INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **124**

TORBEN JAKOBSEN

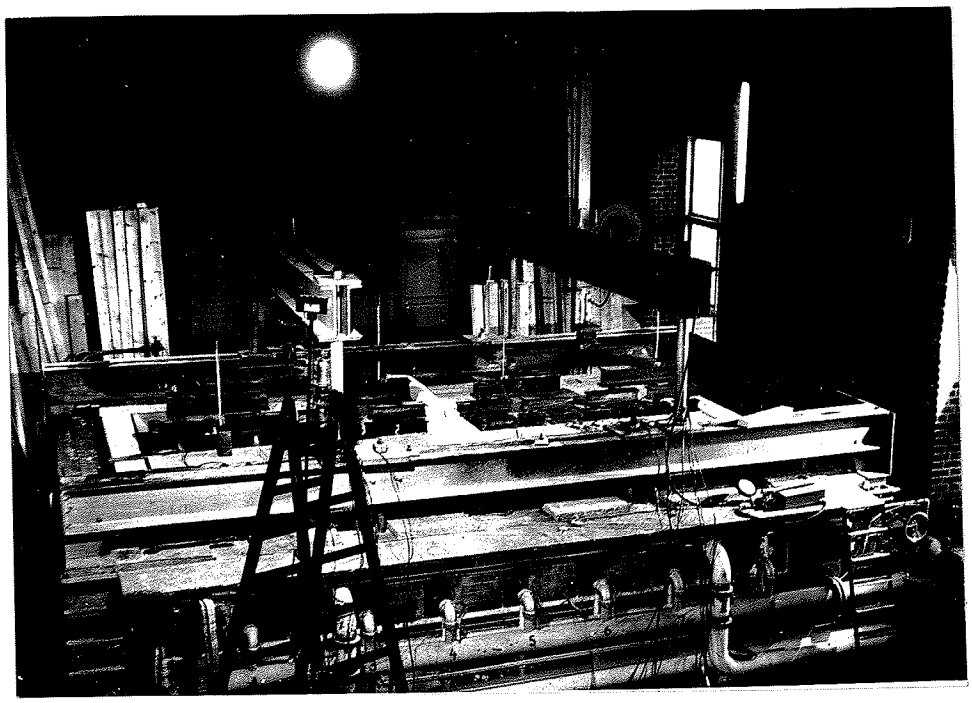
BRANDTEKNISK DIMENSIONERING

Den polytekniske Læreanstalt, Danmarks tekniske Højskole

Lyngby 1978

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

RAPPORT vedr. STVF-bevilling
nr.: 516-2473.B-241



TORBEN JAKOBSEN

TEORETISK BRANDDIMENSIONERING

Den polytekniske Læreanstalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1977

FORORD

Med støtte fra Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd har instituttet gennemført et forprojekt vedrørende brandteknisk dimensionering af bygningskonstruktioner.

Projektet havde til hovedformål at tilvejebringe kendskab til dimensioneringsmetodikken, dens forudsætninger og dens anvendelsesmuligheder.

I denne rapport redegøres for resultatet af projektets undersøgelser, og forskellige eksperimentelle og teoretiske arbejder i tilknytning til projektet er kortfattet behandlet heri. For en dyberegående behandling af en række delemner kan henvises til den angivne litteratur, og for de nævnte tilknyttede arbejder til de respektive rapporter.

Lyngby, januar 1978

Torben Jakobsen

0. INDHOLDSFORTEGNELSE

		Side
1.	Indledning	1
2.	Generelt om projektet	2
3.	Branddimensioneringens principper og parametre	8
4.	Branddimensionering af konstruktionslementer	17
5.	Sikkerhedsproblematikken	23
6.	Teori og forsøgserfaringer	27
7.	Ikke-publicerede studenterarbejder	35
8.	Publikationer med relation til projektet	35
9.	Litteraturfortegnelse	36

1. INDLEDNING

Fagområdet Bygningsbrandteknik blev i 1972/73 optaget på instituttets arbejdsprogram, og da med særlig vægt på emnet husbygningskonstruktioner og brand. På baggrund af en generel drøftelse om faget med forskere på Lunds tekniske Højskole, Sverige, fandt instituttet det ønskeligt at iværksætte et arbejde vedr. dimensionering af bygningskonstruktioner for brandpåvirkning. Dette blev til projektet Teoretisk branddimensionering, for hvis første fase der hermed aflægges rapport.

Ved projektets start var den hjemlige kendskab til branddimensionering meget begrænset. Projektet blev derfor naturligt opdelt i følgende afsnit:

1. Tilvejebringelse af litteratur om emnet.
2. Analyse af dimensioneringsprincipper og -parametre ud fra litteraturen.
3. Anvendelse af metodikken på forskellige konstruktionselementer.
4. Forsøg med sådanne, i begrænset omfang, til sammenhold med teorien.

I det følgende gives en redegørelse for hovedresultaterne af de nævnte delarbejder. Der henstår fortsat en nøjere afklaring af forskellige problemer, efter hvilken en samlet rapport over emnet påregnes udsendt. I kap. 8 er anført 6 publikationer eller interne notater, der vedrører delområder af branddimensionering. Nr. 2 og 4-6 vedlægges til fondet; nr. 1 og 3 er tidligere fremsendt.

Civilingeniør Erik Pedersen har assisteret som videnskabelig medarbejder ved projektet, ligesom lic.techn.Bjarne Chr. Jensen har ydet bidrag dertil. Dele af projektet, fortrinsvis af forsøgsmæssig karakter er løst som studenteropgaver; disse er anført i kapitel 7.

Projektet har været præsenteret ved Nordisk Betonforskningsmøde i Århus i 1974, ligesom de ovenfor nævnte medarbejdere i artikler og foredrag har behandlet emnet.

I forbindelse med projektet, som også ved andre lejligheder, har Statsprøveanstaltens brandlaboratorium bistået med råd og dåd. For dette bringer instituttet sin bedste tak.

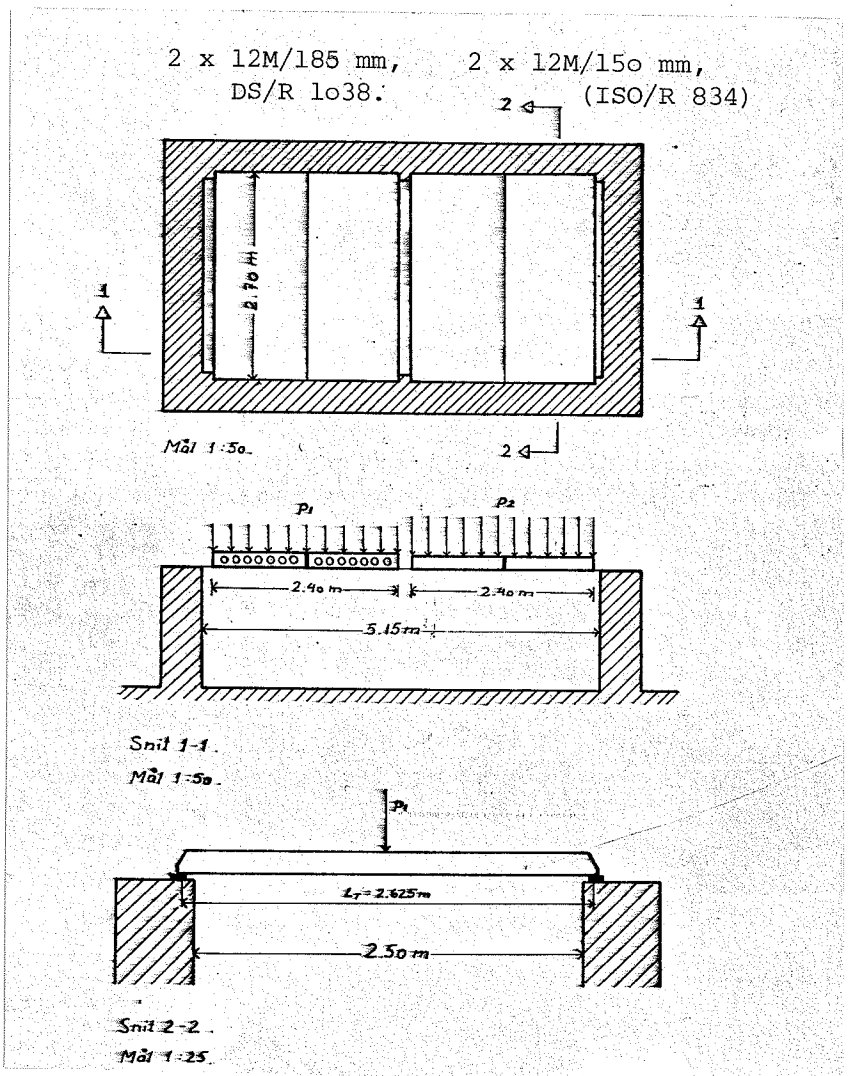


Fig. 11a. Skitse af forsøgsopstilling til brandforsøg med betondækelementer. Ref.: 7.1.

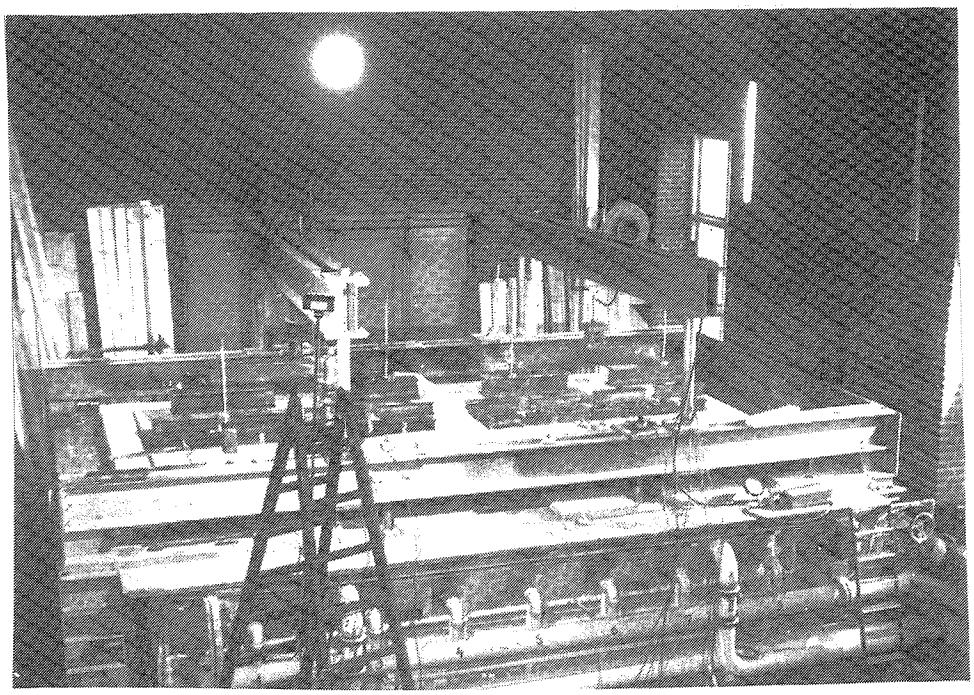


Fig. 11b. Forsøgsopstilling i brandprøvningsovn.

2. GENERELT OM PROJEKTET

Baggrund

Kravene til de bærende og adskillende konstruktioners brandmodstand i de forskellige bygnings- og brugskategorier er som bekendt lovmæssigt fastlagt og hovedsagelig udtrykt i bygningsreglementet, senest BR 77. Hvorvidt en bygningsdel opfylder givne krav afgøres ved en standardiseret klassifikationsprøvning efter DS 1051 samt 1052 og 1053. DS 1051 omhandler ovnprøvningens udførelse. DS 1052 og 1053 omhandler klassifikationsbetingelserne, i hvilke en bygningsdels brandmodstand angives ved 3 kriterier: stabilitet, integritet og temperaturstigning på udvendig overflade.

Klassifikationssystemet må siges at være et veludbygget system, som normalt giver en god sikkerhed i konstruktionernes anvendelse. Men det er også et temmelig stift system, der ikke tillader nogen nuanceret vurdering i de enkelte brugstilfælde. Når man betænker de veludviklede dimensioneringsmetoder for konstruktioner udsat for statiske og sædvanlige dynamiske belastninger, er det derfor naturligt at tænke sig en parallel metodik udviklet for påvirkninger, eller belastninger, fra brand.

