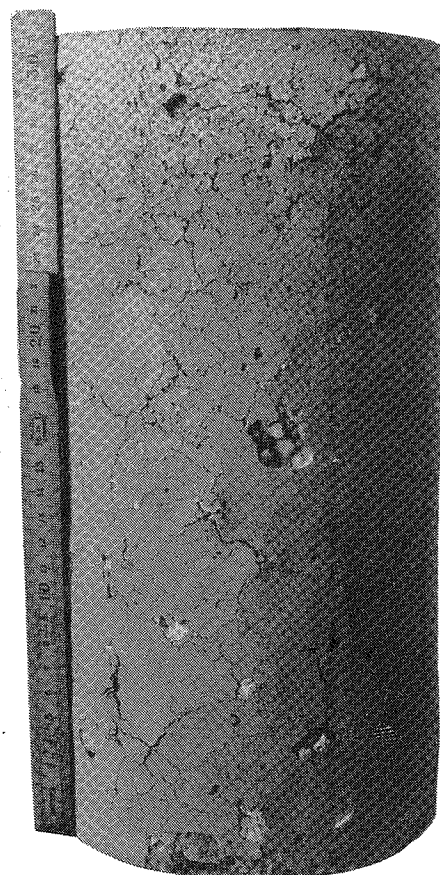


INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **140**



DEL 1 **KRISTIAN HERTZ**

BETONKONSTRUKTIONERS
BRANDTEKNISKE EGENSKABER

Den polytekniske Læreanstalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1980

FORORD - DEL 1 OG 2

Rapport nr. 140 omfatter første og anden del af et licentiatarbejde vedrørende betonkonstruktioners brandtekniske egenskaber.

Første del søger først og fremmest at give en oversigt over materialeegenskaberne for brandpåvirket beton ved sammenstilling og behandling af påstande og resultater fra litteraturen og egne forsøg.

I anden del gøres rede for nogle mere specielle emner, såsom forslag til, hvad man kan gøre for at opnå bedre brandbestandighed af betonen, samt forslag til en bedre opvarmningsmetode i forbindelse med materialebrandprøvning.

Tredie del er allerede udgivet i februar 1980 i form af rapport nr. 138:

"Armeringsståls forankring ved høje temperaturer", som omhandler et delprojekt, udført i NORDTEST-regie.

Fjerde del er rapport nr. 141:

"Reference List on Concrete Constructions Exposed to High Temperatures", der er opstået som et bi-produkt i forbindelse med projektets litteraturstudium.

For at lette overskueligheden er hver af de fire deles sidetal og referencenumre forsynet med et præfix, svarende til den pågældende dels nummer.

Licentiatprojektet blev påbegyndt februar 1978 ved Instituttet for Husbygning med professor Johs.F. Munch-Petersen som faglærer og i den første periode har især lektor Egil Borchersen bidraget ved indsamling af relevant litteratur.

Fra februar 1979 blev lektor Torben Jakobsen medfaglærer og denne har ydet en værdifuld bistand, specielt med hensyn til afviklingen af NORDTEST-projektet, samt den endelige rapportering.

Til alle udtrykkes min bedste tak.

En særlig tak skylder jeg Hanne Hindsgaul Rasmussen og laborant Niels Hansen for henholdsvis renskrivning og trykning af rapporterne.

Endelig takkes en række medarbejdere ved Instituttet for Husbygning, Laboratoriet for Bygningsmaterialer og Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DTH, for hjælpsomhed i forbindelse med projektets gennemførelse.

Lyngby, juli 1980

Kristian Hertz

INDLEDNING

Da licentiatprojektet "Betonkonstruktioners brandtekniske egenskaber" påbegyndtes, herskede der ingen tvivl om, at titlen dækkede et så stort fagområde, at kun en beskeden del heraf kunne behandles indenfor projektets rammer.

Når dette navn alligevel anvendtes, skyldes det et ønske om, at prioriteringen af de emner, der skulle behandles i projektet, ligesom behandlingen af det enkelte emne skete ud fra hensynet til en konstruktionsvurdering.

Projektet skulle altså inden for de givne rammer søge at skabe det bedst mulige grundlag for opstillingen af en beregningsmæssig vurderingsmåde for betonkonstruktioner påvirket af lasttilfældet brand.

Da statikkens love ikke ændrer sig ved brand, er problemerne først og fremmest af materialemæssig karakter og dernæst selve udformningen af beregnings- og vurderingsmetoder for fastlæggelse af temperaturfordelinger, deformationer, tvangskræfter og termiske spændinger og herudfra bæreevnen af konstruktionselementer, samlinger og hele bygværker.

Da der allerede kendes ganske raffinerede metoder til beregning af temperaturfordelinger, behandles dette emne kun relativt kort i projektet.

De øvrige emner er alle baseret på de ændringer, som materialernes mekaniske egenskaber undergår ved varmepåvirkning, hvorved hovedvægten naturligt er lagt herpå.

Fra litteraturen er søgt indsamlet viden om ændringerne i betonens mekaniske egenskaber, samt årsagerne hertil.

Prøvningsresultater er optegnet som funktion af den maksimale temperatur ved hjælp af et standardkoordinatsystem, så sammenligning af beslægtede prøvninger muliggøres.

Årsagerne til ændringerne er søgt klarlagt ved kritisk vurdering af påstande herom fra litteraturen, sammenholdt med egne hypoteser og iagttagelser.

Resultatet heraf foreligger i licentiatarbejdets første del.

I anden del omtales visse specielle forhold, såsom muligheden af at fremstille brandbestandig beton, at undgå temperaturforskelle i større materialeprøvelegemer, samt det umulige i at udføre modelforsøg.

Sideløbende med litteraturbehandlingen er en højisoleret elektrisk ovn konstrueret, specielt med henblik på langvarige opvarmninger af materialeprøvelegemer.

Da forbandtet mellem beton og armeringsstål under og efter brand hidtil har været dårligt belyst, er en ny prøvningsmetode udviklet for denne egenskab og et større antal prøvninger foretaget, der - udover information om vedhæftningsforholdene for danske armeringsstål i dansk beton - har givet oplysning om resttrykstyrke, -elasticitetsmodul og -Poissons forhold for en dansk beton.

Disse resultater er følgelig medtaget i del 1, hvorimod selve prøvningsmetoden og dens baggrund behandles i del 3.

Endelig er - som en særskilt del 4 - udgivet en samling af referencer om betonkonstruktioner, udsat for høje temperaturer, idet en sådan formentlig vil have interesse ved fremtidige studier over emnet.

Da en væsentlig del af dette arbejde består i behandling af andres og egne påstande og iagttagelser, finder jeg det hensigtsmæssigt allerede på dette sted at gøre opmærksom på et par grundfilosofiske forhold, som til stadighed har været af betydning i forbindelse hermed.

Det er væsentligt at gøre sig klart, at man intet kan bevise om et materiale (eller noget andet stofligt). Til et bevis kræves et begrebsmæssigt udgangspunkt. Man kan derimod have mulighed for at påvise en teori derom.

Påvisningen består i at gøre teorien acceptabel. En teori kan accepteres når noget taler for den, og intet taler imod den.

Flere steder i de efterfølgende diskussioner er teorier søgt retableret ved nye fortolkninger af forhold, som oprindeligt så ud til at modsige dem.

Yderligere bekræftelser på teoriernes gyldighed er derimod ikke altid tilstræbt, da der i forvejen ofte forelå så mange bekræftende iagttagelser, at tiden kunne anvendes bedre på andre gøremål.

Forfatteren håber altså med nærværende projekt at have taget et skridt i retning mod en brandteknisk vurderingsmåde for betonkonstruktioner. Opstilling af egentlige beregningsregler og udførelse af konsekvensberegninger hermed vil - såfremt de fornødne midler hertil kan skaffes - finde sted i et senere projekt.

<u>INDHOLD DEL 1</u>	side
FORORD DEL 1 OG 2	2
INDLEDNING	3
INDHOLD DEL 1	6
RESUME DEL 1	7
SYMBOLLISTE DEL 1	8
KLINKERMINERALERNES FORHOLD VED PÅVIRKNING AF HØJE TEMPERATURER	9
C_3S	10
$\beta-C_2S$	12
C_3A	14
C_4AF	16
HYDRATISERET CEMENTPASTA OG BETONS KEMISKE OG MEKANISKE FORHOLD VED HØJE TEMPERATURER	19
Forskningsudvikling	19
Om cementpasta ud fra klinkerminerale	20
Ændringer i betons kemiske og mekaniske egenskaber ved opvarmning	21
0-100 °C	21
100-200 °C	23
200-300 °C	26
300-400 °C	28
400-500 °C	30
500-600 °C	32
600-700 °C	35
700-800 °C	37
800-900 °C	40
900-1000 °C	40
1000-1200 °C	40
Vand-cementtallets betydning for styrkeudviklingen	41
Alderens betydning "	44
Den statiske belastnings betydning "	46
Opvarmningstidens betydning "	51
Termiske cyklers betydning "	54
Afkølings- og lagringsbetingelsernes betydning for styrkeudviklingen	56
afkølingsforsøg med beton	60
afkølingsforsøg med cementpasta	62
EKSEMPLER PÅ TRYK- OG TRÆKSTYRKEVARIATIONER MED TEMPERATUREN	66
AFSKALNING	94
DEFORMATIONSFORHOLD FOR BRANDPÅVIRKET BETON	103
Termisk tøjning	104
E-modul	105
Poissons forhold	110
Krybning	132
Transient tøjning	132
FARVEDANNELSER I BRANDPÅVIRKET BETON	134
TEMPERATURFORHOLD	138
Betons varmeledningsevne	139
Betons varmekapacitet	149
Beregningsmetoder	152
SUMMARY PART 1	159
LITTERATUR DEL 1	160
DEL 2 (36 p.) begynder	175

RESUME - DEL 1

Der gives en samlet fremstilling af betons materialeegenskaber under og efter påvirkning af høje temperaturer.

Grundlaget for denne fremstilling er dels en samlet kritisk anvendelse af oplysninger fra litteraturen og dels egne iagttagelser.

Ansvar for udledningen af alle teorier, som anføres i dette arbejde, er derfor helt forfatterens med mindre eksplicitte referencer er opgivet.

Til illustration af diskrete betoners brandtekniske forhold er der fra litteraturen foretaget omarbejdning og optegning af 168 kurver over mekaniske- og 48 kurver over termiske egenskaber.

En forsøgsserie på ialt 230 standardcylindre af dansk beton har givet rig mulighed for visuelle iagttagelser og bidraget med oplysninger om resttrykstyrkens variation med den maksimale temperatur.

På 30 af disse cylindre er endvidere foretaget målinger af elasticitetsmodul og Poissons forhold.

Herudover er i mindre omfang gennemført forsøg til belysning af mere specielle spørgsmål i forbindelse med de anførte teorier.

