens icke förkolnade del. I /4.1/ anvisas också ett angreppssätt för en behandling av det transienta fuktillståndet.

De utförligaste experimentella undersökningarna rapporteras av Hadvig /4.5/ och White-Schaffer /4.6/. Den senare rapporten redovisar noggranna fuktgradientmätningar, som bl a illustrerar den kraftiga fuktökning, som uppkommer i olika punkter av ett träbärverks tvärsnitt vid brand och som i respektive tvärsnittspunkt når sitt maximivärde samtidigt som 100°C-isotermen passerar - figur 4.1.

#### 4.2 Termisk nedbrytning

Trä är ett organiskt material, uppbyggt av ett antal komponenter med individuella kemiska egenskaper. Att analytiskt simulera träets beteende genom hopkoppling av dessa komponenter leder till en komplicerad behandling, som ytterligare försvåras av "defekter" i form av bl a variationer i träets biologiska struktur.



Figur 4.2 Karakteristiska zoner för trä vid pyrolysis

Studier av trä vid förhöjd temperatur (pyrolysis) har lett till att man för träs pyrolysis kan särskilja fyra karakteristiska zoner, parallella med den uppvärmda ytan - figur 4.2. Följande beskrivning bygger på /4.7/.

#### Zon A, temperaturen mindre än 200°C

De gaser, som bortgår vid en mycket långsam pyrolysis, är icke antändbara. Träet erhåller en långsam viktnedgång, över 95°C kan träet i vissa fall börja förkolnas. En oxidation av kolskiktet förekommer, som är exotermisk och som under omständigheter, där värmen bevaras, kan leda till självantändning. Frisk ved - utan t ex rötangrepp - antänds emellertid inte i zon A.

#### Zon B, 200 till 280°C

Även om de gaser, som avges, ej är antändbara, uppnås ett exotermiskt tillstånd vid pyrolysen. Den temperatur, vid vilken nettoresultatet av samtliga pyrolysisreaktioner och oxidationer blir märkbart exotermiskt, har tagits som en av definitionerna av träs antändningspunkt, även om spontan antändning inte inträffar förrän vid högre temperatur, än vad som gäller för zon B.

#### Zon C, 280 till 500°C

Den gasblandning, som avges i stora mängder i zon C, innehåller till en början alltför mycket koldioxid och vattenånga för att vara antändbar. Efterhand ökar dock brännbarheten på grund av en annan, snabbare pyrolysis. Vid detta stadium uppträder förbränningen med låga endast i gasfasen, utanför träet, vilket beror på att de snabbt avgivna gaserna måste hinna blandas med lämpliga proportioner av luftens syre. Självunderhållande diffusionsflammar från organiskt bränsle brinner med en temperatur av cirka 1100°C. Det bildade träkolet kan inte brinna utan ackumuleras så länge som gasproduktionen är tillräckligt stor

för att utestänga träytan från syre. Eftersom träkol har lägre värmeledningstal än trä, försenar träkolsskiktet värmeinträngningen och uppkomsten av ett exotermiskt tillstånd i innanför liggande delar.

#### Zon D, över 500 °C

Vid 500 °C glöder träkolet och oxideras. När yttemperaturen uppgår till strax över 1000 °C, förbrukas träkolet vid ytan lika snabbt som reaktionszonernas inträngning.

När reaktionszonerna har inträngt så långt, att allt ursprungligt trä är förbrukat, upphör de lysande diffusionslågorna och endast de icke lysande flammorna av brinnande kolmonoxid och väte återstår.

Om man grovt vill markera gränsen mellan träkol och, mer eller mindre mekaniskt oförstört trä, indikerar vissa undersökningar en temperatur på 300 °C som användbart kriterium.

#### 4.3 Processer för kolskiktstillväxt

Två olika processer kontrollerar kolskiktstillväxten, nämligen reaktionskinetiska processer och transportprocesser. De kinetiska beskriver hur fort kemiska reaktioner sker vid en viss temperatur och transportprocesserna hur och när temperaturen uppnås. Vilken av dessa, som dominerar, avgörs av tjockleken på materialet. En god tumregel är, att ett tunt material styrs av de kinetiska processerna och ett tjockt av transportprocesserna.

Vid lösning över en pyrolysmo­dell görs idag långtgående förenklingar genom en analys av pyrolyldata med hjälp av en första ordningens Arrheniusfunktion, som kan skrivas:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho b e^{-(E_A/RT)} \quad (4.1)$$

varvid

$\rho$  = densiteten vid tiden  $t$  för materialet,

$R$  = allmänna gaskonstanten,

$T$  = temperaturen i K,

$b, E_A$  = konstanter, där  $E_A$  står för aktiveringsenergin.

Dessa båda konstanter erhålls från termogravimetriska mätningar på små provkroppar eller från densitets- och temperaturmätningar i olika punkter av mindre eller större provkroppar. En bestämning av dessa konstanter är förknippad med stora svårigheter. Konstanterna skall nämligen återspegla samtliga pyrolysisreaktioner, som var för sig har skilda förlopp vid olika temperaturpåverkan. Dessutom inverkar den varierande biologiska, kemiska och fysikaliska strukturen hos träprovet.

En annan svårighet är att mäta reaktionsvärmets, som för trä varierar inom vida gränser beroende på de villkor, som gäller vid pyrolysen. Reaktionsvärmets kan erhållas ur differentialkalorimetriska mätningar på små provkroppar eller genom energibalansberäkningar i kombination med försök med stora provkroppar.

Vid framtagandet av konstanterna  $b$  och  $E_A$  och av reaktionsvärmets har hittills korrektion för fukt gjorts endast för reaktionsvärmets.

En mer detaljerad beskrivning av träets förbränningsmekanismer finns i Fredlund /4.1/.

Transportprocesserna innehåller följande komponenter:

- Värmeledning,
- diffusion av syre genom trä och kol,

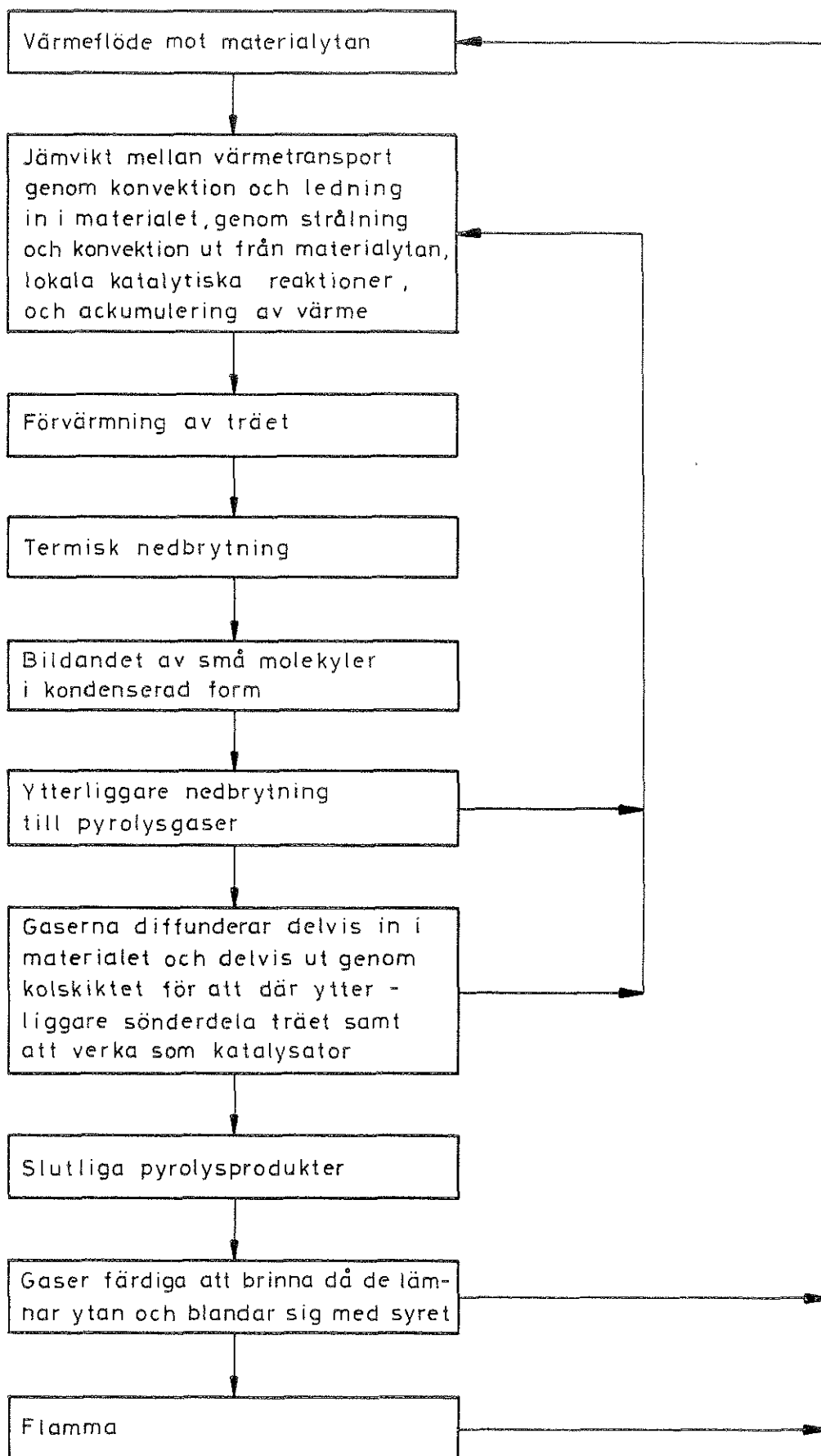
- gastransport, inkluderande vattenånga, genom trä och kol.

Förbränningshastigheten för trä kontrolleras sannolikt i huvudsak av fyra parametrar, nämligen densitet, permeabilitet längs fibrerna, fuktkvot och tjocklek. Värmeledningsförmågan är också viktig men bestäms till stor del av densiteten. I experiment med varierande träsort, tjocklek, fuktkvot och strålningsintensitet har visats, att viktminskningen är proportionell mot densiteten och mindre beroende av fuktkvoten inom gränserna 0-30% /4.8/. Det krävs dock energi för att förånga vattnet och detta minskar förbränningshastigheten. Inverkan från tjockleken på kolskiktet är försumbar för tjocklekar > 6 mm /4.8, 4.9/. Eftersom permeabiliteten är 10 000 ggr större längs fiberriktningen än vinkelrät däremot måste provkroppen noga förseglas. Det vatten och de gaser, som bildas vid förbränningen, komplicerar förloppen ytterligare därigenom att en del lämnar provkroppen och en del transporteras längre in i materialet och kondenseras för att återigen senare -kanske förångas. Denna transport, kondensation och förångning har en uttalad effekt på temperaturtidförloppet i provkroppen. Detta är verifierat i försök med träcylindrar /4.10/.

Följande materialparametrar bör tas hänsyn till vid ett studium av kolskiktstillväxt för en brandutsatt träkonstruktion: densitet, värmeledningsförmåga och fuktkvot för det icke förkolnade träet, temperatur vid basen av kolskiktet, mängden brännbara gaser och karakteristika för kolskiktet (tjocklek, sprickstorlek, permeabilitet och värmeledningsförmåga). Även omgivningens variabler såsom brandrumstemperatur och typ av värmekälla påverkar kolskiktstillväxten.

Ett flödesschema som översiktligt beskriver dessa parametrars influens, visas i figur 4.3. Av figuren framgår att samverkande fysikaliska och kemiska processer spelar en stor roll samt att händelsekedjan kan delas upp i två delar. En del är därvid kopplad till materialets inre och består i att bestämma, vilka





Figur 4.3 Händelsekedjan för brandutsatt trä

reaktionsprodukter som genereras för en given termisk påverkan och för kroppens temperaturhistoria. En annan del refererar till materialets yta och det utanförliggande gränsskiktet. Denna del omfattar en bestämning av storlek och intensitet av flammen i gränsskiktet och flammans värmetransport till materialytan för en given kvantitet och sammansättning av de pyrolysisprodukter, som inträder i gränsskiktet.

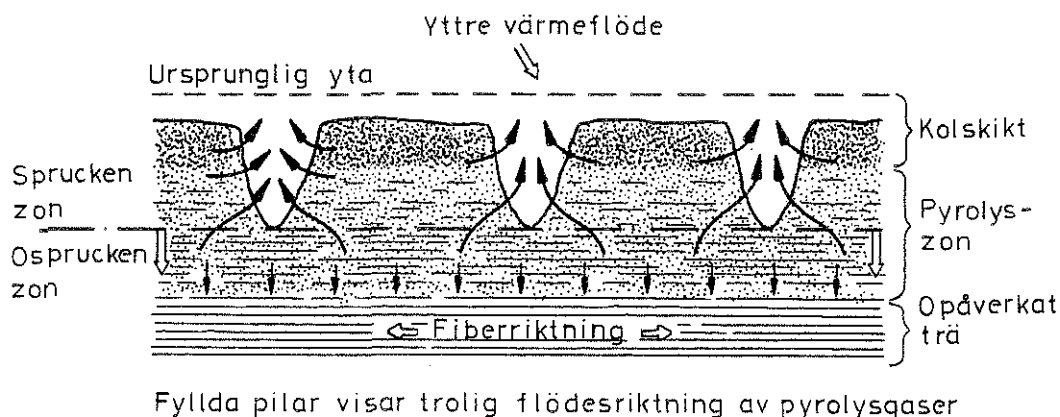
Problemet är förhållandevis lätt att lösa för ett flytande bränsle, eftersom därvid förångningen (pyrolysen) begränsas till ett tunt lager nära ytan, och då behöver bara de yttre förhållandena bestämmas. Problemet blir mer komplext för fasta bränslen, som förkolnas, varvid de inre förhållandena spelar en avgörande roll.

Eftersom kunskapen i att hantera värme- och masstransportproblemen vida överstiger kunskapen i att behandla de kemiska processerna är det naturligt att studera kolskiktstillväxt och temperaturtillstånd genom att lösa värme- och massbalansekvationerna och låta de kemiska processerna inverka som "punktkällor". När man studerar dessa punktkällor, är det viktigt att notera följande förhållanden:

- a) Eftersom kolskiktstjockleken ökar med tiden, kommer också pyrolysisprodukterna att få svårare att passera skiktet.
- b) Detta ökade motstånd kan medföra, att pyrolysisgaserna bidrar till ytterligare nedbrytning av materialet samt att de även verkar som katalysator.
- c) I ytan utvecklas ett nätverk av sprickor med ett djup, som tillväxer i takt med pyrolysiszonens utbredning. Värmeutbytet mellan den externa värmekällan och den spruckna zonen sker då inte längre över en plan yta, utan nu kan strålnings- och konvektionsvärme via sprickorna transporteras direkt till det icke förkolnade träet. Om fiberriktningen är parallell med den bestrålade ytan, kommer gaserna att i huvudsak tränga ut

genom sprickorna, eftersom pyrolysgaserna lättast kan transporteras längs fiberriktningen. Detta är illustrerat i figur 4.4. Inverkan av sprickorna reducerar effekterna enligt punkterna a) och b).

- d) De samtida, samverkande kemiska processerna är ytterst komplexa och hittills högst ofullständigt klarlagda.
- e) Förvärmningen av träet varierar med temperaturnivå och tid. Detta medför att de kinetiska konstanterna också kommer att variera.



Figur 4.4 Sektion av trä utsatt för pyrolysis /4.2/

- f) I den ospruckna zonen kommer pyrolysgaserna att bygga upp ett internt övertryck som först ökar med avståndet från den exponerade ytan och sedan avtar till det värde, som gäller i opåverkat trä. Som en konsekvens av detta tryck kommer huvuddelen av pyrolysgaserna att strömma mot exponeringsytan, men en mindre del transporteras längre in i träet, där de kommer att kondenseras för att i ett senare skede åter förgasas. Denna process påverkar temperaturfördelningen genom det konvektiva värmeutbytet.
- g) Kopplingen mellan värme- och masstransporten minskar uppvärmningshastigheten inuti materialet /4.11/.

#### 4.4 Matematiska modeller

I det följande beskrivs översiktligt strukturen av en matematisk modell, som avser att beräkna de instationära temperatur-, fukt- och densitets-tidfälten för en brandpåverkad träkonstruktion med värmeflödet inuti materialet uppdelat i en värmeledningsdel och en konvektionsdel och värmeutbytet vid materialytan bestående av en strålningsdel och en konvektionsdel. En sådan modell innehåller följande komponenter /4.1/:

- a) Kontinuitetsekvationer för de grundläggande variablerna energi, fukt, gaskomponenter och massa.
- b) Relationer mellan problemets tillståndsvariabler, vilka utöver de grundläggande variablerna enligt a) omfattar temperatur, ångtryck, relativ fuktighet, mättnadstryck vid given temperatur, tryck för kondenserat vatten och porvolym.

Det grundläggande antagandet är därvid, att termodynamisk jämvikt existerar lokalt för varje punkt under den dynamiska processen. Detta innebär att gasfasen, vätskefasen och den fasta fasen i en liten omgivning till punkten antar samma temperatur. Dessutom antar hela vätskefasen i den begränsade omgivningen till punkten samma porvattentryck, och samtliga gasfaser antar respektive gastryck och ångtryck i den begränsade omgivningen. Vidare antages att de tryckdifferenser, som hänför sig till pyrolysgaserna, är försumbara så att pyrolysgaserna fritt kan röra sig ut ur porsystemet, dvs ingen ändring i pyrolyskoncentrationen äger rum.

- c) Uttryck för flödena av energi, fukt och pyrolysgaser. Dessa uttryck måste därvid formuleras så att flödena för en godtyckligt vald tidpunkt kan beräknas ur fördelningen av temperatur, fukt osv i träet.

Energiflödet kompliceras av det massflöde, som förutom värmeledningen bidrar till det totala energiflödet. Det totala flödet kan beskrivas som en konvektionsdel, som anger energinnehållet per massenhet pyrolysgaser och fukt, samt en värmeledningsdel, där värmeledningstalet är en funktion av temperatur, fuktinnehåll och densitet. Behandlingen av fuktflödet är mycket komplicerad genom en lång rad svårbestämda transportkoefficienter, som beror av tillståndsvariablerna. En allmän behandling av problemet finns redovisad i Claesson /4.12/. Fuktproblematiken i samband med träets pyrolys är därvid speciellt komplicerad, vilket kan förklara, att den endast varit föremål för ett fåtal studier. Fredlund /4.1/ redovisar en matematisk modell, som dock inte har verifierats experimentellt, och i andra undersökningar har man nöjt sig med att mäta fuktfördelningen i provkroppar under en brandpåverkan /4.6,4.13,4.14/. Om man vidare antar att de tryckdifferenser, som hänför sig till pyrolysgaserna är försumbara, ges dess flöde av produktionen av pyrolysgas.

d) Uttryck för produktionstermerna, vilka beskriver den energi, som frigörs per tidsenhet, och den fasändring, som uppstår vid pyrolysen. Fasändringen antas vanligen innebära en nedbrytning av träet till pyrolysgaser och vatten. Produktionstermerna är relaterade till den hastighet, varmed träet undergår pyrolys. Pyrolysen styrs av komplicerade kemiska reaktioner. Under förutsättning av att huvuddelen av de kemiska reaktionerna i träet utgöres av sönderfall av molekyler oberoende av närvaron av andra molekyler och att de kemiska reaktionerna påverkas i samma utsträckning av temperaturen, kan en "medelreaktion" för träets pyrolys anses följa en Arrheniusfunktion. Med kännedom om träets reaktionsvärme kan den energi, som frigörs vid pyrolysen, också anges.

e) Rand- och begynnelsevillkor, vilka diskuterats översiktligt tidigare.

Som komplement till en mer fullständig matematisk modell av beskriven karaktär är det önskvärt att också kunna ha tillgång till en förenklad modell för en snabb uppskattning av ett materials kolskiktstillväxt. En sådan modell har nyligen presenterats av Delichatsios och de Ris /4.15/. Modellen omfattar en enkel analytisk lösning för en beräkning av den asymptotiska pyrolyshastigheten för kolskiktsbildande material, exponerat för en konstant extern strålning. Tillsammans med resultat från ett fåtal laboratorietester ger modellen ett tillfredsställande underlag för att på ett enkelt sätt approximativt kunna förutsäga ett materials kolskiktstillväxt i en verklig brandmiljö.

Den analytiska lösningen förutsätter, att värmetransporten i kolskikt och hos pyrolysgaser kan försummas i förhållande till värmetransporten i det opåverkade materialet. Vidare förutsätts, att pyrolyprocessen kan beskrivas genom konstant temperatur och reaktionsvärme, dvs utan tillämpning av någon Arrheniusfunktion. Förutsättningen är verifierad genom lång erfarenhet för enkla homogena material. För trä och träbaserade material, som vid brand karakteriseras av att ett permanent kolskikt utvecklas, som succesivt minskar pyrolyshastigheten, innebär förutsättningen en grovare approximation.

