

**DBF**

**BRANDPÅVIRKEDE  
BETONKONSTRUKTIONER**

**PUBLIKATION 11: 1981  
DANSK BETONFORENING**



DANSK BETONFORENING  
INSTITUTTET FOR HUSBYGNING  
DANMARK TEKNISKE HØJSKOLE

KRISTIAN HERTZ

**BRANDPÅVIRKEDE  
BETONKONSTRUKTIONER**

FORORD

Efter at jeg på et møde i Dansk Ingeniørforening i januar 1981 har orienteret om ændringerne i betonkonstruktioners mekaniske egenskaber ved brandpåvirkning, har Dansk Betonforenings publikationsudvalg fundet, at emnet var velegnet til behandling i en specialpublikation.

Denne udgivelse har derfor til hensigt at redegøre for, hvorledes betonkonstruktioner beskadiges af brandpåvirkning samt om det igangværende arbejde med opstilling af beregningsmæssige dimensioneringsmetoder herfor.

Dele af stoffet stammer fra en lærebog om emnet, som jeg har under udarbejdelse; men hovedparten er skrevet specielt med henblik på denne kortfattede indføring.

Da man i visse lande satser stærkt på at få anerkendt systemer til kostbar prøvningsmæssig brandteknisk vurdering af de bærende konstruktioner som Europa-norm, anser jeg det for væsentligt at orientere danske rådgivende ingeniører om muligheden af en betydelig hurtigere og billigere beregningsmæssig fremgangsmåde, hvorfor afsnit herom er medtaget på trods af, at disse metoder endnu ikke kan siges at udgøre et komplet dimensioneringsgrundlag.

Lyngby, marts 1981

Kristian Hertz

INDHOLD

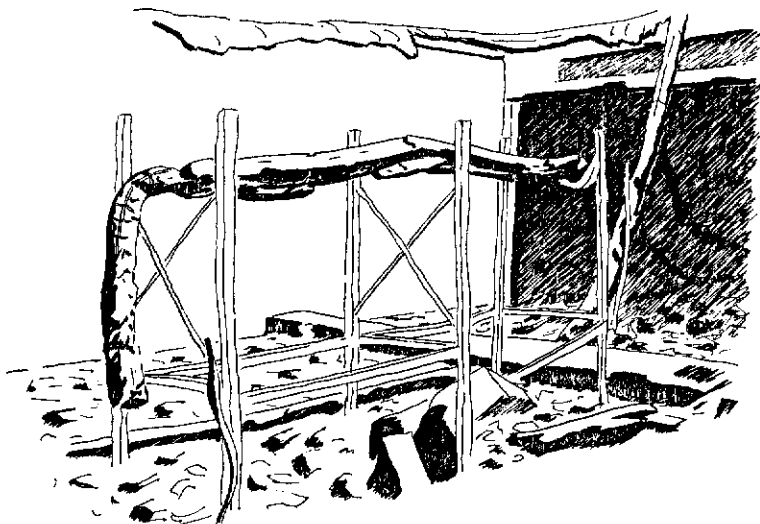
|   |    |
|---|----|
| TITELBLAD.....                          | 1  |
| FORORD.....                             | 2  |
| INDHOLD.....                            | 3  |
| SYMBOLLISTE.....                        | 4  |
| INDLEDNING.....                         | 5  |
| ÅRSAGER TIL BETONS MØRNING.....         | 9  |
| TERMISKE INDIKATORER.....               | 13 |
| Farve.....                              | 13 |
| Klang.....                              | 13 |
| AFSKALNING.....                         | 15 |
| Forholdsregler.....                     | 16 |
| Silikabeton.....                        | 16 |
| Visioner.....                           | 17 |
| DEFORMATIONSFORHOLD.....                | 18 |
| FORANKRING.....                         | 21 |
| VARMEBESTANDIG BETON.....               | 29 |
| PRØVNING AF BRANDPÅVIRKEDE BETON-       |    |
| KONSTRUKTIONER.....                     | 33 |
| TEMPERATURBEREGNINGER.....              | 35 |
| IDEALISEREREDE MATERIALEEGENSKABER..... | 39 |
| BEREGNING AF BÆREEVNE.....              | 41 |
| Bjælker.....                            | 41 |
| Plader.....                             | 42 |
| Forskydning.....                        | 44 |
| FORANSTALTNINGER MOD BRAND.....         | 45 |
| Større armering.....                    | 45 |
| Større dæklag.....                      | 45 |
| Større tværsnit.....                    | 46 |
| Isolering.....                          | 46 |
| Stabile principper.....                 | 46 |
| LITTERATUR.....                         | 47 |

SYMBOLLISTE

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| A          | Armeringsareal            |
| A          | Forkortelse for $Al_2O_3$ |
| C          | Forkortelse for CaO       |
| E          | Elasticitetsmodul         |
| F          | Kraft                     |
| H          | Forkortelse for $H_2O$    |
| $i_v$      | Enthalpi                  |
| Q          | Forskydningskraft         |
| S          | Forkortelse for $SiO_2$   |
| T          | Temperatur                |
| t          | Tid                       |
| v/c        | Vand-cementforhold        |
| x          | Dybde af nullinie         |
| $\epsilon$ | Tøjning                   |
| $\eta$     | Spændingsfordelingsfaktor |
| $\lambda$  | Varmeledningsevne         |
| $\nu$      | Poissons forhold          |
| $\xi$      | Styrkereduktionsfaktor    |
| $\sigma$   | Trækstyrke                |
| $\sigma'$  | Trykstyrke                |
| $\tau$     | Forankringsspænding       |

## INDICES:

|    |                   |
|----|-------------------|
| 20 | Ved $20^{\circ}C$ |
| b  | Beton             |
| s  | Stål              |



Figur 1. Strengbetonås i en dansk brandtomt.

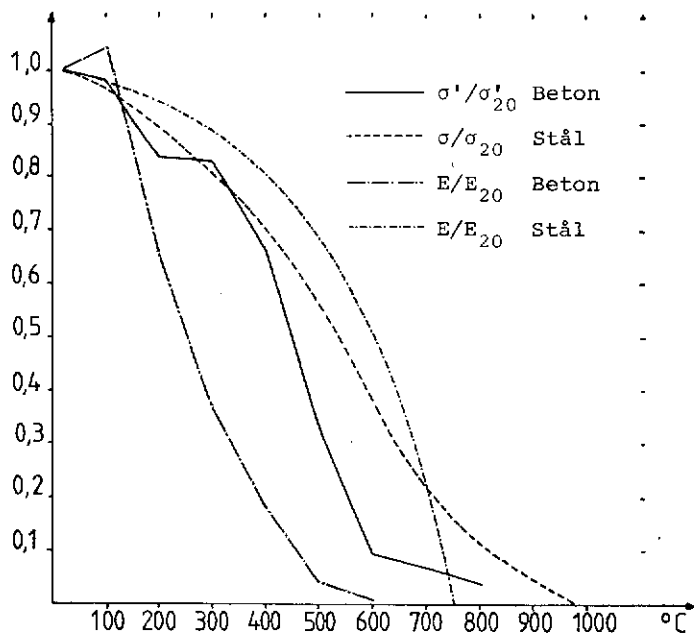
## INDLEDNING

Ovenstående illustration synes at stamme fra den omvendte verden. Den viser en betonkonstruktion, i dette tilfælde en strengbetonås, som hænger i guirlander over en stålkonstruktion, der har bevaret sin stabilitet.

Billedet plejer at være det modsatte: at det ubeskyttede stål efter en brandpåvirkning hænger i guirlander over en betonkonstruktion.

Der er imidlertid intet mystisk i det viste forhold. Sagen er simpelthen den, at normal dansk beton i sig selv er væsentligt ringere stillet med hensyn til modstandsevnen over for varmepåvirkning end stål.

Dette indser man straks, hvis man som på figur 2 på næste side optegner udviklingen af de relative trykstyrker og elasticitetsmoduler som funktion af den maksimale temperatur for henholdsvis blødt stål og en sædvanlig dansk beton.



Figur 2. Relativ udvikling i tryk-/trækstyrke og elasticitetsmodul for en normal dansk beton og for blødt stål.



"ALMINDELIG BETON BLIVER  
MØR VED VARMEPÅVIRKNING"

Den udbredte opfattelse, at normal beton skulle være varmebestandig, beror på en forveksling af årsag og virkning.

Årsagen til, at betonkonstruktioner traditionelt kun tager begrænset skade ved brandpåvirkninger, er ikke materialets brandresistens, men den omstændighed, at betonen har en stor varmekapacitet og en relativt beskeden varmeledningsevne, samtidig med, at betonkonstruktioner traditionelt har store tværsnitsdimensioner.

Det betyder, at sådanne tværsnit slet ikke kan nå at blive gennemvarme ved en normal brandpåvirkning. Skaderne begrænser sig til et overfladelag, hvis dybde meget ofte vil ligge på omkring fem til ti centimeter.

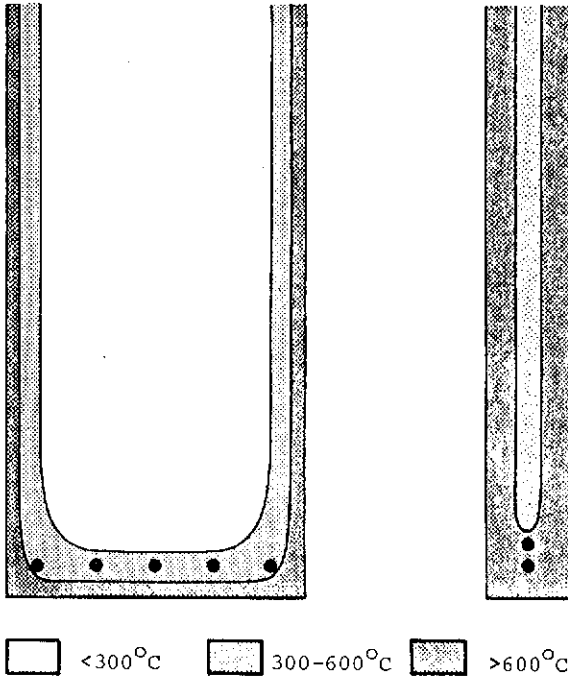
I de senere år er vi imidlertid blevet stadig dygtigere til at optimere betonkonstruktionerne. Tværsnitsdimensionerne er herved i mange tilfælde reduceret så kraftigt, at selv normale ret kortvarige brandforløb kan resultere i en gennemvarmning og deraf følgende kollaps.