SYMBOLLISTE - DEL 1

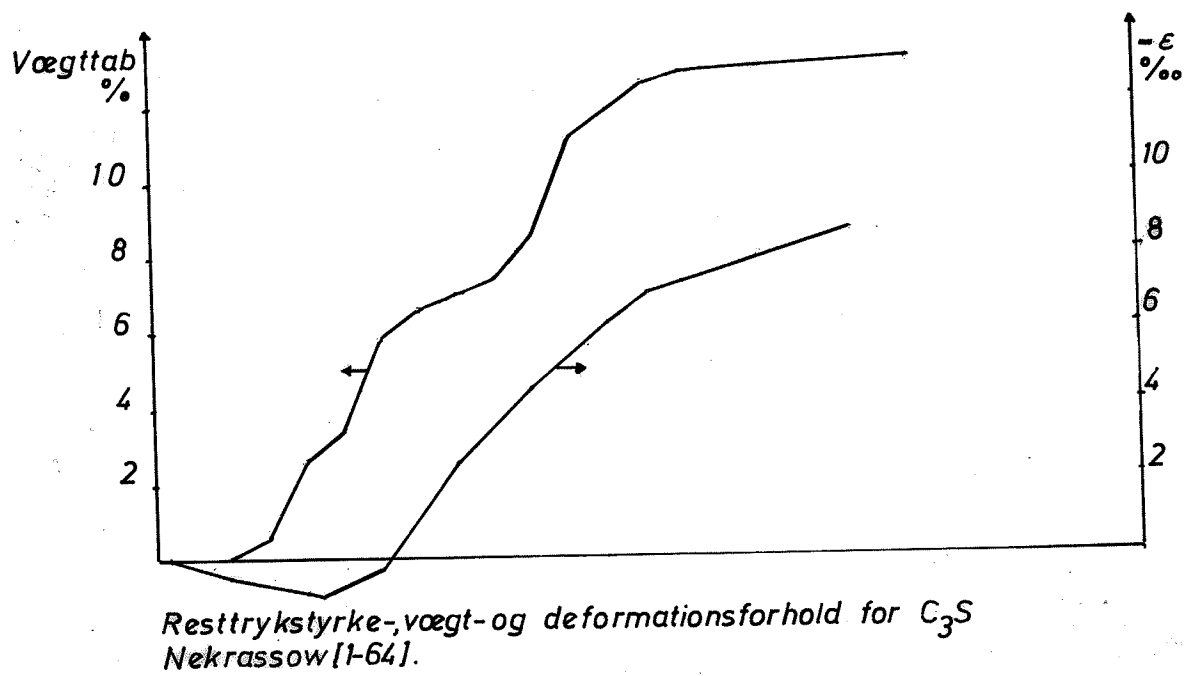
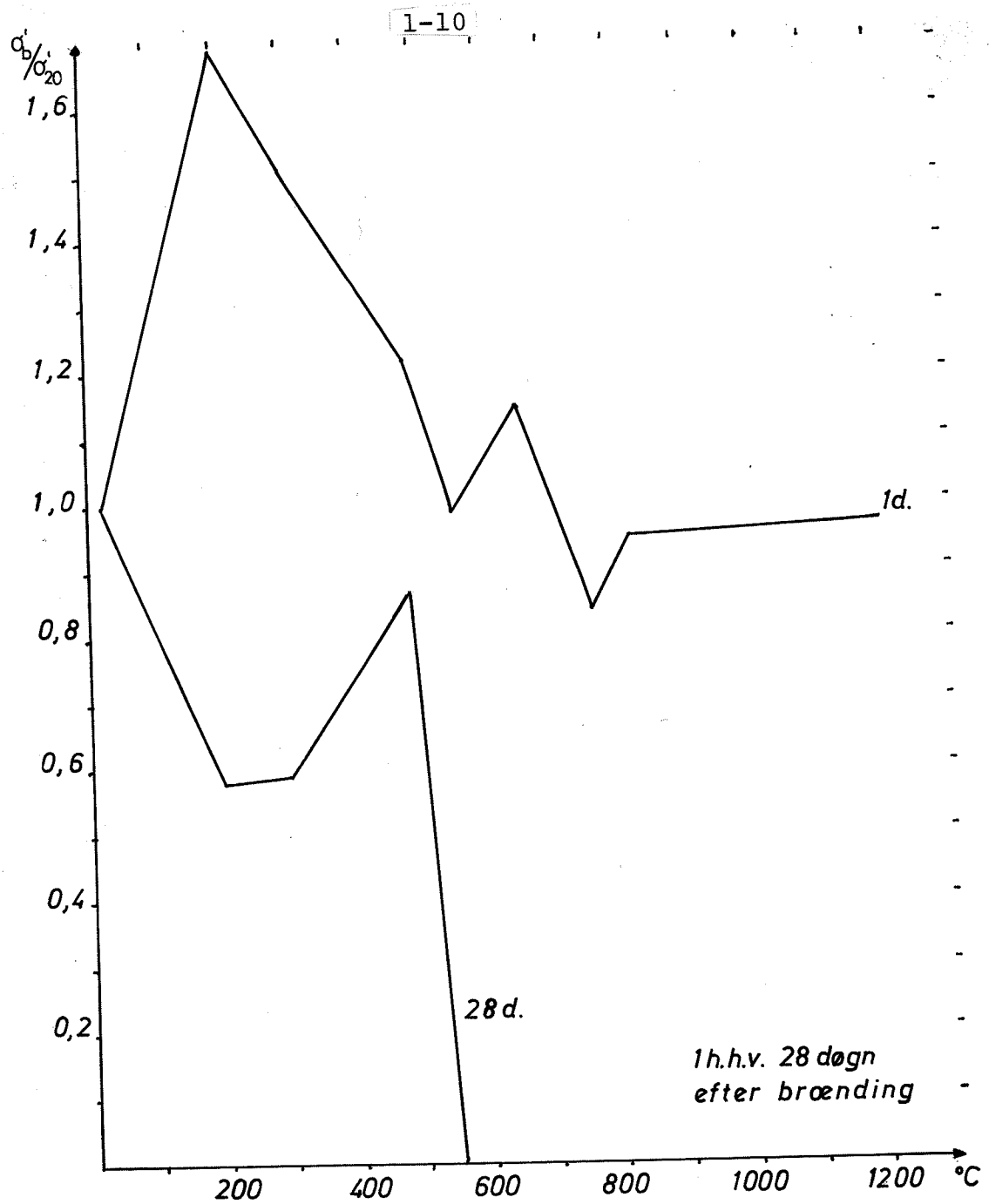
A	areal
A	forkortelse for Al_2O_3
A_1	arbitrær konstant
A_t	totale areal
a	temperaturledningstal
b	breddemål
C	forkortelse for CaO
C_o	arbitrær konstant
C_1	arbitrær konstant
c_p	varmefylde
d_{max}	største korndiameter
E	elasticitetsmodul
F	forkortelse for Fe_2O_3
G	forskydningsmodul
H	højde
H	forkortelse for H_2O
i_v	enthalpi
RF	relativ fugtighed
r	polar koordinat
S	forkortelse for SiO_2
T	temperatur
T_o	arbitrær temperatur
t	tid
t/c	tilslag-cementforhold
v	vinkelhastighed
v/c	vand-cementforhold
x	koordinat
Φ	diameter
ε	tøjning
ε_{cr}	krybetøjning
ζ	andel hydratiseret calciumilte
λ	varmeledningstal
ν	Poissons forhold
ξ	andel hydratiseret calciumsilikat
ρ	massefylde
σ'	trykspænding
σ'_b	betontrykstyrke
σ_b	betontrækstyrke

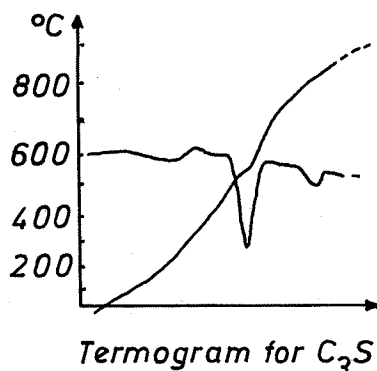
KLINKERMINERALERNE
FORHOLD VED PÅVIRKNING
AF HØJE TEMPERATURER

Kendskabet til dette område baserer sig hovedsageligt på sovjetiske arbejder, foretaget gennem de sidste henved fyre år i forbindelse med udvikling af varmebestandige betoner. Resultaterne herfra er nedfældet i diverse rapporter og sammenfattet hovedsageligt af Nekrasov og Tarasova i forbindelse med disses bøger om varmebestandig beton. Den første stammer fra 1954 "varmefaste betoner til gulve i ovne". Manuskriptet til Nekrasovs "Varmefast beton" fra 1957 blev i 1961 udgivet i tysk oversættelse [1-64], hvortil mange vestlige forfattere refererer. Resultater fra senere arbejder er medtaget i Nekrasov og Tarasovas "Varmebestandig beton af portlandcement" fra 1969 [1-115]. Heri er endvidere visse tolkninger af de i 57-udgaven refererede arbejder justeret. I sådanne tilfælde anvendes i det følgende 69-udgavens konklusioner og værdier.

Ved en metode til sintring af de enkelte klinkermineraller gennem gentagne brændinger og formalinger, blev disse udskilt og tildannet som 2 cm terninger til brug for trykstyrkebestemmelser og 3 cm lange 1,5 x 1,5 cm prizmer til længdeændringsbestemmelser.

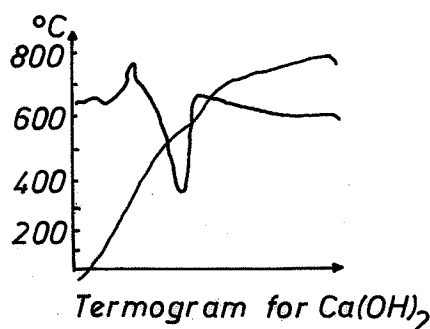
De første opvarmedes til 100° C med 1° C/min, herfra til 150° C med 0,4° C/min og endelig til den maximale temperatur med mindre end 2,5° C/min. Denne temperatur blev holdt i 4 timer og der afkøledes i ovnen, hvorpå prøvning fandt sted umiddelbart eller efter 28 døgn i luft. De sidste opvarmedes 3° C/min til 900° C og længdeændringen aflæstes efterhånden. Desuden er der optegnet termogrammer og foretaget vægttabsbestemmelser samt mikroskopiske analyser af tyndslib fra prøverne.