#### 4.5 Slutsatser

Ur redovisningen ovan framstår som angelägna forskningsprojekt:

##### 1) För tunnväggiga träkonstruktioner

Utveckling av en förenklad endimensionell modell för beräkning av kolskiktstillväxt och temperaturfördelning. Hänsyn måste härvid tas till träets reaktionskinetiska parametrar, vilket kräver omfattande experimentella studier.

## 2) För träkonstruktioner med massiva sektiondelar

Utveckling av en förenklad, endimensionell modell för beräkning av kolskiktstillväxt, temperaturgradient och fuktfördelning. Uppgiften kan lösas utan användning av komplicerade förbränningssekvationer. Behandlingen måste inkludera transportprocesser och detta kräver en förenklad modell för fukttransporten i materialet samt experimentell bestämning av en del materialkonstanter.

I ett andra steg är en utvidgning av modellen till två- och tredimensionella fall naturlig för praktisk tillämpning på balkar samt olika typer av skarvar och förband. Därvid måste hänsyn tas till träets anisotropa egenskaper.

### REFERENSER

- /4.1/ FREDLUND, B, "Modell för beräkning av temperatur och fuktfördelning samt reducerat tvärsnitt i brandpåverkade träkonstruktioner". Intern rapport IR79-2, Inst för byggnadsstatik, LTH, Lund, 1979
- /4.2/ ROBERTS, A F, "Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood". Thirteenth Symposium on Combustion, August 1970
- /4.3/ KANSA, E, PERLEE, H, CHAIKEN, R, "Mathematical Model of Wood Pyrolysis Including Internal Forced Convection". Combustion and Flame 29, 1977, pp 311-324
- /4.4/ WHITE, R H, SCHAFFER, E L, "Application of CMA Program to Wood Charring". Fire Technology, Vol. 14, No. 4, 1978

- /4.5/ HADVIG, S, "Charring of Wood in Building Fires". Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, 1981
- /4.6/ WHITE, R H, SCHAFFER, E L, "Transient Moisture Gradient in Fire-Exposed Wood Slab". Wood and Fiber 13(1), 1981
- /4.7/ FREDLUND, B, "Träets antändnings- och förbränningsmekanism". Intern rapport IR79-3, Inst för byggnadsstatik, LTH, Lund, 1979
- /4.8/ Great Britain Ministry of Technology and Fire Offices' Committee, Joint Fire Research Organization 1964. Fire Research 1963; report of the Fire Research Board with the report of the Director of Fire Research, London
- /4.9/ AKITA, K, "Studies on the Mechanism of Ignition of Wood". Report of Fire Research Institute of Japan, 9(1, 2), 1959, pp 98,
- /4.10/ BLACKSHEAR, P L, KANURY, M A, "Heat and Mass Transfer to, from and within Cellulosic Solids Burning in Air". Tenth Symposium on Combustion, 1965, pp 911-23
- /4.11/ HENRY, P H S, Proceedings, Royal Society (London), Series A171, 1939, pp 215
- /4.12/ CLAESSION, J, GAFFNER, D, "Fukt i porösa byggnadsmaterial". Rapport, Byggnadskonstruktionslära, 1977: 1, LTH, Lund, 1977
- /4.13/ "Fire Resistance of Wood Structures". Symposium VTT, Finland, 1980



- /4.14/ DORN, H, EGNER, K, "Fire Tests on Glued Laminated Structural Timbers". Holz-Zentralblatt, 28, Stuttgart, 1961
- /4.15/ DELICHATSIOS, M A, DE RLS, J, "An Analytical Model for the Pyrolysis of Charring Materials". Presented at the CIB W14 Workshop, Borås, Sweden, May 1983

5.1 Inledning

För optimal dimensionering av brandutsatta bärande träkonstruktioner krävs metoder, som tar hänsyn till givna förutsättningar för lastpåverkan och termisk påverkan. I avsnitt 6.1 redovisas existerande dimensioneringsmetoder för balkar och pelare, vilka - beroende på vald termisk påverkan - ger en mer eller mindre grov uppskattning av bärförmåga och reellt brandmotstånd. Normalt leder därvid metoderna till resultat, som sannolikt ligger icke oväsentligt på säkra sidan. Metodernas tillämpning är begränsad till en beräkning av gränsböjmoment och kritiska laster för vissa typer av instabilitetsfenomen. Deformationsberäkningar ligger ej inom metodernas tillämpningsmöjligheter.

Av metoder, som skall kunna vara mer generellt tillämpbara och också bilda underlag för en optimal dimensionering, fordras, att de bygger på experimentellt verifierade analytiska modeller, som funktionellt korrekt beskriver de olika processerna i bärverkets termiska och mekaniska verkningssätt vid brand. För en optimal dimensionering måste vidare dimensioneringsmetoden och dess modeller kopplas till en sannolikhetsteoretisk analys enligt avsnitt 1.5.

För en kvalificerad beräkning av ett brandpåverkat träbärverks bärförmåga behövs bl a en experimentellt verifierad materialmodell, i vilken träets mekaniska egenskaper beskrivs som funktion av de transienta spännings-, temperatur- och fukttillstånden. Med en sådan materialmodell tillgänglig kan därpå en statisk beräkning genomföras av konstruktionens verkningssätt vid en godtyckligt vald tidpunkt av brandförloppet med hänsyn tagen till bl a tidsvariationer av krafter, moment och spänningar från inre och yttre tvång.

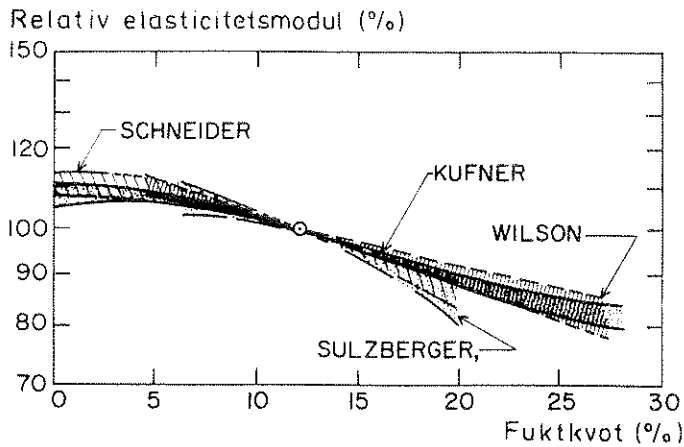
## 5.2 Hållfasthets- och deformationsegenskaper

Existerande kunskap om träets mekaniska egenskaper kommer i huvudsak från försök med små provkroppar. Den stora informationsmängd, som erhållits genom omfattande sådana försök, ger emellertid endast ett begränsat underlag för en praktisk dimensionering, eftersom vid dessa försök hållfasthetsegenskaperna mäts på rent, felfritt trä. För böjhållfastheten har det visats, att spänningarna i tryckzonen är avgörande för små felfria provkroppar, medan spänningarna i dragzonen är utslagsgivande för bärverkselement av ordinära dimensioner. Vidare gäller, att hållfasthetsfördelningen för små provkroppar som regel följer en normalfördelning, medan hållfasthetsfördelningen för konstruktionsträ bättre ansluter sig till en Weibullfördelning, vilket visar, att konstruktionsträets hållfasthet styrs av ett sprött brott.

Den existerande kunskapen om träets mekaniska egenskaper kommer i huvudsak från undersökningar, som utförts vid konstanta temperatur- och fukttillstånd för antingen olika konstanta spänningsnivåer eller olika spännings-tidpåverkan, medan i den verkliga brandsituationen temperatur- och fukttillstånden är transienta. Undersökningarna ger alltså information om hållfasthets- och deformationsegenskapernas variation med olika kombinationer av stationära temperatur- och fuktnivåer.

Trä har en mycket komplicerad anisotrop struktur, en stor kvalitetsspridning inom samma träslag och är behäftat med växtfel. Detta gör det svårt att sammanfatta de mekaniska egenskapernas variation för olika typer av påverkan.

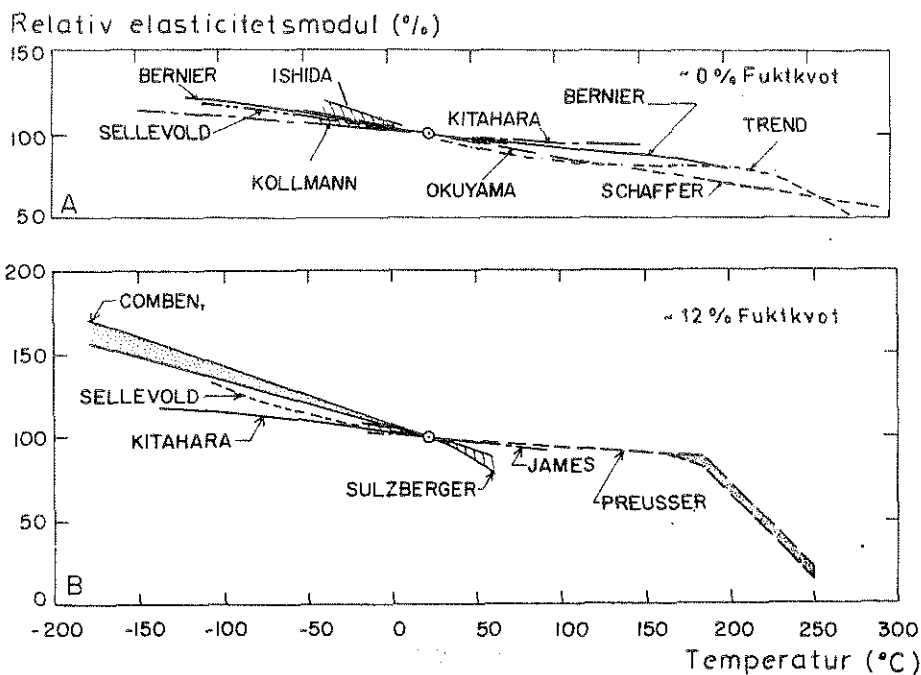
De momentana elasticitetsmodulerna och hållfasthetsvärdena för olika belastningsriktningar ökar både när fuktkvoten sjunker under fibermättnadspunkten och då temperaturen minskar. Detta visas för trä, belastat parallellt med fiberriktningen, i figurerna 5.1, 5.2, 5.3 och 5.4, hämtade från Gerhards /5.1/. I figurerna finns refererat, vilken undersökning respektive resultat kommer ifrån.



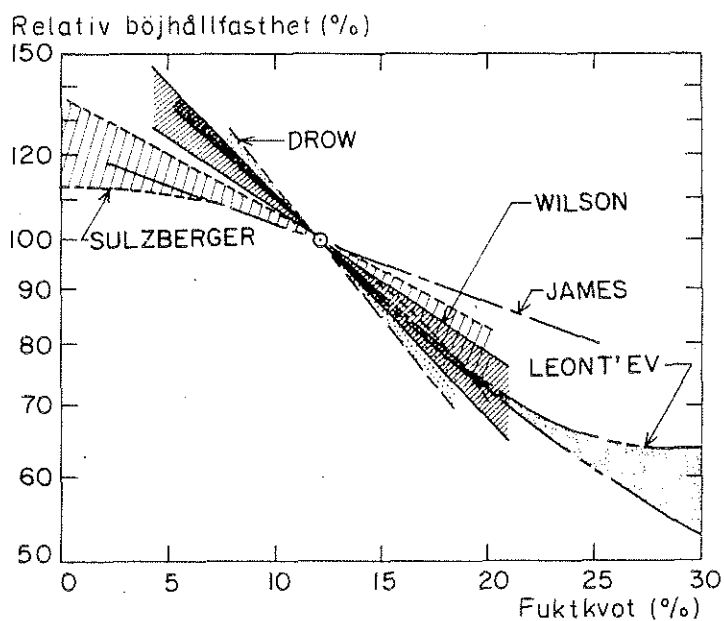
Figur 5.1 Effekt av varierande fuktkvot på elasticitetsmodulen parallellt med fiberriktningen vid 20°C. 100% vid fuktkvoten 12% /5.1/

Av figurerna framgår, att för temperaturnivåer större än 100°C saknas resultat för böjhållfastheten. Däremot finns sådana värden för tryck- och draghållfastheterna /5.1, 5.7/. För högre temperaturer finns också experimentella data rörande elasticitetsmodulen parallellt med fiberriktningen, men dessa resultat kommer från undersökningar av cellulosa-fibrer vid uppvärmningstider av endast ett par sekunder.

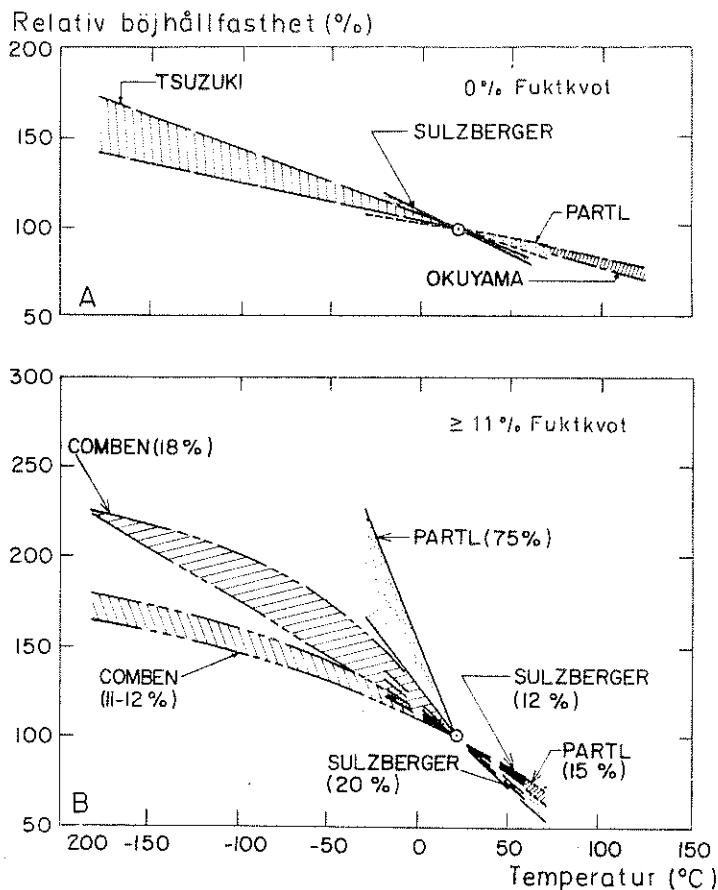
De påverkanstider, som är av intresse för en brandutsatt träkonstruktion är 1-2 timmar. Detta innebär att den i litteraturen redovisade långtidseffekten, krypning till brott, ej är relevant för träbärverk med normala spänningsnivåer i brandsammanhang. Spänningsnivån påverkar då främst krypningskurvans proportionalitet, krypnings storlek och trätets elasticitetsmodul. Övriga viktiga faktorer, som påverkar deformationerna är temperatur och fuktkvot. Av redovisade transienta försök framgår därvid bl a, att den deformation, som uppkommer i en provkropp för en definierad kombination av spänning och temperatur, beror av spännings- och temperaturhistorien /5.2, 5.7/.



Figur 5.2 Effekt av varierande temperatur på elasticitetsmodulen parallellt med fiberriktningen. A: Fuktkvot nära 0% (100% vid temperaturen  $25^{\circ}\text{C}$ ), B: Fuktkvot 12% (100% vid temperaturen  $20^{\circ}\text{C}$ ) /5.1/



Figur 5.3 Effekt av varierande fuktkvot på böjhållfastheten vid  $20^{\circ}\text{C}$ . 100% vid fuktkvoten 12% /5.1/



Figur 5.4 Effekt av varierande temperatur på böjhållfastheten.  
 A: Fuktqvot 0%, B: Fuktqvot  $\geq 11\%$ . 100% vid temperaturen  $20^{\circ}\text{C}$  /5.1/

Högre temperatur och högre fuktqvot leder generellt till större deformationer vid en given spänningsnivå /5.3, 5.4/. En ändring av fuktqvoten under belastning, vilket har aktualitet i brand-sammanhang, påverkar deformationen avsevärt, vilket visats av bl a Armstrong och Kingston /5.5/. Perkitny hävdar därvid, att redan fuktqvotsändringar på 1% påtagligt påverkar krypdeformationen /5.6/.

Sammanställningar av försöksresultat för träets mekaniska egenskaper vid olika temperatur- och fuktnivåer kännetecknas genomgående av en stor spridning. Detta förklaras av att en stor mängd olika träslag använts vid undersökningarna samt av de mättekniska svårigheter, som föreligger vid mätning av temperatur och fuktqvot. Det förhållandet, att för trä fuktqvoten ändras med temperaturen försvårar därvid en distinkt tillståndsdefinition.

### 5.3 Slutsatser

Ovan har bl a framhållits den skillnad i information, som erhålls för träets mekaniska egenskaper från undersökningar på små felfria provkroppar och från provningar av bärverksdelar av trä med ordinära dimensioner. Framtida normer för träbärverk kommer att i större omfattning beakta dessa faktorer för en dimensionering vid normala temperaturer. Det är angeläget, att vid framtagning av underlaget till dessa normer också inkludera de specifika problem, som har aktualitet för dimensioneringsmetoder för träbärverk vid brand.

Från de experimentella undersökningarna på små provkroppar vid varierande temperatur- och fuktillstånd har en del grova materialmodeller för träets mekaniska beteende utvecklats, dock ingen, där deformationsförloppet vid transient spännings- och temperaturpåverkan och samtidig närvaro av fukt beaktas. Det är därför angeläget, att en sådan för kvalificerade beräkningar lämpad analytisk modell utvecklas. Modellen måste ha sådana kvalifikationer, att den kan användas för praktiska beräkningar av brandpåverkade bärverks deformationsförlopp och instabilitetslaster. Modellens giltighet måste verifieras genom experimentella studier för små provkroppar och slutgiltigt också för några större provkroppar - t ex böjbalk och axiellt tryckt pelare.

Ingenting har publicerats om varför temperatur och fukt påverkar de mekaniska egenskaperna utan endast hur de förändras. Det är därför angeläget att undersöka, om de biologiska skillnaderna mellan olika träslag eller inom samma träslag fenomenologiskt kan förklara en del av den stora spridningen i försöksresultat för träets mekaniska egenskaper vid definierade kombinationer av temperatur- och fuktillstånd. En sådan undersökning bör innehålla en utveckling av någon förenklad analytisk modell, som tar hänsyn till träets årsringsstruktur och relationen mellan cellulosa och lignin.

REFERENSER

- /5.1/ GERHARDS, C C, "Effects of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood:An Analysis of Immediate Effects". Wood and Fiber 1, 1982
- /5.2/ KITAHARA, K, YUKAWA, K, "The Influence of the Change of Temperature on Creep in Bending". Journal of Japan Wood Research Society, Vol. 10, No. 5, 1964, pp 169-175
- /5.3/ NEMETH, L L J, "The Influence of Moisture on Creep in Wood". M.S. Thesis, University of California, Berkeley, 1964
- /5.4/ TAKEMURA, T, "Plastic Properties of Wood in Relation to the Non-equilibrium States of Moisture Content". Journal of Japan Wood Research Society, Vol. 13, No. 3, 1967, pp 77-81
- /5.5/ ARMSTRONG, L D, KINGSTON, R S, "Effect of Moisture Changes on Creep in Wood". Nature (London) Vol. 185, No. 4716, 1960, pp 862-863
- /5.6/ PERKINNY, T, "Über Wechselbeziehungen zwischen Sorption, Desorption und Rheologie von Holz". Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 23, No. 5, 1965, pp 173-182
- /5.7/ SCHAFFER, E L, "Elevated Temperature Effect on the Longitudinal Mechanical Properties of Wood". Thesis, Engineering Mechanics, University of Wisconsin, 1971





Som övergripande mål för en kvalificerad dimensionering av bärande och avskiljande konstruktioner måste gälla, att dimensioneringen bygger på realistiska förutsättningar för brand och lastpåverkan och att den leder till konstruktioner, som har en jämn och rimlig säkerhetsnivå i kombination med en god totalökonomi.

Med de metoder, som nu normalt tillämpas för en bestämning av en brandutsatt träkonstruktions beteende och gränstillstånd, kan endast grova bedömningar göras. I praktisk dimensioneringstillsämpning blir den oundvikliga konsekvensen härav konstruktiva lösningar med en starkt varierande säkerhetsnivå och med en kostnad, som kan ligga långt ifrån den optimala.