Generelt kan man sige, at de øgede muligheder for at presse udnyttelsen af materialer og tværsnit giver anledning til, at en række forhold, som tidligere har været relativt upåagtede, nu får større aktualitet.

Dette gælder for praktisk taget alle konstruktionsformer.

For betonkonstruktionernes vedkommende kan debatten om holdbarhed, som føres i disse år, opfattes som et udslag heraf.

Nærværende publikation kan derfor betragtes som et indlæg i denne debat.



Figur 3. Temperaturprofiler efter 1 times standardbrandpåvirkning.

ÅRSAGER TIL BETONS MØRNING

Emnet er indgående behandlet i Hertz [1]. Her skal blot omtales et par af de væsentligste årsager.

Når beton opvarmes til over ca.  $150^{\circ}\text{C}$  vil det vand, som er bundet kemisk i de hydratiserede calciumsilikater, begynde at frigøres og fordampe.

Dette medfører et svind af den hydratiserede cementpasta.

Samtidig udvider tilslag og armering sig termisk.

Kompositmaterialet bliver på denne måde spændt sammen, og ved maksimale temperaturer omkring  $300^{\circ}\text{C}$  bliver de indre spændinger så store, at matrixen gennemtrænges af mikrorevner.

Effekten viser sig som en svækkelse af såvel tryk- og trækstyrke som elasticitetsmodul samt en blivende ikke-reversibel udvidelse af ubelastede prøver.

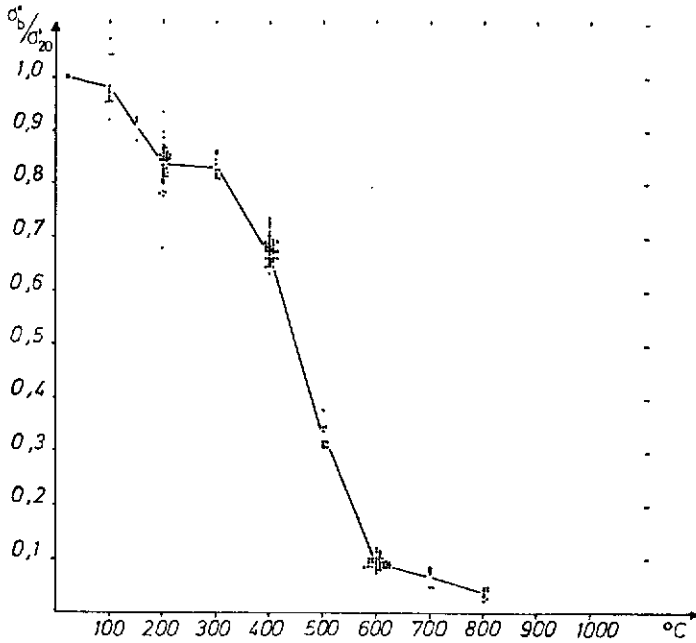
Når temperaturer omkring  $400^{\circ}\text{C}$  passerer, vil calciumhydroxidkrystallerne i den hydratiserede cementpasta begynde at afgive vand.

Processen, hvis maksimale intensitet nås ved  $535^{\circ}\text{C}$ , efterlader brændt kalk - calciumilte i strukturen.

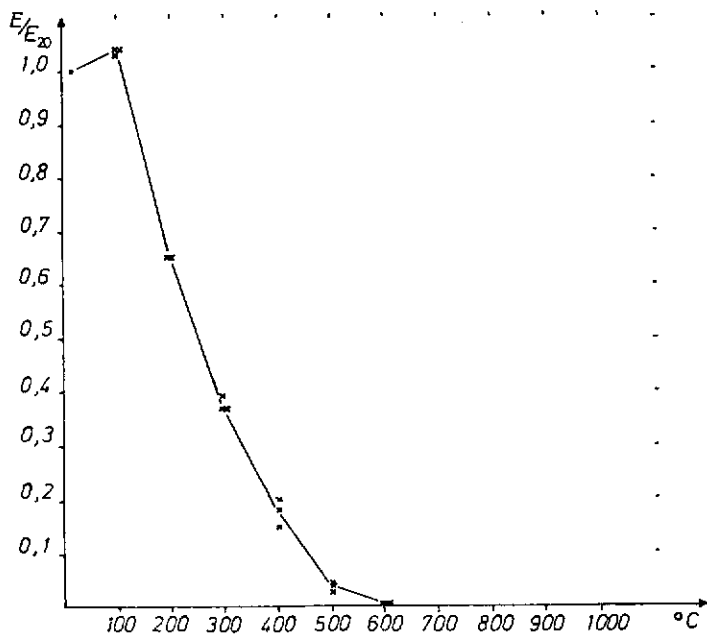
Dette giver i sig selv anledning til et styrketab. Men under afkøling og lagring optages påny vand fra luften, hvorved den brændte kalk ekspanderer voldsomt, og de allerede dannede revner åbner sig.

Processen har først indstillet sig omkring fem til syv døgn efter branden, og materialet er da (efter påvirkning med  $600-800^{\circ}\text{C}$ ) så nedbrudt, at man kan smuldre det med fingrene.

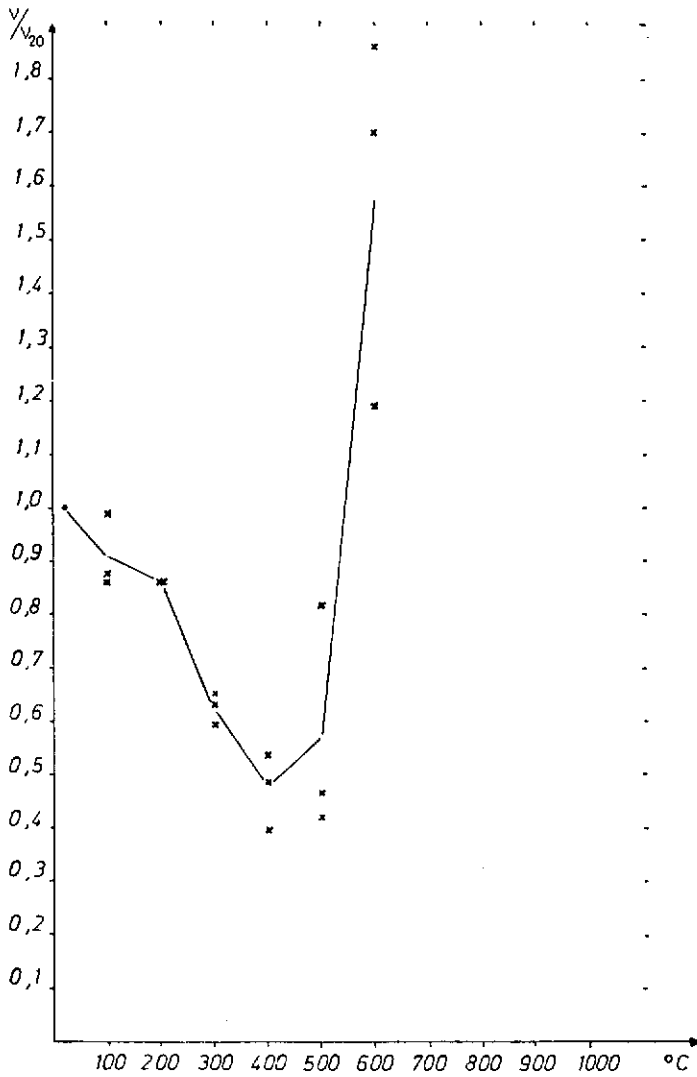
I denne forbindelse bemærkes, at dansk Portland cement indeholder særligt meget tricalciumsilikat, som medfører dannelse af calciumhydroxid.



Figur 4. Udvikling i relativ trykstyrke med temperaturen for en beton med danske sømaterialer.



Figur 5. Udvikling i relativt statisk E-modul med temperaturen for en beton med danske sømaterialer.



Figur 6. Udvikling i relativt Poissonske forhold med temperaturen for en beton med danske sømaterialer.

TERMISKE INDIKATORER

En normal beton vil jfr. det foregående være uegnet til konstruktive formål, hvis den har været påvirket af temperaturer på over ca. 300°C.

Det er derfor specielt vigtigt, at kunne fastlægge dybden, hvor denne temperatur er nået, hvis en brandskadede konstruktion skal repareres.

## Farve

Visse tilslag giver anledning til en farveindikator for denne temperatur.

Det drejer sig om tilslag, som tilfører betonen jerniliter, der ved 300°C skifter farve fra gult til rødt. Betonen farves herved Rosa.

Farven forsvinder og betonen bliver grå-hvid ved dannelsen af calciumferrit omkring 600°C.

Det indskræpes, at man intet kan slutte, hvis farven mangler helt.

## Klang

Forfatteren har iagttaget en anden ganske entydig termisk indikator: betonens klang.

I takt med den tiltagende sammenspænding af materialet ved opvarmning vil tonehøjdene i betonens klang øges. De højeste frekvenser forekommer lige før mikrorevnedannelsen ved 300°C. Herefter aftager niveauet; men med en anden spektral fordeling end under opvarmningen, idet materialet nu består af dele med høj klang adskilt af revner.

Det har ved flere lejligheder været muligt at bestemme den maksimale temperatur, et materiale har været påvirket med, inden for 50°C ved hjælp af klangen alene.

Klangen af et legeme er naturligvis nært forbundet med legemets form, jfr. vor brug af ord som fx. "klokkerent".