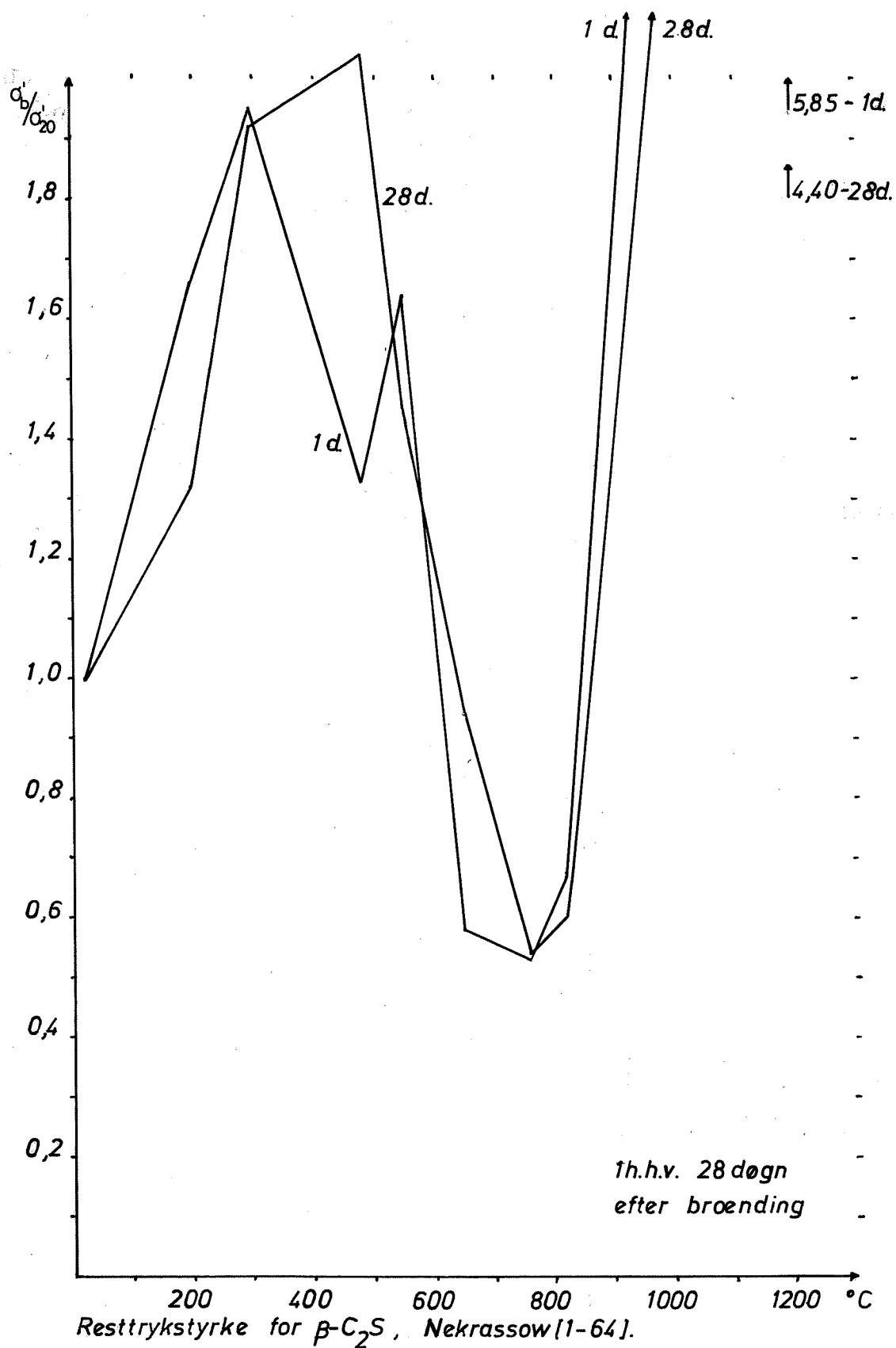
C_3S 

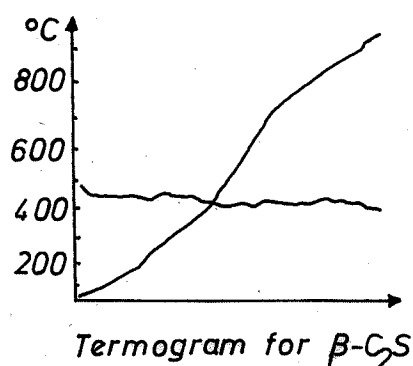
Termogrammer af hydratiseret tricalciumsilikat viser tre endoterme reaktioner i intervallerne hhv. $490 - 540^\circ C$, $770 - 810^\circ C$ og $855 - 950^\circ C$.

Den første skyldes vandafgivelse fra CH, dannet ved hydratiseringen. Den anden kan ikke umiddelbart forklares; men den tredje skyldes sønderdeling af de karbonatiseringsprodukter som er dannet af CH under optagelse af CO_2 fra luften. Ved opvarmning vil trykstyrken øges indenfor de første $200^\circ C$. Her vil der ske en forceret hydratisering og en så stærk udvidelse af kornene, at dette volumenmæssigt kompenserer tabet af det fysisk bundne vand med en tættere struktur til følge. Samtidig ses en forstærket krystaldannelse af CH. Over $200^\circ C$ aftager prøverne i volumen. Fra 300 til $480^\circ C$ vil de enkelte korn ikke udvide sig, men restgelfractionen af C_2S dehydrerer og aftager fortsat i volumen. Dette giver anledning til indre spændinger og heraf følgende nedbrydning og styrketab. Omkring $550^\circ C$ iagttages vægttab og en kraftig styrkereduktion, da dehydreringen af CH løsner strukturen. Dersom opvarmningen er så hurtig i forhold til prøvens størrelse, at den dannede vanddamp ikke kan undslippe, vil et indre tryk opbygges og processen finde sted ved højere temperaturer. Den hurtige fjernelse af vandet mellem 540 og $580^\circ C$ efterlader porøse og revnede prøver. Opbevares disse derpå i luft vil en yderligere stærk reduktion af trykstyrken indtræde (til ca. 40%) og sker dette efter endnu højere maksimale temperaturer ($600 - 1200^\circ C$) kan styrken mistes helt. Årsagen er, at den frie C Forbinder sig med luftens fugtighed (partiel læskning) under voldsom ekspansion (2,5 gange) med svære indre ødelæggelser af strukturen til følge. (Se iøvrigt behandlingen af fænomenet under betonens egenskaber og Weigler og Fischers kritik af denne udlægning).



Ved yderligere opvarmning indtræder der intet brat styrkefald. Reaktionerne her giver altså ikke direkte svækkelser af strukturen. Over $820 - 1200^\circ C$ er en svag forbedring af styrken (uden luftlagring) at iagttage. Prøverne blev let sammensintrede med runde porer af uregelmæssig overflade og havde et net af fine revner.

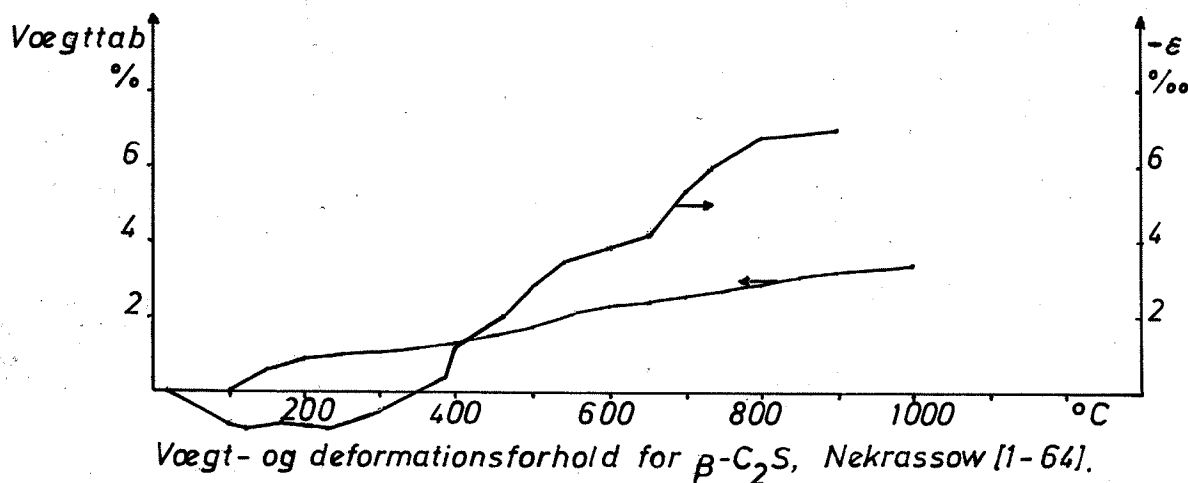


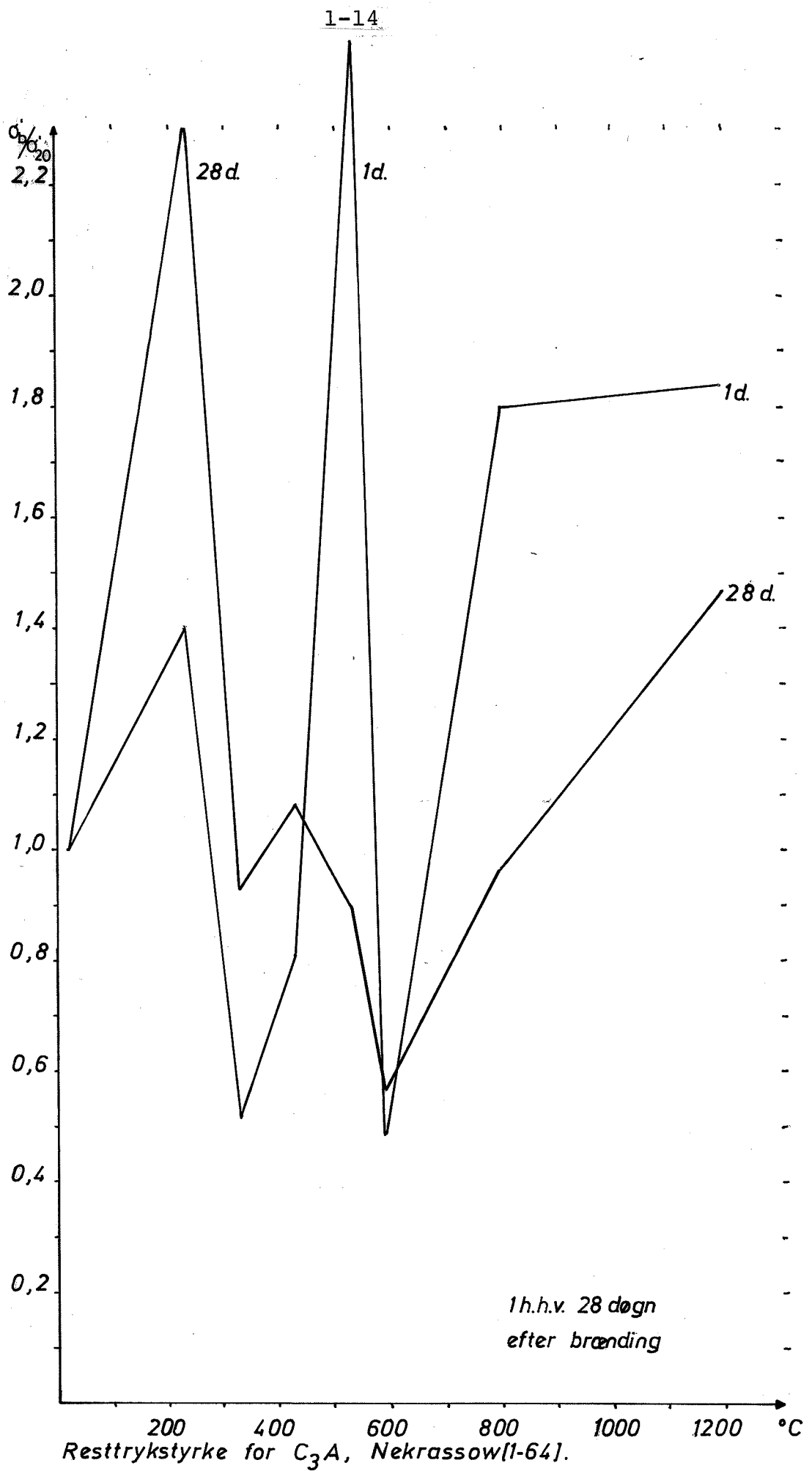
β -C₂S

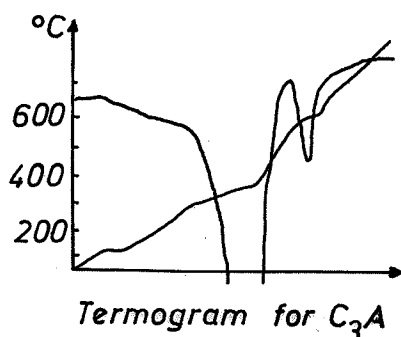
Termogrammer for dicalciumsilikat udviser ingen væsentlige reaktioner ved opvarmning fra 20 til 900° C, hvorefter sluttes, at vandafgivelsen sker jævnt over et meget bredt temperaturområde og at frit C ikke er tilstede. Dette bekræftes af væggtabskurven, og man antager, at det bundne vand findes indlejret mellem krystallagene.

Trykstyrken øges næsten 100% ved opvarmning til 300° C, idet vandafgivelsen medfører en tættere gel. Mironov og Malinina fandt i 1964, at styrkeforøgelsen ved disse temperaturer tillige skyldes en øget krystallisering. Salmanov konstaterede i 1952, at trykstyrken øges jævnt til 280% ved 400° C og holder sig praktisk taget konstant til 600° C, hvorefter den aftager en smule til ca 200% ved 1000° C. Dersom der forekommer krystaller af ikke hydratiseret materiale sammen med gel af hydratiseret C₂S, viste Koltunova (i en rapport af 1959), at forskelle i deformation heraf vil give indre spændinger og svækkelser, som over ca 300° C vil overstige den positive indflydelse af gelfortætningen. Trykstyrken når da et minimum på 53% ved 760° C. En mikroskopisk undersøgelse af tyndslib af et materiale opvarmet hertil viser, at det består af korn af β -C₂S omgivet af tynde hinder af anisotrope γ -C₂S krystaller. Ved yderligere opvarmning øges trykstyrken først svagt til 67% ved 820° C og derpå kraftigt til 500% ved 1200° C.

Ren hydratiseret β -C₂S udvider sig først ved opvarmning; men over ca 330° C vil svindet fra den jævnt tiltagende vandafgivelse overstige den termiske udvidelse, og ved 900° C udgør det 6,8‰. Dette sker naturligvis kun ved den første opvarmning. Ved gentagelse iagttages som forventeligt en gradvis udvidelse.