Formål

Et systematisk arbejde hermed blev optaget i Sverige i midten af 1960'erne, og har hovedsageligt været koncentreret omkring en forskergruppe ved Lunds tekniske Højskole. Principperne for en nuanceret branddimensionering og en række parametre var fastlagt i begyndelsen af 1970'erne, og formålet med det her omhandlede projekt blev derfor at fremskaffe nøjere kendskab til dimensioneringsmetodikken, dens forudsætninger og anvendelsesmuligheder. Under projektforløbet kunne den erhvervede viden derefter formidles videre, med det endemål at få branddimensionering accepteret og godkendt som en metode sideløbende med klassifikationssystemet. Dette er fornylig sket i Sverige, omend med forskellige begrænsninger.

Projektets delarbejder

Som forannævnt blev projektet opdelt i 4 delarbejder.

De indledende litteraturstudier viste, at der kun i meget begrænset omfang var viden tilstede herhjemme om emnet, hvorfor

der ved professor, dr. Ove Petterssons venlige medvirken dels blev fremskaffet uddybende litteratur, dels fremkom en række kommentarer til sagen.

I sin fulde sammenhæng må en nuanceret branddimensionering endnu siges at være en ganske kompliceret proces, der forudsætter megen brandteknisk viden hos brugeren. Metodikken kan anskueliggøres ved en art flow-diagram, se fig. 2, side 9. Til sammenhold med dette er klassifikationssystemet anskueliggjort i fig. 1. Som det ses, er dimensioneringen en flertrins procedure, der i hovedtræk omfatter:

1. Fastlæggelse af bygningens størrelse, geometri og ventilationsforhold.
2. Valg af bygningens konstruktioner: de bærende, omgivende eller adskillende bygningsdele og deres konstruktive sammenhæng.
3. Vurdering af bygningens brandbelastning, udtrykt ved den varmemængde, der i brandtilfælde kan udløses fra bygningsdele og indhold.
4. Beregning af brandforløbet udfra kendskabet til de foregående punkter (temperatur-tidskurven).
5. Beregning af temperatur-tidsfeltet i konstruktionerne udfra 4 og udfra kendskab til bygningsmaterialernes brandtekniske egenskaber i henseende til varmetransmission og -kapacitet.
6. Beregning af deformationer og spændinger, herunder disses ændringer, i konstruktionerne under brandforløbet udfra 5 og udfra materiale- og styrkeegenskaberne under højtemperaturforhold.
7. Fastlæggelse af sikkerhedsfaktor under hensyn til bygnings- og brugsværdi.
8. Sammenhold af pkt. 6 og 7 til vurdering af om sikkerheden er fornøden, eller acceptabel. Hvis "nej" omregning ved nyvalg eller justering i et eller flere af de foregående trin.

I kapitel 3 er en række detailforhold omkring de enkelte trin omtalt.

Dimensioneringen af den enkelte bygningsdel udgør, som det fremgår, kun en mindre del af systemet, men den forudsætter grundig kendskab til byggematerialernes brandtekniske egenskaber. For de traditionelle

konstruktionsmaterialers (træ, stål, beton og jernbeton) vedkommende er disse på basis af mange undersøgelser på laboratorier og i brandtilfælde som helhed godt oplyst, og tilgængelig litteratur med tal, grapher m.v. foreligger. Mindre sikker er kendskabet til plastmaterialernes brandtekniske egenskaber, men da de kun sjældent kan anvendes som bærende eller adskillende bygningsdele, er forholdet i denne forbindelse af mindre betydning.

For nogle materialer, som f.eks. træ og stål, er dimensioneringen simpel, eftersom kun forholdsvis få og sikre parametre indgår deri, medens den for f.eks. beton og spændbeton er mere omfattende og ofte vil kræve anvendelse af EDB.

I den i dag anvendte dimensioneringsmetodik for statiske belastninger bruges som bekendt et system af partialkoefficienter på belastninger og på styrke- og stivhedstal, fastlagt efter belastningsgrupper og fugtklasser og i foreskrevne belastningskombinationer i henhold til normerne. En sådan differentieret fremgangsmåde findes ikke for beregning eller vurdering af bygningskonstruktionernes sikkerhed ved brandpåvirkning. Belastningerne fra brand er normalt kortvarige set i forhold til de statiske belastninger. Afhængig af forhold som mængde og sammensætning af brændbart materiale, brandrummets størrelse, omgivende konstruktioner og åbningsforhold samt slukningsindsatsen, manuel som automatisk, er typiske tidsforløb fra ½-2 timer, hvilket da også udtrykkes i klassifikationstiderne 30, 60, 90 og 120 minutter.

Fra lovgivningens side har man primært ønsket at tilgodese personsikkerheden under brand, men også sikkerheden mod (for store) materielle og økonomiske tab er naturligvis af betydning. Eftersom personstabstallet i en årrække har været stort set konstant (ca. 80), synes det første mål rimelig godt opnået ved den nuværende sikkerhedsfilosofi. Derimod er tabsbeløbene ved brandskader vokset stigende (nu vel ca. 800-900 mill. kr./år), og opmærksomheden derfor i højere grad henledt herpå. Tabene omfatter både rene bygningstab og tab ofte som følge af funktionssvigt i bærende og adskillende konstruktioner (lagerværdier, driftstab), og udviklingen

peger derfor mod en mere nuanceret vurdering af konstruktionernes brandmodstand, end klassifikationssystemet giver mulighed for.

Det må imidlertid erkendes, at grundlaget for opstilling af en sikkerhedsfilosofi i retning af den ved de statiske belastninger anvendte endnu ikke er tilstede. En hovedårsag hertil er, at den store variation, der er i brandopstået og brandforløb i de forskellige bygnings- og brugskategorier, ikke hidtil har kunnet belyses med statistisk tilstrækkelig sikkerhed. Både dette specifikke forhold og sikkerhedsproblemet som helhed arbejdes der dog flere steder ihærdigt med.

Der er i forbindelse med projektet gennemført nogle brandforsøg med forskellige bygningselementer med det formål at få belyst elementernes brandmodstand i relation til de førnævnte 3 kriteriers stabilitet, integritet og temperaturstigning og at få en sammenligning af beregnede og eksperimentelt fundne temperatur/tids-tilstande i elementerne. Brandpåvirkningen under forsøgene har været den standardiserede, som vel sjældent vil være identisk med den i praksis forekommende. Der har derfor i projektet været arbejdet med begrebet ækvivalent brandbelastning, der kort beskrevet muliggør "oversættelse" fra et brandforløb til et andet, oftest en standard tidstemperaturkurve. Forsøgene har bl.a. omfattet prøvning af typiske danske væg- og dækelementer af beton, dels 150 mm massive elementer, dels 185 mm huldækelementer efter DS/R 1034.

Ved forsøgene med vægelementer bestemtes temperatur-tidsfelterne i 3 højder i elementet, hvorved visse ovnkarakteristikas indflydelse på prøvningen kunne vurderes. Måleresultaterne blev sammenlignet med resultaterne af den analytiske beregning, baseret på standard-brandpåvirkning. Overensstemmelsen blev ikke så god som ønskelig men kan forbedres ved nøjagtigere beregning og følgning af den forudsatte brandkurve.

For dækkenes vedkommende viste forsøgene god sikkerhed i forhold til klassifikation BS 60, idet første brud forekom efter godt 90 minutters påvirkning, og temperaturstigningen i udvendig overflade var meget moderat. Undersøgelserne viste

ikke tilstrækkelig god overensstemmelse mellem forud beregnede og experimentelt fundne temperatur-tidstilstande, men dette kan primært henføres til beregningernes nøjagtighed. Der er desuden udført en branddimensionering af sædvanligt anvendte spændbetonkomponenter, hvor resultaterne for TT-komponenternes vedkommende har vist god overensstemmelse med svenske forsøgsresultater. Andre arbejder i forbindelse med branddimensionering er beskrevet i rapportens kap. 6.

Projektets resultat

De udførte undersøgelser har vist, at det er muligt for i hvert fald en række sædvanligt anvendte bygningskonstruktioner at foretage en nuanceret branddimensionering, men også at arbejdet hermed kan blive forholdsvis omfattende, og at nogle væsentlige parametre, f.eks. med hensyn til brandhyppighed og brandforløb, der berører sikkerhedsfastlæggelsen ikke er fuldt oplyste. Imidlertid er dimensioneringsmetodikken meget klar, således at arbejdet kan systematiseres, og for de mere komplicerede beregninger findes eller kan relativt nemt udvikles EDB-programmer. Problemerne omkring sikkerhedsfastlæggelsen kan næppe forventes løst inden for kortere tid, bl.a. fordi det forudsætter et større analysearbejde af indtrufne brande og tilvejebringelse af brandstatistikker. Det skulle dog være muligt tilnærmelsesvis at behandle forholdene, og overvejelser desangående indgår for tiden i et forberedende normarbejde.

Videreførelse af projektet

En fortsættelse af projektet som helhed er ikke planlagt. Det er opfattelsen, at der under projektets forløb er sket en tilstrækkelig afklaring af mange aspekter, og den opnåede viden har da også fundet anvendelse dels i undervisning, dels i forskellige brandtekniske udvalgs- og gruppearbejder, som projektets medarbejdere deltager eller deltog i. Der skal i denne forbindelse særligt peges på det normarbejde vedr. branddimensionering, som er iværksat og på et fornylig afsluttet projektarbejde vedr. brandrisikoanalyse (i ATV-regie).

Fortsættelsen af projektet bør ske i form af projekter på dele af hovedområdet Branddimensionering. Det føromtalte analyse- og statistikarbejde, hvis resultater iøv-

rigt ville kunne anvendes på andre brandtekniske felter, bør fremmes, men inden formulering af et konkret projekt herom er det dog rimeligt at afvente udkommet af de forannævnte udvalgsarbejder, ligesom der må forudses et vist forarbejde med forhandling med de parter, der nødvendigvis må involveres i sagen.

Instituttet har udarbejdet 3 projektforslag omhandlende: Beregningsmetoder for betonkonstruktioners bæreevne under brand, Stabilitetssvigt i bygningsafsnit forårsaget af brand samt Brandtekniske modeller anvendt på bygningskonstruktioner. Disse er for tiden til drøftelse i ATV-brandgruppens udvalg vedr. brandteknisk forskning og udvikling.

3. BRANDDIMENSIONERINGENS PRINCIPPER OG PARAMETRE

Formålet med al brandsikring er naturligvis at skabe den fornødne sikkerhed for personer og mod (alt for) store materielle og økonomiske tab ved brand. Et af midlerne dertil er at søge følgende 3 kriterier for brandmodstand opfyldt for en given bygningsdel, hvis funktion kan være bærende eller adskillende eller eventuelt begge:

Stabilitet

Integritet

Isoleringsevne.

Herved forstås

at bygningsdelen ikke må bryde sammen under samtidig statisk belastning og brandpåvirkning i et givet tidsrum,

at bygningsdelen ikke må undergå sådanne ændringer under den kombinerede påvirkning, at der opstår utætheder, hvorigennem ild og røg kan trænge, i dette tidsrum,

og at bygningdelen skal have en sådan isoleringsevne, at der ikke sker større temperaturstigninger på den ikke-brandpåvirkede side end fastlagt eller vurderet acceptabelt i påkommende tilfælde.

Man må her notere sig, at der ved bygningsdel ikke alene forstås den enkelte komponent, men også en sammenbygget konstruktion af flere komponenter, og i videste udstrækning en hel bygningssektion.

Hvad enten man anvender en klassifikationsmetodik eller en dimensioneringsmetodik må målet da være en påvisning af, at de 3 kriterier er opfyldt.