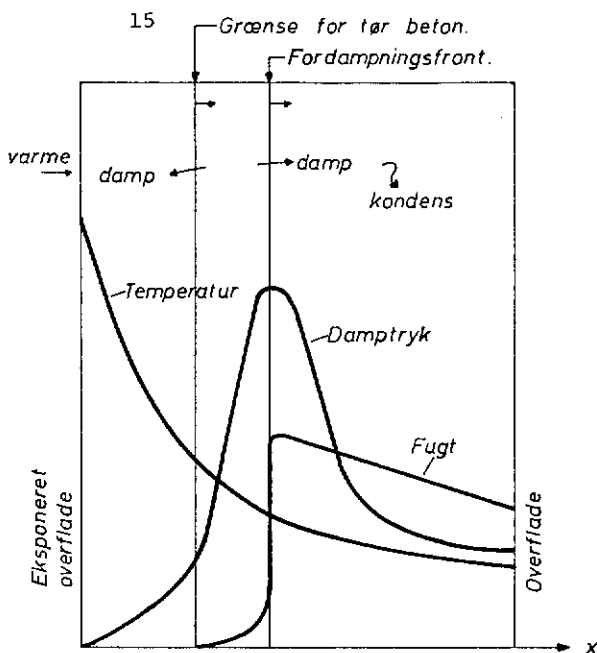
Den mest hensigtsmæssige måde at videregive klanginformationen på er da, at sammenligne med klangen af et andet materiale, hvorved man må forestille sig klangen af det givne objekt udført af referencematerialet.

Følgende sammenhæng kan angives mellem  
betonens klang og den maksimale tempera-  
tur:

|            |                  |
|------------|------------------|
| 20°C.....  | Beton            |
| 100°C..... | Hårdtbrændt tegl |
| 200°C..... | Procelæn         |
| 300°C..... | Krystalglas      |
| 400°C..... | Almindeligt glas |
| 500°C..... | Stentøj          |
| 600°C..... | Revnet tegl      |
| 700°C..... | Træ              |
| 800°C..... | Papmaché         |



## AFSKALNING



Figur 7. Princip for varme- og fugtforhold ved afskalning.

Et fænomen, som har været ofret ganske megen opmærksomhed er den såkaldte afskalning.

Det består i, at flager af konstruktionens overflade sprænges af under ledsagelse af høje knald indenfor de første femten til tyve minutter af en brand.

Årsagen hertil er først og fremmest damp-eksplosion.

På figur 7 er teorien illustreret for en væg, ensidigt påvirket af brand.

En fordampningsfront bevæger sig ind i tværsnittet, og den dannede vanddamp søger dels længere ind i væggen og fortættes og dels ud mod den eksponerede overflade.

Den sidstnævnte del vil få en længere og længere strækning af tilbagelægge samtidig med, at større og større fugtmængder opbygges foran fordampningsfronten.

Herved øges damptrykket, og på et tidspunkt overskrides overfladebetonens trækstyrke, og en flage sprænges af.

Dette kan naturligvis have alvorlige følger for konstruktionens stabilitet, navnlig hvis der herved blotlægges armeringsstål.

Imidlertid er risikoen for fænomenets optræden blevet overvurderet. Hvilket hænger sammen med, at mange brandforskningsforsøg er udført på konstruktionselementer af ringe alder og dermed med et relativt højt fugtindhold.

For tørre konstruktioner af en vis alder, vil afskalningen som regel begrænse sig til hjørner af bjælker og søjler, hvor resultanten af de termiske trykspændinger langs de to overflader danner en uadrettet kraft, som bidrager til afskalningen.

#### Forholdsregler

Af forholdsregler mod fænomenet må først og fremmest nævnes en effektiv udtørring og beskyttelse af konstruktionen.

Isolering og heraf følgende lavere temperaturstignings-hastighed er også en mulighed, men den traditionelle løsning består i en overfladenetarmering.

Specielt vil forfatteren påpege muligheden af at anvende en fiberarmering i et overfladelag fx. i form af en blivende forskalling. Dette lag skal have stor trækstyrke, men også stor sejhed og frem for alt en stor porøsitet.

Det er oplagt, at jo tættere materialet er, jo vanskeligere vil den dannede vanddamp kunne slippe ud til overfladen, og jo større vil risikoen være for afskalning

#### Silikabeton

Fænomenet bliver af den allerstørste betydning for den såkaldte silikabeton.

Dette nye materiale opnår ekstremt høje trykstyrker (150 MPa og opefter) gennem en udfyldning af hulrummene mellem de enkelte cementkorn med et endnu finere materiale: - silikapulver -.

Materialet bliver skørt, og trækstyrken øges ikke slet så meget som trykstyrken.

Porøsiteten er overordentlig lav, og selv om vandindholdet er beskedent, tager en

udtørring meget lang tid.

Ved varmepåvirkninger opstår derfor store indre damptryk, hvortil kommer dampen af det kemisk bundne vand, som frigives ved opvarmningen.

Selv ved meget langsom opvarmning ( $1^{\circ}\text{C}$  per minut) og relativt små prøvelegemer ( $\varnothing 10$  cm), forekom ved en orienterende undersøgelse kraftige dampekspllosioner.

Ved konstruktive anvendelser af materialet, må man tænke i helt nye baner, såvel hvad angår armering (kraftig fiberarmering), som med hensyn til selve konstruktionens opbygning.

#### Visioner

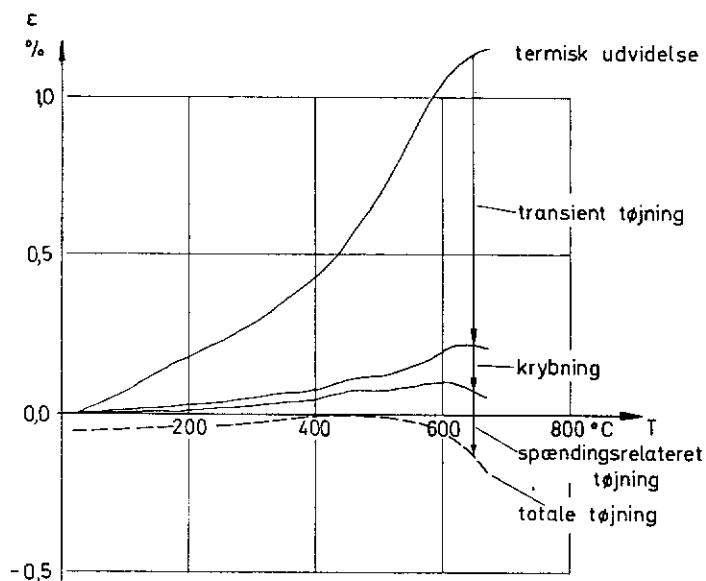
Forfatteren er af den opfattelse, at en adskillelse af konstruktionens bærende, stabiliserende og beskyttende funktioner vil kunne føre til helt nye og gunstige konstruktionstyper, hvor man udnytter den nye mulighed, der ligger i at kunne udstøbe stærke koncentrerede trykzoner i et materiale af høj styrke.

En fremgangsmåde kunne fx. tænkes at bestå i følgende:

- 1) Opstille forskalling evt. i form af en blivende, porøs og fiberarmeret skal.
- 2) Indlægge armering.
- 3) Ophænge en bøjelig, korrugeret og evt. svagt perforeret plastslange af passende diameter, hvor trykzonen ønskes.
- 4) Udstøbe med en isolerende letvægtsbeton, som tillige sikrer trykzonens stabilitet.
- 5) Udstøbe trykzonen med en fiberarmeret silikabeton.

Naturligvis vil udformningen af forankringszonerne i en sådan konstruktion kræve helt speciel opmærksomhed, ligesom krybnings- og deformationsforhold bør klarlægges nøjere, før silikabetonen anvendes konstruktivt.

DEFORMATIONSFORHOLD



Figur 8. Tøjningsbidrag.

Ved mange brandforløb har betonkonstruktionernes udvidelsesforhold være årsag til kollaps.

Svigt af denne karakter indtræder ofte på grund af for små og for dårligt udførte vederlag under vandrette konstruktions-elementer.

En anden type svigt skyldes tvangskræfter som følge af hindrede termiske udvidelser.

Ud over de primære anvendelser til vurdering af risikoen for disse svigttyper har kendskabet til betonens deformationer ved høje temperaturer betydning ved vurdering af størrelsen af termiske spændingsgradienter, kraftforløb i spændstål og meget andet.

Desværre er netop deformationsforholdene særdeles vanskelige at fastlægge, dels fordi den termiske udvidelse af betonen er meget følsom overfor ændringer i tilslagetets sammensætning, og dels fordi denne udvidelse lader sig modvirke ved til-

stedeværelsen af trykspændinger under opvarmningen.

Altså har såvel de anvendte materialer som den påførte belastning afgørende indflydelse på den endelige deformation.

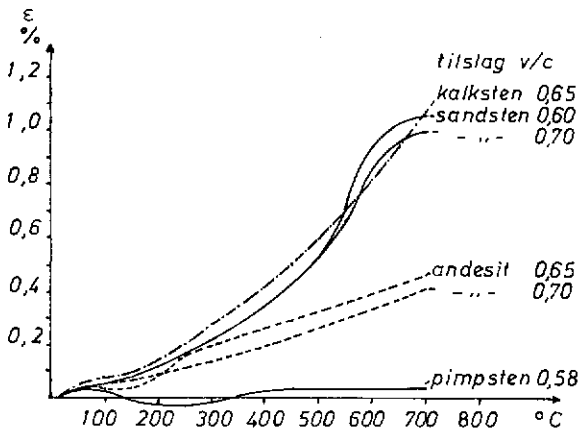
Der resterer stadig en væsentlig forskningsindsats til afklaring af disse forhold; men stort set vil man kunne opfatte den samlede tøjning af et belastet legeme under varmepåvirkning som bestående af fire bidrag:

- 1) TERMISK TØJNING: Udvidelse af tilslag, revner og svind.
- 2) TRANSIENT TØJNING: Belastning under opvarmning giver forspænding af tilslag og delvis hindring af termisk tøjning.
- 3) KRYBETØJNING: Spænding og tid under varmepåvirkning.
- 4) SPÆNDINGSRELATERET TØJNING: Den øjeblikkelige deformation under belastning.