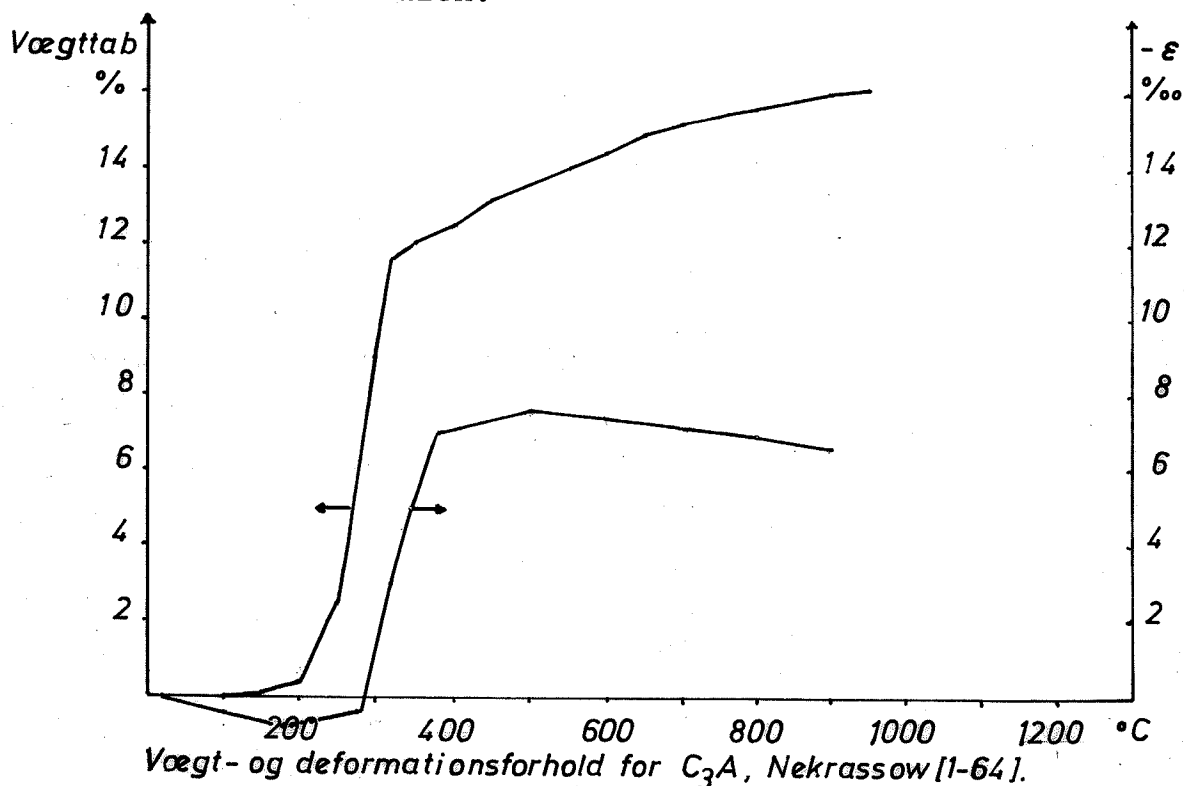
C_3A 

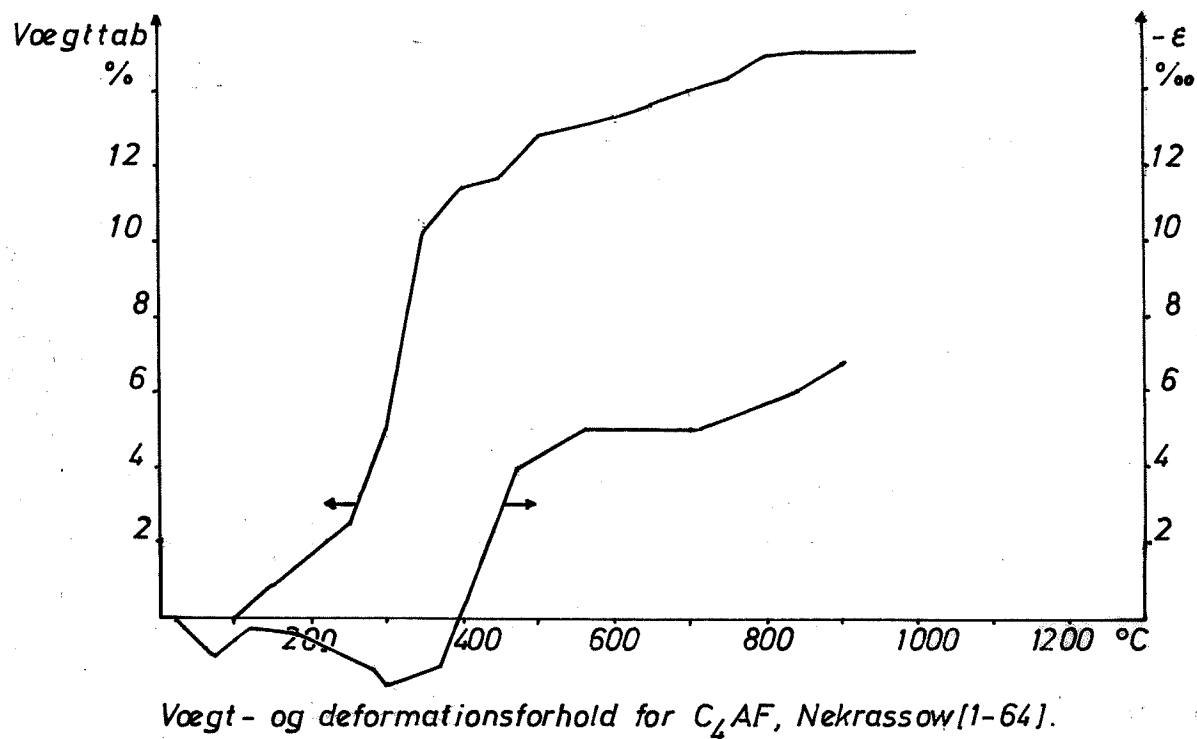
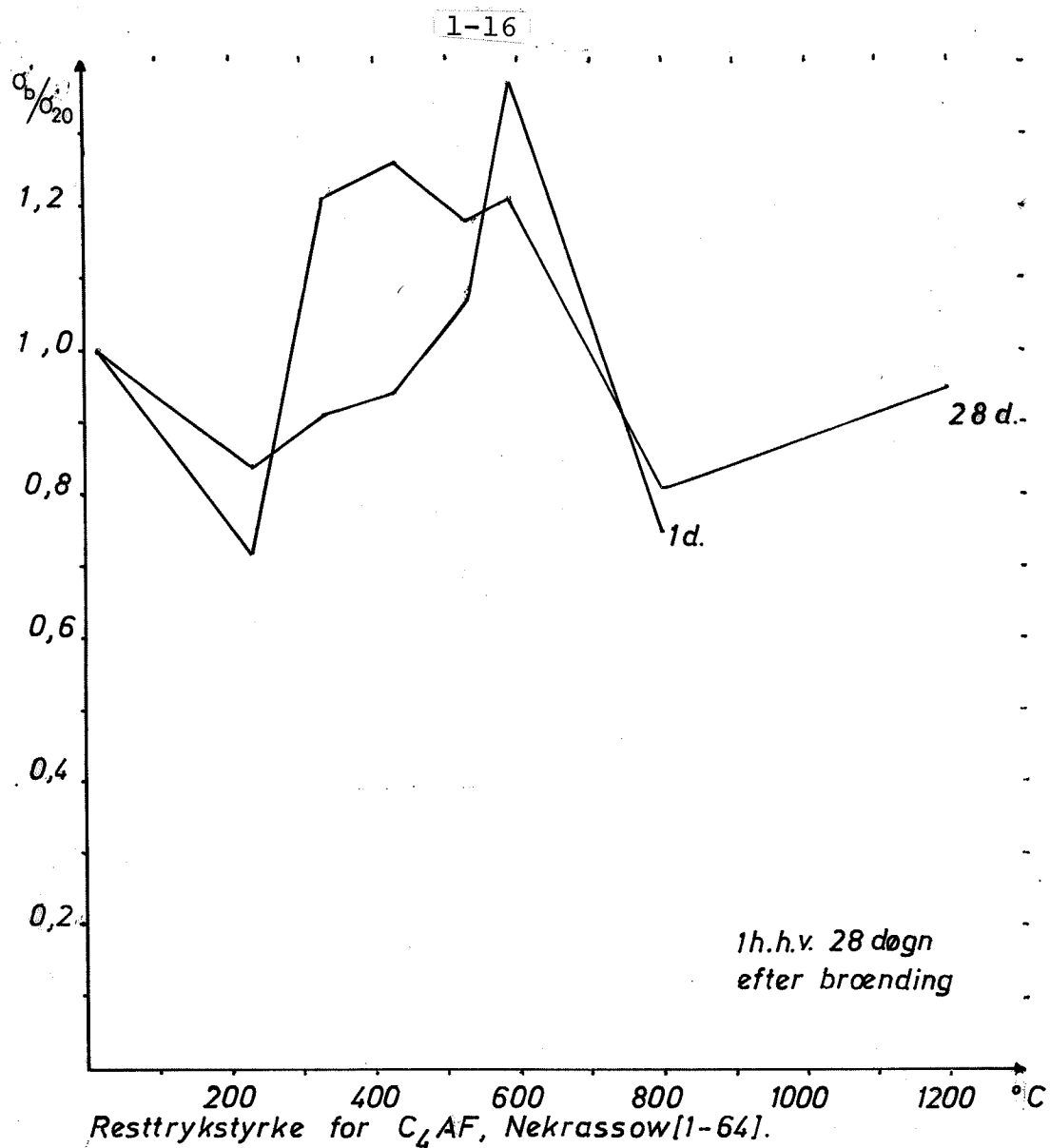
Opvarmes ren hydratiseret tricalciumaluminat, vil en udvidelse iagttages inden for de første $190^\circ C$, hvorpå materialet begynder at svinde, og dette svind bliver særligt stærkt i intervallet $280 - 350^\circ C$, hvor et kraftigt vandtab finder sted. Af væggtabskurven ses dette at andrage 68% af alt bundet vand, og termogrammer viser et stærkt varmeforbrug fra $260 - 340^\circ C$. Man slutter, at dette vand er krystalinsk bundet. Trykstyrken har et maximum omkring $230^\circ C$ og falder henved to gange ved opvarmning til $330^\circ C$. Ved denne temperatur ses i mikroskop, at materialet består af stykker af ikke hydratiseret C_3A omgivet af fine krystaller af C_5A_3 , der tilsyneladende sammen med C er dannet ved en delvis nedbrydning af C_3A samtidig med, at krystalvandet fjernes.

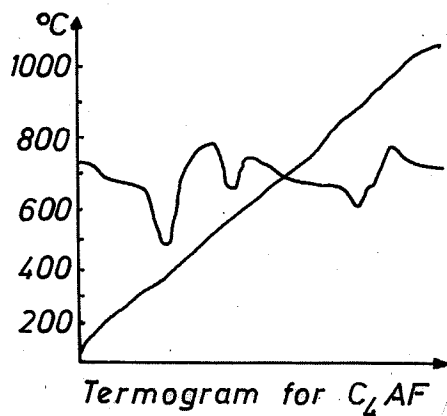
Den næste endoterme reaktion sker mellem 550 og $590^\circ C$, hvor et styrketab forårsages af en kraftig nedbrydning af C_3A 's krystalgitter under udskillelse af frit C.

Herover vil trykstyrken øges. Ved $838 - 945^\circ C$ indicerer termogrammer ligesom ved C_3S en ødelæggelse af kalk dannet med luftens CO_2 under hydratiseringen. (Dette er bl.a. ikke med i 57-udgaven).

Ved $1200^\circ C$ er materialet sammensintret og trykstyrken oppe på 184% af begyndelsesværdien.