I Sverige har ett omfattande forskningsarbete genomförts rörande stål- och betongbärverks verkningsätt och dimensionering med hänsyn till brand. I samband härmed har ett från grunden nytt dimensioneringsförfarande utvecklats. För brandpåverkade stålkonstruktioner har forskningsresultaten sammanställts i en handbok, som typgodkänts av Statens Planverk /1.12, 1.13/. För brandpåverkade betongkonstruktioner pågår inom avdelningen för byggnadstekniskt brandskydd, LTH, ett forsknings- och utvecklingsarbete för framtagning av en motsvarande dimensioneringshandbok /1.21/. Dimensioneringsförfarandet bygger på reella brandförlopps-förutsättningar och har goda möjligheter för anpassning till moderna last- och säkerhetsprinciper. Metodiken leder parallellt till en jämnare säkerhetsnivå och minskade kostnader i förhållande till vad som erhålls med de starkt schematiska metoder, som är internationellt förhärskande.

Forskningsinsatser, som kan leda till ett motsvarande funktionsbaserat dimensioneringsförfarande för brandpåverkade träkonstruktioner är angelägna och en nödvändig förutsättning för att stål, betong och trä i framtiden skall kunna konkurrera på likvärdiga villkor som material till bärande och avskiljande byggnadskonstruktioner.

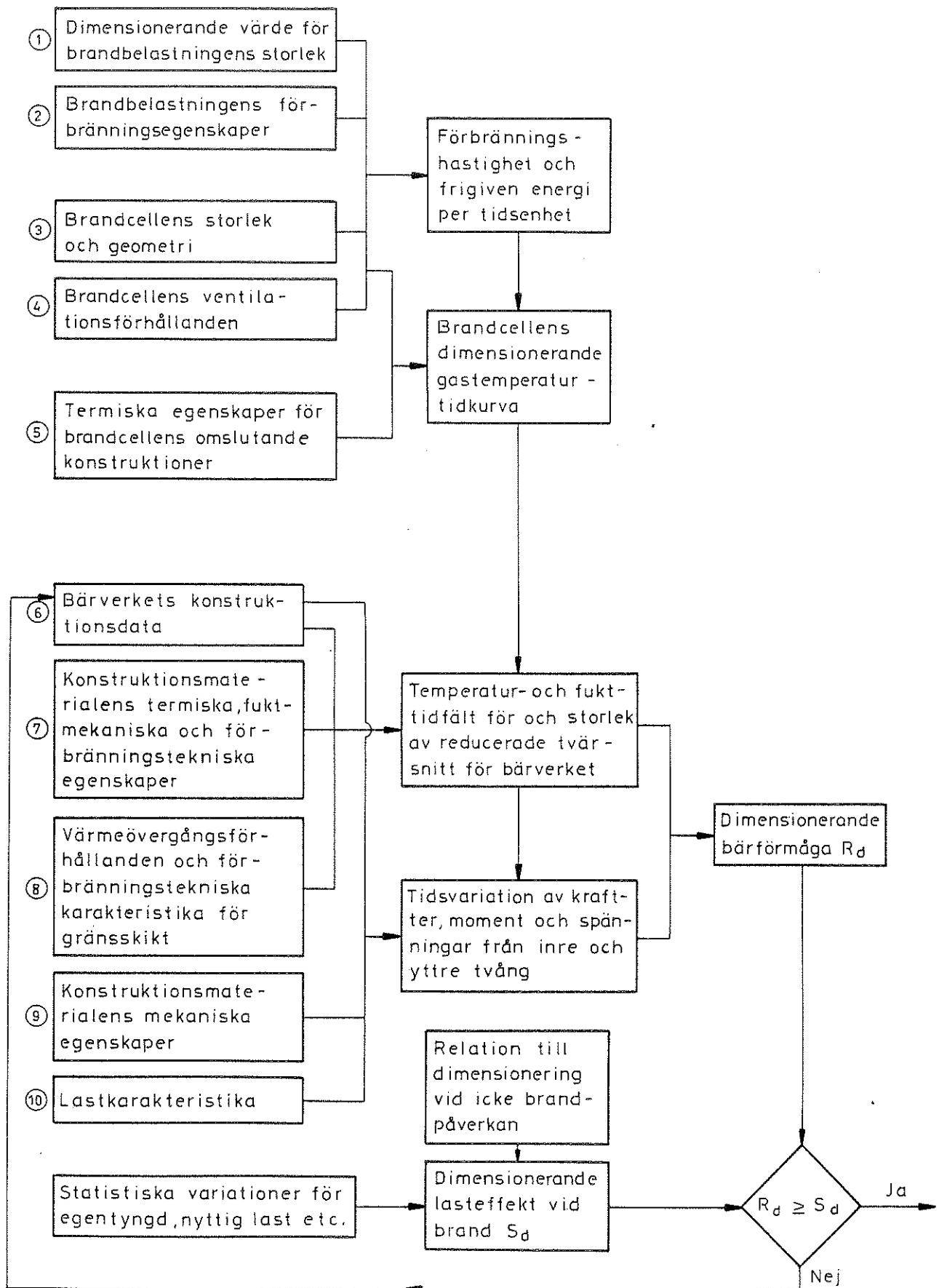
I det följande beskrivs först beräkningsgången för en funktionsbaserad dimensioneringsmetod, som bygger på verkliga brandförloppsförutsättningar - avsnitt 6.1. Aktuellt kunskapsläge och de praktiska förutsättningarna för en tillämpning av metoden behandlas översiktligt med referens till bärverk av massivt tvärsnitt, t ex limträkonstruktioner. I avsnitt 6.2 görs därpå motsvarande bedömning för lätta och sammansatta träkonstruktioner med bärande och/eller avskiljande funktion. I avsnitt 6.3 slutligen behandlas de problem, som är specifika för en brandteknisk dimensionering av skarvar, infästningar och förband.

### 6.1 Massiva träbärverk

Grundläggande för en analytisk brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande konstruktioner är de karakteristika, som gäller för ett brandförlopp i en brandcell. Avgörande ingångsparametrar är därvid /6.1/ - figur 6.1

- (1) dimensionerande värde för brandbelastningens storlek,
- (2) brandbelastningens förbränningsegenskaper,
- (3) brandcellens storlek och geometri,
- (4) brandcellens ventilationsförhållanden,
- (5) termiska egenskaper för de konstruktioner, som omsluter brandcellen.

Tillsammans bestämmer dessa parametrar förbränningshastighet och frigiven energi per tidsenhet samt brandcellens dimensionerande gastemperatur-tidkurva vid ostört brandförlopp.



Figur 6.1 Flödesschema, som beskriver brandteknisk dimensionering av bärverk av brännbart material

För en konstruktion av brännbart material ger denna kurva tillsammans med

- (6) bärverkets konstruktionsdata,
- (7) konstruktionsmaterialets termiska, fuktmekaniska och förbränningstekniska egenskaper,
- (8) värmeövergångsförhållanden och förbränningstekniska karakteristika för gränsskikt

temperaturfältet och fuktfältet samt det reducerade tvärsnittet för det brandpåverkade bärverket och dess delar vid varje tidpunkt av brandförloppet. Med

- (9) konstruktionsmaterialets mekaniska egenskaper,
- (10) lastkarakteristika

som ytterligare ingångsparametrar kan därpå bestämmas tidsvariationen av de krafter, moment och spänningar, som uppkommer i det brandpåverkade bärverket från eventuella inre och yttre deformationshinder, samt tidsvariationen av bärverkets bärförmåga. Det minsta värdet av denna bärförmåga under det fullständiga brandförloppet definierar bärverkets dimensionerande bärförmåga  $R_d$ .

Över karakteristiska värden, partialkoefficienter och lastreduktionsfaktorer för egentygnd, nyttig last etc, valda med hänsyn till att brandpåverkan skall behandlas som en olyckslast, definieras den dimensionerande lasteffekten vid brand  $S_d$  /6.2/. En direkt jämförelse mellan den dimensionerande bärförmågan  $R_d$  och den dimensionerande lasteffekten  $S_d$  avgör därpå om konstruktionen kan fullgöra sin bärande funktion under brandpåverkan eller ej.

Vid dimensioneringen kan brandcellens gastemperatur-tidkurva antingen väljas enligt /6.1/, avsnitt 3.2 (metod I) - exemplifierat genom figur 1.2 - eller bestämmas i den enskilda tillämpningen över brandcellens energi- och massbalansekvationer

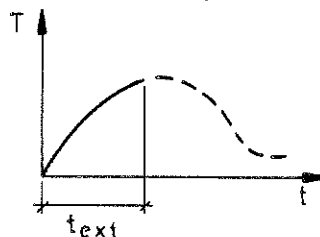
eller på annat likvärdigt sätt, t ex experimentellt eller kombinerat teoretiskt och experimentellt (metod II). Brandförloppskaraktiska enligt metod I förutsätter därvid en brandcell av sådan storlek, som gäller för t ex bostäder, ordinära kontor, skolor, sjukhus, hotell och bibliotek. För brandcell med mycket stor volym - t ex industri- eller idrottshall - ger underlaget enligt metod I en dålig beskrivning av reell brandpåverkan. Detta gäller också för den gastemperatur-tidkurva, som tillämpas vid normenlig brandprovning enligt ISO 834. Något underbyggt underlag, som möjliggör en noggrannare brandteknisk dimensionering vid sådan brandcell med stor volym finns ej för närvarande - jämför vidare kommentarer på sid. 13.

Den dimensionerande brandbelastningen och brandcellens karaktistika utgör alltså basen för bestämning av dimensionerande brandexponering uttryckt som brandcellens dimensionerande gastemperatur-tidkurva, vilken används som input i flödesschemat i figur 6.1. Beröende på den praktiska tillämpningen kan den dimensionerande bärförmågan krävas för

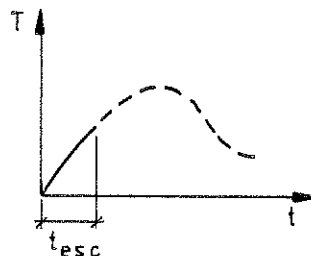
a) fullständigt brandförlopp



b) en del av brandförloppet,  $t_{ext}$ , bestämd med hänsyn till den tid, som krävs för bekämpning av elden under ogynnsamma förhållanden



c) en del av brandförloppet, begränsad av dimensionerande utrymningstid  $t_{esc}$  för byggnaden.



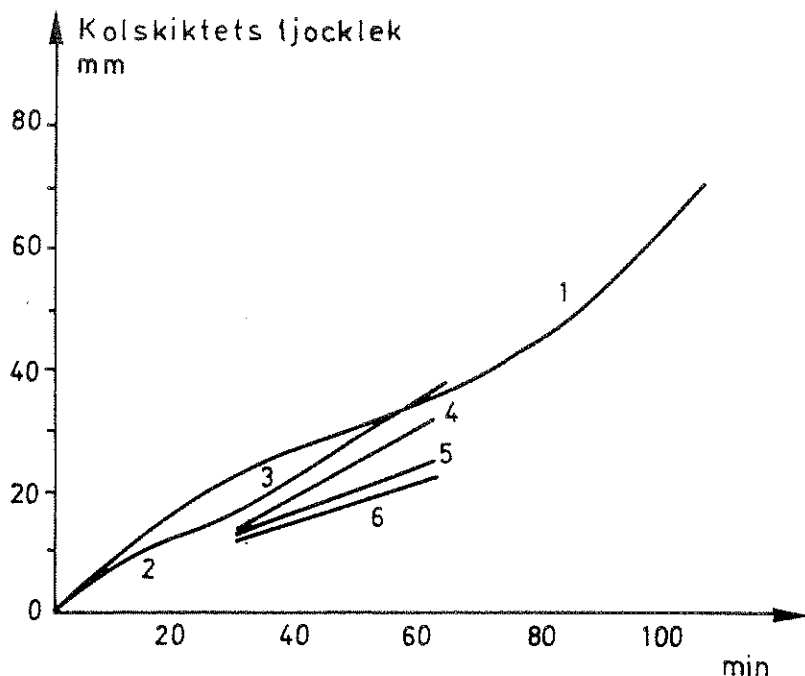
Förekomsten av ett automatiskt släcksystem kan därvid beaktas dimensioneringstekniskt vid valet av dimensionerande brandbelastning. Denna påverkas också av t ex konsekvenserna av ett brott för den bärande konstruktionen med hänsyn till person- och egendomsskador.

Den tid, för vilken bibehållen bärförmåga skall krävas, måste bedömas från fall till fall. Det är helt klart, att en dimensionering grundad på alternativ c), där normalt endast en mycket begränsad del av det totala brandförloppet behöver beaktas, i stället för alternativ a) medför jämförelsevis stora besparingar på grund av klenare dimensioner för det bärande systemet. Avgörande för vilket av alternativen a) - c), som skall ligga till grund för dimensioneringen är - utöver i bestämmelser angivna krav - bl a ekonomiska överväganden av byggherren. Härvid är t ex byggnadens värde, värde av byggnadens innehåll, kostnader vid produktionsbortfall, sanerings- och reparationskostnader relevanta vid bedömningen.

De praktiska möjligheterna att tillämpa den genom figur 6.1 beskrivna dimensioneringsmetoden kommenteras i det följande med referens till träbärverk av massivt tvärsnitt, t ex limträkonstruktioner.

#### 6.1.1 Kolskiktets tillväxt

Som utgångspunkt för en dimensionering kan t ex experimentellt bestämda samband mellan kolskiktets tjocklek och varaktigheten av påverkan användas. Figur 6.2 illustrerar ett sådant samband för den termiska påverkan, som gäller vid en normenlig brandprovning enligt ISO 834 - ekv (1.1).



Figur 6.2 Experimentellt bestämt samband mellan kolskiktets tjocklek och varaktigheten för standardbrand. De olika kurvorna ger resultat från engelska, finska och svenska brandprovningar av massiva eller laminerade träbalkar i furu (kurvorna 1, 2 och 3), furu med brandskyddsfärg (kurva 4), ek (kurva 5) och teak (kurva 6) /6.4, 6.5, 6.6/

Med stöd av sambanden i figur 6.2 och av resultat från andra liknande undersökningar väljs ofta tillväxthastigheten till 0.6 mm/min som representativ för termisk påverkan enligt ISO 834. I /6.18, 6.19/ anges i förhållande härtill väsentligt mer konservativa värden. För pelare tillämpas därvid tillväxthastigheten 0.7 mm/min och för balkar tillväxthastigheten 0.8 mm/min, vad avser vertikala ytor och övre horisontell yta, och 1.1 mm/min, vad avser horisontell underyta. Värdena har införts i DIN 4102, Teil 2.

För en brandteknisk dimensionering av träbärverk för differentierade brandförlopp med gastemperatur-tidkurvor enligt figur 1.2 rekommenderar kommentarer till SBN 1976:1 /6.1/ för kolsiktets tillväxthastighet det i figur 6.3 visade sambandet som



ett provisoriskt underlag - jfr också /6.7/ och /6.13/. Närsambandet har konstruerats genom ett studium av undersökningar, som redovisats av Knublauch /6.8/. Brandvaraktigheten uppskattas som tiden fram till den tidpunkt, då respektive gastemperaturtidkurvas nedåtgående del minskat till 300°C.

En förenklad analytisk modell för en beräkning av kolskiktets djup vid varierande termisk påverkan presenteras i /6.9/. Modellens användbarhet illustreras i figur 6.4 /6.10/. I /6.9/ redovisas också ett praktiskt dimensioneringsunderlag i form av diagram och närmeformler för en beräkning av kolskiktets djup (mm) för limträkonstruktioner vid en brandpåverkan med gastemperaturtidförlopp enligt figur 1.2. Följande närmeformler gäller därvid:

$$\theta = \frac{0,0175f}{\frac{A\sqrt{h}}{A_{\text{tot}}}} \quad (6.1)$$

$$\beta_0 = 1,25 - \frac{0,035}{\frac{A\sqrt{h}}{A_{\text{tot}}} + 0,021} \quad (6.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \beta_0 t && \text{för } 0 \leq t \leq \frac{\theta}{3} \\ \beta &= \beta_0 \left( -\frac{\theta}{12} + \frac{3t}{2} - \frac{3t^2}{4\theta} \right) && \text{för } \frac{\theta}{3} \leq t \leq \theta \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

varvid

$f$  = brandbelastningen i MJ/m<sup>2</sup> omslutningsyta,

$\frac{A\sqrt{h}}{A_{\text{tot}}}$  = brandcellens öppningsfaktor i m<sup>1/2</sup>,

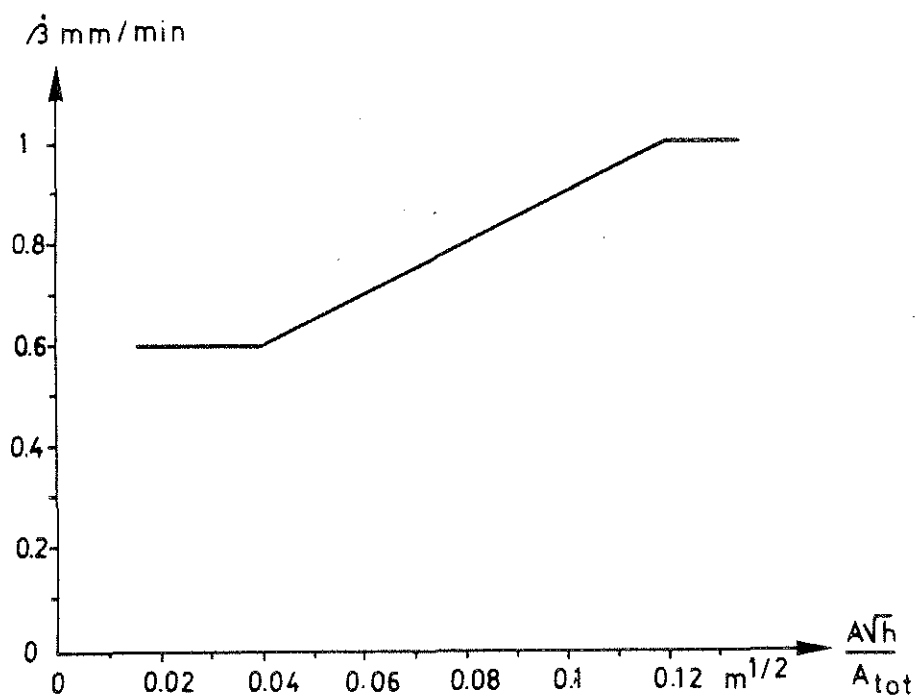
$\theta$  = den tid i min, vid vilken maximal kolskiktstillväxt inträffar för aktuell brandbelastning och öppningsfaktor,

$\beta_0$  = kolskiktstillväxtens initialvärde i mm/min,

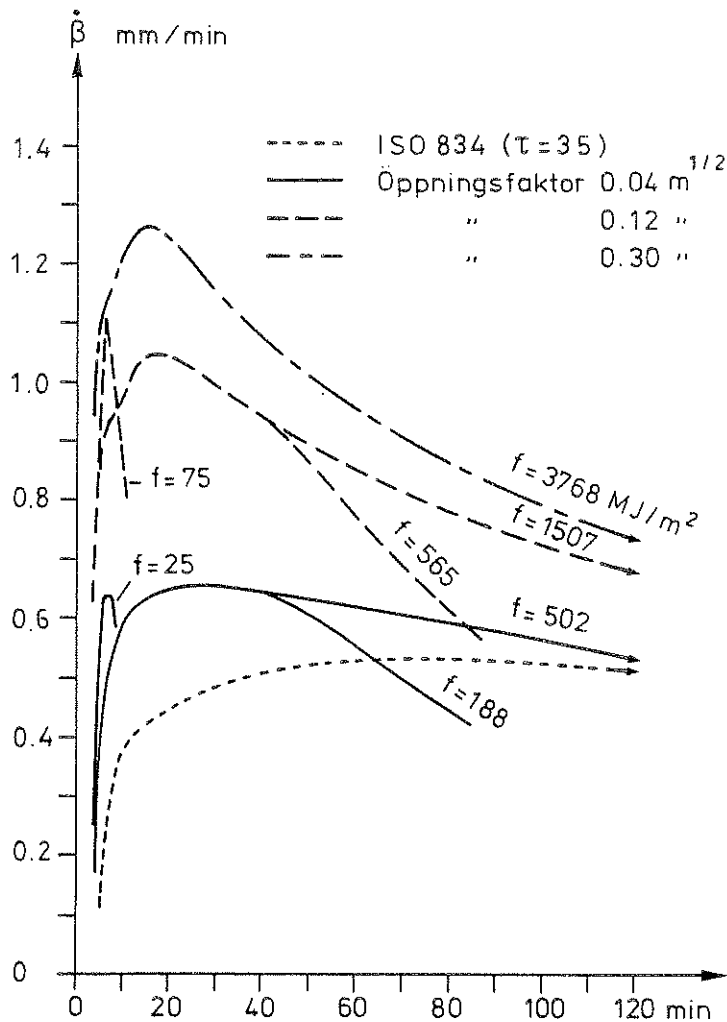
$t$  = tiden i min.