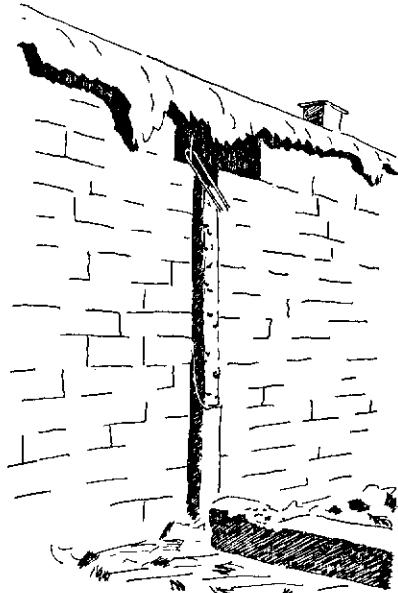
De fire bidrag er søgt anskueliggjort på figur 8.

Specielt bemærkes, at den resulterende tøjning meget vel kan blive negativ dvs. sammentrykning ved tilstrækkeligt store belastninger.

Der henvises i øvrigt til fx. Hertz [1] og de der anførte referencer.



Figur 9. Termisk udvidelse af beton med varierende tilslag og v/c.

FORANKRING

Figur 10. Søjle i en brandtomt.

Ovenstående illustration er hentet fra en nyere dansk brandtomt og viser et forankringssvigt. Bøjlen, som skulle sikre, at bjælken forblev på søjlens dorn, lod sig trække ud og ses nu hængende frit, medens bjælken er faldet ned af sit vederlag.

Forankringssvigt kan ved brandpåvirkning ofte foregå på en måde, som afviger fra den normalt forekommende.

For at indse dette betragtes først en forkammet trækpåvirket armeringsstang forankret i et halvuendeligt betonlegeme.

Ved stigende belastning vil der først optræde en forskydningstilstand i planer orienteret radiært med hensyn til stangaksen.

På et tidspunkt vil der dannes adskillelsesbrudrevner under  $45^\circ$  med stangaksen.

Efter dannelsen af disse kegleformede revner, kan stangens forankringskraft kun optages som trykspændinger under en vinkel

med stangaksen.

Optimum for denne vinkel er  $45^\circ$  i retningen vinkelret på de kegleformede revner. Og kræfterne vil da søge at indstille sig her-efter i brudtilstanden.

Brudet foregår som en knusning og en rul-ningsbevægelse umiddelbart op ad stangover-fladen, hvor spændingerne er størst.

Denne form for svigt kalder forfatteren vedhæftningssvigt svarende til det engelske "bond".

I konstruktioner er situationen imidlertid ofte den, at en begrænsende overflade (f.x. bunden af en bjælke) befinder sig nær ved, og parallelt med stangen.

Mellem stang og overfalde ligger praktisk taget altid en armering, hvis areal pr. længdeenhed her betegnes  $A$  ( $m^2/m$ ).

Traditionelt vil dæklag og tværarmering være af så beskeden størrelse, at konstruk-tionen omkring hovedarmeringen ikke kan optage det radiære tryk, som ville svare til vedhæftningssvigtet.

Der opstår da en flækningsrevne på langs af hovedarmeringsstangen, og forankringen svigter ved en vis åbning af denne revne.

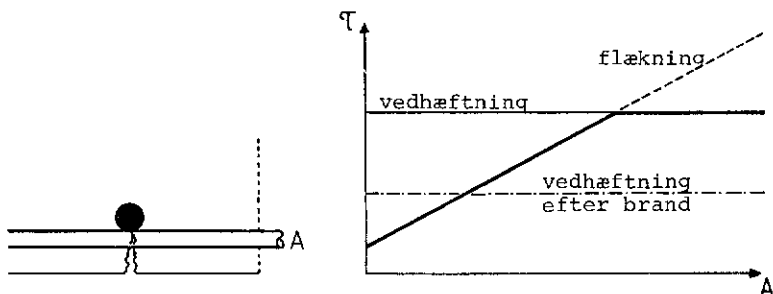
I brandteknisk sammenhæng bliver svigtkri-teriet sandsynligvis et integritetskrite-rium. Dvs. svigtet må defineres som selve revnens dannelse.

Uanset hvilken fremgangsmåde, man vælger, ses, at flækningssvigt er bestemt af geo-metrien af det pågældende tværsnit, hvorfor en standardprøvning med fast geometri ikke vil give oplysning herom i alle tilfælde.

Kriteriet for flækningssvigt fastlægges ved beregning ud fra kendskab til geometri og materialeegenskaber. Den tilsvarende forank-ringskraft vil øges lineært med tværarme-ringsarelaet.

Derimod vil vedhæftningssvigtet svare til





Figur 11. Tværsnit med flækning og forankringsspændingens afhængighed af tværarmeringens areal og af vedhæftningsstyrken.

en konstant maksimal værdi af forankringskraften.

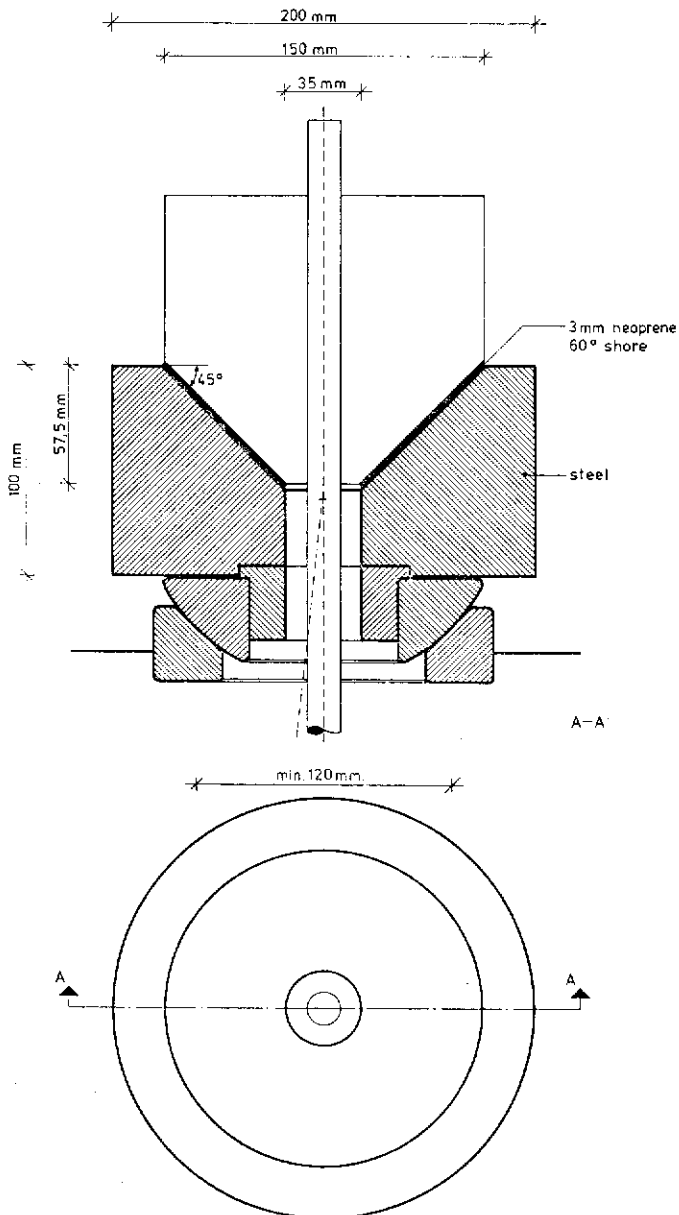
Traditionelt vil man ofte befinde sig i området, hvor flækningskriteriet er afgørende.

Hvis dæklagstykkelsen øges mærkbart fx. i forbindelse med branddimensionering, hvor 70 til 100 mm dæklag forekommer, kan vedhæftningssvigtet også blive afgørende i normal kold tilstand.

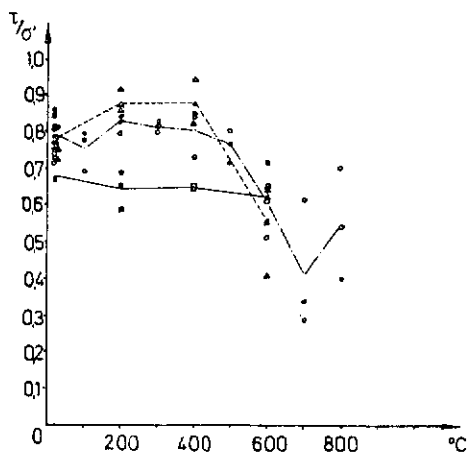
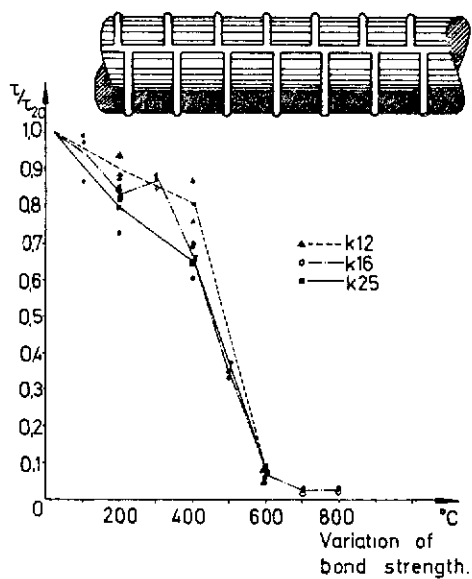
Efter en brand sker imidlertid det, at tværarmeringen genvinder sin styrke fuldstændig, hvorimod vedhæftningsstyrken falder drastisk.

Dette er årsagen til, at vedhæftningskriteriet bliver af afgørende betydning ved vurdering af konstruktionernes restbæreevne.