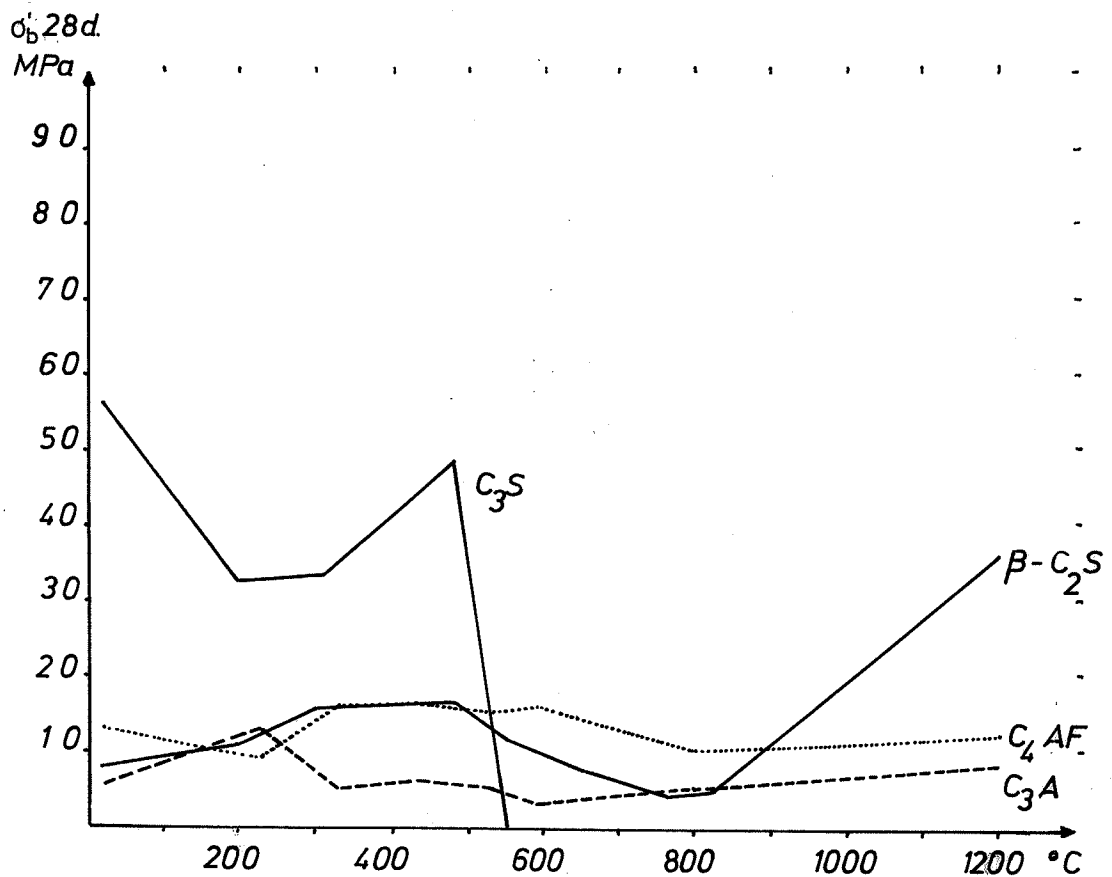
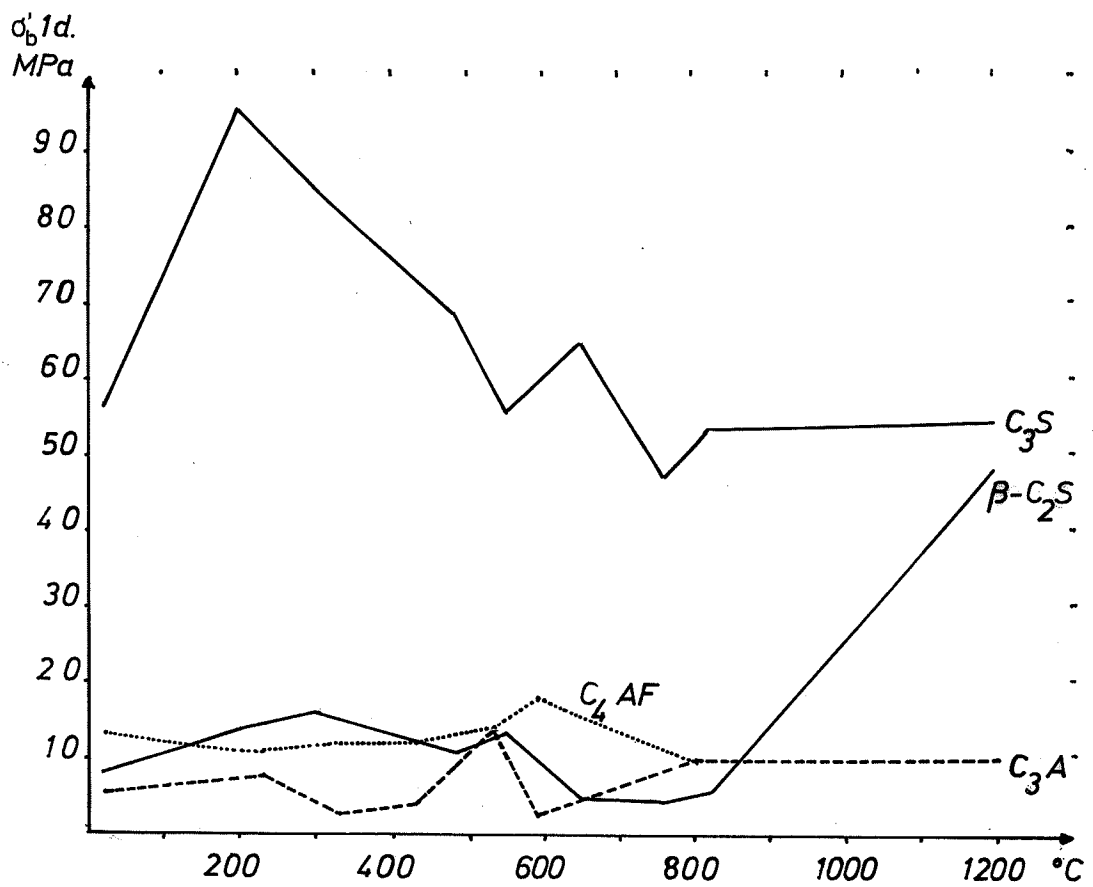




C_4AF 

Ved hydratisering af tetracalciumaluminat-ferrit dannes tricalciumhydroaluminat C_3AH_6 og calciumhydroferrit CFH_n . Materialet vil ved opvarmning først udvide sig til $80^\circ C$, så svinde for derpå fra $180^\circ C$ til $300^\circ C$ at udvide sig igen, altsammen under et svagt fald i trykstyrken med minimum ved $330^\circ C$. At det stærke styrketab, der kendes fra rent hydratiseret C_3A udebliver skyldes, at CF -hydraterne følger en styrkeudvikling som for $\beta-C_2S$. Krystalvandet afgives endotermt i intervallet $265 - 350^\circ C$. I mikroskop ses ved $330^\circ C$ stykker af C_4AF indlejret i farveløs isotrop C_5A_3 dannet ud fra C_3A , hvori lidt F er opløst (ses af et forøget lysbrydningsindeks), hvad der antages at virke hindrende på nedbrydning og styrketab.

Fra $300 - 450^\circ C$ indtræder et kraftigt svind, og trykstyrken tiltager. Ved $545 - 575^\circ C$ udskilles C som ved rent C_3A ved en endoterm proces, men dette ledsages her kun af et behersket styrketab.



Absolutte værdier for klinkermineralernes resttrykstyrker
1h.h.v. 28døgn efter brøeding, Nekrassow [1-64].

HYDRATISERET CEMENTPASTA OG BETONS KEMISKE
OG MEKANISKE FORHOLD VED HØJE TEMPERATURER

FORSKNINGSUDVIKLING

At man i oldtidens Rom har vist betonmaterialeforskningen stor interesse er hævet over enhver tvivl (se f.eks. Vitruvius 10 bøger om arkitektur), og skønnet udfra materialevalget må mange af datidens lette betontyper anses for at have overordentligt gunstige brandtekniske egenskaber, idet der anvendtes pozzolaner og lette vulkanske tilslag med beskeden varmeudvidelse (se i øvrigt afsnit om brandbestandig beton).

Fra perioden efter betonens genopdagelse kendes tidlige eksempler på egentlig materialebrandforskning.

F.eks. påpeger allerede Shitkewitsch i "Beton som brandfast bygningsmateriale" (St. Petersburg 1903) de skadelige egenskaber ved kvartstilslag under brand.

Hovedparten af de referencer, som ligger til grund for denne fremstilling stammer imidlertid fra de seneste årtier, hvor en intensiv, men dårligt koordineret forskning har fundet sted.

Den er iværksat dels ud fra ønsket om at spare liv og værdier ved brand, og dels i forbindelse med nye anvendelser af beton ved høje temperaturer såsom til atomreaktortanke og andre industrielle anlæg, samt militære formål.

Disse sidste anvendelser har sandsynligvis været en årsag til den ringe koordinering af bestræbelserne.

OM CEMENTPASTA UD FRA KLINKERMINERALERNE

I det foregående afsnit er forholdene for de hydratiserede klinkerminerale i ren tilstand beskrevet.

Når disse indgår i en hydratiseret cementpasta, vil en gensidig indvirkning gøre sig gældende, således at egenskaberne ikke direkte kan forudsiges på basis af cements sammensætning.

Man kunne f.eks. befrygte, at cement med et relativt højt indhold af C_3S ville give et svagt materiale efter opvarmning. En forsøgsserie til belysning af disse forhold viste, at variationer i kombinationen af klinkemineralerne ikke gav nævneværdige variationer i styrkeforholdene ved høje temperaturer. (Nekrasov og Tarasova [1-115]).

Indholdet af β - C_2S varierede fra 20 til 41% og af C_3S fra 31² til 56%. Sammenlignet med danske cements ses derfor, at β - C_2S indholdet var relativt højt (vi bruger 18-22% i standardcement) og C_3S -indholdet relativt lavt (i Danmark 55-60% i standardcement).

Undersøgelsens resultat kan således ikke afkræfte en formodning om en skadelig virkning af de danske cements høje C_3S indhold.

Specielt må man befrygte, at hvid portlandcement med C_3S på 77-83% og β - C_2S helt nede på 5-8% kunne give styrkemæssige problemer efter en brand.

Undersøgelser af Campbell-Allen og Desai [1-10] viser, at kalkstensbeton af cement med forhøjet indhold af C_3S (fra 55 til 65%) og af C_4AF (fra 10 til 15%) og til gengæld lavere indhold af C_3A (fra 13 til 5%) og af β - C_2S (fra 16 til 9%) gav lavere trykstyrker efter cyklisk opvarmning til 300°C, hvad der stemmer med styrkeudviklingsforløbet af disse klinkerminerale i temperaturområdet.

Da de mekaniske og kemiske forhold for den hydratiserede cementpasta har afgørende indflydelse på betonens egenskaber, behandles disse naturligt i forbindelse med den følgende gennemgang af betons udvikling ved opvarmning.

ÆNDRINGER I BETONS KEMISKE OG MEKANISKE EGENSKABER VED OPVARMNING0-100°C

Opvarmes en beton, vil cementpastaen først miste sit frie - og derpå sit adsorberede vand (f.eks. Hansen [1-30]).

Lankard et al. [1-48] skelner mellem 5 typer fordampeligt vand (Ishai's model), der adskiller sig fra hinanden ved størrelsen af den nødvendige energi for deres fjernelse:

- 1) Kapillarpore vand
 - 2) Gelpore vand
 - 3) Vand, adsorberet på krystalflader
 - 4) Vand, adsorberet mellem nære krystalflader
 - 5) Zeolitisk interkrystallisk vand
- ordnet fra mindst til størst energibehov.