Modellen enligt /6.9/ ger ingen information om temperatur- och fuktfördelning i den icke förkolnade delen av tvärsnittet.

I Fredlund /6.11/ anges en modell för träets pyrolysis, som är mer generell och funktionellt överlägsen i litteraturen angivna modeller. Modellen ger underlag för beräkning av kolskiktets tillväxt vid varierande reella förlopp för brandens tidiga skede och för fullt utvecklad brand. Publikationen anvisar också metoder för en approximativ bestämning av temperatur- och fukt-tillstånden i träbärverket. En vidare utveckling krävs dock för att metodiken skall bli enkelt praktiskt tillämpbar.



Figur 6.3 Efter enkla överväganden konstruerat närme samband mellan kolskiktets tillväxthastighet  $\beta$  för massiv eller laminerad träbalk av gran eller furu och brandcellens öppningsfaktor  $\frac{\sqrt{Ah}}{A_{tot}}$  /6.1, 6.7, 6.13/

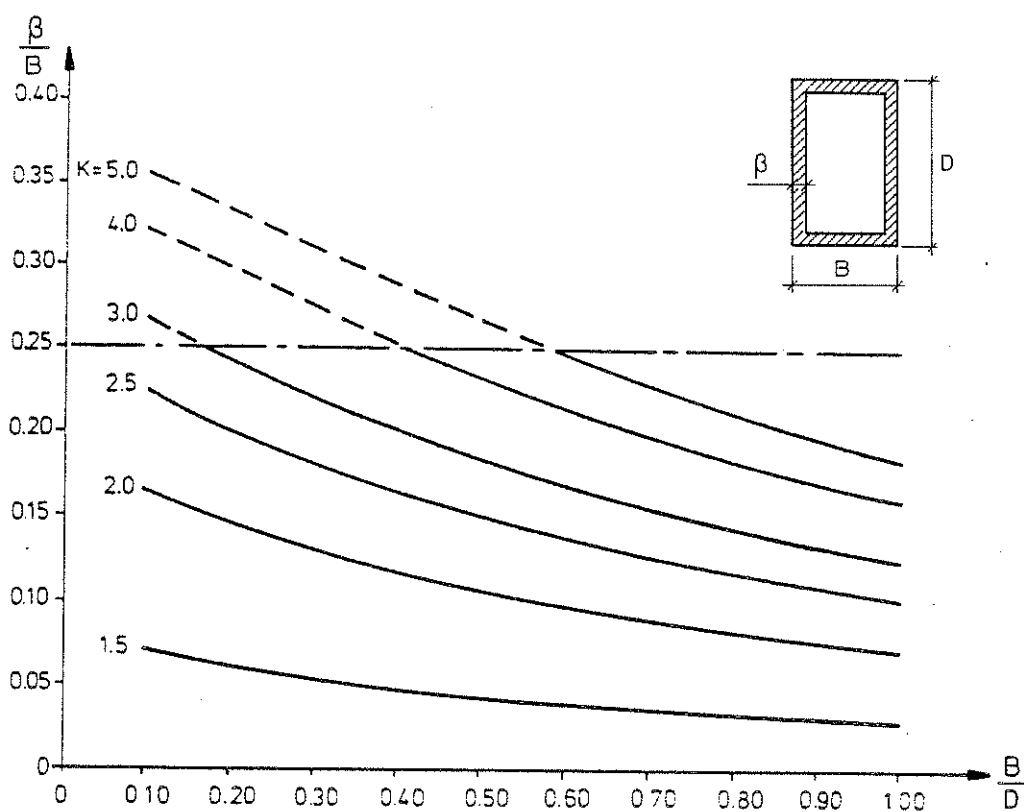


Figur 6.4 Medelförkolningshastigheten  $\dot{\beta}$  som funktion av brandtiden för termisk påverkan enligt standardbrandkurvan (ISO 834), korrigerad till en ugn med karakteristisk tid  $\tau=35$  min samt för varierande gastemperaturtidförlopp, givna av brandbelastning  $f$  och öppningsfaktor  $\sqrt{A_{\text{ö}}/A_{\text{tot}}}/6.10/$

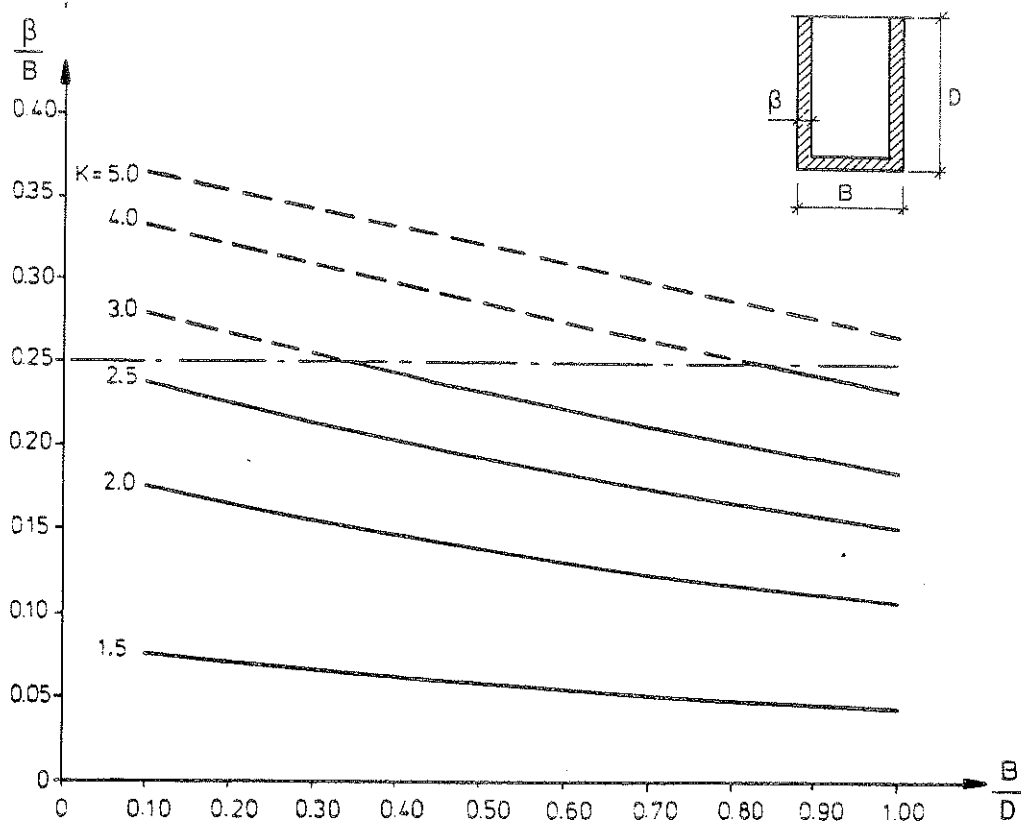
### 6.1.2 Balkar med gränstillstånd i form av böjbrott

Under förutsättning av att kolskiktets tjocklek  $\beta$  under relevant del av brandförloppet bestäms enligt t ex ekv (6.1)-(6.3) samt att förändringen i det icke förkolnade materialets mekaniska egenskaper under brandpåverkan kan beskrivas som en reduktion av brottspänningen med en faktor  $\mu$ , kan samband härledas för bärförmågan av ett tvärsnitt utsatt för ett fyrsidigt och tresidigt brandangrepp.

I figur 6.5 och 6.6 redovisas sådana samband för fyrsidigt respektive tresidigt brandangrepp. Kurvorna ger det mot böjbrott svarande värdet för storheten  $\beta/B$ . Ingångsstorheter är tvärsnittets bredd-höjdförhållande  $B/D$  och tvärsnittets brottsäkerhet med avseende på renodlat böjbrott före brandpåverkan  $K$ . Inom området  $\beta/B > 0.25$  redovisas kurvorna streckmarkerade, eftersom beräkningsförutsättningarna är otillräckligt experimentellt verifierade inom detta område. För faktorn  $\mu$ , som sammanfattat beskriver den oförkolnade tvärsnittsdelens reducerade bärförmåga med hänsyn till förhöjd temperatur och ökad fukthalt under branden, har valts värdet 0.8.



Figur 6.5 Samband mellan storheten  $\beta/B$  och tvärsnittets sidoförhållande  $B/D$  för fyrsidigt brandpåverkad, massiv eller laminerad träbalk med rektangulärt tvärsnitt. Kurvorna förutsätter böjbrott.  $K$  är tvärsnittets brottsäkerhet före brandpåverkan /6.13/



Figur 6.6 Samband mellan storheten  $\beta/B$  och tvärsnittets sidoförhållande  $B/D$  för tresidigt brandpåverkad, massiv eller laminerad träbalk med rektangulärt tvärsnitt. Kurvorna förutsätter böjbrott.  $K$  är tvärsnittets brottsäkerhet före brandpåverkan /6.13/

### 6.1.3 Balkar med gränstillstånd i form av instabilitetsbrott

Om risken för vippning måste beaktas, kompliceras problemet genom att instabilitetslasten successivt minskar under brandförloppet på grund av den fortskridande tvärsnittsreduktionen och den därmed ökande slankheten. Risken accentueras ytterligare, om eventuella balkavstyvningar kollapsar eller försvinner under branden.

I /6.12/ redovisas ett omfattande dimensioneringsunderlag för brandpåverkade rektangulära träbalkar med avseende på risken för vippning. Sammanfattat innebär dimensioneringen följande.

Tvårsnittets oförbrända del beräknas på det sätt, som redovisats i avsnitt 6.1.1. Slankheten och spänningar beräknas för det reducerade tvärsnittet. Tiden till brott definieras som den tid, som förflyter till dess att spänningarna uppnår ett visst värde, som beror av slankheten, definierad enligt formeln

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_{bk}}{\sigma_E}} \quad (6.4)$$

där  $\sigma_{bk}$  är ett karakteristiskt värde på böjbrottpåkänningen, beräknad med antagande om linjär spänningsfördelning. I SEN 80 anges  $\sigma_{bk} = 3\sigma_{ma}$ , där  $\sigma_{ma}$  är tillåten böjtryckpåkänning.  $\sigma_E$  är största böjtryckpåkänning för den enligt elasticitetsteorin beräknade vipplingslasten. Tillåten böjtryckpåkänning  $\sigma_{ma}$  reduceras med hänsyn till vippning genom multiplikation med faktorn  $\kappa_v(\alpha)$  enligt funktionen

$$\left. \begin{aligned} \kappa_v(\alpha) &= 1 && \text{då } \alpha \leq 0.6 \\ \kappa_v(\alpha) &= 1.37 - 0.61\alpha && \text{då } 0.6 < \alpha \leq 1.4 \\ \kappa_v(\alpha) &= 1/\alpha^2 && \text{då } \alpha > 1.4 \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

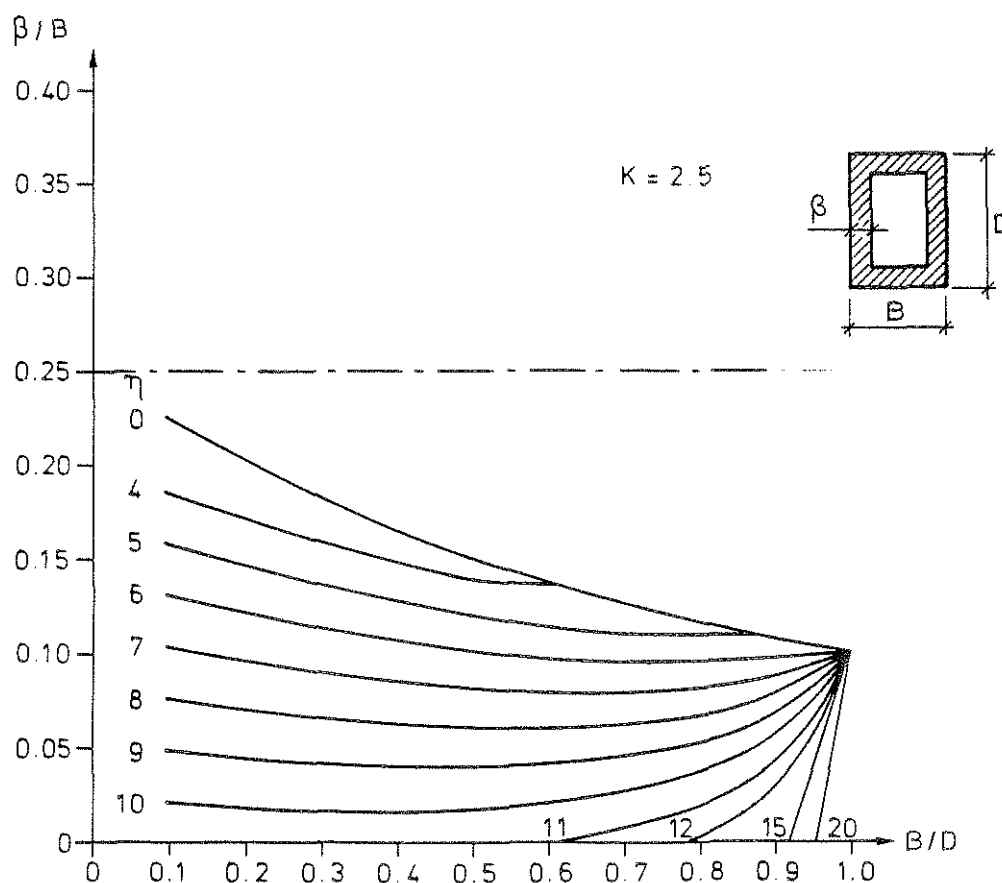
Som bivillkor gäller att balkens minsta tvärmått från början inte understiger 4 gånger maximalt inträngningsdjup för kolskiktet.

Med känt värde för kolskiktets tjocklek  $\beta$  under relevant del av brandförloppet kan enligt den beskrivna tekniken ett uttryck för det kritiska värdet på kvoten  $\beta/B$  härledas som funktion av  $K$ ,  $B/D$  samt en parameter  $\eta$ , som uttrycker känsligheten för vippning av en icke brandexponerad balk. Parametern definieras som

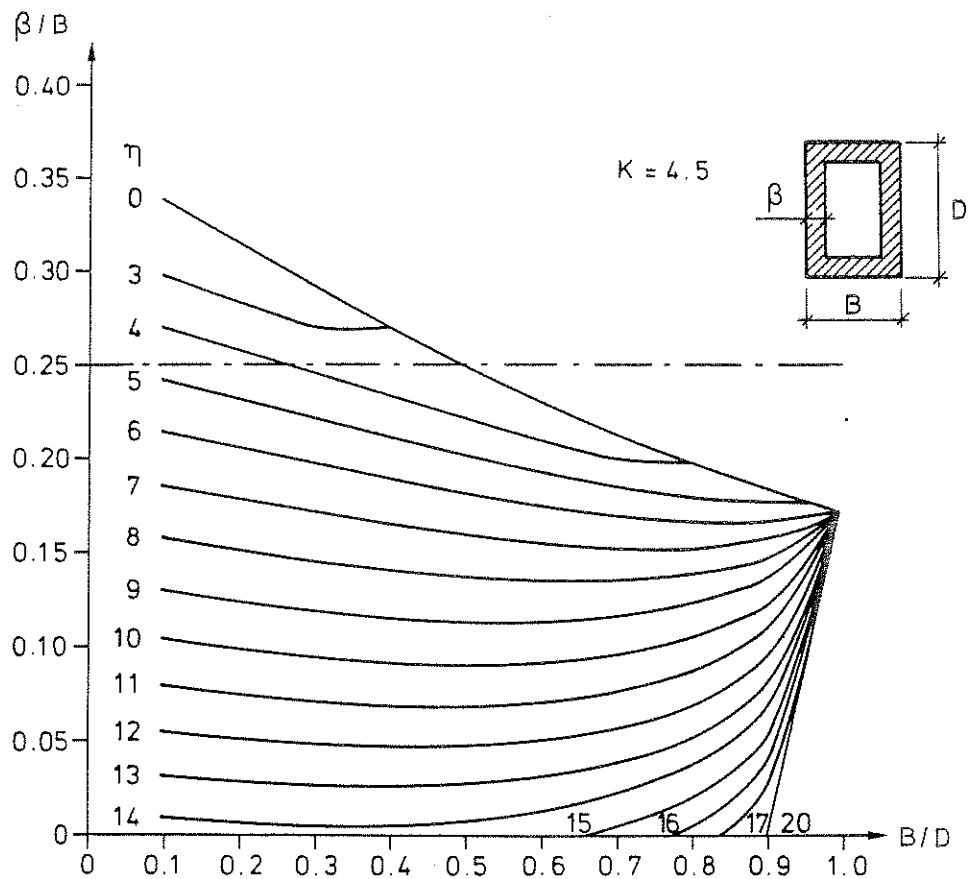
$$\eta = \sqrt{\frac{LD}{mB^2}} \quad (6.6)$$

där  $L$  är balkens längd och  $m$  en koefficient, som beror av balkens belastning och inspänningsförhållanden och som för normala praktiska tillämpningar kan hämtas ur handböcker.

I figur 6.7 och 6.8 redovisas som exempel lösningar till problemet för fallet fyrsidigt brandangrepp vid säkerhetsfaktorn  $K = 2.5$  och  $4.5$  med kvoten  $\beta/B$  som funktion av breddhöjdförhållandet  $B/D$  vid varierande värden på parametern  $n$ . Motsvarande samband existerar också för tresidigt brandangrepp /6.12/.



Figur 6.7 Kvoten  $\beta/B$  som funktion av breddhöjdförhållandet  $B/D$  för fyrsidigt brandangrepp och säkerhetsfaktorn  $K = 2.5$  mot böjbrott före brand vid varierande värden på parametern  $n$  /6.12/



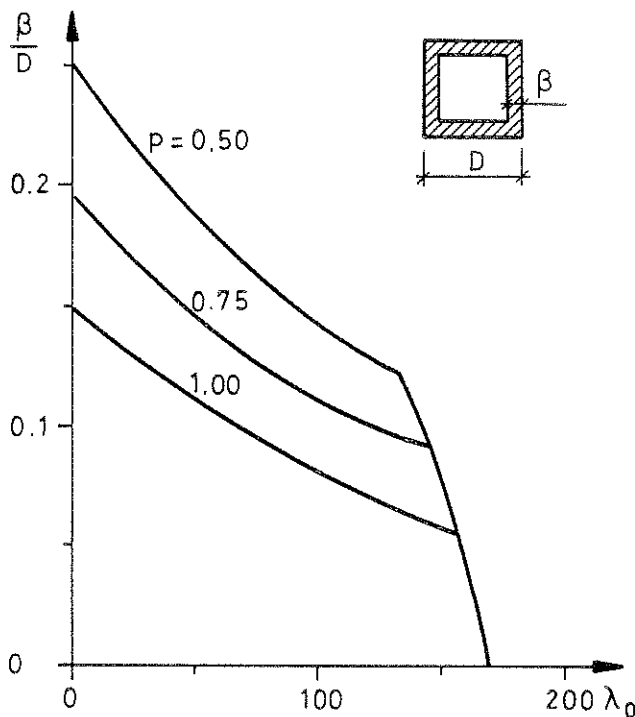
Figur 6.8 Kvoten  $\beta/B$  som funktion av bredd-höjdförhållandet  $B/D$  för fyrsidigt brandangrepp och säkerhetsfaktorn  $K=4.5$  mot böjbrott före brand vid varierande värden på parametern  $\eta$  /6.12/

#### 6.1.4 Pelare med gränstillstånd i form av knäckning

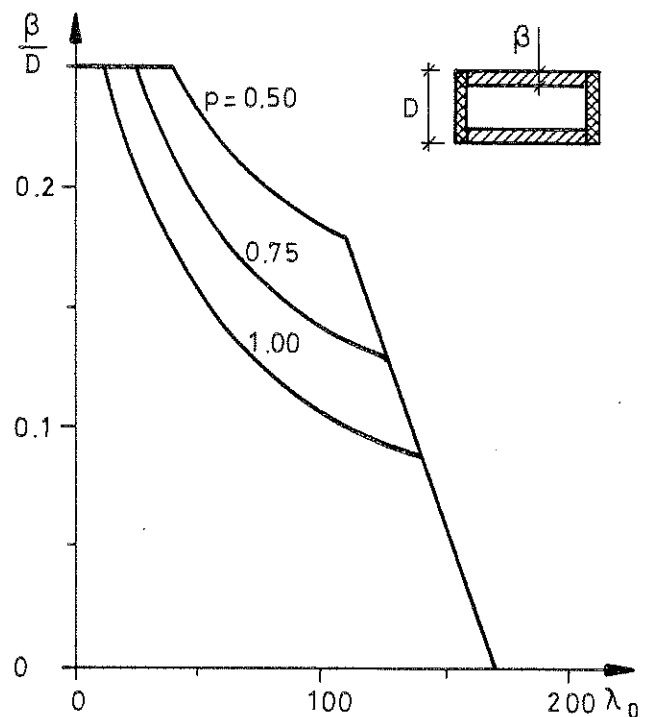
Vid dimensionering av pelare utan knäckningsrisk kan motsvarande förfarande tillämpas som för balkar. Om risken för knäckning måste beaktas, kompliceras problemet genom att denna risk hela tiden ökar under brandförloppet på grund av den successiva tvärsnittsreduktionen och det därmed ökande slankhetstalet.