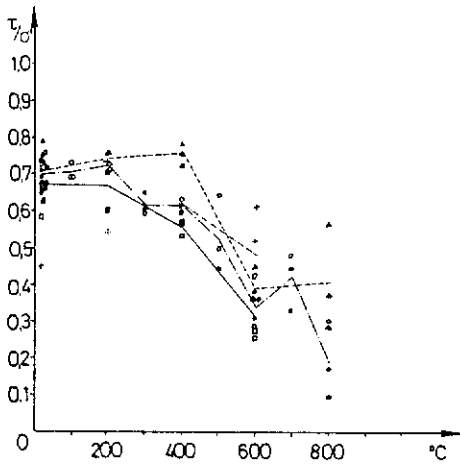
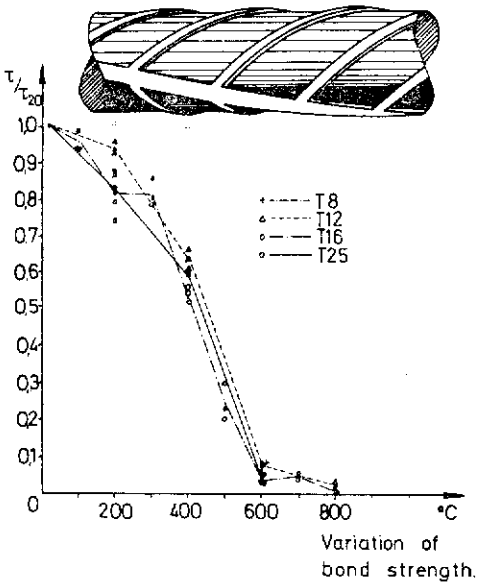
En metode til måling af vedhæftningsstyrken ses at skulle være rotationssymmetrisk og med spændinger påført under  $45^\circ$  med armeringsstangens akse. En sådan metode er udviklet i Hertz [3]. Resultater og udformning heraf illustreres på de følgende sider.



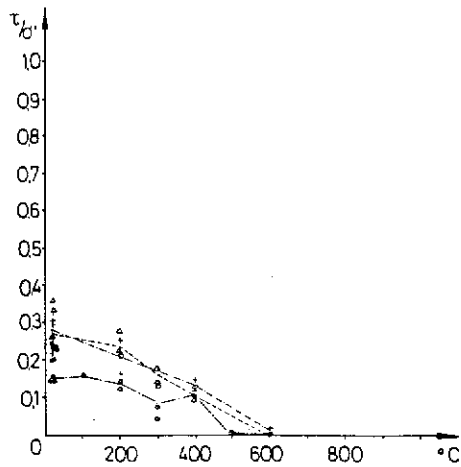
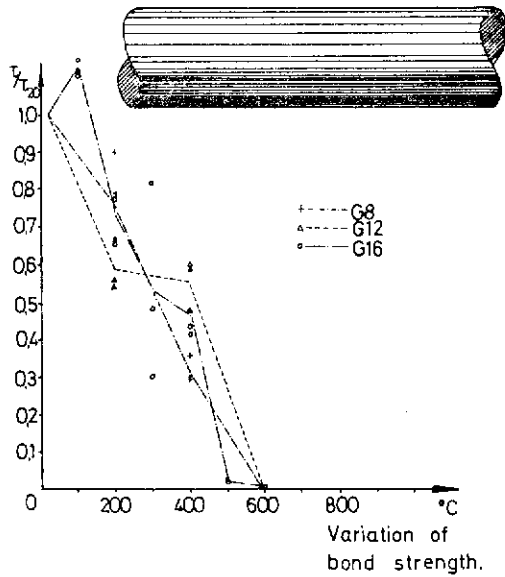
Figur 12. Manchettest.



Figur 13. Vedhæftningsstyrkens variation for kamstål, relativt og i forhold til betonens trykstyrke.



Figur 14. Vedhæftningsstyrkens variation for tentorstål, relativt og i forhold til betonens trykstyrke.



Figur 15. Vedhæftningsstyrkens variation for glat stål, relativt og i forhold til betonens trykstyrke.



VARMEBESTANDIG BETON

Efter at have påpeget i hvor ringe grad almindelig beton kan modstå varmpåvirkninger, vil det være hensigtsmæssigt at gøre opmærksom på muligheden af at fremstille varmestabil beton.

Et basalt kendskab til varmestabile materialer og konstruktionsprincipper er af afgørende betydning for, at den rådgivende ingeniør kan dimensionere hensigtsmæssigt ud fra brandtekniske krav.

Et sådant kendskab vil selvsagt også være nødvendigt for den, som projekterer industri anlæg, hvor høje temperaturer kan forekomme.

For betonkonstruktioners vedkommende er det værdifuldt, at have adgang til et bredt spektrum af brandtekniske løsningsmuligheder, således at man ikke altid skal være henvist til isolering eller anvendelse af store tværsnit.

Opskriften på brandbestandig beton er ret beset enkel:

MAN SKAL BLOT UNDGÅ DET,  
SOM VIL ØDELEGGES BETONEN.

Det, som ødelægger betonen ved påvirkning af høje temperaturer, er som tidligere omtalt i særdelighed tilslag, hvis varmeudvidelse giver spændinger ved samvirken med den svindende cementpasta, og calciumhydroxiden.

Ved proportionering af varmebestandig beton må man vælge et tilslag, hvis varmeudvidelse er mindst mulig.

I vulkanske egne har tuf og pimpstem vist sig overordentligt velegnede.

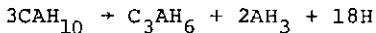
I et område som det danske, hvor man langt fra lever på vulkaner, er produkter som chamotte, knust tegl og visse typer ekspanderet ler rimelige tilslag ud fra et brandteknisk hensyn.

Hvad calciumhydroxiden angår, har man med held formået at binde den ved hjælp af puzzolaner og chamotte nedknust til et fint mel.

Herved dannes varmemestabile forbindelser af typen  $CAS_2$  foruden  $C_3S_2$ .

Anvendes derimod aluminacement, hvad der er tradition for til vesteuropæiske industrieanlæg, må man være opmærksom på, at den herved dannede beton ikke kan tåle påvirkning af fugtig-varm karakter.

Materialet nedbrydes gradvist ifølge processen:



Allerede efter denne meget kortfattede introduktion til varmebestandig beton vil læseren være i stand til at vurdere visse betoners varmemodstandsevne ud fra kendskab til de indgående materialer.

Et interessant eksempel er den antikke romerske beton.

Man ved, at den indeholdt jord fra Pozzolana, det nuværende Pozzuoli ved Napoli, altså Puzzolan i form af flyveaske fra Vesuv. Navnet puzzolan har sin oprindelse her trods den lidt mærkværdige ombytning af o og u.

Desuden indeholdt den romerske beton knust tegl i flere fraktioner samt diverse vulkanske tilslag.

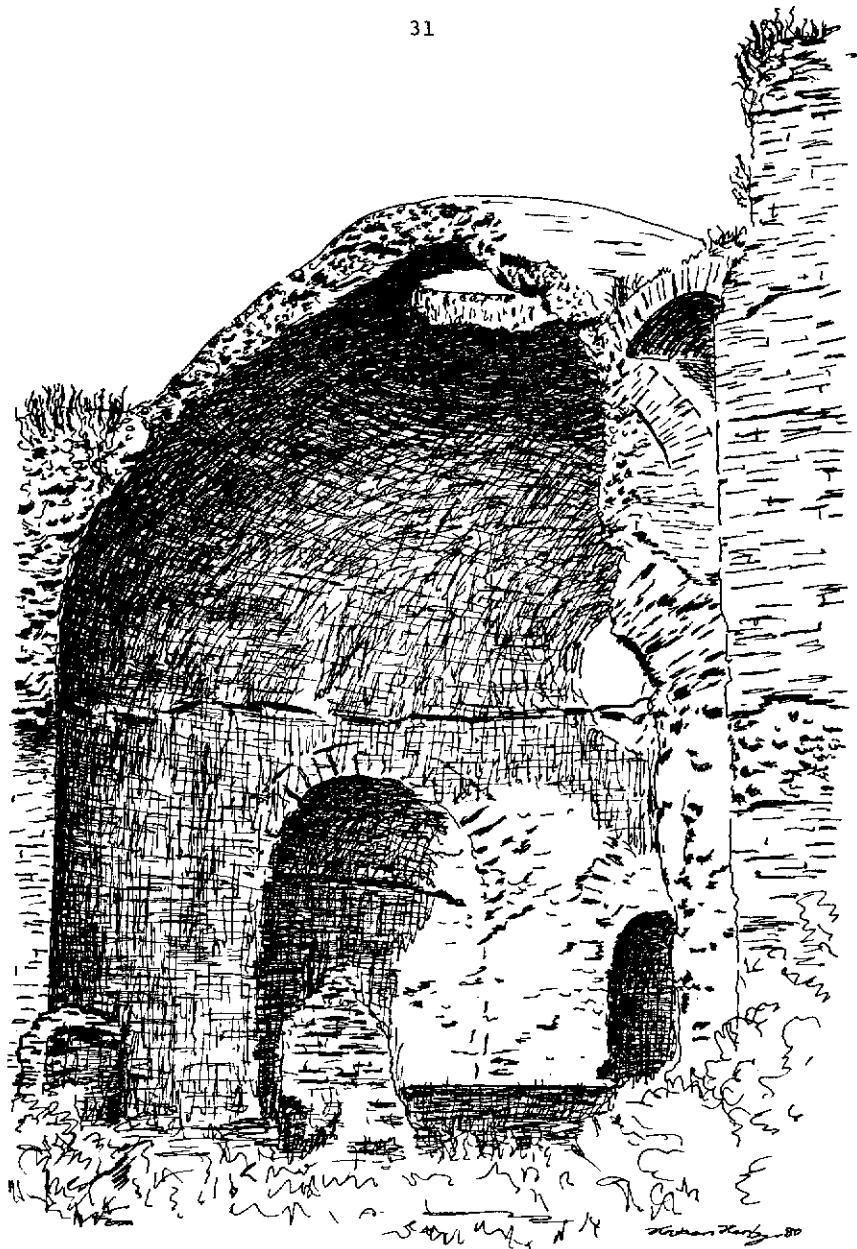
Sammenholdt med det tidligere nævnte ses, at man næppe kan forestille sig en mere brandbestandig beton end den antikke.

Hertil kommer, at man ofte anvendte en blivende forskalling i form af teglsten, der virker isolerende og beskyttende for betonen og giver mulighed for rige variationer i overfladens struktur.