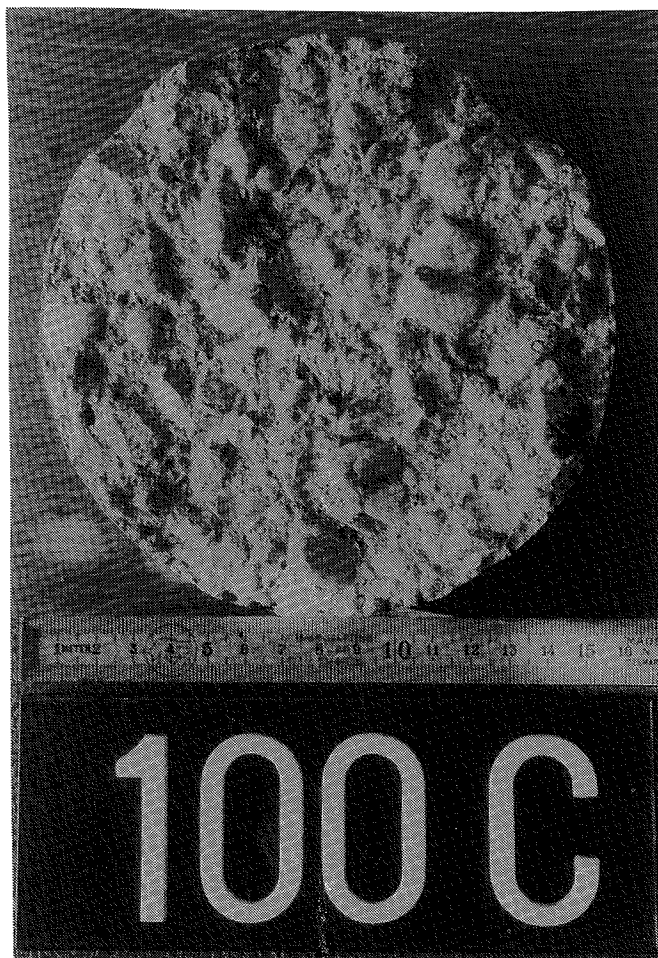
Hovedparten af det fordampelige vand vil ved tilpas langsom opvarmning være afgivet allerede ved 50°C, hvor et svagt forhøjet E-modul kan konstateres (Maréchal [1-58]), for herover at undergå et fald til f.eks. 80% ved 110°C.

Ved hurtig opvarmning af cementpasta viste Lea og Stradling i 1922, at denne vil udvide sig indenfor de første 100°C, medens en langsom opvarmning gav vandet mulighed for at undslippe, og en kontraktion blev resultatet (jfr. f.eks. Zoldners [1-106]).

Denne afhængighed af varmepåvirkningstiden er også fundet af Harada i 1961 og Dettling i 1964, hvor man for hurtige opvarmninger fandt, at cementpastaen kunne udvide sig mere end tilslagene, hvorfor cementrige mørtler fik størst udvidelse i temperaturområdet op til 80-90°C.

Variationen af de mekaniske egenskaber vil inden for de første 100°C helt afhænge af betonens fugtighed og cementpastaens hydratiseringsgrad.

Ofte ses et lokalt minimum af trykstyrken mellem 50 og 100°C, hvad der kan være særligt udtalt for det ellers i brandteknisk henseende så velegnede kalkstenstilslag (Schneider [1-81]).



Betoncylinder efter påvirkning med 100°C.

Dette hænger formodentlig sammen med, at kalksten trækker sig en anelse sammen med minimumslængde omkring 100°C, samtidig med, at Schneider har anvendt så høj opvarmningshastighed i forhold til prøvelegemernes størrelse (2°C/min og $\varnothing = 8$ cm), at cementpastaen kan få en udvidelse som ovenfor beskrevet med maksimum omkring 80°C.

For en 20 MPa-beton af rapidcement og danske sømaterialer har forfatteren iagttaget, at alle tilslag er intakte efter brænding til 100°C, matrixen grålig og uden revner og klangen som hårdtbrændt tegl. (Det har i forbindelse med en større forsøgsserie vist sig, at klangen ved placering på et betongulv og ved lette slag på prøvelegemerne varierer på entydig måde for den anvendte beton. Anførelse heraf siger mere end mange ord om materialets indre struktur, dets tæthed og revner etc.).

Resttrykstyrken andrager 98% af koldstyrken i middel over 4 brændinger med 3 standardcylindre $\varnothing 15$ H30 cm i hver.

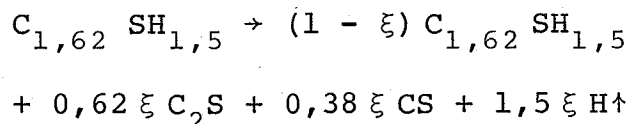
100-200°C

I temperaturområdet fra 100 til 200°C vil resten af det fordampelige vand afgives (Malhotra [1-54], p.91 og Nekrassow [1-64]), hvorefter væggtabsvariationen bliver uafhængig af begyndelsesfugtindholdet (Anderberg og Thelandersson [1-3]).

Zoldners [1-105], p.1105 fandt, at fjernel- sen af det fordampelige vand finder sted helt op til 400°C, men opvarmningshastig- heden var da også oppe på 20-30°C/min for prøvelegemer $\varnothing = 10$ cm. (Dette kan angå- ende fugten være relevant for beton meget nær overfladen af en konstruktion; men resultaterne af de udførte mekaniske prøv- ninger i dette arbejde må grundet de indre spændinger betragtes med den allerstørste skepsis!).

Over 100°C begynder også afgivelsen af det kemisk bundne vand (Hansen [1-30], p. 33-1).

Denne dehydrering kan endog begynde før det fordampelige vand er helt væk, jfr. Harmathy [1-37], p. 52, der angiver pro- cessen for de hydratiserede calciumsili- kater i en idealcement (kun bestående af C_3S 56,8% og $\beta-C_2S$ 43,2%) til:



En fremstilling, hvortil der ofte refereres (f.eks. Bartholemy og Kruppa [1-6], p. 46).

Dehydratiseringshastigheden $\frac{d\xi}{dt}$ har et mak- simum ved 150-200°C og igen ved 710°C.

Indtil dette indtræffer, vil den hydratisere- rede cementpasta kun undergå små ændringer (Harmathy og Berndt [1-33], p. 109, hoved- sagelig som følge af en fugtafhængig og dermed aldersafhængig efterhydratisering (bl.a. Thelandersson [1-90]), som accele- rerer af den høje temperatur.

Dette giver anledning til voksende cement- korn og større CH-krystaller (Nekrassow [1-64]), der tillige med afgivelsen af det fysisk bundne vand resulterer i en tættere struktur med bedre styrkeegenska- ber (Nekrasov og Tarasova [1-115], p. 17).

Lankard et al. [1-48], p. 68 gør opmærksom på betydningen af fugtindholdet ved prøvningstidspunktet, idet Gilkey i 1937 fandt 20-30% højere trykstyrker for lufttørrede end for mattede prøver og Lea i 1956 fandt, at gennemblødning af en ellers hårdnet og tør beton afstedkom et styrkefald på 20-40%.

Årsagerne hertil angives dels som svækkelse af cementgelen p.g.a. det adsorberede vand og dels reduktion af overfladekræfterne gelpartiklerne imellem p.g.a. den adsorberede fugt.

Således vil udtørringen i området 150-200°C bidrage til styrkeforøgelsen.

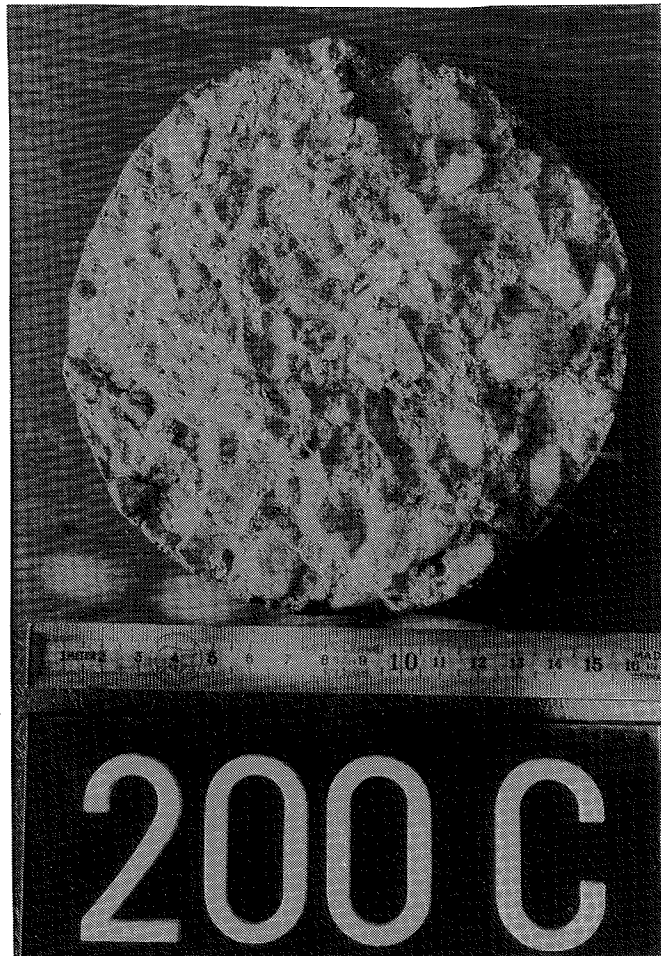
Dette forhold illustreres klart af Pihlajaara [1-75], p. 354, og af Hannant [1-28], der med et overlejret triaxialt tryk på 3,4 MPa ved 150°C fandt en reduktion i trykbrudspændingen til 65% af koldværdien, hvis vandets fordampning hindredes, imod 85%, hvis fordampning kunne foregå.

Fugtafgivelsen og den heraf følgende kontraktion af den hårdnede cementpasta kan resultere i aftagende tvangskræfter for hindret udvidelse af beton i området 100-200°C (Schneider [1-81], p. 127); men forskellen i udvidelse for cementpasta og tilslag (Hansen [1-30], p. 33-2) og for den sags skyld også armering, der ligesom tilslaget fortsat udvider sig (Green [1-25], p. 8), giver anledning til dannelsen af indre spændinger og dermed en begyndende svækkelse.

Dette medfører bl.a., at Fischer [1-21], p. 75, finder store forskelle i trykstyrketilvæksten for mørtel og beton (små henholdsvis store tilslag) og viser sig særligt ved prøvning i varm tilstand, f.eks. som en medvirkende årsag til det minimum, som Kordina [1-20], p. 13, finder i varmtrykstyrken for exler-beton omkring 150°C.

Generelt er styrkevariationen for beton dog moderat op til 200°C (Malhotra [1-54], p. 92).

Ovenstående fugtbetingede mekanismer må formodes at have en reducerende indflydelse på Poissons forhold.



Betoncylinder efter påvirkning med 200°C.

Findes forholdet ved måling af tværudvidelsen over et større tværsnit, vil den senere revnedannelse give en forøgelse, hvorfor man vil se et minimum omkring 300°C, således som det er observeret af Crispino [1-15], p. 452, og af egne forsøg (se afsnittet om deformationsforhold).

Forfatterens egne prøvelegemer af 20 MPa-beton med rapidcement og danske sømaterialer har efter brænding til 200°C alle tilslag intakte og urevnet, men mere hvidlig matrix. Klang som porcelæn.

Resttrykstyrke 84% af koldstyrken (middel over 10 brændinger med 3 standardcylindre i hver).

200-300°C

Ved opvarmning over 200°C fortsætter vandafgivelsen fra de hydratiserede calciumsilikater og et stærkt svind kan iagttages trods den volumenforøgelse, som calciumhydroxidkrystallerne og eventuelle ikke hydratiserede cementkorn undergår.

Disse forskelle i udvidelse vil forårsage en svagere struktur og et mindre styrketab (f.eks. Thelandersson [1-90]) for cementpastaen.

Ved langtidsopvarmning til 260°C (500 F) fjernes såvel det interkrystallinske vand som en del af det krystallinsk bundne vand (Lankard et al. [1-48], p. 71 og 78).

Ved mættet damptryk får man derimod nye krystallinske faser i den hydratiserede cementpasta.

Man kan opfatte det som en varme-stimuleret efterhydratisering, der især er mulig, når vanddampen ikke kan undslippe.