Forskellen mellem en brandteknisk klassificering og en brandteknisk dimensionering af en bygningsdel kan anskueliggøres ved de nedenfor viste "flowdiagrammer", fig. 1 og 2 respektive. Diagrammerne viser den principielle fremgangsmåde og hovedparametrene i de to tilfælde. Det ses, at man ved en klassificering, der måske kan beskrives som en simpel dimensionering, har få parametre og en enkel fremgangsmåde. Ved en nuanceret brandteknisk dimensionering er der mange parametre og en i hvert fald tilsyneladende kompliceret metodik. En nøjere analyse viser dog, at metodikken

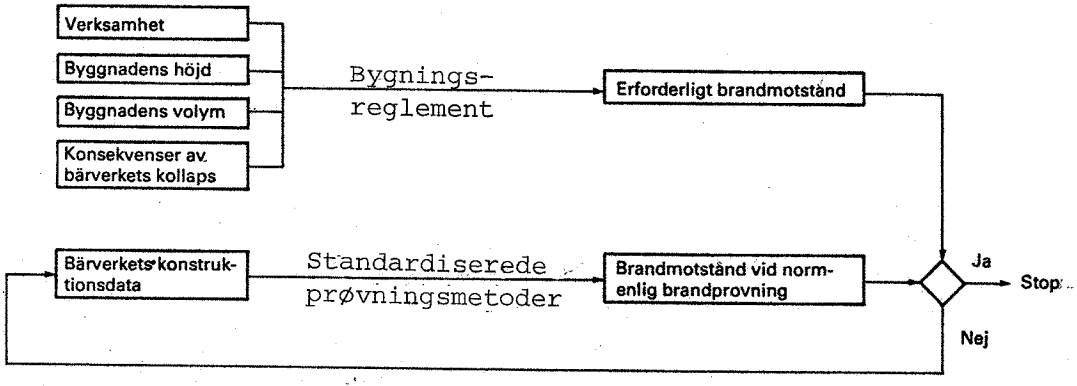


Fig.1. Flow-diagram for simpel brandteknisk dimensionering af konstruktioner (klassificering) [12].

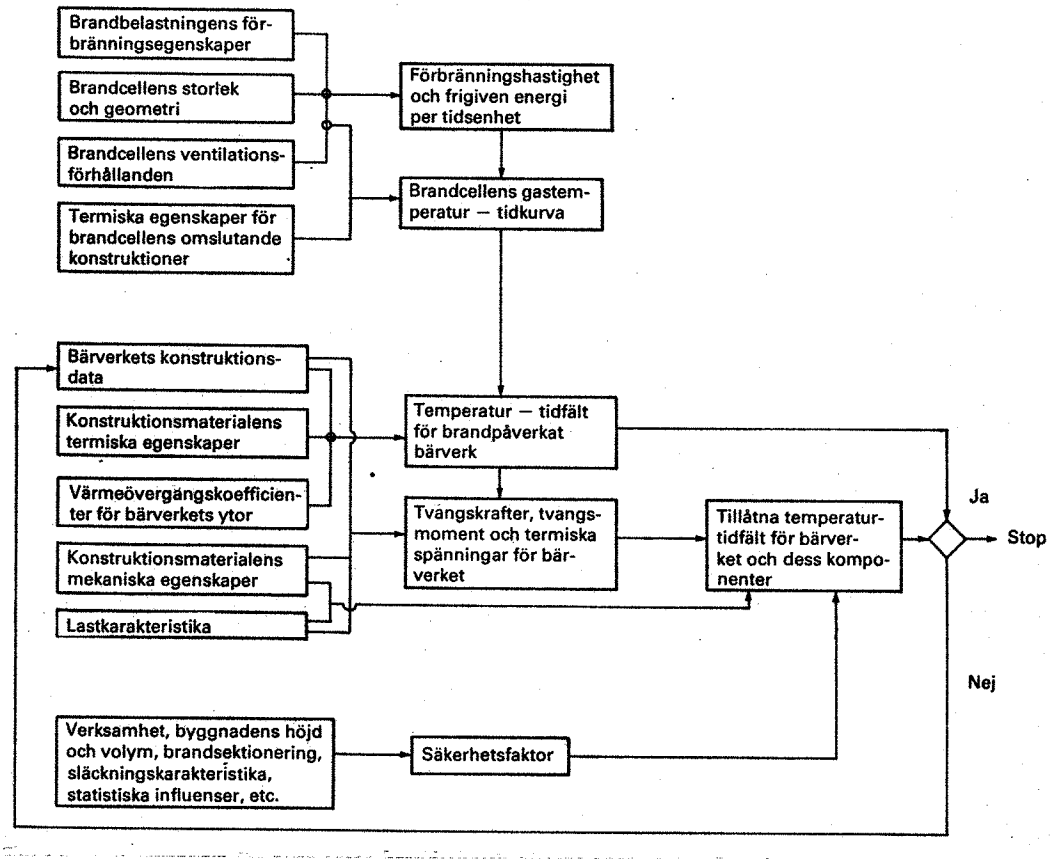


Fig. 2. Flow-diagram for nuanceret brandteknisk dimensionering af konstruktioner. [12].

er ganske logisk og også praktisk velanvendelig; herom i det følgende.

Klassificeringen er den mange år gamle metodik, hvor de brandtekniske krav er love eller normmæssigt fastlagt for en given bygnings anvendelse og udformning, og hvor de påvises opfyldt, i et krævet tidsrum, ved en standardiseret prøvningsmetodik. Fremgangsmåden er ligetil, og resultatet - bestået/ikke bestået - som regel indiskutabelt. Der indgår kun sjældent større beregninger eller vurderinger og som regel kun i forbindelse med montagen af bygningsdelen i prøvningsovnen, der principielt skal svare til den i praksis anvendte. Alle parametre ligger som regel fast, herunder den vigtige: brandpåvirkningen. Den udtrykkes som bekendt ved en standardiseret temperatur-tidskurve, fig. 3.

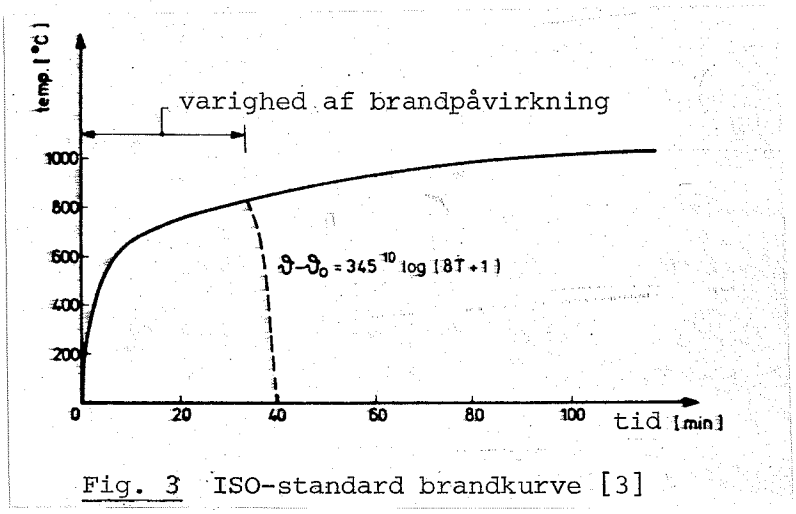


Fig. 3 ISO-standard brandkurve [3]

Ved en faktisk brand vil temperatur-tidsforløbet (næsten) altid være et andet, indeholdende 3 karakteristiske faser (fig. 4), der i tid og partielt forløb kan variere ganske meget.

Standardkurven er derfor ikke særlig repræsentativ, men indebærer den klare fordel, at alle bygningsdele udsættes for samme påvirkning og derved får ens vurderingsgrundlag. De sædvanligt anvendte bygningsdele eller -konstruktioner har da også een gang for alle kunnet prøves og godkendes, hvilket naturligvis er af stor praktisk betydning. Bygningsreglementets samling af umiddelbart anvendelige bygningsdele afspejler dette, omend den ingenlunde er udtømmende.

Den nuancerede brandtekniske dimensionering giver principielt og også i praksis, når parametrene er vel oplyste, en væsent-

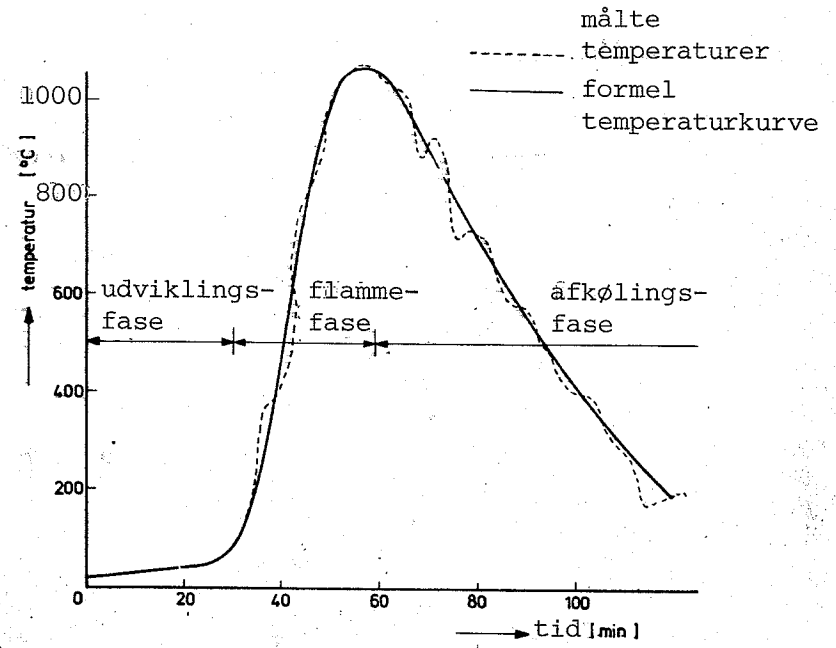


Fig. 4. Gastemperaturudvikling under en brand [3]

lig nøjagtigere bestemmelse af bygningskonstruktionernes opførsel under brand, - for hvert enkelt bygnings- og brugstilfælde - end hidtil mulig. Heri ligger den logiske parallel til den dimensionering, der sædvanlig foretages for statiske og for visse dynamiske belastninger, hvad enten man så til denne anvender brugs- eller brudstadieberegning.

Det er især af betydning, at man

1. behandler den konkrete bygning til en konkret brug og ikke blot anvender en grov kategorigruppering som ved klassificeringsmetoden,
2. beregningsmæssigt bestemmer brandforløbet i det aktuelle bygningsafsnit (brandcelle eller større brandsektion) og derved fås en mere korrekt temperatur-tidskurve i brandrummet, som muliggør en
3. nøjagtigere bestemmelse af temperatur-tidsfeltet i den brandpåvirkede konstruktion, når konstruktionsdata og materialeparametre er kendte.

Når konstruktionens mekaniske egenskaber og deres højtemperaturafhængighed samt de statiske og evt. dynamiske belastningskarakteristika er kendte, kan herefter

4. kræfter, spændinger og deformationer under brandpåvirkningen beregnes for konstruktionen.

Tilbage står så at fastlægge en passende brugs- eller brudsikkerhed, afhængig af de parametre, der er anført i fig. 2, og dermed at

5. fastlægge det tilladelige temperatur-tidsfelt for konstruktionen og dens komponenter.

Til slut sammenholdes det fundne og det tilladelige til afgørelse af konstruktionens anvendelighed.

Det ses, at "dumper" konstruktionen, er der principielt mange parametre at variere på. I praksis er antallet dog begrænset. Normalt vil bygningens brug og indretning, som er af væsentlig betydning for flere parametre (brandrisiko, brandbelastning og brandudvikling), og byggesystemet på forhånd være fastlagt. Med det sidste begrænses variationen af materiale- og konstruktionsparametre. Som regel er der dog mulighed for at ændre geometriske forhold som komponenttværsnit og spændvidder, måske også bygningens sektionsstørrelser; i betonkonstruktioner kan armeringen ændres, og der kan gives konstruktionen særlig beskyttelse i form af brandisolering ved sprinkling eller på anden måde.

En meget vigtig parameter i dimensioneringen er naturligvis brandforløbet udtrykt ved brandrummets gastemperatur-tidskurve. Denne er bestemt af varmebalanceforholdene i rummet, dvs. balancen mellem udviklet og bortskaffet varmeenergi under branden. De detaljerede forhold omkring varmebalanceudvikling og påvirkning heraf er først klargjort inden for de sidste 10 år ved forskningsarbejder fortrinsvis i Japan, Storbritanien og Sverige, se f.eks. litt. [7], [11], [19].

Flere faktorer influerer på varmebalancen under branden. De vigtigste er:

1. Brandbelastningen, dvs. mængden af brændbart materiale, dets energiindhold og den hastighed, hvormed energien frigøres.
2. Brandrummets åbningsforhold, dvs. størrelse, men også placering af åbninger i de omgivende konstruktioner, som er effektive under branden, og
3. De omgivende konstruktioners termiske egenskaber, dvs. deres evne til at bortlede eller optage varmeenergi fra branden.