Tvårsnittets oförbrända del bestäms på samma sätt som för balkar enligt avsnitt 6.1.1. Slankhetstalet och spänningarna beräknas för det reducerade tvårsnittet. Tiden till brott definieras som den tid, som förflyter till dess spänningarna uppnår ett visst värde, som beror av slankhetstalet. Enligt /6.13/ kan detta värde tillåtas uppgå till dubbla den vid normalt lastfall tillåtna spänningen. Som bivillkor tillåts ej större slankhetstal än 170 samt att pelarsektionens minsta tvårmått från början ej understiger 4 gånger maximalt inträngningsdjup för kol-siktet.



Figur 6.9 Samband för bestämning av mot knäckning svarande kolskiktstjocklek  $\beta$  vid varierande initieellt slankhetstal  $\lambda_0$  och förhållande  $p$  mellan pålagd last och vid vanligt lastfall tillåten last /6.13/



Figur 6.10 Motsvarande samband som figur 6.9 men gällande då branden endast kan angripa två motstående ytor. Knäckning förutsätts ske vinkelrätt mot de brandutsatta ytorna /6.13/

Vid enligt ekv (6.1)-(6.3) bestämd tjocklek  $\beta$  för kolskiktet kan med dessa antaganden sambanden enligt figur 6.9 och 6.10 beräknas. Ur figur 6.9 kan den mot brott svarande kolskiktstjockleken bestämmas för en fyrsidigt brandpåverkad pelare med kvadratisk sektion som funktion av initieellt slankhetstal  $\lambda$  och förhållandet  $p$  mellan pålagd last och vid vanligt lastfall tillåten last. I figur 6.10 ges motsvarande samband, då branden endast kan angripa två motstående ytor, varvid knäckningen förutsätts ske vinkelrätt mot de brandutsatta ytorna.

#### 6.1.5 Slutsatser

Den beskrivna dimensioneringsmetoden för brandutsatta träbärverk av typen limträkonstruktioner bygger på förenklade antaganden för metodens samtliga komponenter. Som en följd härav är metodens tillämpbarhet begränsad till överslagsmässiga beräkningar, som dock innebär ett väsentligt framsteg i förhållande till konventionell dimensionering, baserad på brandteknisk klassificering och resultat från standardbrandprovningar.

En ökning av dimensioneringsmetodens precision förutsätter forskningsinsatser av den typ, som ovan behandlats för komponenterna kolskiktstillväxt, termiska egenskaper, temperatur- och fuktillstånd samt mekaniska egenskaper. Med förbättrad kunskap om dessa komponenter kan verkningsätt och bärförmåga teoretiskt analyseras för olika typer av brandpåverkade träkonstruktioner på ett mer meningsfullt och underbyggt sätt. Konstruktionerna kan därvid förekomma som direkt brandexponerade eller som exponerade först efter en viss brandtid. Aktuella brottmoder utgör böjning, avskärning, vridning, knäckning, vippning. En analys av spik- och bultförbands verkningsätt ingår tillsammans med en dimensionering, som gör dessa jämnstarka med det brandpåverkade bärverket i övrigt. Detta kommenteras vidare i avsnitt 6.3.

Beskriven bärverksanalys underlättas genom befintlig programvara för strukturmekaniska högtemperaturberäkningar, primärt utvecklade för betong- och stålkonstruktioner.

## 6.2 Lätta och sammansatta träkonstruktioner

För brandpåverkade, lätta och sammansatta träkonstruktioner med bärande och/eller avskiljande funktion är dagens kunskap i huvudsak begränsad till resultat från standardbrandprovningar och litteratursammanställningar av sådana resultat. I Sverige för olika brandtekniska klasser typgodkända konstruktioner finns därvid förtecknade i Godkännandelista B från Statens Planverk. En översiktlig sammanställning härur redovisas i /6.15/, vad gäller typgodkända vägg- och bjälklagskonstruktioner av trä och/eller träbaserat material - figur 6.11 och 6.12. De internationellt mest omfattande sammanställningarna av resultat från standardbrandprovningar och tillhörande brandtekniska klassificeringar ges i /6.14, 6.19/.

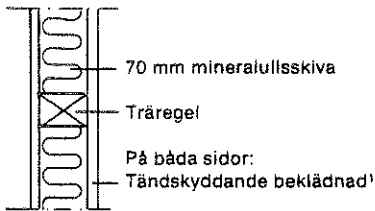
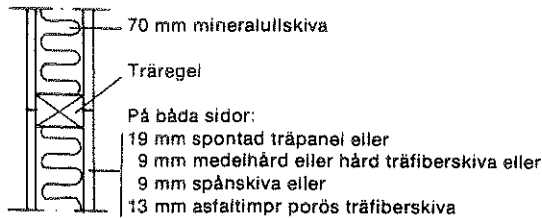
Samtliga publicerade resultat för lätta och sammansatta träkonstruktioners verkningssätt och bärförmåga vid brand gäller för en termisk påverkan enligt standardbrandprovning - ISO 834, ekv (1.1). Några experimentella resultat, som belyser verkningssätt och bärförmåga vid en för naturlig brand mer representativ påverkan, föreligger ej. Ej heller har några analytiska metoder utvecklats för konstruktionstypens brandtekniska dimensionering.

Forskningsinsatser, som kan leda till utveckling av sådana analytiska metoder, har därför hög angelägenhet. Detta gäller såväl för termisk påverkan enligt ISO 834 som för verklig brandpåverkan, beskriven enligt t ex de i figur 1.2 redovisade gastemperatur-tidkurvorna. I utvecklingen ingår därvid experimentella studier i fullskala eller reducerad skala för en verifiering av de analytiska beräkningsmodellerna. En central del-forskningsuppgift utgör en kombinerad teoretisk och experimentell insats för att ta fram ett underlag, ur vilket inbrän-

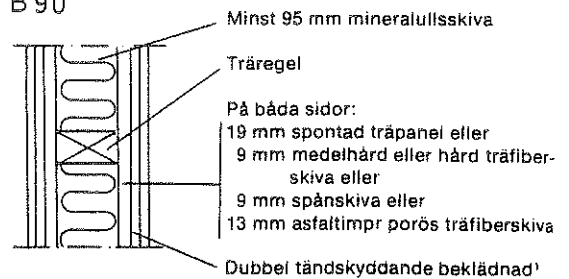
ningsdjupet kan förutberäknas för tunna skivor av trä och träbaserat material vid olika termiska påverkansförlopp - figur 6.13 /6.14/. Ett teoretiskt och experimentellt studium av möjligheterna för att öka de lätta och sammansatta träkonstruktionernas brandmotstånd genom brandfördröjande tillsatser är ett annat angeläget forskningsprojekt inom området.

## Bärande och avskiljande väggar

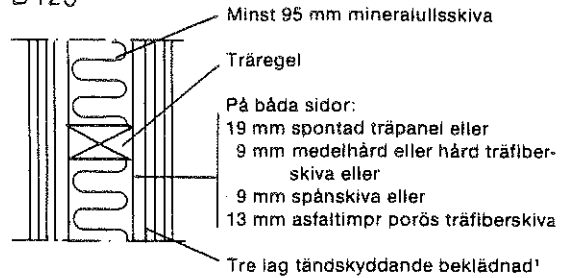
B 30



B 90

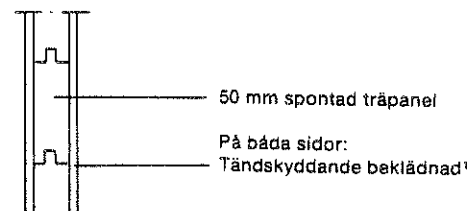
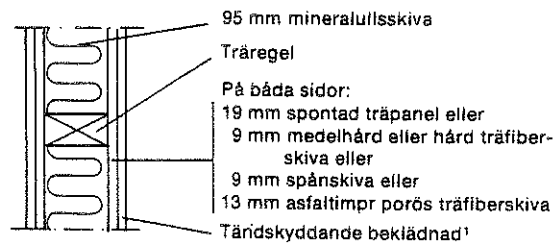
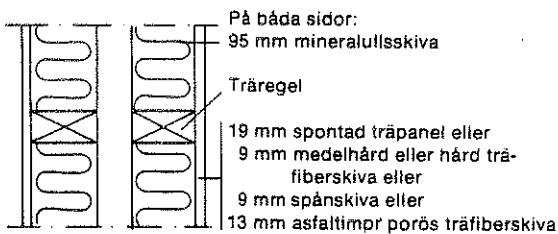


B 120

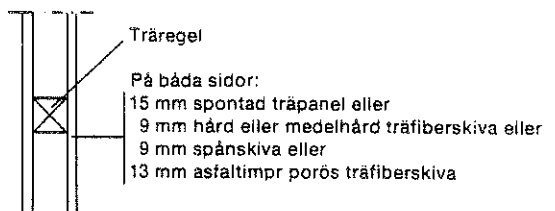
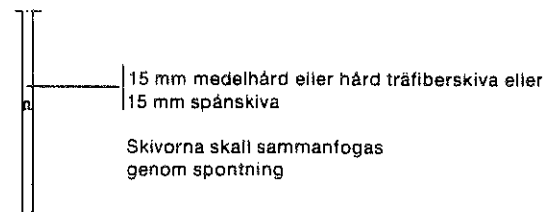
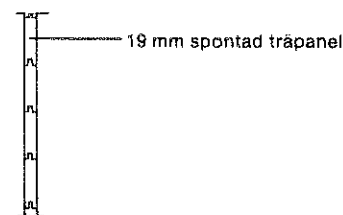


## Enbart avskiljande väggar

B 60



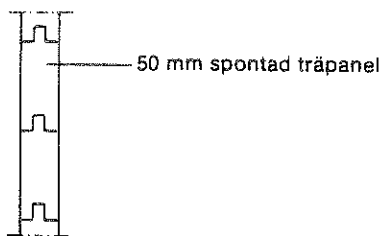
B 15



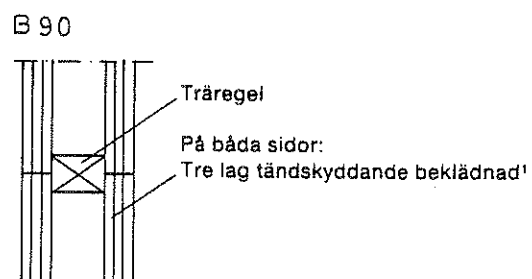
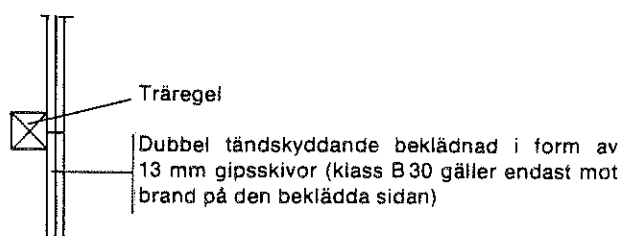
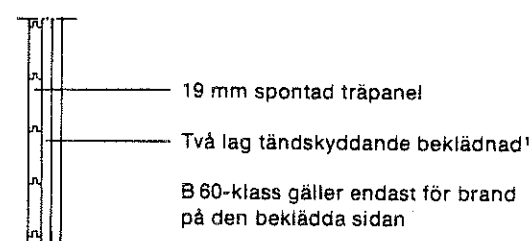
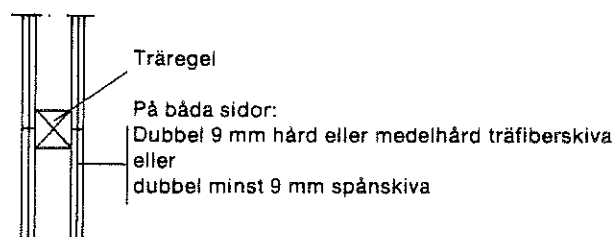
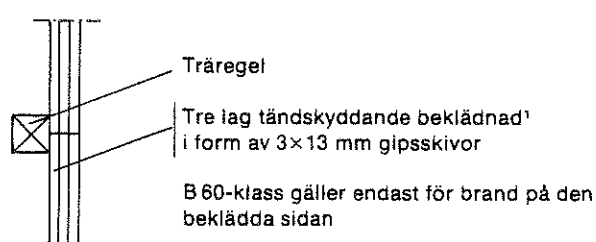
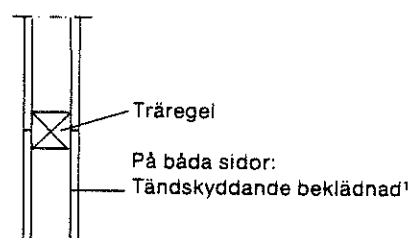
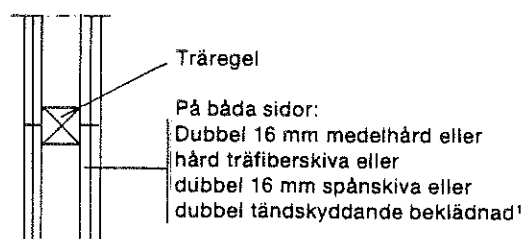
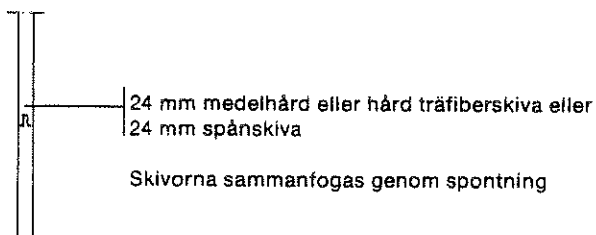
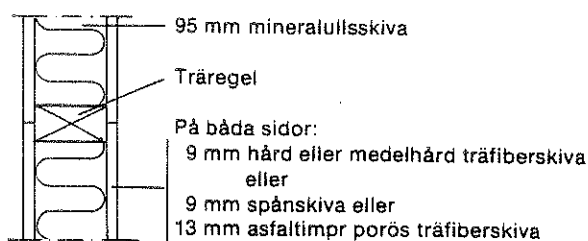
<sup>1</sup> Tändskyddande beklädnad kan tex vara 10–13 mm gips-skivor, 12 mm träfiberskiva med mineraliskt ytskikt av godkänd typ "godkänd såsom med beklädnad av obrännbart material likvärdig beklädnad på invändiga vägg- och taktytor". Se även godkännandelista B från Statens Planverk.

Figur 6.11 För olika brandtekniska klasser typgodkända väggar av trä och/eller träbaserat material. För vidare konstruktiva detaljanvisningar hänvisas till /6.15/

B 30

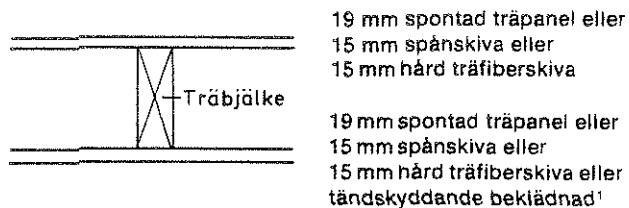
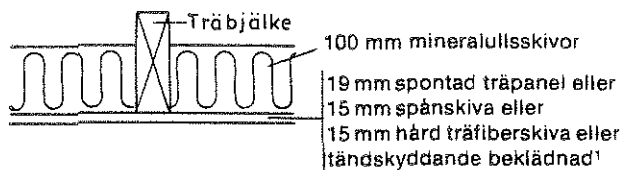


B 60

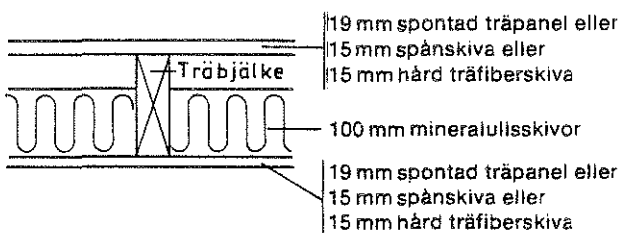
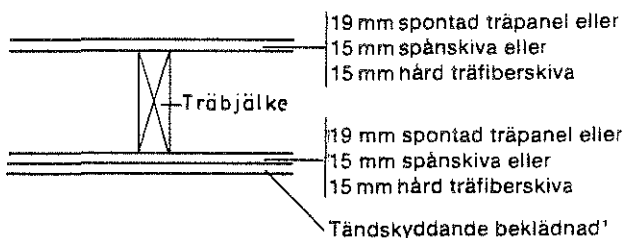
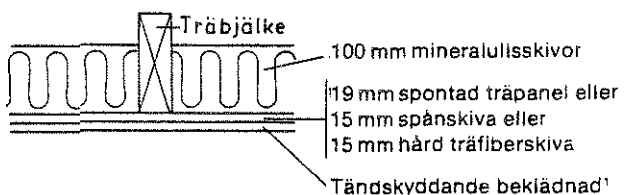


Figur 6.11 Forts

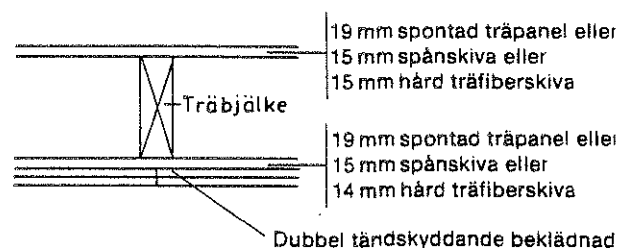
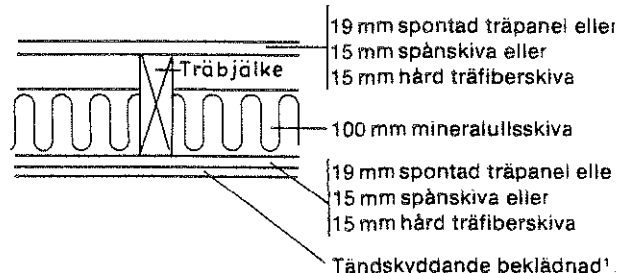
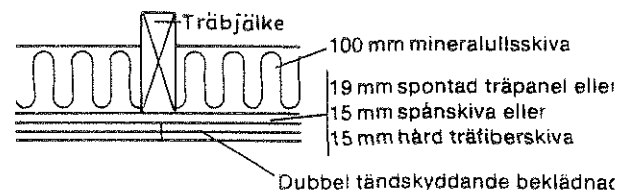
B 15



B 30

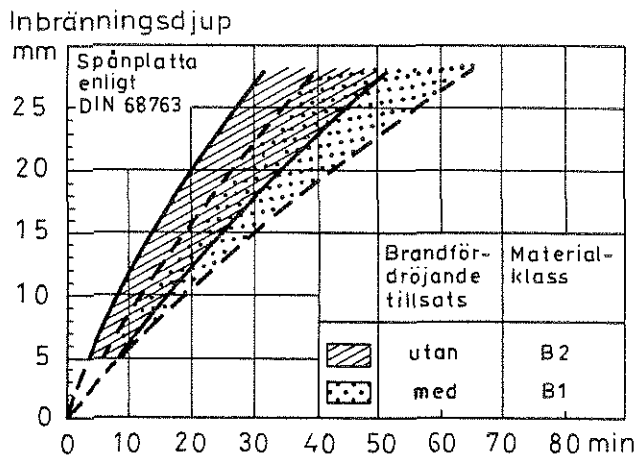


B 60



<sup>1</sup> Tändskyddande beklädnad kan t ex vara 10–13 mm gip skivor, 12 mm träfiberskiva *med mineraliskt ytskikt* godkänd typ "godkänd såsom med beklädnad av obrännbart material likvärdig beklädnad på invändiga vägg- o/ taktor". Se även godkännandelista B från State Planverk.