Endelig byggede man overdækninger i form af kupler og hvælve, som også må anses for optimale, hvad brandstabilitet angår. M.a.o.:

RYK TILBAGE TIL START. NÅR DE PASSERER  
ROMERSK KEJSERTID, INDKASSERER DE ET  
KENDSKAB TIL BRANDSTABIL KONSTRUKTION.





Figur 16. Kuppel fra Hadrians villa tegnet af forfatteren august 1980.



### PRØVNING AF BRANDPÅVIRKEDE BETONKONSTRUKTIONER

Det er oplagt, at man vil kunne overtøye sig om en betonkonstruktions evne til at bære en foreskrevet belastning gennem et brandforløb ved at underkaste konstruktionen en prøvning.

Men det er også oplagt, at prøvninger af denne karakter skal udføres med konstruktionselementer i fuld størrelse, med korrekte understøtninger, med den angivne belastning og specielt med en isolering, som svarer til den, man påtænker at anvende i virkeligheden.

En bjælke på femogtyve meters længde kræver da en femogtyve meter lang oven.

Desværre er brandtekniske modelforsøg med konstruktionselementer i beton fysisk umulige, hvis man samtidig ønsker at modellere temperaturbilledet og spændings- og trykfordelingen.

Man vil heller ikke kunne opnå en realistisk belastning af afkortede elementer, sådan som man ofte anvender dem i forbindelse med det nuværende brandtekniske klassifikationssystem.

Tænker man sig den ovenfor nævnte femogtyvemeters bjælke afkortet til standardprøveovnens fem meters længde, vil man selvsagt ikke samtidig kunne påføre fuldt maksimalt moment og fuld maksimal forskydningskraft, ligesom bjælkens deformationstilstand vil være væsentlig forskellig ved prøvning og virkelighed.

Den nuværende brandtekniske klassifikation har mange fordele; men den må ikke forveksles med en dimensionering.

Der findes således eksempler på konstruktioner, som er klassificeret for en times standardbrand; men som næppe i praksis vil kunne modstå en halv time.

En korrekt prøvningsmæssig dimensionering vil være en ret bekostelig og tidsrøvende foreteelse, som dog i lighed med normale statiske prøvninger vil kunne åbne mulig-

hed for en mindre konservativ vurdering, end en tilsvarende beregning nødvendigvis måtte føre til.

Set i lyset af de omkostninger, som den korrekte prøvningsmæssige dimensionering vil medføre, er det væsentligt i stedet at kunne anvende en beregningsmæssig fremgangsmåde.

I det følgende omtales derfor resultater fra arbejdet med opstilling af sådanne beregningsmæssige fremgangsmåder til brug for brandteknisk dimensionering af betonkonstruktioner.

TEMPERATURBEREGNINGER

En forudsætning for at kunne beregne bæreevnen af en given brandpåvirket konstruktionsdel er et kendskab til temperaturfordelingen og dens variation med tiden.

Ser man bort fra de varmebidrag, som bortledes ved dampstrømning, styres problemet af Fouriers varmeledningsligning, hvis generelle form er

$$\frac{\delta i_v}{\delta t} = \nabla(\lambda \nabla T)$$

hvor  $i_v$  er enthalpien ( $J/m^3$ ),  $t$  er tiden (s),  $T$  er temperaturen (f.eks.  $^{\circ}C$ ) og  $\lambda$  er den retningsbestemte varmeledningsevne ( $W/m^{\circ}C$ ).

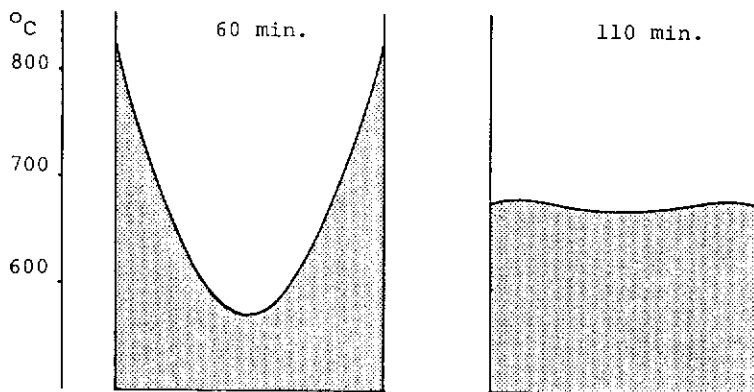
Løsninger til dens en- og to-dimensionale former er fundet ved trinvis udvikling efter tilsvarende differensudtryk under anvendelse af EDB, eller ved hjælp af finite elementmetoden.

Imidlertid må man erkende, at specielt betonens varmeledningsevne ikke lader sig bestemme med større nøjagtighed, end at usikkerheden herfra vil medføre en usikkerhed på temperaturberegningen af størrelsesorden  $50^{\circ}C$ , uanset den anvendte beregningsmetodes nøjagtighed.

Da man til praktisk brandteknisk dimensionering heller ikke har brug for større nøjagtighed, kan en relativ grov beregningsmetode forsvares.

Ud fra disse betragtninger, har forfatteren udviklet en simpel løsningsmetode, som kan programmeres for en avanceret lommeregner, og som kan give fuldt tilstrækkeligt nøjagtige værdier for tilfældene halv-uendeligt medium, tosidigt eksponeret væg og tresidigt eksponeret rektangulært tværsnit udsat for såvel standardbrand som for andre mere nuanceret bestemte brandforløb.

I forbindelse med fastlæggelse af temperaturudviklingen i tværsnit er det væsentligt at gøre sig det forhold klart, at



Figur 17. Temperaturfordeling i en 10 cm tyk dragerkrop ved en 60 min. standardbrand med afkøling.

den maksimale temperatur i et punkt i tværsnittets indre altid vil optræde til et senere tidspunkt end den maksimale temperatur i det brændende rum.

Dvs. at de højeste temperaturer fx. på de steder, hvor armeringen ligger, altid vil forekomme under afkølingsfasen.

Effekten er illustreret på figur 17, hvor temperaturfordelingen er vist i en 10 cm tyk dragerkrop med armeringen placeret i centerlinien.

Efter opvarmning med én times standardbrand er temperaturgradienterne store, brandrumstemperaturen er vokset hele tiden, og varmen er strømmet ind i tværsnittet.

Branden slukkes og afkølingen begynder.

Da vender gradienterne i området nærmest overfladen, og profilet afgiver varme, men samtidig sker en udligning af gradienterne i tværsnittets indre med en kraftig temperaturstigning til følge.

Hvis armeringen ligger centralt som i dette tilfælde er opvarmningen af denne årsag af afgørende betydning for bæreevnen.

I det viste eksempel havde profilet praktisk taget bevaret sin karakteristiske bæreevne til tiden 60 minutter, hvor branden slukkes.

Til tiden ca. 110 minutter bliver armeringen varmest, og dens flydespænding og dermed bøjningsbæreevnen er som følge heraf reduceret til ca. 12% af den oprindelige værdi.

Der sker med andre ord et fald på ca. 85% i tværsnittets bøjningsbæreevne under afkølingen! (Eksemplet er fra Pedersen [6]).

Da de traditionelle betragtningsmåder hovedsageligt koncentrerer sig om bevarelse af bæreevnen under brandpåvirkningen, er resultatet ofte blevet, at man har foreskrevet større dæklagstykkelser.

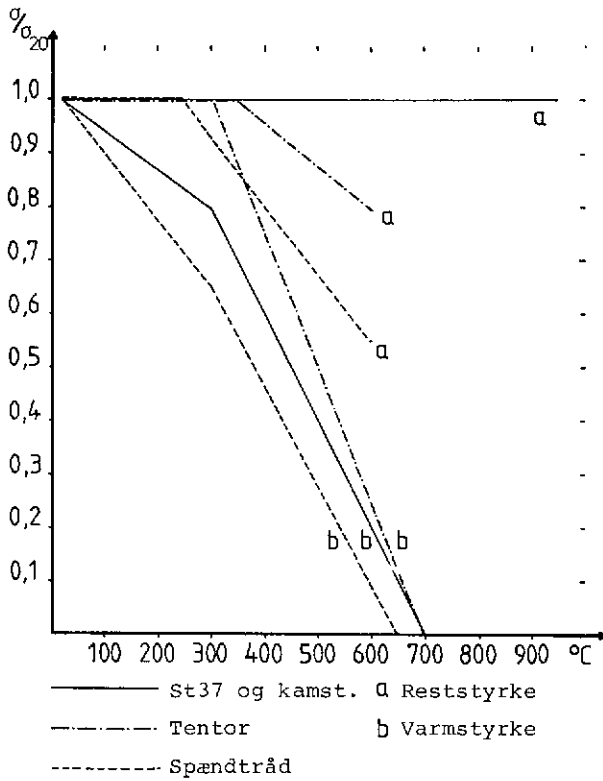
Af ovenstående betragtninger ses, at den reelle virkning af forøgede dæklagstykkelser først og fremmest består i en forhaling af det kritiske tidspunkt snarere end en egentlig beskyttelse.

Da svækkelserne i tværsnittets forskellige dele indtræder til vidt forskellige tidspunkter, ses at en undersøgelse af en konstruktionsdels bæreevne bør ske under et fuldt brandforløb, dvs. såvel opvarmning som afkøling.

Skal undersøgelsen også give en idé om restbæreevnen, må perioden tillige omfatte en lagringstid på ca. 7 døgn, idet betonens mekaniske egenskaber først vil have stabiliseret sig på et minimum til dette tidspunkt.

Reduktionen i et tværsnits bøjningsbæreevne som følge af svækkelser i trykzonens beton andrager typisk omkring 20 - 30% og er således ikke uvæsentlig.

Hvis hovedarmeringen genvinder sin styrke ses i øvrigt, at tværsnittet let bliver overarmeret i resttilstanden.



Figur 18. Udvikling i relativ 0.2-spænding med temperaturen under- og efter varmpåvirkning.



### IDEALISEREDE MATERIALEEGENSKABER

Når temperaturudviklingen kendes i hvert eneste punkt af konstruktionen kan bæreevneundersøgelsen i princippet forme sig på den måde, at man i hvert punkt anvender materialeegenskaber svarende til temperaturen under hensyntagen til svækkelser som følge af en tidligere højere temperatur.