Hvortil naturligvis kommer effekten af manuelle eller automatiske indgreb, forsåvidt sådanne kan etableres og tages i regning.

Fig. 5 viser typiske temperatur-tidssammenhænge for et fuldstændigt brandforløb.

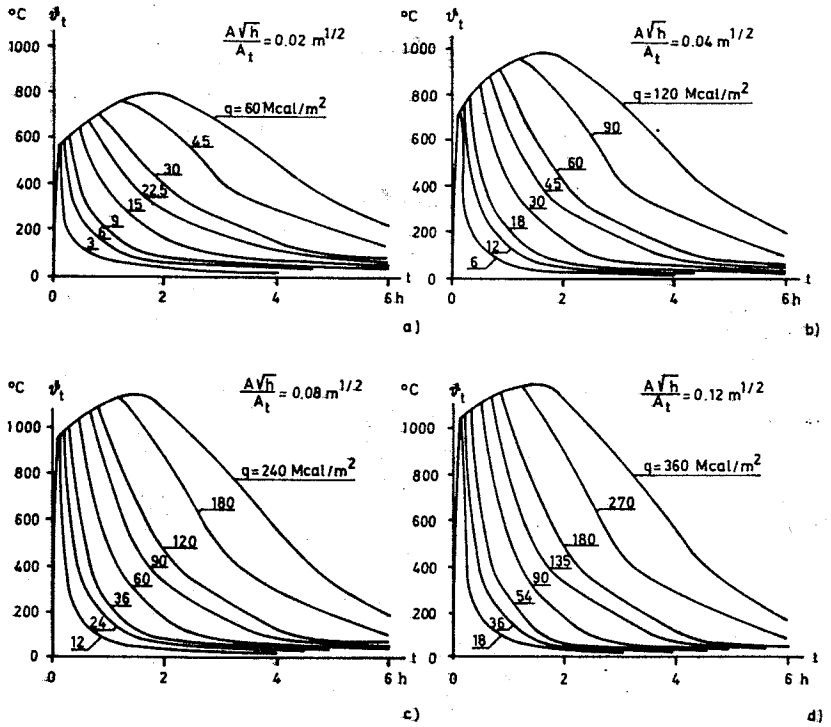


Fig. 5

Gastemperatur-tidskurver, v,t(°C,h), for fuldstændig forbrændingsproces med forskellige værdier af åbningsfaktoren $A\sqrt{h}/A_t (m^{\frac{1}{2}})$ og brandlast q (Mcal/m² af den totale omgivende overflade). Kurverne svarer til en træbrand i et rum med bestemte omgivende konstruktioner. [12],[17].

En nøjere analyse af de nævnte faktorer og deres samspil skal dog ikke gives her. Der kan henvises til f.eks. litt. [12], i hvilke der er givet en detaljeret behandling både af dimensioneringsmetodikken som helhed, af beregningsgangen og af de væsentlige enkeltheder.

Der er dog nogle enkelte forhold, som bør omtales:

Sideløbende med det teoretiske udviklingsarbejde med den brandtekniske dimensionering har man især i Japan og Sverige omkring 1970 gennemført forsøgsserier til verifikation af hypoteser og beregningsresultater, og man har som helhed fundet

god overensstemmelse mellem teori og forsøg. Under forsøgene har man arbejdet med veldefinerede brandbelastninger af træ eller træbaseret materiale med varierende men hver gang kendte åbningsforhold og med et omend begrænset antal varianter af omgivende konstruktioner i brandrummet.

I praksis vil brandbelastningen i dag som oftest være sammensat af materialer med ret forskellige forbrændingskarakteristika, ligesom der vil være stor variation i de omgivende konstruktioner, der jo kan være tunge eller lette eller kombinationer deraf, godt eller dårligt isolerende og varmeakkumulerende, brændbare eller ubrændbare. Disse forholds indflydelse har man naturligvis erkendt og søgt at vurdere tidligt og iøvrigt forskellige steder søgt at belyse eksperimentelt. Både på baggrund heraf men også med henblik på den praktiske anvendelighed har man derfor - i den svenske dimensioneringsversion - indført nogle brandtekniske begreber, som kort skal omtales, nemlig

Brandcelletyper

Ækvivalent brandbelastning

Ækvivalent åbningsfaktorer og

Ækvivalent brandvarighed.

De 3 førstnævnte anvendes i sammenhæng ved oversættelse af brandforløbet i anden type brandcelle til brandforløbet i en såkaldt standardbrandcelle. Eftersom dimensioneringsgrundlaget, bl.a. i form af tabeller og diagrammer i litt. [12] er baseret på temperatur-tidsforløbet i denne, der er defineret i Svensk Byggnorm med omgivende konstruktioner som et gennemsnit af beton, tegl og letbeton, er det nødvendigt at have nogle omsætningsfaktorer fra virkelig til ækvivalent brandbelastning og åbningsfaktor for forskellige brandrum (brandcelletyper). Disse faktorer tilsikrer, at varmebalancen er tilgodeset i de to tilfælde. Brandcelletyperne, 8 ialt, er defineret ved en bestemt sammensætning af de omgivende konstruktioner, f.eks. 20% beton og 80% sammensat gipspladekonstruktion (type G). Omsætningsfaktoren for ækvivalent brandbelastning og åbningsfaktor varierer for denne brandcelletype fra 1,50 til 1,05 for åbningsfaktorer fra 0,02 til 0,12 $m^{\frac{1}{2}}$.

Begrebet "ækvivalent brandvarighed" er indført som et hjælpemiddel for oversættelse fra brandpåvirkning ved en virkelig brand til den termiske påvirkning ved en standardbrandprøvning for klassificering af en bærende eller adskillende konstruktion eller vice versa. Den ækvivalente brandvarighed er den tid, som konstruktionen skal påvirkes under en standardprøvning for at opnå samme temperatur som under den virkelige brand, og den vil være afhængig af såvel brandforløbets parametre som af den givne konstruktion (materiale, udformning). Begrebet kan anskueliggøres ved fig. 6 fra litt. [12], [16], i hvilke det er detaljeret behandlet.

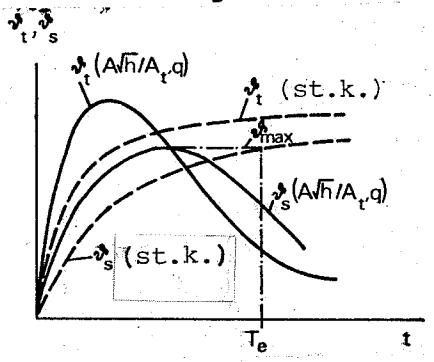


Fig. 6

Definition af ækvivalent brandvarighed, T_e, exemplificeret ved en uisoleret stålkonstruktion. Fuldt optrukne kurver angiver gastemperaturen θ og ståltemperaturen θ_s ved en virkelig brand, punkterede kurver angiver de tilsvarende temperaturer ved en standardbrandprøvning [12].

Sluttelig skal i dette kapitel lidt nøjere behandles begrebet "brandbelastning", der som før nævnt i sin simpleste form defineres som den varmeenergimængde, der kan frigøres ved en fuldstændig forbrænding under en brand. Den angives normalt enten pr. m^2 gulvareal eller, mere korrekt og nødvendigt for dimensioneringsbrug, pr. m^2 omsluttende ydre. Den omfatter naturligvis såvel den faste brandbelastning (i konstruktioner, fast inventar m.v.) som den mobile brandbelastning (lagervarer, møbler o.a.). Af betydning for brandforløbet er imidlertid ikke alene størrelsen af men også hastigheden, hvormed varmeenergien kan frigøres. Denne sidste parameter afhænger både af brændstoffet i sig selv og af den form, i hvilket det befinder sig. En korrekt branddimensionering fordrer altså kendskab til begge forhold. For fast brændstof som f.eks. træ og træbaserede materialer eller plastmaterialer

har fordelingen i brandrummet men også i høj grad finfordelingen af brændstoffet stor betydning.

Forholdet er umiddelbart forståeligt ved betragtning af et par træbaserede fabrikationer, nemlig af spånplader og af trækasser. I første tilfælde er brandbelastningen i produktionsleddet beskeden, målt pr. m^2, men træmaterialets finfordeling stor - der er rigelig lufttilgang til en forbrænding. På lageret stables pladerne kompakt i stor højde; der er meget stor brandbelastning, målt pr. m^2, men der er kun luftadgang til sidefladerne, og forbrændingshastigheden vil følgelig være moderat. I det andet tilfælde vil finfordelingsgraden stige fra råvare til færdigt produkt, og på lageret vil der være rigelig luftadgang til et næsten eksplosivt brandforløb.

Ved en brandteknisk dimensionering vil det være nødvendigt at foretage et bedste skøn over de forannævnte forholds betydning, men man må på den anden side være opmærksom på konsekvenserne af en for hård fastlåsning af brandbelastningen. Den kan indebære ulemper ved eventuelle fremtidige ændringer og omdisponeringer i bygningen. Det vil derfor ofte være rimeligt at bestemme den dimensionerende brandbelastning på grundlag af statistiske undersøgelser af brandbelastningen i karakteristiske typer af lokaler eller bygninger, - hvilken betragtningsmåde iøvrigt også stemmer godt med fastsættelsen af den statiske nyttelast på en konstruktion. For nogle bygnings- og brugskategorier er sådanne undersøgelser foretaget, bl.a. i Sverige og i U.S.A., men også i enkelte tilfælde herhjemme. De svenske resultater er tabelleret til direkte anvendelse ved branddimensionering.

Endelig bør omtales et principielt væsentligt men i praksis mindre betydende forhold: Branddimensioneringsmetodikken er baseret på forudsætningen, at brandforløbet er ventilationskontrolleret, dvs. at lufttilførslen kontrollerer forbrændingshastigheden. Dette vil ikke altid være tilfældet. Brandbelastningen kan være beskeden og lufttilførslen rigelig, og i så fald vil brandforløbet være brændstofkontrolleret. Men eftersom branden i dette tilfælde vil forløbe mindre hastigt, vil forudsætningen ventilationskontrolleret brand være på den sikre side, og rimelig at anvende i hvert fald i grænsetilfælde.

4. BRANDDIMENSIONERING AF KONSTRUKTIONSELEMENTER

Når de forskellige parametre omtalt i det foregående afsnit er fastlagt, kan dimensioneringen af de enkelte konstruktionselementer og/eller konstruktionsafsnit foretages. Af flow-diagrammets midterste del, fig. 2, fremgår, at det drejer sig om

1. Beregning af temperatur-tidsfeltet i den brandpåvirkede bygningsdel.
2. Beregning af tvangskræfter og -momenter og af termiske spændinger i bygningsdelen.

Dette gælder for ikke-brændbare bygningsdele, eller bygningsdele overvejende af ubrændbare materialer, dvs. som oftest bygningsdele af stål, beton, jernbeton, letbeton eller murværk. For rene trækonstruktioner er beregningerne væsentligt simplere, fordi en enkelt parameter, indbrændingshastigheden, normalt er helt afgørende. Afhængig af den konkrete udformning gælder det sidste også, omend i varierende grad, for sammensatte bygningsdele med træ eller træbaserede materialer.

Den brandtekniske dimensionering af simple trækomponenter og af en sammensat komponent er nøjere beskrevet i litt. 8.2 og 8.3, hvorfor kun enkelte væsentlige forhold skal omtales her. Omend indbrændingshastigheden for det aktuelle træmateriale i nogen grad er afhængig af bl.a. de lokale termiske påvirkninger og for tynde plader af tykkelsen og en eventuel bagved liggende isolering, kan man for dimensioneringsformålet med god tilnærmelse regne med konstant indbrændingshastighed. Afhængig af hvilken træsort eller hvilken type plade, det drejer sig om, vil den for sværere konstruktioner være 0,4-0,8 mm/minut og for plader 0,6-1,0 mm/minut. Eftersom trætværsnittets temperatur- og fugtforhold bagved brandzonen kun ændres meget lidt, kan der regnes med uændrede styrke- og stivhedstal. Dimensioneringen bliver derfor en simpel restbæreevnebestemmelse, hvortil de sædvanlige beregningsmetoder for bjælker, søjler og rammer m.v. anvendes.