Figur 6.12 För olika brandtekniska klasser typgodkända bjälklag av trä och/eller träbaserat material. För vidare konstruktiva detaljanvisningar hänvisas till /6.15/



Figur 6.13 Variationsområden för experimentellt bestämt inbränningsdjup för spånplatta med densiteten  $\geq 600 \text{ kg/m}^3$  vid en termisk påverkan enligt standardbrandprovning, ISO 834 /6.14/

### 6.3 Skarvar, infästningar och förband

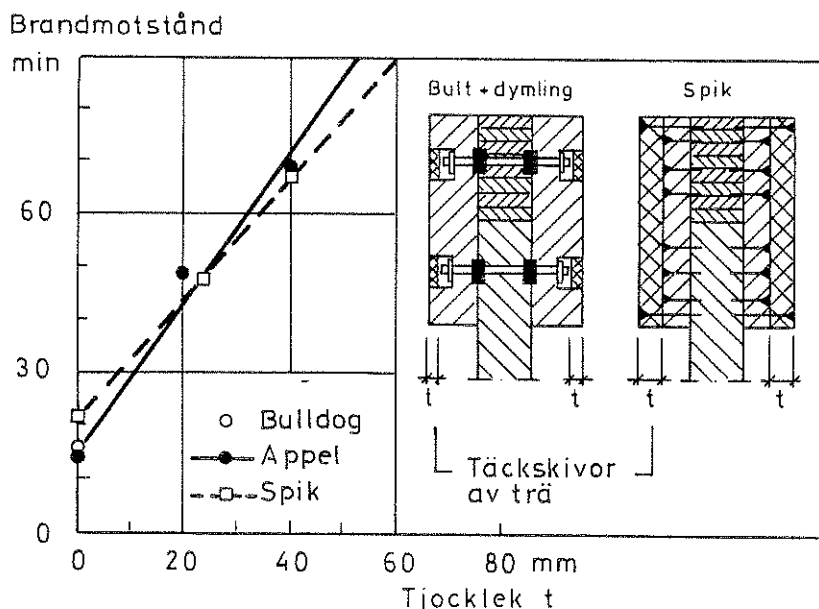
För bärande träkonstruktioner utgör skarvar, infästningar och förband kritiska detaljer, som kräver speciell uppmärksamhet vid projektering och dimensionering för brandpåverkan. I de finska byggnadsbestämmelserna anges som övergripande krav härför: "Metalldelar, som ingår som bärande element i träkonstruktioner, skall skyddas på ett sådant sätt, att de får minst samma brandmotstånd som konstruktionen i övrigt. För att uppnå detta skydd kan t ex användas trä, spånplattor eller mineralull av tillräcklig tjocklek. Metalliskt material, som är i direkt kontakt med träet, skall isoleras så att temperaturen inte överstiger  $300^\circ \text{C}$  under den krävda brandmotståndstiden." Förslag föreligger om att införa konstruktionsregeln i norsk standard för beräkning av träbärverks brandmotstånd /6.20/.

Resultat av omfattande standardbrandprovningar av skarvar, infästningar och förband redovisas i /6.14, 6.19, 6.21/. En fragmentarisk resultatillustration ges i figur 6.14, som visar ökningen i brandmotstånd för skjuvbelastade bult- och spikförband genom limmade respektive spikade täckskivor av trä. I /6.20/ redovisas resultat från några orienterande studier med



termisk påverkan enligt ISO 834 av möjligheterna att förbättra träförbands brandmotstånd genom en isolering av ståldetaljerna med en brandskyddsfärg (3 lag Unitherm) eller ett bruk (20 mm tjock Pyrocrete 102).

Brott i skarvar, infästningar och förband vid en brandpåverkan sker normalt genom att stora lokala deformationer inträffar inom kontaktområdet trä/stål. Detta verifieras i de relativt fåtaliga experimentella undersökningar, som publicerats /6.21/ - /6.24/.



Figur 6.14 Brandmotståndet för skjuvbelastade bult- och spikförband som funktion av tjockleken  $t$  för limmade respektive spikade täckskivor av trä /6.14/

Någon analytisk modell, som möjliggör en beräkning av  $t$  ex ett spik- eller bultförbands verkningssätt och bärförmåga vid brand finns ej. Däremot finns sådana modeller för motsvarande tillstånd vid ordinära rumstemperaturförhållanden. Dessa modeller är väl ägnade att bilda en fenomenologisk utgångspunkt för en modellutveckling, som täcker också brandsituationen. En sådan utveckling innehåller följande komponenter:

- \* En två- eller tredimensionell modell för beräkning av kol-skiktstillväxt, temperaturgradient och fuktfördelning för träet kring en uppvärmd spik eller bult,
- \* en experimentell bestämning av kraft-deformationstillståndet för en enskärig och tvåskärig dorn vid några olika kol-skikts-, temperatur- och fukttillstånd vid varierande dorn-diameter, trätjocklek och vinkel mellan kraft- och fiberriktning,
- \* en motsvarande experimentell undersökning för enskärig och tvåskärig bult för en kompletterande bestämning av effekten av friktion i förbandet,
- \* en tillämpning - för varierande termisk påverkan - av vid dessa undersökningar erhållna data på tillgängliga modeller för förbands verknings sätt och bärförmåga - se t ex /6.25/, i vilken en motsvarande tillämpning redovisas för skruvförband i brandpåverkat stålbärverk,
- \* en experimentell verifiering av teorien i modell- eller fullskala.

Ett forskningsprojekt av beskriven struktur har hög angelägenhet. Detta gäller också ett mer begränsat projekt för att ta fram ett dimensioneringsunderlag för en bestämning av erforderlig tjocklek för täckskivor och annan typ av bult- och spikförbands isolering vid reell brandpåverkan, beskriven genom t ex brandcellens gastemperatur-tidkurvor enligt figur 1.2.

#### REFERENSER

- /6.1/ STATENS PLANVERK, "Kommentarer till SBN 1976: 1". Liber Förlag, Stockholm 1976

- /6.2/ STATENS PLANVERK, SBN AVD 2A, "Bärande konstruktioner med kommentarer: Säkerhetsbestämmelser baserade på sannolikheteoretiska principer och partialkoefficientmetoden". PFS 1979:7
- /6.3/ STATENS PLANVERK, "Svensk Byggnorm 1980". Liber Förlag, Stockholm 1980
- /6.4/ ÖDEEN, K, "Fire Resistance of Glued Laminated Timber Structures". Symposium No 3, "Fire and Structural Use of Timber in Buildings", held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts, October 25, 1967, London 1970
- /6.5/ TENNING, K, "Limmade träbalkar, brandförsök och erfarenheter". "Träkonstruktioners brandstabilitet", Symposium vid Chalmers Tekniska Högskola, 18 juni 1962, CTHs handlingar nr 274, Göteborg 1963
- /6.6/ TENNING, K, "Glued Timber Beams: Fire Tests and Experience in Practice". Symposium No 3, "Fire and Structural Use of Timber in Buildings", held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts, October 25, 1967, London 1970
- /6.7/ PETERSSON, O, "Differentierad, brandteknisk dimensionering av träkonstruktioner". Tre i tiden, Treopplysningsrådet, Oslo, 1975, s 93
- /6.8/ KNUBLAUCH, E, "Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2 im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer". BAM-Berichte Nr. 16, Berlin 1972

- /6.9/ HADVIG, S, "Charring of Wood in Building Fires - Practice, Theory, Instrumentation, Measurements". Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, Lyngby 1981
- /6.10/ HADVIG, S, "Indbraending og temperaturforhold i trae under brand". Nordisk traesympodium, Aalborg, 28-30 maj 1979, Nordisk trätidskrift, Nr 6, 1979, s 115-124
- /6.11/ FREDLUND, B, "Modell för beräkning av temperatur och fuktfördelning samt reducerat tvärsnitt i brandpåverkade träkonstruktioner". Intern rapport IR79-2, Institutionen för Byggnadsstatik, Lunds tekniska högskola, Lund 1979
- /6.12/ FREDLUND, B, "Structural Design of Fire Exposed Rectangular Laminated Wood Beams with Respect to Lateral Buckling". Report No. 79-5, Department of Structural Mechanics, Lund Institute of Technology, Lund 1979
- /6.13/ PETTERSSON, O, ÖDEEN, K, "Brandteknisk dimensionering av byggnadskonstruktioner - principer, underlag, exempel". Liber Förlag, Stockholm 1977
- /6.14/ KORDINA, K, MEYER-OTTENS, C, "Brandverhalten von Holzkonstruktionen". Informationsdienst Holz, EGH, München 1977
- /6.15/ TRÄINFORMATION, "Trä och brand". Stockholm 1974
- /6.16/ LIE, T T, "A Method for Assessing the Fire Resistance of Laminated Timber Beams and Columns". Canadian Journal of Civil Engineering 2, 1977

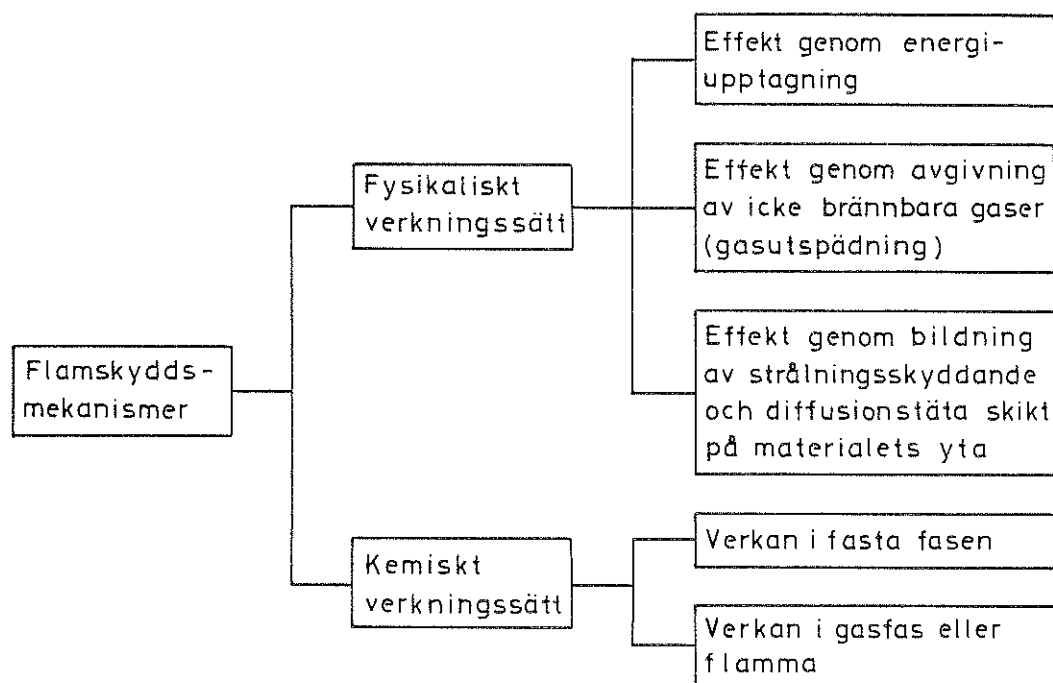
- /6.17/ PETERSSON, O, JÖNSSON, R, "Fire Design of Wooden Structures". International Seminar "Three Decades of Structural Fire Safety", held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts, UK, 22/23 February 1983, pp 229-246
- /6.18/ MEYER-OTTENS, C, "Junctions in Wood Structures - Total Construction". International Seminar "Three Decades of Structural Fire Safety", held at the Fire Research Station, Borehamwood, Herts, UK, 22/23 February 1983, pp 247-259
- /6.19/ KORDINA, K, MEYER-OTTENS, C, "Holz - Brandschutz - Handbuch". Holzwirtschaftlicher Verlag, Düsseldorf, 1983
- /6.20/ RIMSTAD, N O, "Ståldeler i limtrekonstruksjoner - beskyttelsesmetoder". Nordisk traesymposium, Aalborg, 28-30 maj, 1979, Nordisk trätidskrift, Nr 6, 1979, s 129-133
- /6.21/ INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, "Untersuchungsbericht Nr. 77 169 über die Prüfung von Verbindungen zwischen Brett-schichtverleimten Holzbauteilen auf Brandverhalten in zwei Versuchsabschnitten: Teil I - Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von auf Abscheren beanspruchten Anschlüssen von Trägern an Stützen. Teil II - Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von auf Abscheren beanspruchten Anschlüssen von Zuggliedern". Aufgestellt für die Entwicklungsgemeinschaft Holz (EGH), München, 1977
- /6.22/ PERCIVAL, D H, SUDDARTH, S K, "An Investigation of the Mechanical Characteristics of Truss Plates on Fire-Retardant Treated Wood". Forest Products Journal, Vol. 21, No. 1, January 1971

- /6.23/ JOHNSON, J W, "Tests of Fire-Retardant Treated and Untreated Lumber-Plywood Nailed and Stapled Joints". Forest Products Journal, Vol. 29, No. 4, April 1979
- /6.24/ AHLÉN, B, MÅNSSON, L, "Experimentell undersökning av ståldetaljers inverkan på brandmotståndet hos limträ". Byggforskningen, Rapport R48:1979
- /6.25/ PLEM, E, "Theoretical and Experimental Investigations of Point Set Structures". Swedish Council för Building Research, Document D9:1975



7.1    Inledning

Genom flamskyddsmedel kan träkonstruktioners brandbeteende förändras i olika avseenden under ett brandförlopps olika skeden - långsam pyrolys under uppvärmningsskedet, antändning av bildade pyrolysgaser, aktiv pyrolys och förbränning med flamma samt efterglödning, dvs oxidation av bildat träkol. Aktuella mekanismer för flamskyddsmedels verkan kan därvid grovt indelas i mekanismer med fysikaliskt och kemiskt verkningssätt - figur 7.1 /7.1/. Till flamskyddsmedelseffekt genom fysikalisk verkan räknas energiupptagning, avgivning av icke brännbara gaser samt bildning av strålningsskyddande och diffusionstäta skikt på materialets yta. För de kemiska mekanismerna skiljs mellan verkan i fast fas och verkan i gasfas eller flamma.



Figur 7.1    Mekanismer för flamskyddsmedels verkan

För många kemikalier erhålls den flamskyddande effekten genom samverkan mellan flera fysikaliska eller mellan fysikaliska och kemiska mekanismer. Effekten kan styras genom blandningar av flamskyddskemikalier, t ex på så sätt, att de kompletterar va-

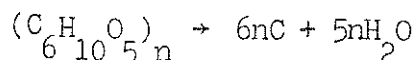


randra över ett fullständigt brandförlopp. Relevanta fysikaliska och kemiska storheter för de olika flämskyddsmekanismerna är t ex värmeledningsförmåga, specifik värmekapacitet, värmeinhåll, smältpunkt och smältvärme, viskositet hos smälta, ångtryck och ångbildningsvärme, vattenlöslighet.

I det följande vidareutvecklas verkan för de olika mekanismerna och deras inbördes samverkan enligt en i /7.2/ presenterad framställning.

## 7.2 Kemiska mekanismer

Vid verkan i den fasta fasen bygger den kemiska flämskyddsteorin för trä och andra cellulosa material på ändring av den snabba pyrolysen till en långsam pyrolys. Om pyrolysen av cellulosa kunde styras mot den ideala, fullständiga dehydratiseringen till vatten och kol enligt ekvationen:



skulle det inte bildas några brännbara gaser från den huvudsakliga träkomponenten, förrän temperaturen blir tillräckligt hög för att initiera vatten-gasreaktionen. Många flämskyddsmedel styr också sönderfallet i denna riktning. Även om den ideala reaktionen inte uppnås, får man ökad bildning av träkol och de flyktiga komponenterna blir syrerikare och får därigenom lägre förbränningsvärme. Bildningen av tjära minskar samtidigt. Detta medför, att det initiella skedet med långsam pyrolys under brandförloppet förlängs. Enligt teorin för kemisk verkan i fasta fasen förhindrar effektiva flämskyddsmedel levoglukosanbildningen genom att dessa blockerar eller avlägsnar hydroxylgruppen på kolatom 6.

Man kan även vid uppvärmning av lignocellulosa material erhålla tvärbindingar mellan intilliggande cellulosa kedjor genom vattenavspaltning. Den hastighet, varmed tvärbindingarna utbildas, påverkas starkt av närvaro av vissa organiska salter, exempelvis aluminiumsulfat, järn- och kopparnitrat.

Vid verkan i gasfasen påverkar inte flamskyddsmedlet bildningen av brännbara produkter men väl dessas senare reaktioner. Flamskyddsmedlet fungerar som en inhibitor i kedjereaktionerna mellan fria radikaler i flamman genom att avge gasformiga produkter. Detta innebär, att skyddseffekten huvudsakligen fås under antändningsfasen och den aktiva pyrolysen, medan den inledande långsamma pyrolysen förblir opåverkad. Flamskyddsmedel, som påverkar förbränningsförloppet enligt denna mekanism, bör ha ett högt ångtryck och snabbt dissocieras vid de temperaturer, som råder vid en brand.

### 7.3 Fysikaliska mekanismer

#### (a) Energiupptagning

Energiupptagning ger flamskyddseffekt genom att kemikalierna absorberar stora värmemängder vid uppvärmning. Detta kan ske genom att ämnet har hög värmekapacitet, genomgår fasomvandlingar eller reaktioner, som kräver stora energimängder, exempelvis smältning, sublimering, sönderfall och dehydratisering. Denna mekanism har störst effekt under den tidiga långsamma pyrolysen.

#### (b) Gasutspädning

Många flamskyddsmedel sönderfaller vid upphettning under avgivande av obrännbara gaser t ex vatten, kväve eller koldioxid. Dessa gaser antas kunna skydda materialet på två sätt. Dels kan de verka utspädande på gasblandningen och därigenom göra den icke brännbar, dels kan de avskärma materialytan från syre och på så sätt hindra förbränning av denna.

#### (c) Bildning av skyddsskikt

Flamskyddsverkan genom bildning av skyddsskikt kan åstadkommas på tre sätt. Ett sätt utgörs av en film, som sprutas eller penslas på materialytan och utestänger syret från träytan samt förhindrar utträngande pyrolysgaser. Ett sådant skikt måste vara mycket elastiskt, annars förstörs det snabbt vid en brand. Ett annat sätt består av att den tillsatta kemikalien smälter och bildar en film på materialytan. Skyddsverkan erhålls då genom

värmereflektion, värmeisolering, utestängande av luftens syre och förhindring av utträngande pyrolysgaser. Slutligen kan skyddet åstadkommas genom ett skikt, som under termisk påverkan skummar upp till en porös, värmeisolerande, träkolsliknande beläggning.

#### 7.4 Samverkan mellan olika mekanismer

För många kemikalier gäller, att deras flamskyddande effekt hänförs till en samverkan mellan flera fysikaliska eller mellan fysikaliska och kemiska mekanismer. En flamskyddskemikalie kan ha följande verkningsätt.

Vid en relativt låg temperatur smälter föreningen och bildar ett skikt på materialets yta. När temperaturen sedan stiger, sönderfaller föreningen och avger en inert gas samt bildar en sur återstod, som kan verka kemiskt i fasta fasen. Den inerta gasen kan ha den dubbla funktionen att den dels späder ut gasblandningen, dels ger en skumningseffekt i ytskiktet och därigenom ökar dess isolerande förmåga. Dessutom förbrukas energi vid smältningen och sönderfallsreaktionen. Man får här en samverkan mellan fem olika mekanismer /7.1/.

#### 7.5 Olika typer av flamskyddsmedel

Tekniken att skydda trä mot brand genom brandfördröjande tillsatser har varit tillämpad sedan lång tid. Lyons /7.3/ anger, att referenser över flamskyddsmedel daterar sig till mer än 200 år tillbaka i tiden. Den tidigaste referensen över flamskyddsmedel för trä i Chemical Abstracts återfinns i volym 1 från 1905 och anger en blandning av ammoniumfosfat och borsyra, ett idag fortfarande ofta använt preparat. Ungefär samtidigt diskuteras användandet av natriumsilikat, volfram, borater och aluminiumhydroxid samt klorider av kalcium, magnesium, zink och tenn. I ett brittiskt patent från 1912 anges som flamskyddsmedel zink, kvicksilver och kopparsalt, som anbringas genom att utsätta virket för vakuum före impregnering. 1914 rekommenderar American Wood Preservers Association  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  och  $\text{NH}_4^-$

fosfater som speciellt lämpliga preparat och i komplettering 1944 anger samma sammanslutning  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$  samt kromaterad  $\text{ZnCl}_2$  som lämpliga. I /7.2, 7.3/ ges en sammanställning över ett stort antal flamskyddspreparat med tillhörande appliceringsmetod.

I tabell 7.1 redovisas några för närvarande kommersiellt vanliga flamskyddsmedel med rekommenderad kemisk sammansättning.

Sellman et al /7.1/ har sammanställt fysikaliska och termiska data för några oorganiska flamskyddskemikalier med uppdelning i ämnesgrupperna borater, fosfater och silikater. Ur denna sammanställning kan sammanfattningsvis följande slutsatser dras:

- \* För borater anses flamskyddsverkan uppkomma genom en kombination av kemisk verkan i fasta fasen, energiupptagning, utvecklande av spädgaser samt bildning av ett skyddsskikt på materialets yta.
- \* För ammoniumfosfater dominerar kemisk verkan i fasta fasen, men spädgasutveckling och energiupptagning bör ge additiva effekter.
- \* För natriumsilikater är skyddsmekanismerna svårare att värdera, men skyddsskiktsmekanismen är troligen den dominerande.
- \* Ämnesgrupperna har likartade verkningsätt och ingriper i ungefär samma skede av brandförloppet. Kombinationer av dem bör alltså inte ge någon väsentlig förbättring av flamskyddseffekten.