Analysen af denne art er i visse tilfælde gennemført under anvendelse af EDB, men i praksis må man naturligvis tilstræbe meget enklere betragtningsmåder.

I det følgende afsnit vil sådanne beregningsmodeller udviklet af forfatteren omtales.

Forinden må dog fastlægges nogle anbefalede forløb af materialeegenskaberne som funktion af den maksimale temperatur dels i varm tilstand og dels i kold tilstand efter varmpåvirkningen.

På figur 18 er optegnet værdier for flyde- og 0.2%-spænding for henholdsvis blødt stål og kamstål, dansk tentorstål og spændtråd.

Arbejdskurverne for armeringen vil med rimelighed kunne regnes at fremkomme af de oprindelige arbejdskurver for ikke brandpåvirkede stål ved simpel affinitet i tøjningsaksen.

For betonens vedkommende forholder det sig ikke så enkelt.

Her øges brudtøjningen drastisk med aftagende trykbrudspænding.

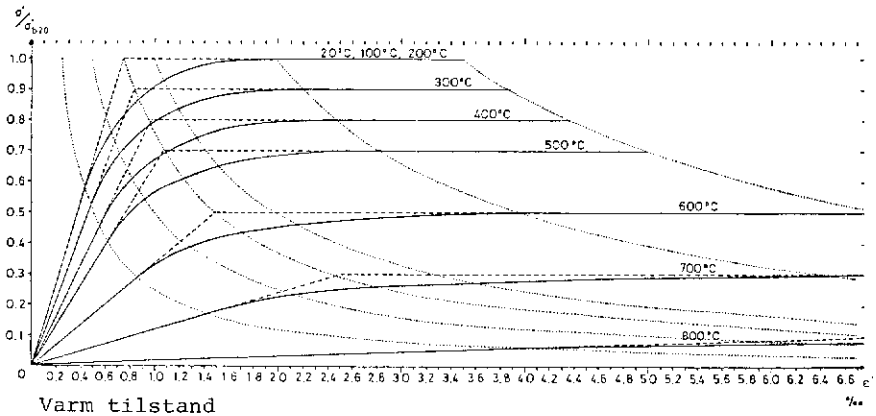
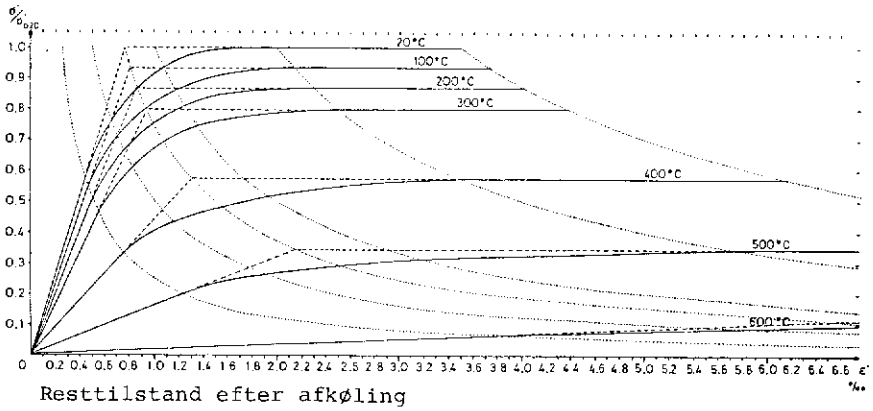
Forfatteren har iagttaget, at der med god tilnærmelse gælder, at produktet af trykspænding og tøjning er en konstant for ethvert punkt på arbejdskurverne uanset temperaturen, som vist på figur 19.

Kaldes den faktor, hvormed trykbrudstyrken er reduceret for  $\xi_b$  fås da specielt:

$$\sigma'_b = \xi_b \sigma'_{b,20}$$

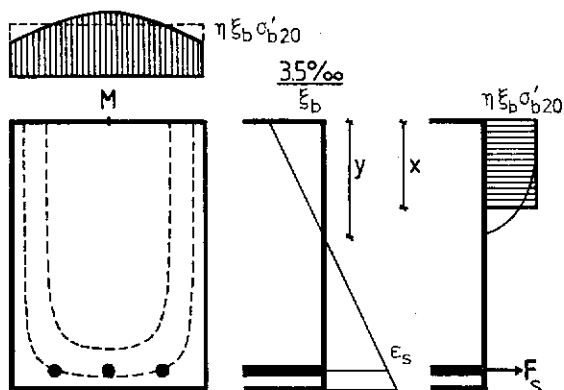
$$\epsilon'_b = \frac{3.5\%}{\xi_b}$$

$$\text{og } E_b = \xi_b^2 E_{b,20}$$



Figur 19. Idealiserede arbejdskurver for dansk beton.

## BEREGNING AF BÆREEVNE



Figur 20. Bøjningspåvirket bjælke.

## Bjælker

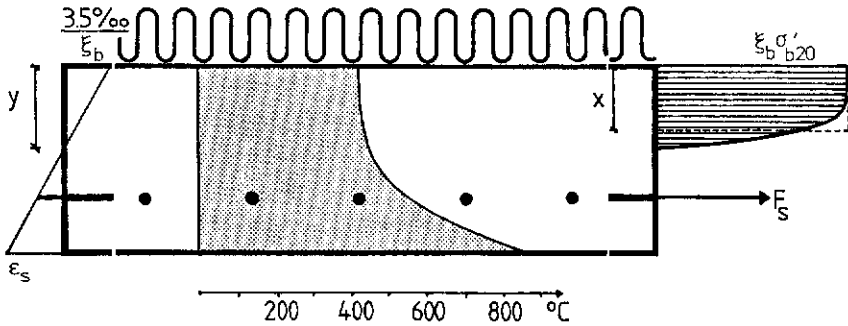
Betragtes et bjælkets tværsnit påvirket af bøjning som vist på figur 20, ses at isotermene i trykzonen med rimelighed kan anses for parallelle med tværsnittets sider.

I en given dybde herfra vil spændingsbilledet da være en reduceret arbejdskurve, hvis man regner med, at plane tværsnit forbliver plane.

På tværs af trykzonen vil spændingen variere og den samlede virkning af dette spændingsbillede beskrives med en ækvi-valent spænding, udtrykt ved spændingen i centerlinien multipliceret med en spændingsfordelingsfaktor  $\eta$ .

Den lodrette spændingsfordeling viser sig for en plastisk betragtning at kunne ækvi-valeres med en rektangulær fordeling til en dybde  $x$  af tre fjerdedel gange dybden til nullinien  $y$ .

Tilnærmelsen herved er ikke større end tilnærmelsen ved en vanlig plastisk dimensionering; men rotationskapaciteten er større.



Figur 21. Bøjningspåvirket plade med oversideisolering.

Man finder da  $\eta$  og evt. temperaturen  $T$  i punktet  $M$  på centerliniens skæring med bjælkeoversiden ved hjælp af en tabel, hvor man anvender bjælketykkelsen og data for den pågældende brand som indgangsværdier.

Heraf fås da  $\xi_b$  i  $M$ , og den ækvivalente spænding bliver  $\eta \xi_b \sigma'_b20$ .

Armeringskraften findes ved summation af de enkelte armeringsstængers arealer  $A_{si}$  gange deres respektive reducerede 0.2-spændinger  $\xi_{si} \sigma_{s20}$ .

$$F_S = \sum_i A_{si} \xi_{si} \sigma_{s20}$$

Derpå fortsættes beregningen som i en normal plastisk dimensionering, blot anvendes de nye betontøjninger.

Plader

For plader er forholdet lidt anderledes.

Armeringskraften findes i princippet på samme måde, men isotermerne skærer nu trykzonen på den anden led.

Optegning af aktuelle spændingsbilleder viser imidlertid, at man stadig med god tilnærmelse vil kunne regne med en rektangular spændingsfordeling med spænding af størrelsen  $\xi_b \sigma'_{b20}$  lig den reducerede brudspænding i pladens overside og dybde  $x$  lig tre fjerdele af nulliniens dybde  $y$ .

Dog i tilfælde, hvor  $\xi_b$  er nul i dybden  $y$ , erstattes  $y$  af dybden, hvor  $\xi_b$  bliver større end 0, og i øvrigt vurderes tværsnitets sammenhæng.

Herefter regnes på normal vis.

#### Forskydning

Hvis man holder sig for øje, hvordan en ideal bjælke fungerer med hensyn til forskydning, er den brandtekniske undersøgelse simpel.

Den enklest tænkelige armerede betonbjælke indeholder en trækstringer som bundarmering og en trykbue.

Da man kun kan overføre en vis forankringskraft mellem de to delementer, må trykbuen for en given belastning lande på trækstringeren med en vis hældning.

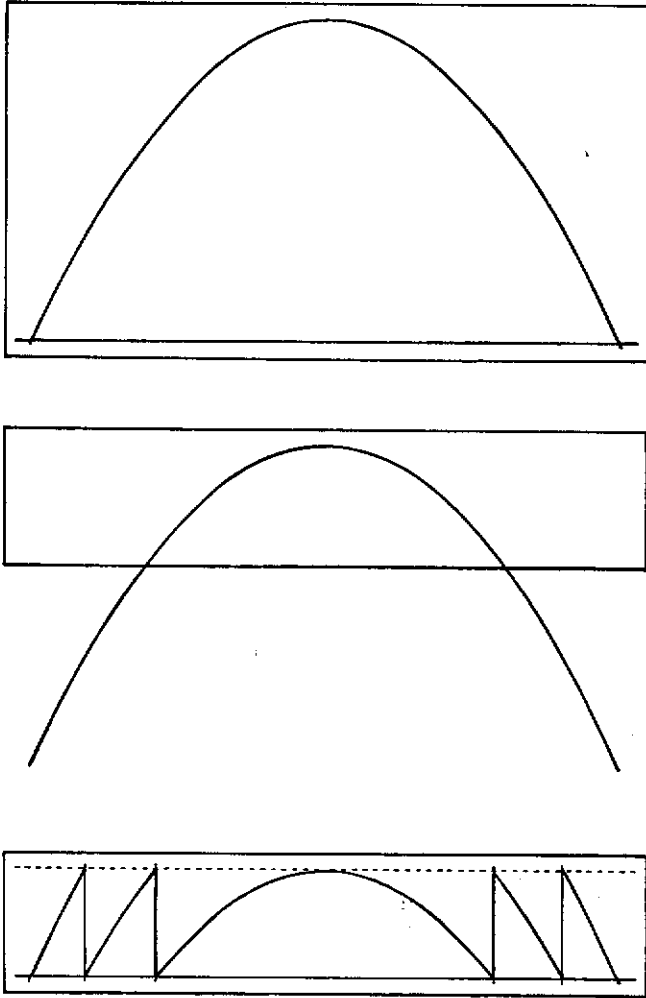
En mindre hældning vil da medføre et forskydningstrækbrud.