Konstruktionens brandmodstand kan da beskrives ved "branddrøjtiden", der kan defineres som den tid, der ved en brand forløber, indtil den karakteristiske kort-

tidsbæreevne bliver mindre end 1,5 gange den foreskrevne belastning. Eneste forskel fra den normale statiske dimensionering er, at der ikke som ved denne anvendes partialkoefficienter, men indtil videre i hvert fald en sikkerhedsfaktor.

For de ikke-brændbare bygningsdele er dimensioneringsmetodikken, jf. pkt. 1. og 2. foran, principielt enkel nok, men især for beton og jernbeton undertiden ganske omfattende i gennemførelsen. I det følgende behandles dels de faktorer (delparametre), som indgår i beregninger, dels beregningernes gennemførelse.

Temperatur-tidstilstanden i et brandpåvirket element bestemmes af varmetransmissionen til og i elementet, som afhænger af

a. Påvirknings- og afkølingsbetingelserne. Væg- og dækkonstruktioner påvirkes normalt fra flere sider.

b. Materialeegenskaberne, dvs. de termiske og de styrke- og deformationsmæssige egenskaber og deres temperaturafhængighed.

c. Dimensionerne af konstruktionselementet eller dets delkomponenter og en eventuel isolering.

Ved en nøjagtig beregning må alle disse parametre tages i regning. Såvel de termiske omstændigheder som materialeegenskaberne er indgående behandlet i litteraturen, både teoretisk og på basis af forsøg, se f.eks. litt. [10] og [18]. For den praktiske beregning vil det ofte være nødvendigt at gøre visse simplificerende forudsætninger i parametrenes varians, således vil man normalt regne den påvirkede overflades temperatur lig med brandrumstemperaturen. Forsåvidt varmetransmissionen fra branden til elementet er tilstrækkelig høj, hvad der som regel vil være tilfældet, medfører tilnærmelsen kun en mindre fejl, og resultatet vil være på den sikre side. Ofte forudsættes endvidere, at materialeegenskaber er temperaturuafhængige. Tilnærmelsen kan dog medføre betragtelige fejl, og man bør derfor regne med den i de fleste tilfælde kendte temperaturafhængighed, eventuelt med rimeligt gode middelværdier.

Ved styrke- og deformationsberegninger af et brandpåvirket konstruktionselement eller -afsnit må der iflg. sagens natur tages hensyn til dets statiske randbetingelser. Hvor konstruktionen er statisk bestemt, som tilfældet ofte er, eller regnes at være i elementbyggeri, er forholdene normalt enkle at behandle. I statisk ubestemte konstruktioner kompliceres beregningen, fordi der under brandpåvirkningens forløb sker kraft- og momentomlejringer, hidrørende dels fra omlejring i tværsnittet, dels fra termiske spændinger (hindret ekspansion, hurtig nedkøling af stålelement).

For en hyppigt anvendt konstruktion, en kontinuert, flerfags jernbetonbjælke kan forholdene anskueliggøres som i fig. 7.

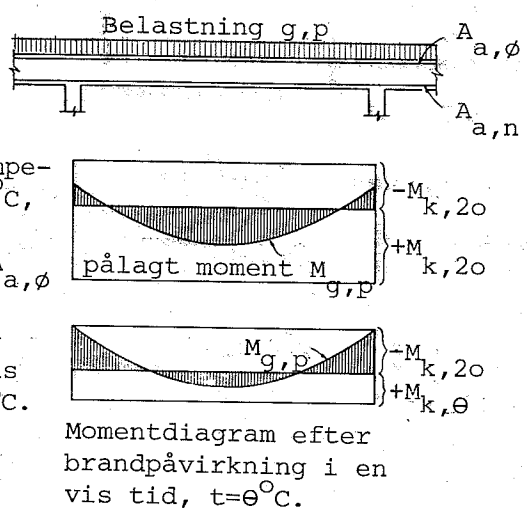


Fig. 7.
Momentomlejring i en brandpåvirket kontinuert jernbetonbjælke. [4].
$\pm M_k$ angiver $\pm$ momentkapacitet.

Den statiske ubestemthed forøger den kritiske temperatur, dvs. den temperatur ved hvilken konstruktionen har mistet så meget af bæreevnen, at den ikke mere kan optage den statiske belastning. Af definitionen forstås iøvrigt det generelle, at den kritiske temperatur må afhænge af konstruktionens udnyttelsesgrad, udtrykt f.eks. ved en pålagt sikkerhedsfaktor. Dette forhold gælder naturligvis uafhængigt af, hvilket konstruktionsmateriale man måtte vælge.

Det forhold, at en statisk ubestemt konstruktion, alt andet lige, har en større brandmodstandsevne end den tilsvarende statisk bestemt opbyggede, gør, at man

brandteknisk skulle foretrække en monolitisk konstruktion i jernbeton eller svejst stålkonstruktion fremfor en tilsvarende elementopbygget, men naturligvis vil andre hensyn som f.eks. byggetid og -økonomi i reglen være de overvejende. Man bør i denne forbindelse være opmærksom på, at elementkonstruktioner ofte kan have lokale brandtekniske svagheder i samlinger eller fuger, som, hvis de ikke sikres mindst lige så godt som komponenterne, gør en nøjagtig dimensionering af disse overflødig eller nytteløs. Det er selvsagt den totale konstruktion, der skal have den nødvendige brandmodstand.

Temperatur-tidsfeltet i en given brandpåvirket konstruktion kan bestemmes eller beregnes ved flere metoder:

1. Eksperimentel bestemmelse
2. Analytisk beregning
3. Numerisk beregning
4. Analog beregning
5. Grafiske metoder.

Hvilken beregningsmetode, der må foretrækkes, vil afhænge af flere forhold i konstruktionens geometri og elementets opbygning (homogent eller inhomogent), de termiske materialeegenskabers temperaturafhængighed, varmestrømningsforholdene (stationær eller ikke-stationær, een- eller flerdimensional), krav til nøjagtighed, rådighed over beregningsprogram og computerfaciliteter, eller ved eksperimentel bestemmelse, forsøgsteknik og -faciliteter.

De forskellige metoder og deres anvendelighed er i dag beskrevet i både brandteknisk og regneteknisk litteratur, se f.eks. litt. [6], [8], [10], [12], [15], [22] og i 7.3. Omtale af de eksperimentelle metoder falder uden for denne rapports område. De grafiske metoder, der ofte er baseret på resultater fra eksperimentelle undersøgelser eller fra beregninger, har den fordel, at de som regel er bekvemme i brug, men deres nøjagtighed vil naturligvis variere med forudsætningerne og den enkelte metodes udformning. I nogle tilfælde, eksempelvis hvor der er tale om flerlagskonstruktioner i et plan, kan analogregneteknik med fordel anvendes. I et sådant element er varmestrømmen eendimensional, og temperaturafhængige ændringer i materialeegenskaberne simuleres let med mod-

stands- og kapacitetsændringer i el-analogien.

De almindelig anvendte regnemetoder er dog analytisk og numerisk beregning. Analytisk beregning af et temperatur-tidsfelt i et konstruktionselement indebærer flere fordele, men også nogle ulemper og begrænsninger. En væsentlig fordel er det, at beregning sker ved anvendelse af simple formler eller grafer eller en kombination deraf. Såfremt det drejer sig om ensidigt eller symmetrisk påvirkede, homogene konstruktioner , eksempelvis et brandrums vægge og dæk eller søjler, er beregningsarbejdet normalt enkelt og begrænset, og der kan tages hensyn til skiftende materialeparametre i en omregning, ligesom resultaterne vil være af rimelig nøjagtighed. Ved beregning af f.eks. stålprofiler, brandbeskyttet med lette og indtil ganske høje temperaturer stabile materialer, vil en analytisk beregning også give resultater, der ikke afviger meget fra en eksperimentel bestemmelse eller nøjagtigere numerisk beregning.

Mange af de i dag anvendte bygningskomponenter har imidlertid mere komplekse former eller sammensætninger, ligesom den analytiske beregnings forudsætning om temperaturafhængige materialekonstanter i reglen ikke er korrekt, og til beregning i dette tilfælde vil i praksis kun numeriske metoder være anvendelige. Den numeriske behandling baseres på de for en elementinddelt konstruktion opstillede varmebalancesammenhænge i differensform, finite-elementmetoden, som muliggør beregning af ikke-stationær, 1- eller flerdimensional varmeledning. I differensligningerne indgår alle relevante faste eller variable parametre som varmeledningstal, specifik varme, varmeovergangstal i grænselag og densitet. Løsningen af ligningerne kræver som regel EDB-programmering og behandling, men med de faciliteter der i dag er til rådighed, skulle dette ikke være nogen stor hindring for metodens anvendelighed. For en række simplere tilfælde eksisterer der færdige programmer, og selv i de mere komplicerede tilfælde kan de sædvanligvis opstilles med en rimelig arbejdsindsats. Til praktisk brug vil det dog være af stor værdi at få udviklet færdige programmer også i de sidstnævnte tilfælde.

Eksempler på programopstilling og databehandling findes f.eks. i rapporterne anført i oversigten kap. 7, pkt. 2 og 4.

Sluttelig bør omtales et forhold, som ofte vil forekomme i brandpåvirkede betonkonstruktioner, nemlig afskalning af større eller mindre stykker. Årsagerne hertil kan være mange, men de to vigtigste synes at være lokale store spændingsforskelle og dannelse af høje damptryk, eventuelt i kombination. Eftersom større afskalninger kan give anledning til f.eks. tværsnitssvækkelse eller blottelse af armering, kan de få afgørende indflydelse på en konstruktions eller komponents brandmodstandsevne. Ved sædvanlige veludførte konstruktioner har afskalningen dog normalt ikke større omfang, men forholdet er desværre meget vanskeligt at tage i regning.

5. SIKKERHEDSPROBLEMATIKKEN

Det er tidligere i rapporten sagt, at formålet med al brandsikring er at skabe den fornødne sikkerhed for personer og mod (alt for) store materielle og økonomiske tab ved brand. Sondringen mellem personsikkerhed og anden tabssikkerhed kan udvides til også at gælde udtrykket "fornødne", derhen at det i første tilfælde kan fortolkes som "størst mulige" og i andet tilfælde som "rimelig" eller "acceptabel", evt. "optimal" sikkerhed. Heri ligger, at man for personer ønsker den absolut minimale risiko under brand, medens man for andre værdier normalt anvender en cost-benefit betragtning, dvs. en afvejning af de potentielle tab og sikringsomkostninger. Sammenhængen kan anskueliggøres ved fig. 8.

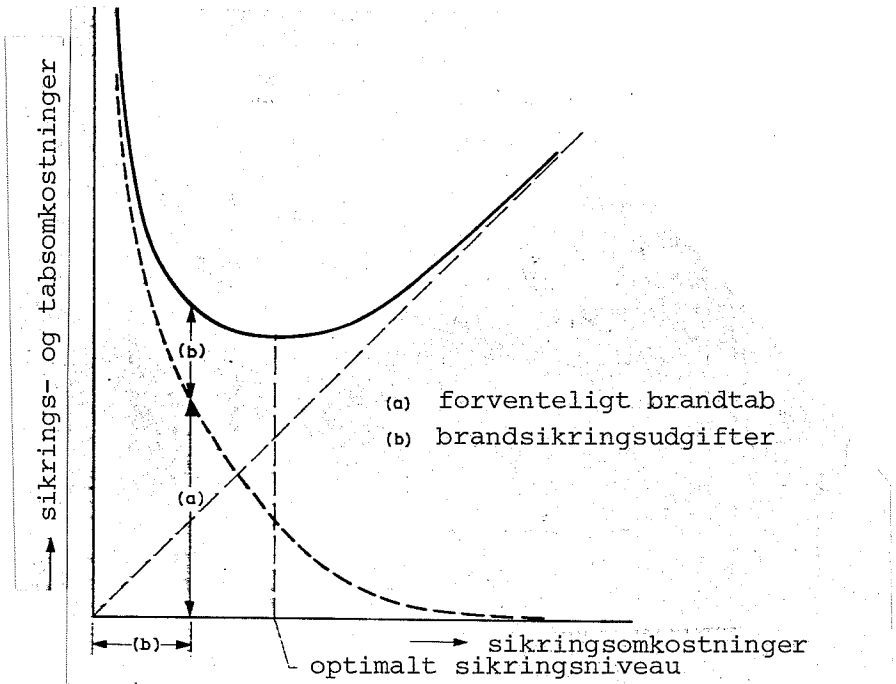


Fig. 8. Cost - benefit opstilling i princip [3]

I den stadigt anvendte sikkerhedssystematik kombineres, som før beskrevet, lovmæssige krav for en given bygnings- og brugskategori med en klassifikation af bygningskonstruktionernes brandmodstand og deres overflade-brandtekniske egenskaber. Herved skulle især personsikkerheden være tilgodeset på passende diffentieret måde, men naturligvis indebærer systemet også sikkerhed for begrænsning af andre tab. For det enkelte konstruktionselement kræves i DS 1052 udover brandstabilitet i et givet minuttal også

en restbæreevne efter afkølingen, der er $\geq$ 1,5 × prøvelasten. Som afkølingstid regnes sædvanligvis 1 døgn.