Dette vil tillige med den tættere gel-struktur - forårsaget af tabet af det fysisk adsorberede vand (Nekrasov og Tarasova [1-115]), p. 17) - give en større trykstyrke.

Et fænomen, der bl.a. vil optræde for prøver, som varmes så hurtigt op, at vanddampen ikke kan nå at trænge bort.

Således fik Zoldners [1-105], p. 1107, 10% højere trykstyrker mellem 200 og 300°C.

Under mere typiske forhold vil man ofte iagttage, at opvarmning op til omkring 250°C ikke afstedkommer nævneværdigt tab af trykstyrke (Saemann og Washa [1-77]) eller revnedannelse (Hansen [1-30]), hvorefter man herover ser såvel lavere trykstyrke som E-modul (Harmathy og Berndt [1-33], p. 109 og Weigler og Fischer [1-98]) samt mikrorevner mellem cementpasta og tilslag (Crispino [1-15], p. 448 for kalkstenstilslag og 6 cykler til 300°C).

Revnerne, der skyldes forskellene i udvidelse for tilslag og pasta, er en væsentlig årsag til styrketabet for beton.

Det er derfor vigtigere, at tilslaget bevæger sig som cementpastaen, end at det i sig selv er stabilt overfor varmepåvirkning.



Betoncylinder efter påvirkning med 300°C.

Tilslag, der udvider sig stærkt, er derfor specielt uheldigt. Da denne slags tilslag også giver en høj varmeudvidelseskoefficient for betonen, vil en sådan være et sikkert tegn på et brandteknisk svagt materiale (Walker et al. via Neville [1-65], p. 436).

Betonens trækstyrke, som må formodes at være meget følsom overfor revnedannelse, forbliver stort set konstant op til ca. 300°C, hvor efter den falder (Thelanderson [1-92], p. 109).

Egne betonprøvelegemer med danske sømaterialer og rapidcement har efter brænding til 300°C en hvidgrå og urevnet matrix og alle tilslag er intakte.

Der forekommer ikke synlige revner omkring tilslagene.

En kraftig rødbrun farvning forekommer til en dybde af 1 mm fra overfladen som følge af nærværelsen af meget stål i ovnen.

Klangen er som krystalglas og trykstyrken er efter brændingen reduceret til 83% i middel af 3 brændinger á 3 standardcylindre.

300-400°C

Når man opvarmer en cementpasta til mere end 300°C, vil forskellene i udvidelse af hydratiserede og ikke hydratiserede dele heraf forstærkes, og styrken falder.

Dehydratiseringen er op til ca. 400°C, særlig markant for de hydratiserede calcium-aluminater (Nekrasov og Tarasova [1-115], p. 18 og 20).

Cementpastaen når ved 400°C ned på et styrkeniveau, der svarer til udgangsniveauet før branden (Hansen [1-30]).

For beton bidrager såvel svækkelsen af cementpastaen som forskelle i udvidelsesforhold for tilslag og pasta til styrketabet over 300°C (Fischer [1-21], p. 79).

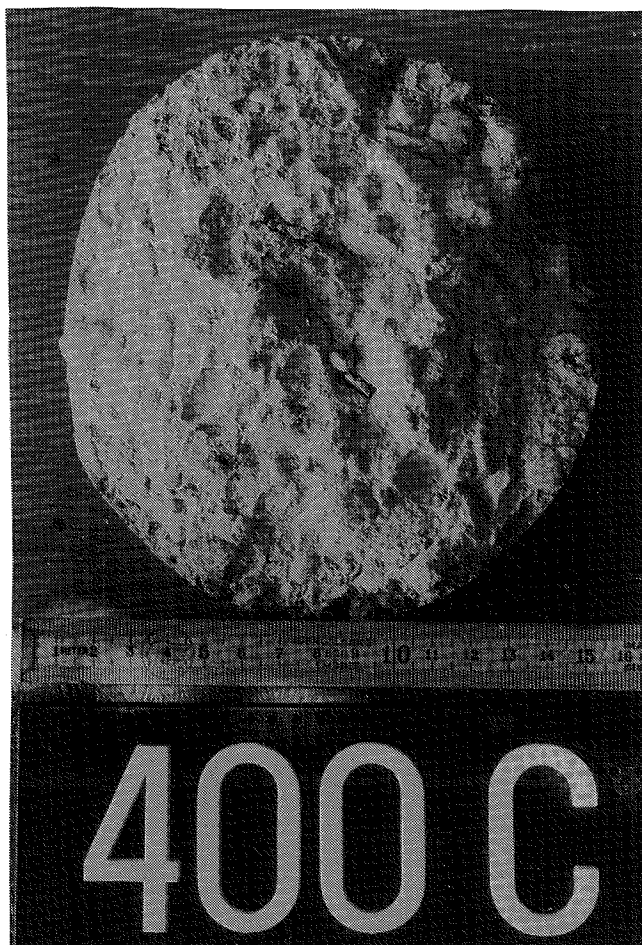
Malhotra [1-54], p. 90, observerer hårfine revner på overfladen af sine prøvelegemer fra 300°C og fra ca. 350°C fandt Sullivan og Poucher [1-85], p. 110, en ikke reversibel ekspansion, forårsaget af mikrorevnedannelse omkring tilslagene.

Disse revner fremkommer med andre ord mellem 250 og 350°C for langt de fleste normalt anvendte typer tilslag (kalksten, kvarts, baryt, ex-ler og forskellige blandede grusforekomster).

Ved opvarmning til 300°C andrager resttrykstyrken typisk 75-85% af begyndelsesværdien for beton med sådanne tilslag og uden belastning under opvarmningen (f.eks. Malhotra [1-54], Harada et al. [1-31]), men meget store variationer kan forekomme, f.eks. 40% for en sandstensbeton (sidstnævnte reference).

Den reducerende indvirkning på styrkeforholdene ved opvarmning i temperaturområdet over 300°C er særlig stor for bøjnings-trækstyrkens og trækstyrkens vedkommende, da disse er særligt følsomme over for revnedannelsen (Sullivan og Poucher [1-85], p. 110, og Thelandersson [1-92], p. 115).

De mange revner er ligeledes ansvarlige for den stærke øgning af porøsiteten, man finder over 300°C (Weigler og Fischer [1-96], p. 46) og den udligning, man her finder af varmeledningstallet mellem betoner med forskellige kornfordelinger (Maréchal [1-57], p. 1049).



Betoncylinder efter påvirkning med 400°C.

Af egne betonprøvelegemer med rapidcement og danske sømaterialer og brændt til 400°C ses, at den kraftige rødbrune overfladefarvning, som forekommer ved 300°C nu er aftaget til en grålig med svagt rødligt skær.

Alle tilslag er stadig intakte. Matrixen er mere hvidlig, ganske svagt rosa partier optræder i enkelte prøver.

Enkelte revner langs overfladen af større sten forekommer (sten med diameter over ca. 5 mm).

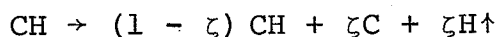
Disse revner forklarer også, at flækning under udtrækning af større korrugerede stål sker praktisk taget lydløst, hvorimod fænomenet indtræder ledsaget af et kraftigt lydtryk ved prøver opvarmet til lavere maksimale temperaturer.

Klangen af prøvelegemerne er som almindeligt glas, d.v.s. uden de højeste af de frekvenser, der er karakteristiske for 300°C.

Resttrykstyrken andrager 67% af koldstyrken (= ca. 20 MPa) i middel over 10 brændinger á 3 standardcylindre.

400-500°C

Når temperaturen overstiger ca. 400°C, begynder calciumhydroxiden at dehydrere under forbrug af varme.



(f.eks. Malhotra [1-54], p. 91, eller Harmathy [1-37], p. 53).

Der indtræder et hurtigt vægttab og svind for cementpastaen (Harmathy [1-35], p. 959).

Beton, der ikke har været udsat for temperaturer over ca. 500°C, hvor processen foreløber hurtigt, kan ifølge Haradas undersøgelser fra 1961 genvinde såvel sit E-modul som sin trykstyrke i vid udstrækning ved længere tids rehydrering (f.eks. Lie [1-51], p. 136).

Resultatet må dog formodes at afhænge af tilslagets art, tiden som betonen har været over 400°C og mulighederne for afgivelse af den udviklede damp.

Hvor styrketabet har været moderat - indtil ca. 450°C - vil det herover tiltage kraftigt for de fleste normale cementbaserede materialer (f.eks. Fischer [1-21], p. 74, for mørtel, og f.eks. Malhotra [1-54], p. 92 eller Thelandersson [1-89], p. 12 for beton).

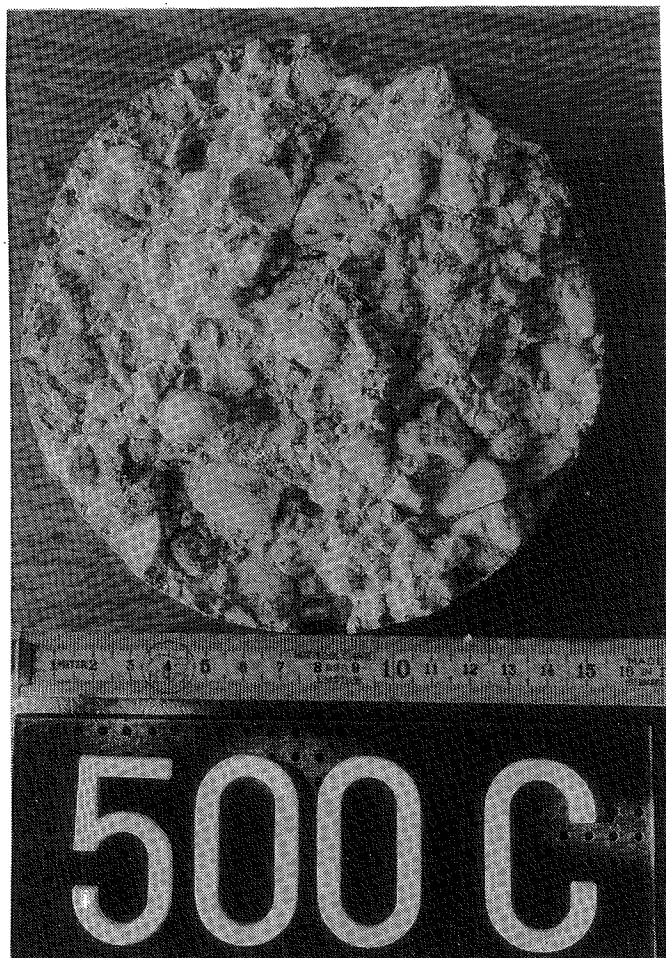
Omkring 450°C finder man typisk trykstyrkeniveauer for ubelastede prøver på ca. 80%, når der prøves i varm tilstand og 50-60% efter 7 døgn ved 21°C (f.eks. Abrams [1-1], p. 54-56) for såvel kalksten-, exler- og kvartsholdige tilslag.

Forfatteren har iagttaget (20 MPa-beton af rapidcement og danske sømaterialer), at prøvelegemernes overflade efter brænding til 500°C er revnet med revnevidder omkring 0,1 mm.

Revnerne optræder normalt allerede ved prøvernes udtagning af ovnen og øges ikke mærkbart under den påfølgende uges luftlagring.

Udtages prøven, medens ovnrummets temperatur stadig er omkring 100°C, vil revnedannelsen kunne iagttages inden for et par minutter.

Det kan altså konkluderes, at den finder sted under den sidste del af afkølingsfasen.



Betoncylinder efter påvirkning med 500°C.

Disse revner kan ikke hidrøre fra termiske spændinger, da lige så store revner forekommer ved meget langsomt afkølede prøver, og da revnemønstret fortsætter gennem hele prøven (temperaturgradientens variation ville ellers give en variation i revnebildet), og endelig vides fra litteraturen og egne forsøg, at en pludselig afgysning vil medføre et stærkt reduceret revnebillede.