Tabell 7.1, enligt /7.3/

Kemikalier	Proportion	Specifikation
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	78	Type 1 <sup>a</sup>
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ or $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	19	
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	60	...
$\text{H}_3\text{BO}_3$	20	...
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	10	Type 2
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	10	Minalith
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	60	Type 3
$\text{H}_3\text{BO}_3$	40	...
$\text{ZnCl}_2$	77.5	Type 4
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	17.5	CZC
$\text{ZnCl}_2$	62	...
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15.5	Type 4
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	10	CZC(FR)
$\text{H}_3\text{BO}_3$	10	...
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	67-70	...
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	33-30	...
$\text{ZnCl}_2$	54	...
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	46	...
$\text{ZnCl}_2$	35	...
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	35	Protexol Class D
$\text{H}_3\text{BO}_3$	25	Pyresote
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	...

## 7.6 Slutsatser

Relaterad till bärande och avskiljande träkonstruktioners verkningssätt och dimensionering vid brand anvisar den presenterade redovisningen av brandfördröjande tillsatserns effekt följande forskningsprojekt:

- (1) Kunskapssammanställning och vidare analys av fysikaliska och kemiska mekanismer för flamskyddsmedels verkan och studium av möjligheterna för optimal samverkan mellan olika mekanismer för ett brandförlopps olika skeden - långsam

pyrolysis under uppvärmningsskedet, antändning av bildade pyrolysgaser, aktiv pyrolysis och förbränning med flamma samt efterglödning. Effekten av sådana brandfördröjande tillsatser, som bygger på ett fysikaliskt skeende i fast fas, bör därvid för vissa tillämpningar - tex beräkning av kolskiktstillväxten - vara möjlig att studera via analytiska pyrolysismodeller.

- (2) Kunskapssammanställning och utarbetande av ett detaljerat program för fortsatt forskning beträffande brandfördröjande tillsatsers inverkan på sådana fenomen och egenskaper, som är avgörande för en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande träkonstruktioner - kolskiktstillväxt, termiska egenskaper, mekaniska egenskaper, skarvars och förbands verkningsätt /7.4/-/7.11/.

#### REFERENSER

- /7.1/ SELLMAN, L G, ÖSTMAN, B, BACK, E, "Fysikaliska och termiska data för några oorganiska flamskyddskemikalier". Svenska Träforskningsinstitutet, Stockholm 1974
- /7.2/ FREDLUND, B, "Träets antändnings- och förbränningsmekanism". Institutionen för byggnadsstatik, LTH, Intern rapport IR79-3, Lund 1979
- /7.3/ LYONS, J W, "The Chemistry and Uses of Fire Retardants". John Wiley and Sons, USA, 1976
- /7.4/ PERCIVAL, D H, SUDDARTH, S K, "An Investigation of the Mechanical Characteristics of Truss Plates on Fire Retardant Treated Wood". Forest Products Journal, Vol. 21, No. 1, January 1971
- /7.5/ KNUDSON, R M, WILLIAMSON, R B, "Influence of Temperature and Time on Pyrolysis of Untreated and Fire Retardant Treated Wood". Wood Science and Technology, Vol. 5, 1971

- /7.6/ HOLMES, C A, "Effect of Fire Retardant Treatments on Performance Properties of Wood". Forest Products Laboratory, US Dept of Agriculture, Madison, Wis., 1977
- /7.7/ SAWKO, P M, "Structural Wood Panels with Improved Fire Resistance". NASA CASE No. ARC-11174-1, Serial No. 929. 086, July 1978
- /7.8/ NARAHARA, T, "Today's Choices in Fire Retardant Coatings for Wood". The Construction Specifier, July 1978
- /7.9/ NANASSY, A J, "Flame Retardant Effects on Thermal Properties of Wood-Char Studied by the Transient Method". Wood Science, Vol. 11, No. 2, October 1978
- /7.10/ ADAMS, E H, MOORE, G L, BRAZIER, J D, "The Effect of Flame Retardant Treatments on Some Mechanical Properties of Wood". Building Research Establishment, Department of Environment, CP 8/79, September 1979
- /7.11/ JOHNSON, J W, "Tests of Fire Retardant Treated and Untreated Lumber-Plywood Nailed and Stapled Joints". Forest Products Journal, Vol. 29, No. 4, April 1979

I den i kapitlen 1-7 presenterade kunskapsöversikten har i varje kapitel slutavsnitt slutsatser dragits beträffande angelägna forskningsprojekt. Forskningsprojekt av övergripande karaktär beskrivs därvid i avsnitt 1.6. I detta avsnitt redovisas också en förteckning över ett antal projekt av ämnesområdesmässigt mer begränsad natur. Dessa projekt har direkt koppling till komponenter i en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande träkonstruktioner. Projekten beskrivs mer ingående i avsnitten 2.5, 3.5, 4.5, 5.3, 6.1.5, 6.2, 6.3 och 7.6 i den ordning, som de möts i dimensioneringsprocessen.

I det följande ges sammanfattande beskrivningar av de olika projekten med uppskattning av erforderlig personinsats och ekonomisk ram. Vid uppskattningen av den ekonomiska ramen har därvid utgått från för universitets- och högskoleforskning representativa kostnader. Först beskrivs de begränsade projekt, som har en direkt relation till komponenter i dimensioneringsprocessen (avsnitt 8.1) och därefter de mer övergripande projekt, som berör hela dimensioneringsprocessen (avsnitt 8.2). I avsnitt 8.3 slutligen belyses de olika projektens inbördes sammanhang och redovisas en översiktlig strategisk planering av de erforderliga forskningsinsatserna.

#### 8.1 Projekt, kopplade till komponenter i dimensioneringsprocessen

- A Utveckling av en förenklad modell för översättning av samband mellan strålningsnivå och antändningstid till ett antändningskriterium för en tidsvarierande brandmiljö (avsnitt 2.5).

Existerande samband mellan strålning och antändningstid för olika material och materialkombinationer har bestämts experimentellt eller analytiskt under förutsättning av i tiden konstanta strålningsnivåer. Figur 2.3 ger exempel på



sådana samband. Under verkliga brandförhållanden utsätts ett material eller en materialkombination för en strålningspåverkan, som varierar med tiden. Det är därför angeläget att utveckla någon förenklad modell och ett tillhörande antändningskriterium för att kunna sammankoppla verklig brandpåverkan och samband mellan konstanta strålningsnivåer och antändningstid och därigenom kunna förutsäga, om antändning kommer att ske eller inte i en given brandsituation. En grov ansats till en sådan förenklad modell presenteras i /2.19/.

Projektet är kombinerat experimentellt och teoretiskt och fordrar tillgång till utrustning med strålningspanel. Erforderlig personinsats är 1 forskare jämte medhjälpare under cirka 1/2 år. Ekonomisk ram: 250 kkr.

- B Kunskapskomplettering beträffande de termiska egenskaperna för förkolnat och oförkolnat trä (avsnitt 3.5).

En sådan komplettering behövs för att förbättra möjligheterna för en analytisk beräkning av kolskiktstillväxt samt av temperatur- och fuktfördelning inom icke förkolnad del av brandpåverkade träkonstruktioner. Kompletteringen bör i första hand fokuseras mot värmeledningsförmågan och specifika värmekapaciteten för dels förkolnat trä, dels oförkolnat trä för temperaturer över  $100^{\circ}\text{C}$ .

Uppgiften innehåller dels en kritisk utvärdering av litteraturuppgifter, dels kompletterande experimentella bestämningar. Tillgång krävs till utrustning för bestämning av värmeledningsförmåga och specifik värmekapacitet vid varierande fuktkvot och vid varierande förhöjd temperatur upp till cirka  $300^{\circ}\text{C}$  för oförkolnat trä och upp till cirka  $500^{\circ}\text{C}$  för förkolnat trä. Erforderlig personinsats är 1 forskare jämte medhjälpare under cirka 1/2 år. Ekonomisk ram: 300 kkr.

- C Vidareutveckling av existerande samband för beräkning av träets reaktionsvärme vid verkliga brandförhållanden (avsnitt 3.5).

En beräkning av träets reaktionsvärme med utgångspunkt från data om entalpiinnehåll och fasomvandlingsenergi är en viktig komponent i en matematisk modell för en analytisk bestämning av kolskiktstillväxt samt temperatur-, fukt- och densitetstidfälten för en träkonstruktion vid varierande brandexponering.

Uppgiften är i dominerande omfattning teoretisk men måste också innehålla verifierande experimentella studier i laboratorieskala. Erforderlig personinsats är 1 teoretiker och 1 experimentalist jämte medarbetare under cirka 3/4 år. Ekonomisk ram: 400 kkr.

- D Utveckling av förenklad modell för beräkning av kolskiktstillväxt och temperaturfördelning i brandpåverkade, tunnväggiga träkonstruktioner (avsnitt 4.5 och 6.2).

Kolskiktstillväxten för en brandpåverkad träkonstruktion kontrolleras dels av reaktionskinetiska processer, dels av transportprocesser (avsnitt 4.3). För tunnväggiga träkonstruktioner dominerar därvid de kinetiska processerna, medan för massiva träkonstruktioner kolskiktstillväxten i huvudsak styrs av transportprocesserna.

Existerande modeller för beräkning av kolskiktstillväxt har utvecklats för massiva träbärverk och är därför inte tillämpliga för tunnväggiga träkonstruktioner. Ett kombinerat experimentellt och teoretiskt forskningsprojekt för att ta fram ett underlag, ur vilket inbränningsdjupet kan förutberäknas för tunna skivor av trä och träbaserat material vid olika termiska påverkansförlopp, är därför angeläget. De experimentella studierna kan därvid förutses bli omfattande.

Information från projektet C ingår som en komponent i uppgiftens teoretiska del. En samordning eller hopkoppling av projekten C och D är därför nödvändig. Erforderlig personinsats för projekt D - exklusive för framtagning av nödvändig kunskap från projekt C - är 1 teoretiker och 1 experimentalist jämte medarbetare under cirka 1 år. Ekonomisk ram: 700 kkr.

För en inledande undersökning med anknytning till beskrivet projekt har Svenska träforskningsinstitutet tilldelats 100 kkr från BRANDFORSK med tidsramen 1982-84.

- E Vidareutveckling av förenklad modell för beräkning av kolskiktstillväxt, temperatur- och fuktfördelning i brandpåverkade träkonstruktioner med massiva sektiondelar (avsnitt 4.5).

En förenklad analytisk modell för en bestämning av kolskiktets djup för massivt träbärverk vid varierande termisk påverkan presenteras i /4.5, 6.9/ - se avsnitt 6.1.1. Modellen kan användas för en beräkning av ett systematiserat underlag för en praktisk bärverksdimensionering, baserad på verklig brandförloppspåverkan. Modellen har utvecklats för endimensionellt fall, förutsätter torrt trä och ger ingen information om temperatur- och fuktfördelningen i den icke förkolnade delen av bärverket. I /4.4/ redovisas en alternativ, endimensionell modell, som innehåller också en beskrivning av den icke förkolnade tvärsnittsdelen temperaturfördelning. I /4.1, 6.11/ anges en mer generell, endimensionell modell för träets pyrolys, som utöver en beräkning av kolskiktets tillväxt också anvisar en metod för en approximativ bestämning av träbärverkets temperatur- och fukttillstånd. En vidareutveckling, särskilt för fuktens inverkan, krävs dock för att metodiken skall kunna bli enkelt praktiskt tillämpbar.

För fuktens inverkan kan utvecklingsarbetet alternativt kopplas till två olika ambitionsnivåer:

(a) Fukttransporten försummas och initiell jämte vid pyrolysen producerad fukt förångas på ursprunglig plats i tvärsnittet,

(b) en delmodell för fukttransport inkluderas .

Det är vidare angeläget, att existerande och vidareutvecklade modeller utvidgas till två- och eventuellt tredimensionella fall för praktisk tillämpning på balkar samt olika typer av skarvar och förband (avsnitt 6.3). Därvid måste hänsyn tas till träets anisotropa egenskaper.

Resultat från projekten B och C utgör ingångsinformation i det beskrivna projektet, som i huvudsak är teoretiskt. En integration av en förenklad modell för fukttransporten kräver dock en experimentell bestämning av ett antal materialkonstanter. Dessutom fordras några verifierande försök för den kopplade totalmodellen.

Erforderlig personinsats för projekt E - exklusive för framtagning av nödvändig kunskap från projekten B och C - är 1 teoretiker och 1 experimentalist jämte medarbetare under cirka 1 år. Ekonomisk ram: 500 kkr.

F Utveckling av analytisk materialmodell för träets spännings-deformationsbeteende vid transienta spännings-, temperatur- och fukttillstånd (avsnitt 5.3).

För praktiska beräkningar av brandpåverkade träbärverks deformationsförlopp, instabilitetslaster och påtvingade krafter och moment vid deformationshinder fordras tillgång till en experimentellt verifierad materialmodell för träets mekaniska beteende vid samtidiga transienta spännings-, temperatur- och fukttillstånd. Utveckling av en

sådan modell är därför angelägen.

Experimentellt innehåller ett sådant projekt dels en undersökning på små provkroppar, dels kompletterande provningar av bärverksdelar med ordinära dimensioner. En naturlig uppläggning av småskaleundersökningen är:

(a) Snabba pålastningsförsök vid stabiliserad temperatur och varierande initiell fuktkvot för bestämning av fullständig  $\sigma - \epsilon$ -kurva,

(b) krypförsök vid stabiliserad last, temperatur och varierande initiell fuktkvot,

(c) försök med uppvärmning till brott vid stabiliserad last och varierande initiell fuktkvot,

(d) mätning av fukttillstånd för samma typ av provkroppar som för (a)-(c) vid varierande uppvärmningsförlopp vid obelastade provkroppar.

Eventuellt bör parallellförsök med förseglade provkroppar ingå.

Erforderlig personinsats för projektet är 1 forskare jämte medhjälpare under cirka 2 år. Ekonomisk ram: 500 kkr.

För ett projekt av den beskrivna typen har STU tilldelat avdelningen för byggnadstekniskt brandskydd, LTH 413 kkr. Projektet pågår. Vidare har Svenska träforskningsinstitutet tidigare erhållit 118 kkr från Träförädlingsbyrån (STU) för en experimentell framtagna<sup>2</sup>ng, via små provkroppar med ett tvärsnitt om 5-10 mm<sup>2</sup>, av data för träets mekaniska egenskaper vid höga temperaturer och varierande fukt. Undersökningen är under rapportering.

- G Experimentellt och teoretiskt studium av den biologiska och kemiska strukturens inverkan på träets mekaniska egenskaper vid olika temperatur- och fuktillstånd (avsnitt 5.3).

Inga undersökningar finns publicerade om varför temperatur och fukt påverkar träets mekaniska egenskaper utan endast hur de förändras. Ett projekt, som belyser, om de biologiska skillnaderna mellan olika träslag eller inom samma träslag fenomenologiskt kan förklara en del av den stora spridningen i försöksresultat för träets mekaniska egenskaper vid olika kombinationer av temperatur- och fuktillstånd, är därför angeläget /5.1/. Ett sådant projekt bör också innehålla en förenklad analytisk modell, som tar hänsyn till träets årsringsstruktur och förhållandet mellan cellulosa och lignin.

Erforderlig personinsats för projektet är 1 trækemist och 1 hållfasthetstekniker jämte medhjälpare under cirka 1 år. Ekonomisk ram: 500 kkr.

- H Vidareutveckling av analytiska metoder och datorprogram för beräkning av massiva träbärverks verkningssätt och gränstillstånd vid brand (avsnitt 6.1.5).

Existerande metoder för en analytisk dimensionering av brandutsatta massiva träbärverk bygger på förenklade antaganden för metodens samtliga komponenter. Metodernas tillämpbarhet begränsas därigenom till överslagsmässiga beräkningar av brottgränstillstånd och kritiska laster för vissa typer av instabilitetsfenomen. Metoderna möjliggör ej någon beräkning av brandexponerade träbärverks deformationsförlopp eller påtvingade krafter och moment från deformationshinder.

Tillgång till en vidareutvecklad modell för beräkning av kolskiktstillväxt, temperaturgradient och fuktfördelning enligt projekt E och en analytisk materialmodell för träets mekaniska beteende vid transienta spännings-, temperatur- och fuktstillstånd enligt projekt F är en förutsättning för att existerande dimensioneringsmetoder för brandutsatta massiva träbärverk skall kunna kvalificerat förbättras och utvidgas med hänsyn till tillämpningsområden. I en sådan verksamhet ingår utveckling av numeriska metoder över finita element eller finita differenser och tillhörande datorprogram för olika bärverkstypers brandbeteende och gränstillstånd. Aktuella brottmoder utgör böjning, avskärning, vridning, knäckning och vippning.

Ett projekt av detta innehåll är i dominerande omfattning teoretiskt. Verifierande provningar i fullskala eller reducerad skala tillkommer. Erforderlig personinsats är 1 forskare med medhjälpare under cirka 2 år. Ekonomisk ram: 600 kkr.

- I Utveckling av analytiska och numeriska metoder samt datorprogram för beräkning av lätta och sammansatta träbärverks verkningsätt och gränstillstånd vid brand (avsnitt 6.2).

All information om lätta och sammansatta träbärverks verkningsätt och gränstillstånd vid brand med hänsyn till bärande och/eller avskiljande funktion härrör från standardbrandprovningar med termisk påverkan enligt ISO 834. Några analytiska metoder för konstruktionstypens dimensionering har ej publicerats.

Forskningsinsatser, som kan leda till utveckling av sådana analytiska metoder, har därför hög angelägenhet. Detta gäller såväl för termisk påverkan enligt ISO 834 som för verklig brandpåverkan. En central komponent i sådana

metoder utgör en förenklad modell för beräkning av inbränningsdjupet för tunna skivor av trä och träbaserat material vid olika termiska påverkansförlopp - projekt D. De analytiska metoderna måste verifieras genom experimentella undersökningar i fullskala eller reducerad skala.

Ett projekt med den beskrivna målsättningen kan angripas med två alternativa ambitionsnivåer:

(a) Dimensioneringen begränsas till gränstillstånd för vissa enklare konstruktionstyper,

(b) dimensioneringen utsträcks till att omfatta också deformationsförlopp samt påtvingade krafter och moment från deformationshinder med mer generell tillämpning med hänsyn till konstruktionstyp.

I ett projekt med den högre ambitionsnivån tillkommer en utveckling av numeriska metoder över finita element eller finita differenser och tillhörande datorprogram för olika bärverkstypers brandbeteende. Tillgång till en materialmodell för träets mekaniska beteende vid transienta spännings-, temperatur- och fukttillstånd enligt projekt F är därvid angelägen.

För ambitionsnivån (a) är erforderlig personinsats - exklusive projekt D - 1 forskare med medhjälpare under cirka 1 år. Ekonomisk ram: 350 kkr.

För ambitionsnivån (b) är erforderlig personinsats - exklusive projekten D och F - 1 forskare med medhjälpare under cirka 2 år. Ekonomisk ram: 600 kkr.

J Utveckling av analytiska modeller för beräkning av skarvars, infästningars och förbands verkningsätt och bärformåga vid brand (avsnitt 6.3).



Ett forskningsprojekt, uppbyggt av två delar, framträder här som angeläget.

Den första delen omfattar framtagna av ett dimensioneringsunderlag för en bestämning av erforderlig tjocklek för täckskivor och annan typ av bult- och spikförbands isolering vid verklig brandpåverkan. Vid täckskivor av trä eller träbaserat material utgör därvid resultat från projekt D en nödvändig ingångsinformation.

Den andra delen omfattar en utveckling av en analytisk modell för beräkning av t ex ett spik- eller bultförbands verkningsätt och bärförmåga vid brand jämte en experimentell verifiering härav i fullskala eller reducerad skala. De naturliga komponenterna i en sådan modellutveckling beskrivs i avsnitt 6.3.

Erforderlig personinsats för projektet är 1 forskare jämte medhjälpare under cirka 1,5 år. Ekonomisk ram: 600 kkr.

Medel omfattande 155 kkr har tilldelats Svenska brandförsvarsförbundet tekniska avdelning från BRANDFORSK och Svenskt Limträ AB för en delundersökning inom projektets andra del.

- K Kunskapssammanställning och framtagna av ett detaljerat forskningsprogram för brandfördröjande tillsatsers inverkan på sådana fenomen och egenskaper, som är avgörande för en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande träkonstruktioner (avsnitt 7.6).