Ønskes af hensyn til frihøjde m.m. en lavere bjælke, ses at den nødvendige trykbue ikke kan finde plads i profilet, som den er.

Derfor deles den, og de enkelte dele hænges op i en forskydningsarmering.

Ved opstilling af denne model er arbejdet ud fra forudsætningen om, at betonens trækstyrke regnes til nul og da vil hele forskydningen skulle overføres af såvel betonen som af armeringen.

Kaldes bæreevnen over et givet tværsnit for  $Q_b$  med hensyn til betonen og  $Q_s$  med hensyn til armeringen ses den totale forskydningsbæreevne at være minimum deraf, og i brandtilfældet fås da tilsvarende  $n \xi_b Q_b$  og  $\xi_s Q_s$ , hvor  $n \xi_b$  er fundet ved bøjningsundersøgelsen og  $\xi_s$  beregnes let.



Figur 22. Simple illustration af en bjælkes forskydningsforhold.

FORANSTALTNINGER MOD BRAND

En del brandtekniske dimensioneringsmetoder tager kun sigte på at sikre konstruktionernes bæreevne inden for et givet antal minutter af en standardbrand, og behandler ikke risikoen for sammenstyrtning under afkølingen.

## Større armering

I de mere avancerede af disse metoder som fx. FIP/CEB [7] opereres med forøgede armeringsarealer for at modvirke tabet i flydespænding og 0.2-spænding ved opvarmningen.

Anvendes sådanne metoder, må man være klar over, at man ikke dimensionerer for den højeste ståltemperatur ved den betragtede brand. Idet denne, som tidligere vist, først opnås under afkølingen.

Man skal yderligere være opmærksom på, at betonen i trykzonen får en blivende svækkelse, som ikke tages i regning ved de nævnte metoder; men som kan føre til overarmerede tværsnit.

## Større dæklag

En anden fremgangsmåde til forbedring af bæreevnen under brand er forøgelse af dæk-lagstykkelserne. Mange normer er baseret på krav af denne art.

Som vist er effekten heraf i væsentlig grad en udskydelse af tidspunktet for sammenstyrtningen og kun i noget mindre grad en egentlig sikring derimod.

Metoden er dog bedre end ingenting, og den udmærker sig i det mindste ved stor simpelhed for anvendelserne.

## Større tværsnit

Som påpeget i indledningen vil store tværsnitsdimensioner være fordelagtige, da store tværsnit kræver store varmemængder for at blive beskadiget.

Dette er årsagen til, at betonkonstruktionerne tidligere har haft ry for at være brandstabile, og det er naturligvis stadig en god og enkel måde at sikre forsvarlige konstruktioner på.

## Isolering

Hvis man ønsker at udnytte fordelene af de lette konstruktioner, som moderne dimensioneringsmetoder kan føre til, vil en egentlig brandisolering i lighed med den, man kender fra stålkonstruktioner, kunne komme på tale.

Funktionen af den er principielt den samme, men fastlæggelsen af isoleringstykkelse og -udformning kræver større indsigt, end tilfældet er for stålkonstruktionerne.

Metoden anvendes allerede i visse forbindelser; men tanken kræver sandsynligvis en vis tilvænnning for danske ingeniører.

## Stabile principper

Endelig vil anvendelse af brandstabil beton og brandteknisk gunstige konstruktionsformer altid være sikre alternativer.

Blandt de gunstige former er allerede nævnt kupler og tøndehvælve; men mulighederne er mangfoldige. Ribbehvælve og spidsbuer er andre velkendte eksempler, hvortil kommer mange nye i form af fx. visse dobbeltkrumme skaller og stabile trykstringersystemer, der for uden at have rent brandtekniske fordele kan virke igangsættende for arkitektonisk nyskabelse.

## Morale

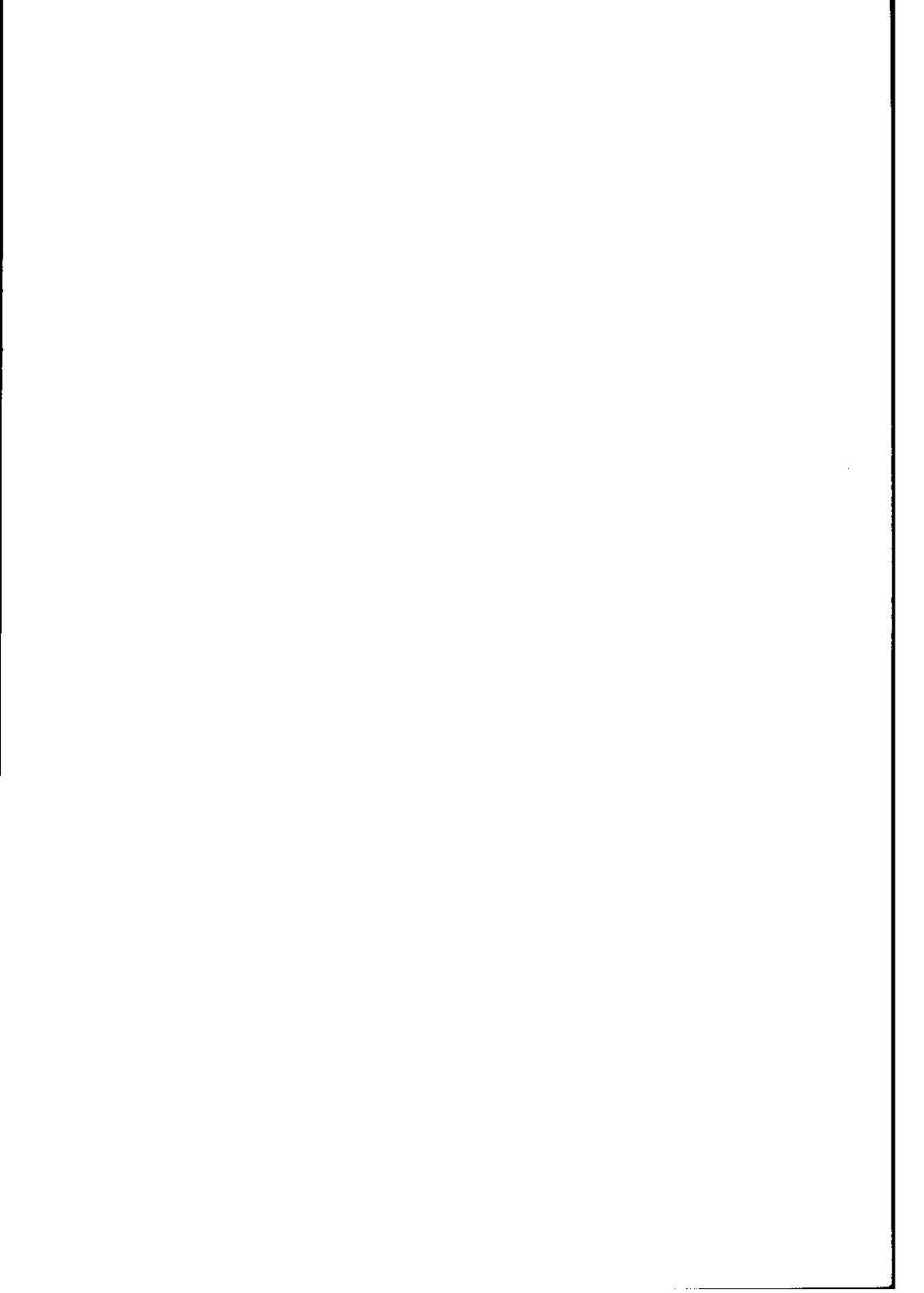
Beton er et overordentligt anvendeligt byggemateriale, som man bør værne om, og det gør man bl.a. ved at anvende det rigtigt.



LITTERATUR

- [1] HERTZ, K.D.:  
Betonkonstruktioners brandtekniske  
egenskaber.  
Rapport nr. 140, 210 p.  
Instituttet for Husbygning DTH.  
Lyngby 1980.
- [2] HERTZ, K.D.:  
Reference List on Concrete Constructions  
Exposed to High Temperatures.  
Report No. 141, 63 p. (Approx. 500 Ref.)  
Institute of Building Design,  
Technical University of Denmark.  
Lyngby 1980.
- [3] HERTZ, K.D.:  
Armeringsståls forankring ved  
høje temperaturer.  
Rapport nr. 138, 103 p.  
Instituttet for Husbygning, DTH.  
Lyngby 1980.
- [4] HERTZ, K.D.:  
Bond Between Concrete and Deformed Bars.  
Nordtest Method Proposal.  
Institute of Building Design,  
Technical University of Denmark.  
Lyngby 1980.
- [5] HERTZ, K.D.:  
Microwave Heating for Material  
Fire Testing of Concrete.  
Report No. 144. 25 p.  
Institute of Building Design,  
Technical University of Denmark.  
Lyngby 1981.  
CIB W14/81/3 (DK).
- [6] PEDERSEN, S.:  
Beregningsmetoder for varme-  
påvirkede betonkonstruktioner.  
Eksamensprojekt 251 p.  
Instituttet for Husbygning, DTH.  
Lyngby 1981.
- [7] FIP/CEB:  
Report on Methods of Assessment of the  
Fire Resistance of Structural Members.  
Cement and Concrete Association, 15.393.  
Wexham Springs, GB. 1978.





ISSN-0106-0406  
ISBN-87-87823-18-7

teknisk forlag e.s. København