Til grund for de gældende sikkerhedskrav ligger især

Statistiske tabsoplysninger

Praktiske erfaringer fra brande

Resultater fra forsøg og prøvninger

Risikovurderinger

og i mange tilfælde

Sikringsomkostningsvurderinger.

Grundlaget er således ikke unuanceret, endsige ukvalificeret, men til brug for en nuanceret brandteknisk dimenering er det ikke tilstrækkelig koncist, bl.a. fordi der savnes et veldefineret statistisk kendskab til en række faktorer og deres varians. De hovedfaktorer, der påvirker en bygning eller bygningskonstruktions optimale brandmodstand fremgår af fig. 9.

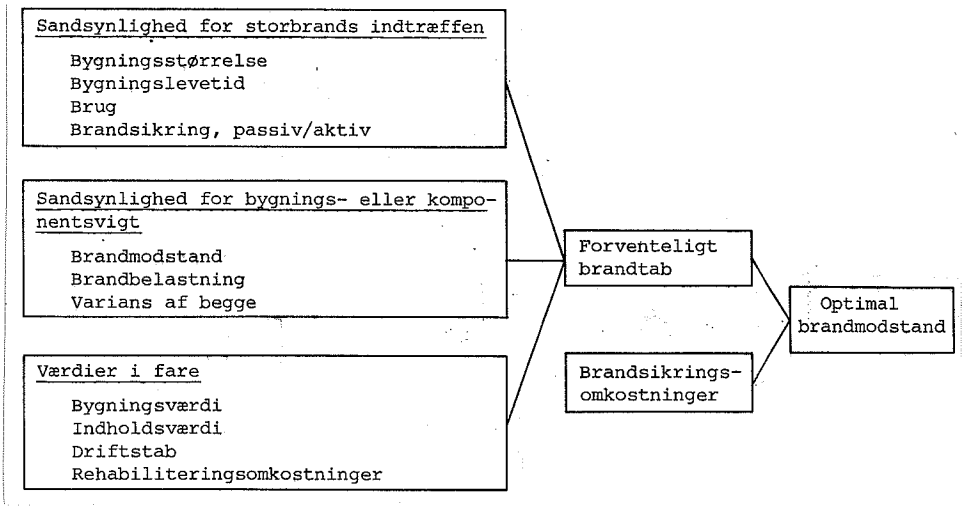


Fig. 9

Faktorer der påvirker den optimale brandmodstand af en bygning. [1o].

Det ses, at en nuanceret dimensionering for optimal brandmodstand forudsætter både

Konkret kendskab til nogle faktorer

og

Statistisk kendskab til andre og deres varians.

Den ønskede nøjagtighed af beregningen influerer direkte på behovet for det ene eller det andet nævnte, men af betydning er desuden, om man behandler en bestemt bygning til et specifikt formål eller, grovere, en bygningstype til kategoribrug. I alle tilfælde vil det dog særligt være sandsynligheden for brands opståen og især udvikling samt for svigt af bygning eller bygningsdel, der har interesse og skal sammenholdes. Der er i de seneste år gennemført mange delundersøgelser af disse forhold, bl.a. i Storbritanien, Sverige, Schweiz og U.S.A., se f.eks. litt. [17] med referencer, men resultaterne synes endnu ikke at være bragt til sammenhæng i tilstrækkeligt omfang.

Sædvanligvis sættes sandsynligheden for en brands opståen = 1, men sandsynligheden for overtænding er naturligvis meget mindre. For 3 af de hyppigste kategorier angives denne, vejledende, til at være

0,3 for industribygninger

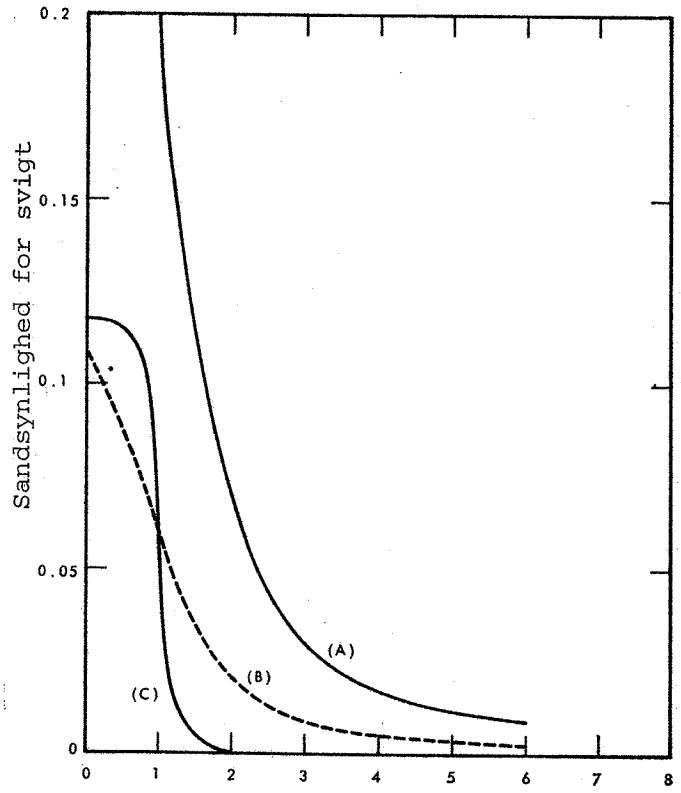
0,04 " kontorbygninger

0,02 " boligbygninger,

gældende for bygningen som helhed, ikke den enkelte brandcelle eller -sektion, [10]. Bygningens levetid er regnet til 50 år, og der er ikke installeret automatiske alarm- og slukkesystemer, som i givet fald ville reducere tallene med en reduktion afhængig af deres effekt og operationssikkerhed.

Hvordan sandsynligheden for en bygnings svigt under brand påvirkes af de forskellige faktorer og deres varians kan illustreres ved et diagram, fig. 10.

Diagrammet viser sammenhængen mellem sandsynligheden for svigt og sikkerhedsfaktoren, defineret som forholdet mellem beregningsbrandbelastningen og den gennemsnitlige brandbelastning for bygningskategorien. Kvalitativt kan kurverne og deres indbyrdes relation næppe overraske, men diagrammet viser klart betydningen af en reduktion af brandrisikoen og af nøje kendskab til brandmodstanden og brandbelastningen.



Sikkerhedsfaktor n.
Ratio: Design brandlast til gennemsnitlig brandlast

Fig. 10

Sandsynlighed for bygningssvigt ved brand som funktion af brandlastsikkerhedsfaktoren ved forskellige sandsynligheder for brand og for varierende brandmodstand og brandlast, (Bygningsstørrelse 50.000 m^2, levetid 50 år). [10]

(A) : Moderat brandrisiko; moderat varians af brandlast og brandmodstand.

(B) : Lav brandrisiko; moderat varians af brandlast og brandmodstand.

(C) : Lav brandrisiko; ringe varians af brandlast og brandmodstand.

Det er derfor disse 3 brandtekniske delområder, der må vies særlig interesse i det videre arbejde med brandteknisk dimensionering.

6. TEORI OG FORSØGSERFARINGER

I projektperioden er der sideløbende med det teoretiske arbejde gennemført forskellige eksperimentelle undersøgelser. Disse er fortrinsvis udført som studenterarbejder og mest som afgangsprojekter. De vigtigste i denne sammenhæng er anført i kap. 7, pkt. 1-5.

Undersøgelserne har generelt haft to formål: dels at skaffe forøget viden om de brandtekniske egenskaber hos udvalgte komponenter eller konstruktioner, dels, såvidt muligt, at verificere teoretiske beregningsresultater med eksperimentelle målinger og registreringer. I det følgende gives en oversigt over undersøgelser og resultater.

(1) Forsøg med betonvægelementer, DS/R 1039

Forsøgene blev gennemført i Statsprøveanstaltens vertikalovn som normale brandprøvninger til klassifikation. Der blev prøvet 3 stk. 24M standardvægelementer, et med alder 3 mdr. og 2 med alder nær 9 mdr. Ovnen blev kørt efter en temperatur-tidskurve angivet i Draft ISO/R 834, som kun afviger ubetydeligt fra den danske standardkurve. ISO/R 834 giver forskrifter for en international kalibrering af brandprøvningsovne, og som kalibreringskomponent foreslås netop et betonelement af den prøvede type, 150 mm tykt. Prøvningsresultaterne kunne derfor også anvendes til det nævnte formål.

Registrering af temperaturfeltet i elementtværsnittet til tiderne 30, 60 og 90 min. foretoges med indbyggede termofølere med udskrift på 12-kanal skriver. Til sammenligning med det målte udførtes en analytisk beregning af temperatur-tidsfeltet på grundlag af simplificerede beregningsantagelser. Måleresultaterne viste stor spredning, dels i relation til højdeplaceringen i betonelementet, dels inden for ens placerede termofølere. De beregnede temperaturtilstande udviste en ensidig afvigelse, på den sikre side, fra det målte, men overensstemmelsen skulle kunne forbedres ved anvendelse af mere nøjagtige beregningsforudsætninger; endvidere kom oventemperaturen under prøvningerne til at ligge noget under standard-brandkurven, omend inden for tolerancerne.

(2) Betonelementers brandtekniske egenskaber

Forud for den heromhandlede undersøgelse var betondækkomponenter, såvidt vides, kun blevet underkastet den standardiserede klassifikationsprøvning (til BS 60), og der forelå ikke nøjere oplysninger om komponenternes termiske og styrkemæssige forhold under brandpåvirkning. Forsøgene omfattede ialt 8 komponenter, hvoraf 4 150 mm massive og 4 185 mm huldæk efter DS/R 1038, kørt efter ISO/R 834 i horizontalprøvningsovn. Der blev foretaget 2 prøvninger, hver med 2 sammenstøbte komponenter af hver type. Temperatur/tidsfelterne blev bestemt ved termomålinger i forskellige dybder, i fuger og på armeringsjernene. Nedbøjninger blev registreret ved nivellement, og integritetssvigt iagttoges visuelt. Brugsbelastningen blev påført som en linielast på tværs af elementernes bæreretning, - og af en sådan størrelse, at armeringen blev udnyttet 40%. Hertil svarer en kritisk temperatur for denne (Kamstål 42) på ca. 540 °C. Forsøgsopstillingen er vist på fig. 11a og b. Måleresultater og kvalitative iagttagelser er givet i rapporten.

Til sammenligning med det målte foretoges en beregning af temperatur/tidsfelterne og af brudtiden for de to dæktyper under brandforløbet. For at begrænse beregningsomfanget, og dermed gøre metoden mere praktisk anvendelig, blev der brugt en ret grov tidsintervalinddeling og en simpel parameterafhængighed for varmeledningstal og varmekapacitet i form af skønnet repræsentative middelværdier for temperaturafhængigheden. Sammenligningen viste, at de gjorte forudsætninger ikke var tilstrækkeligt gode, idet de målte og de beregnede resultater ikke faldt rimeligt godt sammen. Hertil kommer at betonens fugtindhold har større betydning for temperaturstigningen end først antaget. Dette sås bl.a. af, at forskellene var størst for de massive elementer, hvis fugtindhold var højest. Der er dog ikke foretaget beregning af dette forholds indflydelse.

Fra forsøgene er det endelig værd at bemærke, at der ikke fandt integritetssvigt sted i fugerne, før brud kom som følge af armeringens svigt.