Exempel på sådana avgörande fenomen och egenskaper är antändning, kolskiktstillväxt, termiska egenskaper, mekaniska egenskaper samt skarvars och förbands verkningsätt.

Erforderlig personinsats är 1 forskare under cirka 1/2 år.  
Ekonomisk ram: 100 kkr.

- L Kunskapssammanställning och vidare analys av fysikaliska och kemiska mekanismer för flamskyddsmedels verkan och av möjligheterna för optimal samverkan mellan olika mekanismer för ett brandförlopps olika skeden (avsnitt 7.6).

Projektet är kombinerat experimentellt och teoretiskt. En bakgrundsbeskrivning för projektet ges i avsnitten 7.1-7.5.

Erforderlig personinsats är 1 teoretiker och 1 experimentalist jämte medhjälpare under cirka 1,5 år. Ekonomisk ram: 800 kkr.

## 8.2 Övergripande projekt, som berör hela dimensioneringsprocessen

- A Utveckling av metod för en analytisk bestämning av träbyggnadsdelars brandmotstånd (avsnitt 1.2 och 1.6).

En bestämning av byggnadsdelars brandmotstånd sker idag internationellt i helt dominerande omfattning genom standardbrandprovningar enligt ISO 834. Som ett alternativ härtill tillåts nu i allt fler länder, att brandmotståndet bestäms genom en analytisk beräkning.

För träkonstruktioner medger därvid tillgänglig kunskap, att en sådan analytisk bestämning av brandmotståndet kan genomföras med godtagbar noggrannhet för massiva träbärverk av typen balkar och pelare. För bärande och/eller avskiljande, lätta och sammansatta träkonstruktioner är däremot en analytisk bestämning av brandmotståndet ej möjlig för närvarande. Detsamma gäller också för alla typer av träbärverk, som innehåller skarvar, infästningar och förband.

Ett övergripande forskningsprojekt, som syftar till att ta fram ett underlag för ett mer generellt utnyttjande av möjligheten för en analytisk bestämning av träbyggnadsdelars brandmotstånd, innehåller i sig de i avsnitt 8.1 beskrivna komponentprojekten D, I och J. Utöver dessa komponentprojekt innehåller det övergripande projektet dels en systematiserad beräkning av ett dimensioneringsunderlag, dels ett speciellt studium av konsistensproblem med hänsyn till eventuella skillnader i förutsättningar, då brandmotståndet bestäms analytiskt och då det erhålls genom standardbrandprovning.

Projektet är angeläget bl a genom att det kan leda till utökade möjligheter för en analytisk brandteknisk klassificering som ersättning för en klassificering, baserad på resultat från standardbrandprovning, vilket i framtiden skulle kunna ge väsentliga kostnadsbesparingar i samband med utveckling och marknadsföring av nya produkter och konstruktionslösningar. Med ett ökat internationellt accepterande av en analytisk brandteknisk klassificering skulle projektet också kunna medverka till en godkännandemässigt förenklad exportprocedur för svensk träbyggnadsteknik.

Erforderlig personinsats för det övergripande projektet - utöver insatsen för komponentprojekten D, I och J - är 1 forskare med medhjälpare under cirka 1 år. Ekonomisk ram: 300 kkr

- B Utveckling av metod för en brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande träkonstruktioner för verkligt brandförlopp (avsnitt 1.3 och 1.6).

En analytisk dimensionering av bärande och avskiljande byggnadskonstruktioner, baserad på verklig brandförloppspåverkan, är idag praktiskt genomförbar för flertalet typer av stålkonstruktioner och för vissa typer av

betongkonstruktioner. Under 1983 kommer sannolikt en handbok att föreligga för en analytisk dimensionering av betongkonstruktioner, varigenom den praktiska dimensioneringssituationen avsevärt förbättras också för denna bärverkstyp.

Det är angeläget, att kunskapen om träkonstruktioners verknings sätt och dimensionering vid brand utvecklas till en likvärdig nivå som för stål- och betongkonstruktioner. Detta är en nödvändig förutsättning för att stål, betong och trä i framtiden skall kunna konkurrera på lika villkor som material i bärande och avskiljande byggnadskonstruktioner.

I ett övergripande forskningsprojekt för en sådan utveckling ingår de i avsnitt 8.1 beskrivna komponentprojekten B, C, D, E, F, H, I och J, om generalitet i praktisk tillämpning skall krävas. Utöver komponentprojekten omfattar det övergripande projektet därvid primärt framtagning av en handbok för dimensionering. Erforderlig personinsats härför - exklusive insatsen för komponentprojekten - är 2 forskare med medhjälpare under cirka 2 år. Ekonomisk ram: 600 kkr.

- C Frantagning av underlag för en bestämning av ekvivalent brandvaraktighet för träbyggnadsdelar (avsnitt 1.4 och 1.6).

Begreppet ekvivalent brandvaraktighet har införts för att möjliggöra en koppling mellan en verklig brandförloppspåverkan och en termisk påverkan enligt standardbrandprovning (ISO 834). Ekvivalensen definieras därvid ur kriteriet, att de båda typerna av påverkan för aktuell konstruktion skall ge samma utslagsgivande effekt med hänsyn till relevant gränstillstånd.

Underlag finns idag för en beräkning av den ekvivalenta brandvaraktigheten för stålbärverk och armerade betongbalkar med viss brotttyp. För övriga bärverkstyper, inklusive träbärverk, är begreppet ekvivalent brandvaraktighet ofullständigt eller inte alls studerat.

Ett projekt, som syftar till framtagning av ett underlag för en bestämning av ekvivalent brandvaraktighet för träbyggnadsdelar måste bygga på resultat från de övergripande projekten A och B. Internationellt är projektet angeläget. Nationellt har projektet lägre prioritet än övriga övergripande projekt som en följd av den brandtekniska dimensioneringsfilosofi, som valts i Svensk Byggnorm.

Med start från resultat från de övergripande projekten A och B är den erforderliga personinsatsen för projektet om ekvivalent brandvaraktighet 1 forskare med medhjälpare under cirka 3/4 år. Ekonomisk ram: 200 kkr.

- D Vidareutveckling av dimensioneringsmetoden enligt det övergripande projektet B för anpassning till moderna last- och säkerhetsnormer (avsnitt 1.5 och 1.6).

Internationellt tillämpas nu i allt större omfattning säkerhetsteoretiska metoder för en dimensionering av bärverk vid normala temperaturförhållanden. Det är angeläget, att dimensioneringsmetoderna för brandpåverkade bärverk vidareutvecklas för anpassning härtill.

För att en sådan vidareutveckling skall vara meningsfull, måste dimensioneringsmetoden vara uppbyggd av funktionellt väldefinierade och verifierade, analytiska modeller, vars osäkerhet och tillförlitlighetsnivåer kan specificeras. Den genom det övergripande projektet B beskrivna dimensioneringsmetoden uppfyller detta krav.

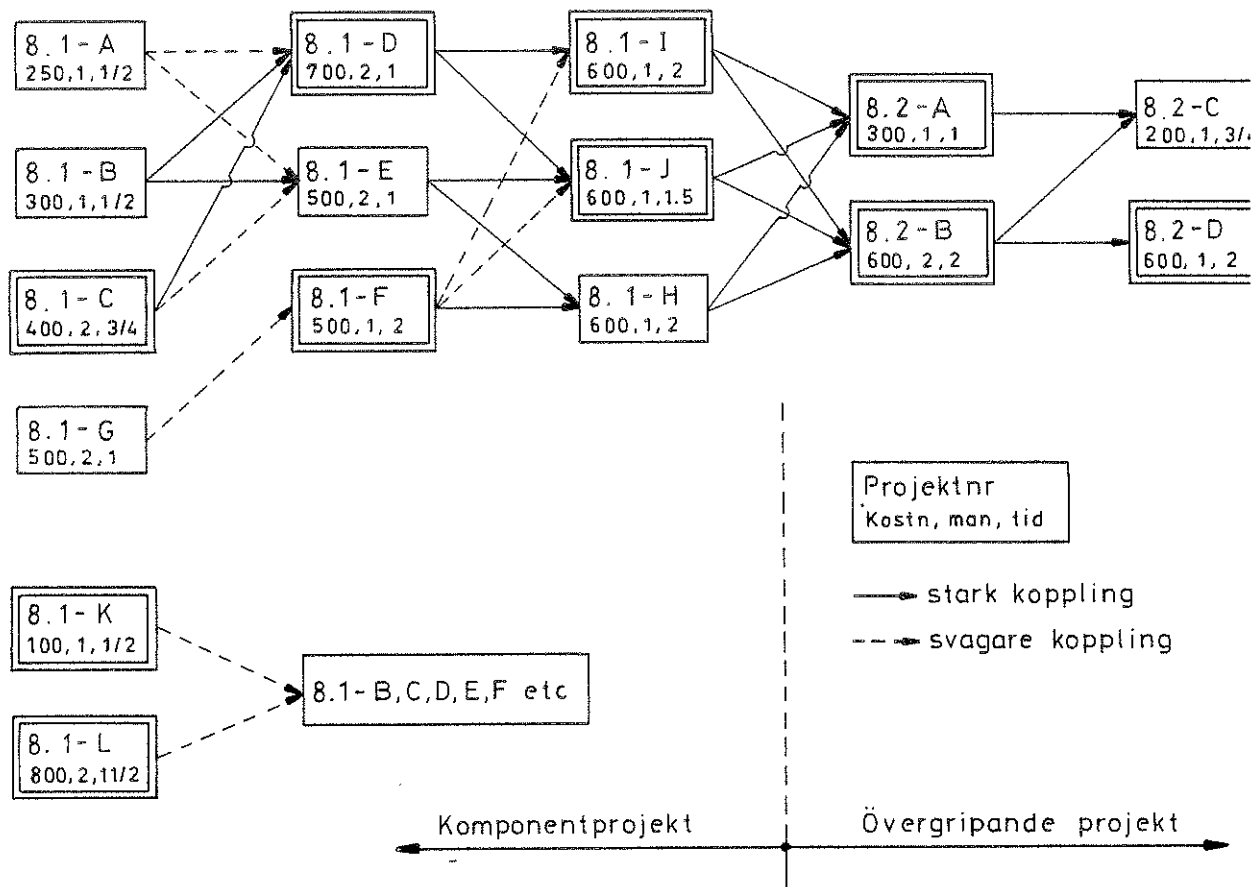
En säkerhetsteoretisk dimensioneringsmetod för brandutsatta träbärverk, vid vilken de statistiska inverkningarna beaktas genom karakteristiska värden och partialsäkerhetsfaktorer för ingående storheter, skulle möjliggöra en ekonomiskt mer optimal konstruktionsutformning. En sådan metod skulle också principiellt eliminera nu gällande skillnader i brandtekniska krav och tillämpningsbegränsningar mellan bärverk av obrännbart och brännbart material.

I förhållande till det övergripande projektet B kräver den beskrivna vidareutvecklingen för anpassning till moderna last- och säkerhetsnormer en personinsats av 1 forskare med medhjälpare under cirka 2 år. Ekonomisk ram: 600 kkr.

### 8.3 Projektens inbördes sammanhang och prioritering

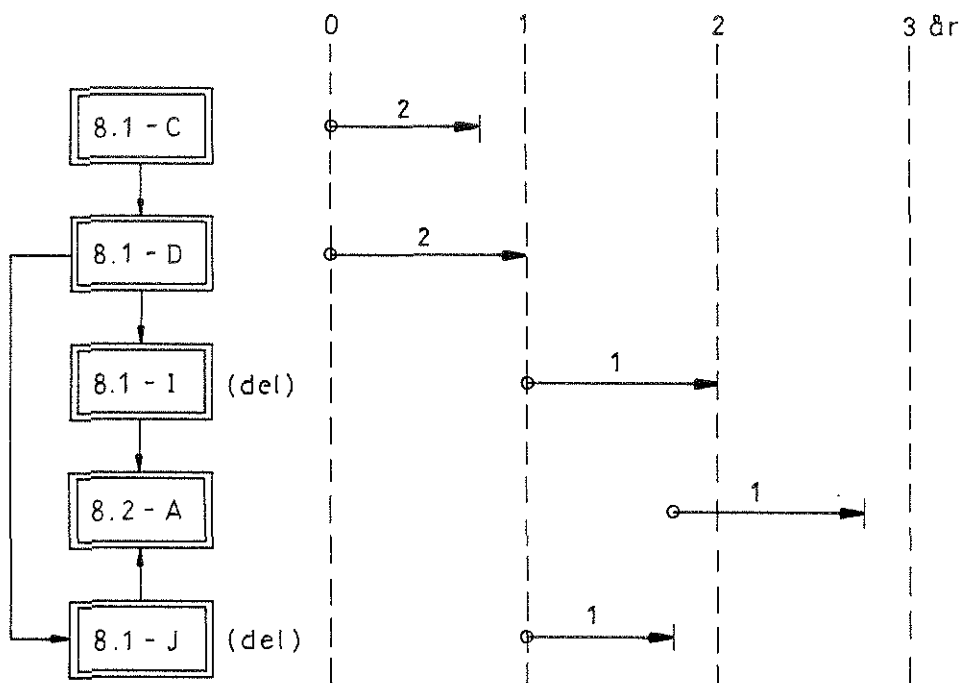
Det inbördes sambandet mellan de i avsnitten 8.1 och 8.2 beskrivna projekten framgår av nätverket i figur 8.1. Till komponenter i dimensioneringsprocessen kopplade projekt har därvid betecknats 8.1-A, 8.1-B, 8.1-C etc, där A, B, C etc direkt refererar till projektbeteckningarna i avsnitt 8.1. Analogt har övergripande projekt, som berör hela dimensioneringsprocessen, betecknats 8.2-A, 8.2-B, 8.2-C och 8.2-D, där A, B, C och D direkt refererar till projektbeteckningarna i avsnitt 8.2.

Heldragna pilar mellan projekt markerar ett starkt samband och streckade pilar ett svagare samband. Projekt med dubbel ram har givits högsta prioritet och projekt med enkel ram lägre prioritet - dock utan att vara lågprioriterade. Projekten 8.1-K och 8.1-L, som behandlar effekter av brandfördröjande tillsatser, och deras sammanhang med andra projekt, har i nätverket placerats i en grupp för sig för att markera, att de tillämpningsmässigt är betydelsefulla för flertalet övriga projekt.



Figur 8.1 Inbördes sammanhang mellan beskrivna forskningsprojekt. Dubbel ram markerar projekt med högsta prioritet, enkel ram projekt med lägre prioritet

I varje projektruta anges projektnummer, ekonomisk ram i kkr för projektet, erforderlig personinsats och erforderlig projekttid. Den uppskattade totalkostnaden för hela projektpaketet uppgår till 7,55 Mkr, varav 5,85 Mkr för de till dimensioneringsprocessens komponenter hörande projekten och 1,7 Mkr i tilläggs-kostnader för de övergripande projekten. Totalkostnaden för de med dubbelram markerade, högst prioriterade projekten belöper sig därvid till 5,2 Mkr. Samtliga projekt är i helt dominerande omfattning av tillämpad karaktär. I några projekt (8.1-C, D, E, F och G) ingår inslag av grundforskningskaraktär till en grovt bedömd totalkostnad av cirka 0,5 Mkr.

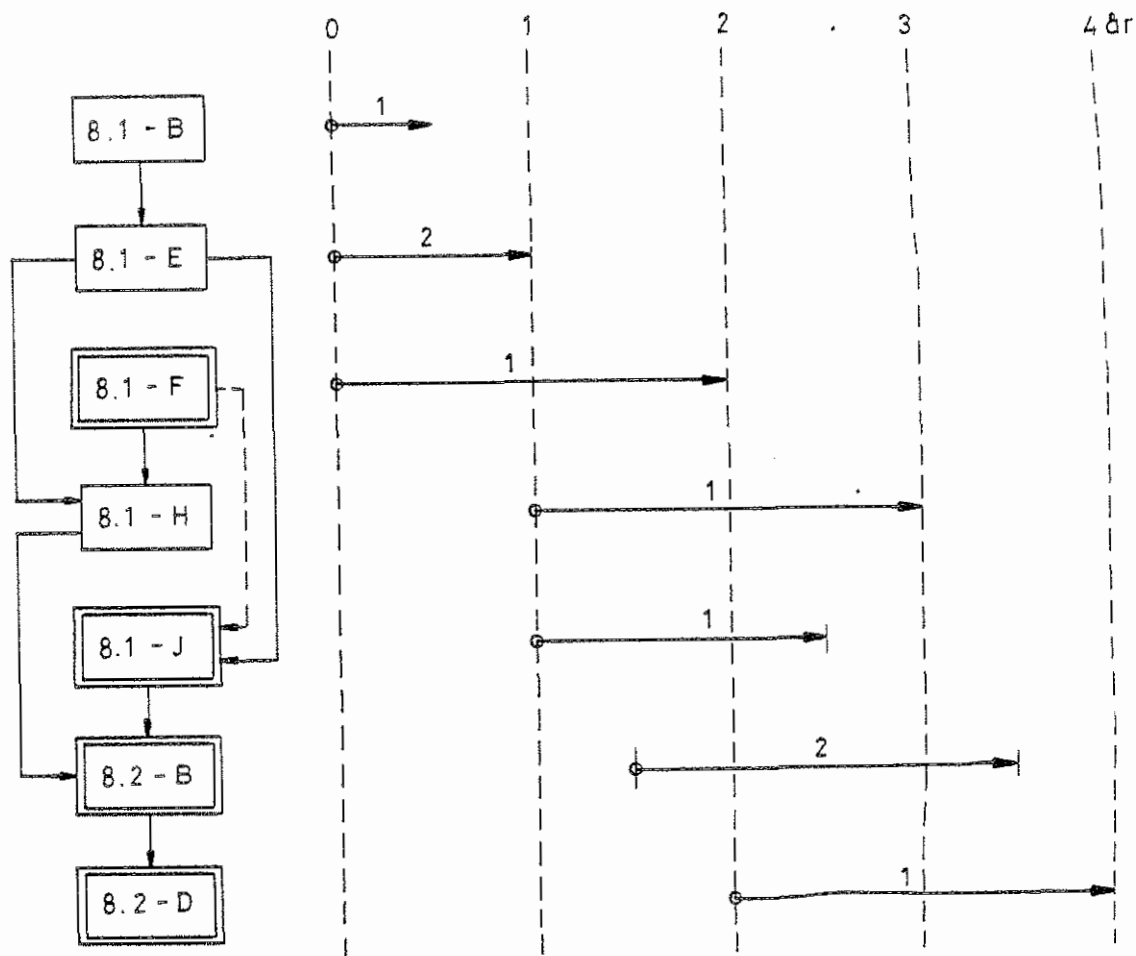


Figur 8.2 Tids- och resursschema för en nationellt samordnad forskningsinsats för utveckling av en för praktiskt bruk anpassad metod för en analytisk, brandteknisk klassificering av lätta och sammansatta träbärverk. Siffrorna vid de olika pilarna anger bedömt behov av antalet forskare för respektive projekt

Det genom flödesschemat i figur 8.1 belysta sambandet mellan det samlade forskningsprogrammets olika projekt understryker angelägenheten av en nationell samordning av pågående och framtida forskningsinsatser inom programmet. I planeringen för en sådan samordning ingår en inventering och bedömning av de personella och utrustningsmässiga förutsättningarna för en integrerad totalinsats med resurs- och tidsberäkningar. Kravet för val av komponentprojekt bör därvid vara, att de tillsammans så direkt som möjligt leder fram till den metodutveckling och framtagning av praktiskt dimensioneringsunderlag, som omfattas av de övergripande projekten. Detta illustreras i exempelform genom figurerna 8.2 och 8.3, vad gäller slutmålet 8.2-A, tillämpat på lätta och sammansatta träbärverk, och slutmålet 8.2-D, tillämpat på massiva träbärverk. I den samordnande forskningsplaneringen bör också ingå en undersökning av hur



annan aktivitet kan ge stöd åt forskningsprogrammet, främst pågående och planerad, internationell forsknings- och utvecklingsverksamhet. Det kan sannolikt förutses, att ett antal standardbrandprovningar av nyutvecklade träbyggnadsdelar kommer att genomföras under programperioden. Det är viktigt, att dessa kan utnyttjas för att ge för forskningsprogrammet användbar information. En analys av vilka kompletterande mätningar, som fordras för en sådan information, är därför en angelägen initialuppgift.



Figur 8.3 Tids- och resursschema för en nationellt samordnad forskningsinsats för utveckling av en analytisk, brandteknisk dimensioneringsmetod för massiva träbärverk, baserad på verkliga brandförloppskaraktäristika och anpassad till moderna last- och säkerhetsnormer. Siffrorna vid de olika pilarna anger bedömt behov av antalet forskare för respektive projekt