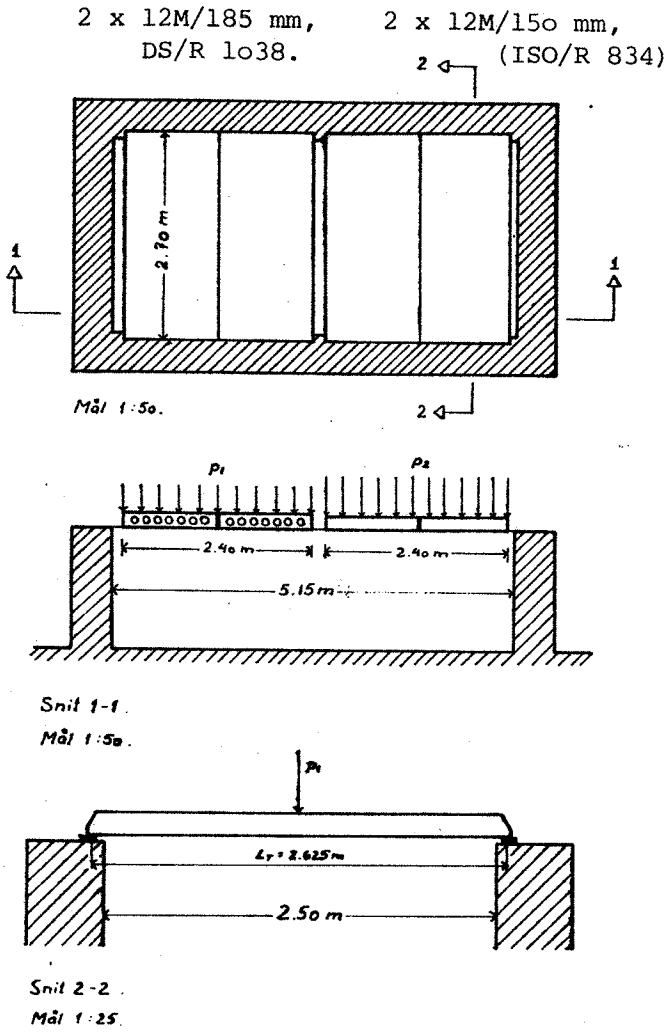


Fig. 11a. Skitse af forsøgsopstilling til brandforsøg med betondækelementer. Ref.: 7.1.

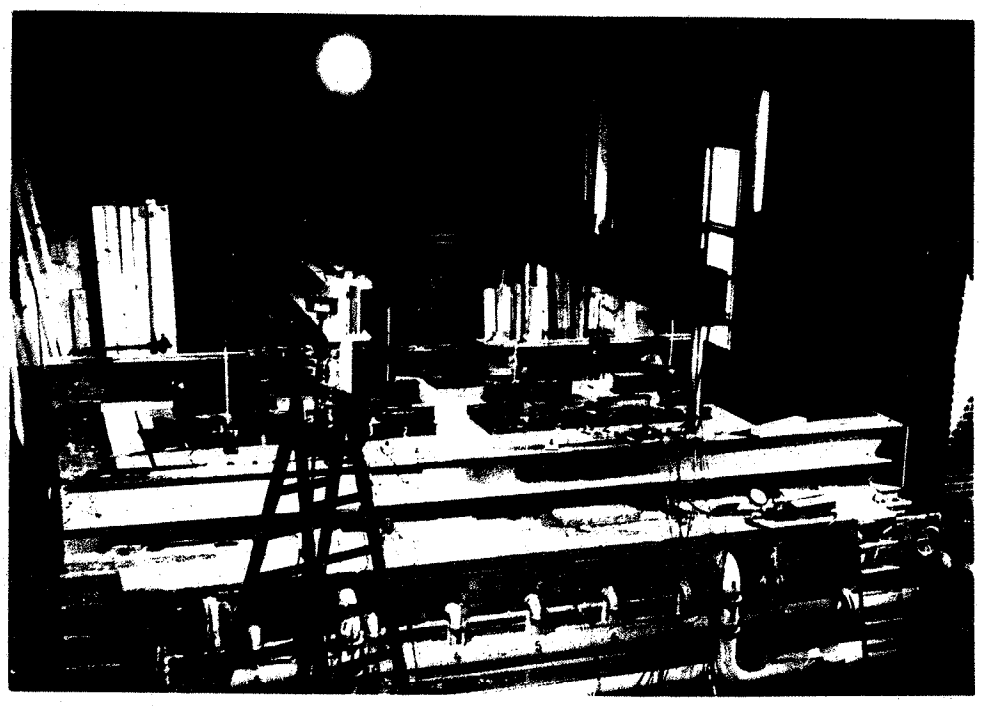


Fig. 11b. Forsøgsopstilling i brandprøvningsovn.

(3) Stålrammer brandbeskyttet ved vandkøling

Som metode er brandbeskyttelse ved "indvendig" vandkøling ikke ny. Forsøg med stålkomponenter og byggerier, hvor metoden er brugt, er gennemført i en række tilfælde. Formålet med projektet har derfor været at undersøge dets muligheder for anvendelse i system-byggeri af lette komponenter, hvor de bærende rammer er udført af RHS-profiler. Til dæk og facader tænkes anvendt præfabrikerede komponenter, enten i kendte eller nyudviklede udformninger. Brandsikringen af den A-formede ramme, se fig. 12, opnås ved vandets cirkulation igangsat af en "lokal" brand.

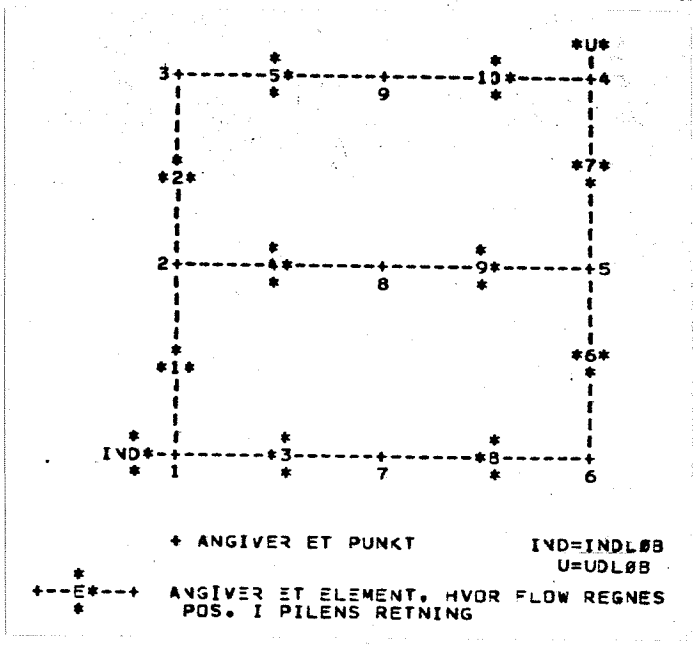


Fig. 12

Matematisk model af vandkølet stålramme. Ref.: 7.2.

Der er opstillet en matematisk model for varmepåvirkede hydrauliske systemer, og udfra modellen udviklet et EDB-program for stålrammer, på hvilken der simuleres en brandpåvirkning. Rammens temperaturtids tilstande, for varierende påvirkninger, er beregnet med programmet. Til sammenligning er der udført en serie forsøg, i skala 1:3, hvor såvel påvirkninger som temperaturforløb er registreret. Anvendelse af el-rørvarmelegemer til opheding muliggjorde på bekvem måde variation af påvirkningerne og dertil nøje kendskab til deres størrelse. Der blev fundet god overensstemmelse mellem det beregnede og det målte.

Udover redegørelsen for det teoretiske og eksperimentelle arbejde indeholder rapporten en kort klassifikationsvurdering med henblik på den praktiske anvendelse af sikringsmetoden.

(4) Brandtekniske modellove anvendt på jernbetonbjælker

Beherskelse af de brandtekniske modellove, der måtte gælde for såvel materialer som konstruktioner som for brand i rum indebærer mulighed for hurtigere og økonomisk mindre belastende eksperimentel forudsigelse af de brandtekniske egenskaber af bygningskomponenter og -konstruktioner. I arbejdet, der betragtes som en forundersøgelse for et nøjere studium af emnet, er behandlet de modellove, der gælder for jernbetonbjælker udsat for samtidig statisk belastning og brandpåvirkning.

I rapporten behandles i hovedtræk de konstruktive, geometriske og termiske forhold, der har betydning for en betonbjælkes brandmodstand. Videre gives en matematisk beskrivelse af temperaturforløbet i bjælken samt en omtale af de ovnkarakteristika, der har indflydelse på en brandprøvnings resultat. På basis af litteraturstudier er givet en fremstilling af modellovene, herunder er behandlet varmeovergang, temperaturfordeling, fugtforhold, termiske spændinger og mekaniske forholds betydning. I et afsnit om modelbeton er redegjort for proportioneringen af denne udfra fuldskalabjælkens beton.

Konklusionen af de nævnte undersøgelser blev, at der skulle udføres forsøg med bjælker i fuld skala og i halv skala; den sidste valgt som den mindste modelstørrelse, hvor de mange parametre var rimeligt styrbare. Modellovene indebærer en anden termisk påvirkning af halvskalabjælken end den standardtemperatur-tidskurven giver. Model-brandforløbet blev beregnet, og pilotforsøg i Statsprøveanstaltens horizontalovn viste, at denne kunne køres i overensstemmelse hermed. Forsøgsbjælkerne, 1 i fuldskala og 2 i halvskala, blev derefter beregnet og udstøbt efter montering af en serie termoelementer til temperaturfeltmåling. Under forsøgene påførtes den statiske belastning ad hydraulisk vej, nedbøjninger måltes ved nivellement, og termomålinger blev registreret på datalogger. Forsøgstiden blev fastsat til prøvningstiden + 1 døgn, således at alle brandpåvirkningens faser kunne indgå i resultatvurderingen.

I rapporten er anført de fundne forsøgsresultater, som desværre ikke kom til at omfatte temperaturfelterne. Årsagen hertil

var et uforklarligt svigt i loggingsystemet, som først afsløredes i dataudskriften. Denne viste så stor instabilitet i registreringen, at det ikke har været muligt at uddrage temperatur-tidskurver af resultaterne, og følgeligt ej heller at få den ønskede verifikation af de teoretiske resultater. Sluttelig udførtes dels nogle materialetekniske undersøgelser, dels undersøgelser af restbæreevnen af modelbjælker og armeringsstål. Resultaterne heraf var dog ikke tilstrækkelige til at kunne erstatte de manglende oplysninger fra hovedforsøgene.

(5) Spændbetons brandtekniske egenskaber

Spændbetonkonstruktioner opfattes som oftest som brandteknisk ringere og mere ukendte end slapt armerede betonkonstruktioner. Med enkelte undtagelser er spændbetonkomponenter i de gængse profiler dog

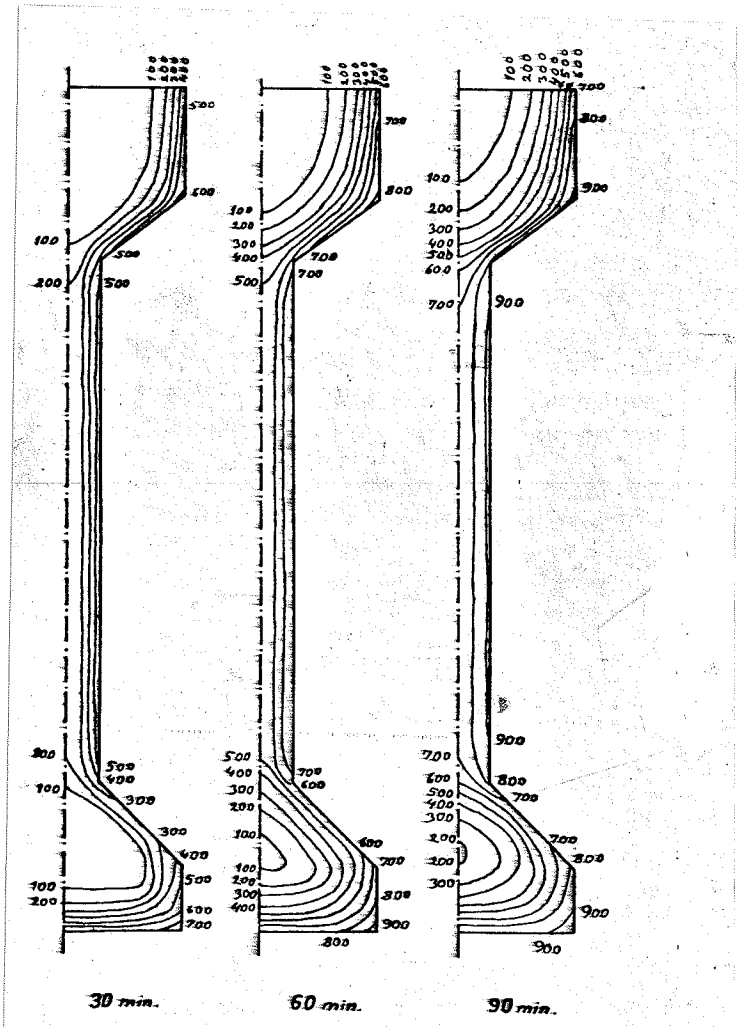
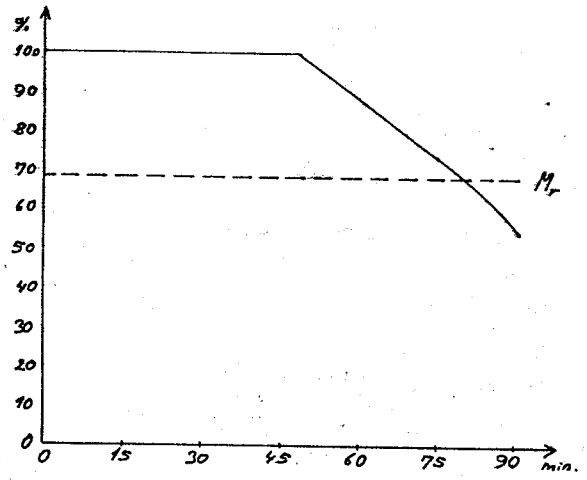


Fig. 13

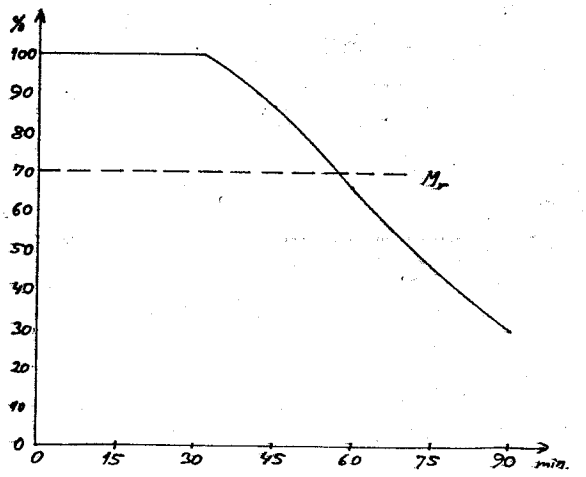
Beregnede temperaturfelter for udsnit af spændbetonbjælker, IB 30/108. Brandpåvirkning efter standardbrandkurven. Ref.: 7.4.

klassificeret som BS 60 bygningsdele, ligesom nøjere beregninger og eksperimentelle undersøgelser af visse profiler er foretaget i bl.a. Sverige og Vesttyskland, se f.eks. litt. [9] og [22].

Der er i dette arbejde givet en vurdering af nogle typiske danske spændbetonkomponenters brandmodstandsevne, nemlig bjælkerne IB 30/108-14 og IB 30/108-8, pladerne TT 60/240-14 og TT 60/240-8, begge med 6 cm overbeton, samt et Spanmax dækelement. Vurderingen er baseret på en dimensionering,



Brudmoment IB 30/108-14



Brudmoment IB 30/108-8

Fig. 14

Beregnede brudmomenter for IB-spændbetonbjælker i afhængighed af brandpåvirkningstiden. Brandpåvirkning efter standardbrandkurven. Ref.: 7.4.

hvor brandpåvirkningen forudsættes at følge standardbrandkurven. De materialetekniske egenskaber, der har betydning for armeret betons opførsel under brand, er gennemgået, og der er opstillet et beregningsprogram, i ALGOL W, for komponenternes temperatur-tidsfelter med interval 0,5 minut. Felterne til tiderne 30, 60 og 90 min. er optegnet. Brudmomenterne er herefter beregnet for brandtider med 15 min. interval og optegnet i % af brudmomentet uden brandpåvirkning. Fig. 13 og 14 viser for IB 30/108 temperaturfelterne til tiden 30, 60 og 90 min., og $M_{brud,brand}$ i % af M_{brud}. M_r er det regningsmæssige brudmoment.

Afgørende for komponenternes sammenbrud under brand er forspændingsstålets store styrketab under høje temperaturer, men for IB-bjælkernes vedkommende kan det dog blive betonens styrke- og stivhedstab, der forårsager svigt (i den tynde kropplade).

Det bemærkes, at beregningerne principielt kan gøres for et vilkårligt brandforløb ved anvendelse af begrebet ækvivalent brandbelastning, og at det er ønskeligt at få verificeret beregningerne ved eksperimentelle undersøgelser.

(5) Tentorståls brandtekniske egenskaber

Svigtende bæreevne af jernbetonkonstruktioner under brand kan normalt henføres til svigt af armeringen. Ved en brandteknisk dimensionering, og for en vurdering af en beskadiget konstruktions restbæreevne, er det derfor nødvendigt nøje at kende armeringsstålets deformations- og styrkeforholds afhængighed af høje temperaturer. Dette har hidtil kun været delvis kendt for det oftest anvendte danske armeringsstål, Tentorstål.

I projektet er derfor gennemført en undersøgelse af dette ståls egenskaber ved stigende temperaturniveauer op til ca. 600°C, som er de for praksis relevante. Stålets arbejdslinier er eksperimentelt bestemt, og videre er undersøgt dets restbæreevne efter afkøling, ligesom visse krybningsforhold er behandlet. Forsøgsresultaterne er givet grafisk i rapporten, der tillige indeholder en kortfattet fremstilling af de strukturelle årsager til egenskabernes temperaturafhængighed.

7. IKKE PUBLICEREDE STUDENTERARBEJDER MED RELATION TIL PROJEKTET

1) Michael Petersen:
"Betonelementers brandtekniske egenskaber".
(Beregninger og forsøg).
Eksamensarbejde 1973.

2) Per Johansen:
"Stålrammer brandbeskyttet ved vandkøling".
(Beregninger og forsøg).
Eksamensarbejde 1976.

3) Jan Elleriis og Niels Tejlgaard Petersen:
"Brandtekniske modellove".
(anvendt på jernbetonbjælker - beregninger og forsøg).
Eksamensarbejde 1976.

4) Poul Weiss:
"Spændbetons brandtekniske egenskaber".
(Beregninger og sikkerhedsvurderinger).
Eksamensarbejde 1976.

5) Palle K. Hansen og Bo Schou Petersen:
"Tentorståls brandtekniske egenskaber".
Eksamensarbejde 1977.

Rapporterne er tilgængelige på instituttets bibliotek.

8. PUBLIKATIONER O.A. MED RELATION TIL PROJEKTET

1) Niels-Ole Hilbert, Torben Jakobsen, Bjarne Chr. Jensen:
"Om Nordisk Betonforskningsmøde 1974".
Internt notat nr. 6, IFH, 1974.

2) Bjarne Chr. Jensen:
"Branddimensionering af konstruktionselementer af træ".
Forelæsningsnotat nr. 41, IFH, 1975.

3) Lauritz Rasmussen:
"Brandforsøg med mineraluldsbaserede sandwichelementer".
Rapport nr. 122, IFH, 1977.

4) Bjarne Chr. Jensen:
"Beton og Brand, bjælkers brandmodstandsevne".
Rapport u/nr., ATV's Brandgruppe, 1977.

5) Erik Pedersen:
"Brand og bærende konstruktioner - Sikkerhedsfilosofi".
Diskussionsoplæg, ATV's Brandgruppe, 1977.

6) Erik Pedersen:
Rapport vedr. Brandprøvning af 15 cm betonvægelementer.
Rapport u/nr., IFH, 1976.

9. LITTERATURFORTEGNELSE

[1] Yngve Anderberg og Sven Thelandersson:
"Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures".
Bulletin nr. 34, Inst. för Byggnadsstatik, L.T.H.,Lund, 1973.

[2] H. Ehm:
"Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonteilen".
Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967.

[3] "Fire Safety in Constructional Steelwork",
E.K.S. Symposium, den Haag, 1974.

[4] A.H. Gustaferro:
"Design of Prestressed Concrete for Fire Resistance".
Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 18, no. 6, U.S.A., 1973.

[5] A.H. Gustaferro, M.S. Abrams, E.A.B. Salse:
"Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams, Study C: Structural Behaviour During Fire Tests".
PCA/RD009-01B. Portland Cement Association, Skokie, Ill., U.S.A. 1971.

[6] F.R. Hertweck:
"Einführung in die Programmiersprache Algol W".
Akademisk Forlag, København, 1971.

[7] K. Kawægoe og T. Sekine:
"Estimation of Fire Temperature - Time Curve in Rooms".
Research Paper no. 29, Building Research Institute, Tokyo, 1967.

[8] Wolfram Klingsch:
"Traglastberechnung instationär thermisch belasteter schlanker Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung".
Heft 33, Technische Universität Braunschweig, 1976.

[9] K. Kordina:
"Grundlagen für das Entwerfen von Stahlbeton - und Spannbetonbauteilen mit bestimmter Feuerwiderstandsdauer".
Festschrift Rüsch, Ernst & Sohn, Berlin 1969.

[10] T.T. Lie:
"Fire and Buildings".
Applied Science Publishers Ltd., London, 1972.

[11] S.E. Magnusson og S. Thelandersson:
"Temperature - Time Curves of Complete Process of Fire Development".
Bulletin nr. 16, Inst. för Byggnadsstatik, L.T.H., Lund, 1970.

[12] S.E. Magnusson, Ove Pettersson, Jørgen Thor:
"Brandteknisk dimensionering av stålkonstruktioner".
Publikation 38, Stålbyggnadsinstitutet SBI, Stockholm 1974.

[13] C. Meyer-Ottens:
"Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung".
Dissertation, Technishe Universität Braunschweig, 1972.

[14] Ove Pettersson:
"Structural Fire Engineering Research To-day and To-Morrow".
Acta Polytechnica Scandinavica", Ci 33, Stockholm 1965.

[15] Ove Pettersson:
"Brandteknisk Dimensionering av Armerade Betongkonstruktioner".
Bulletin-fortryk u/nr., L.T.H., Lund, 1971.

[16] Ove Pettersson:
"The Possibilities of Predicting the Fire Behaviour of Structures on the Basis of Data from Standard Fire Resistance Tests".
Bulletin nr. 20, Inst. för Byggnadsstatik, L.T.H.,Lund, 1971.

[17] Ove Pettersson:
"Principles of Fire Engineering Design and Fire Safety in Tall Building".
Bulletin nr. 31, Inst. för Byggnadsstatik, L.T.H. Lund, 1973.

[18] Sven Thelandersson:
"Betongkonstruktioner vid höga temperaturer - En översikt".
Bulletin nr. 43, Inst. för Byggnadsstatik, L.T.H.,Lund, 1974.

[19] P.H. Thomas og A.J.M. Heselden:
"Fully-Developed Fires in Single Compartments".
C.I.B. Report no. 20, F.R.S. Note no. 923, Fire Research Station, Storbritannien, 1972.

[20] Kai Ödeen:
"Beräkning av icke-stationär, tvådimensionell värmeledning i brandudsatta betongkonstruktioner".
Bulletin nr. 17, Inst. för Konstruktionslära, K.T.H., Stockholm, 1964.

[21] Kai Ödeen:
"Teoretisk bestämning av temperaturförloppet i några av brand påvirkeda konstruktioner".
Særtryk, Byggmästaren no. 4, Stockholm 1964.

[22] Kai Ödeen:
"Fire Resistance of Prestressed Concrete Double-T-Units".
Acta Polytechnica Scandinavica, Ci 48, Stockholm, 1968.

[23] Revised Draft Proposal for ISO/R 834
"Fire Resistance Tests of Elements of Building Construction".
International Standards Organisation, London, 1971.