Revnedannelsen skyldes, som der senere argumenteres for, genlaskning af calciumilten fra den dehydratiserede calciumhydroxid, og iagttagelsen viser, at denne genlaskning finder sted i væsentlig omfang allerede inden afkølingen af prøven er slut.

Tilslagene er uskadte, specielt er flint og sandsten uskadte, men visse sandsten har skiftet frave til rødorange, hvad der må tilskrives disses indhold af jernilte.

Matrixen er grå med et grønligt skær. Der forekommer revner omkring tilslagene. Klangen er som stentøj og resttrykstyrken er reduceret til 33% i middel over 3 brændinger á 3 standardcylindre.

500-600°C

Calciumhydroxidens dehydrering og det heraf følgende styrkefald for cementpastaen fortsætter (Nekrasov og Tarasova [1-115], p. 18) og når sin maksimale intensitet i dette temperaturinterval for at aftage til ca. 600°C.

Harmathy [1-37] får maksimum til at ligge meget nær 500°C; men mange andre forfattere (f.eks. Nekrassow [1-64], p. 28 og Petzold og Röhrs [1-73], p. 27) viser DTA-kurver (Differential Thermal Analysis) med maksimum omkring 530-540°C, og Weigler og Fischer, f.eks. [1-96], p. 45 og [1-98], p. 495 angiver skarpt temperaturen til 535°C.

Fra ca. 500°C vil dybe revner forekomme i betonen, og disse bliver større ved afkøling (Malhotra [1-54], p. 90), hvad Nekrasov, f.eks. [1-115], p. 20, og forfatteren selv forklarer som udslag af rehydrering af C under volumenudvidelse jfr. afsnittet om reststyrke contra varместyrke.

For beton med kvartsholdigt tilslag omtaler langt de fleste forfattere en proces af væsentlig betydning for de mekaniske egenskaber.

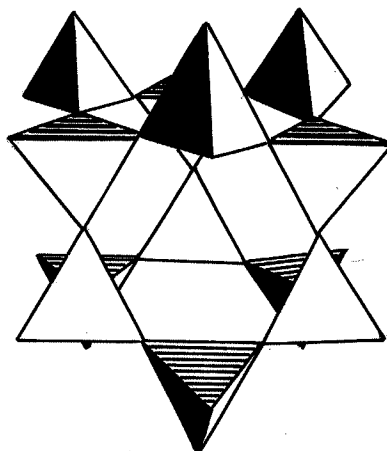
Kvartsens krystallinske opbygning ændres reversibelt fra lav- til høj-kvarts under volumenudvidelse og en svag varmetoning på ca. 20 kJ/kg ved 573°C.

Betegnelserne alfa og beta er anvendt i denne forbindelse, men desværre med modsat betydning i forskellige sprogområder, hvorfor man nu tilstræber at bruge de enkle betegnelser lav- og høj-kvarts.

Temperaturen, hvorved det sker under langsom opvarmning, angives ret entydigt ($\pm 2^\circ\text{C}$), og flere antyder, at denne varmekrævende proces tager en vis tid, altså foregår over et temperaturinterval ved hurtigere opvarmninger (Harmathy [1-37], p. 65, og Ingberg [1-38], p. 827).

Derimod opgives en del divergerende størrelser af volumenudvidelsen. Hansen [1-30], p. 33-3, opgiver således 0,4%, Neville [1-65], p. 145: 0,85% og Zoldners [1-106], p. 6 og [1-105], p. 1107 (fra Ahrens og Hellmers 1947) angiver 2,4%.

Instituttet for Silikatindustri, DTH, oplyser, at omkring 1% vil være realistisk.



*Krystalstruktur for
højkvarts.*

Silicium dioxidkrystaller indeholder ikke separate molekyler (som f.eks. krystallinsk CO_2 gør), men hvert Si atom er omgivet af fire O atomer i hjørnerne af et tetraeder.

Disse hjørner er fælles for flere tetraedre, der kan være placeret på forskellig vis i forhold til hinanden, (Moffat et al. [1-62], p. 60), hvorved de forskellige krystalstrukturer fremkommer af henholdsvis kvarts, cristobalit og tridymit (Syrkin og Dyatkina [1-86], p. 314 og 336).

Ved overgangen fra lav- til høj-kvarts strækker de stumpvinklede Si-O-Si bindinger sig ud og symmetrien øges til højkvartsens regulære hexagonale struktur, hvor lavkvartsens struktur var drejet fra den ene krystalplan til den næste som en højre eller venstre skrue.

Den ovenfor beskrevne kvartsforvandling vil tillige med effekten af calciumhydroxidens dehydrering give anledning til styrketab, specielt naturligvis for betoner med meget kvartsholdige tilslag (Thelandersson [1-90], p. 51), og vedhæftningen mellem tilslag og cementpasta forringes (Abrams [1-1], p. 39), samtidig med, at vandabsorptionsevnen øges mærkbart (Bessey [1-68], p. 14).

Også for sandkorn ses, at disses indlejring i cementpastaen bliver løsere (i forbindelse med bearbejdning af prøver af kalkstensbeton med sand som fin fraktion).



Betoncylinder efter påvirkning med 600°C.

Endelig vil tvangskræfter som følge af hindret længdeudvidelse aftage ved opvarmning over ca. 500°C (Schneider [1-81], p. 127) kun afbrudt af en lille kortvarig stigning omkring 573°C for beton med kvartsholdigt tilslag.

Egne prøvelegemer af rapidcementbeton med danske sømaterialer udviser efter brænding til 600°C kraftig revnedannelse.

Matrixen er grålig med revner omkring tilslagene. Sandsten smuldrer til sand. Flint sprækker op og antager ofte en grønlig farve.

Øvrige tilslag er intakte, men kan have ændret farve til mere udprægede rødlige nuancer. Klangen er som for revnet tegl, og ved trykprøvning forekommer en højlydt knasen allerede fra ca. 1/5 af brudlasten.

Resttrykstyrken andrager 10% af koldstyrken (20 MPa) i middel over 10 brændinger á 3 standardcylindre.

600-700°C

Mellem 600 og 700°C vil en delvis omdannelse af $\beta\text{C}_2\text{S}$ til $\gamma\text{C}_2\text{S}$ medføre et beskedent styrketab for den hydratiserede cementpasta (Nekrasov [1-115], p. 20).

Ved opvarmning til mere end ca. 650°C, hvor det bundne vand er fjernet, observeres et vægttab for beton med kalkstenstilslag som følge af uddrivning af CO_2 herfra (Philleo [1-74], p. 860 og 862).

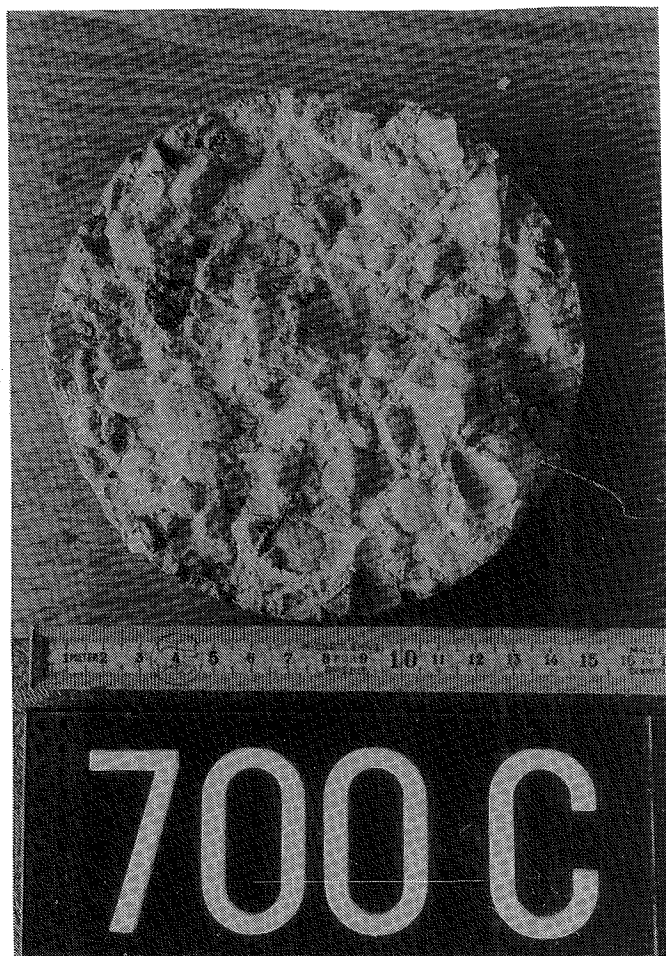
Processen, der er endoterm (1,8 MJ/kg CaCO_3), efterlader et lettere og velisolerende materiale (Ingberg [1-38], p. 825 og Neville [1-65], p. 440); men især under afkøling og luftlagring efter branden vil revner kunne dannes som følge af læskning af CaO med luftens fugt (Hansen [1-30], p. 33-3) og den relativt gunstige styrkeudvikling, som kalkstensbeton kan have i forhold til beton med andre tilslag (grus, sandsten, lexler) op-
hører (Zoldners [1-105], p. 1107).

En idé om trykstyrkens størrelse for forskellige tilslag ved dette temperaturniveau fås f.eks. af Abrams [1-1], der ved 649°C (= 1200 F) fik 56-, 32- og 25% af koldstyrken for en kvartstilslagsbeton henholdsvis i varm tilstand belastet med 0,4 gange trykbrudspændingen, i varm tilstand ubelastet og i kold tilstand efter 7 dages luftlagring og ubelastet under og efter branden.

Samme data for kalkstensbeton blev 103, 76 og 40%. For lexler -beton med sand som fint tilslag opnåedes 97, 79 og 43% (også f.eks. Zoldners og Wilson [1-104], p. 156).

Efter brænding til 700°C udviser forfatterens prøvelegemer af 20 MPa-beton på rapid-cement og danske sømaterialerevner en typisk revnevidde 0,1 - 0,5 mm voksende til 0,2 - 0,6 mm efter en uges lagring i luft.

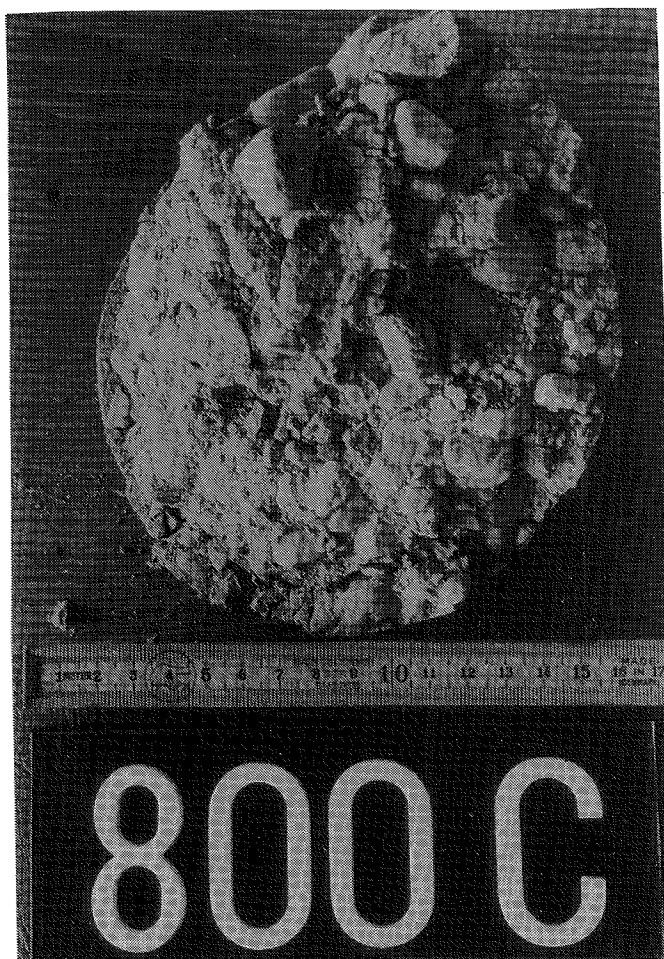
Omkring tilslag forekommer ca. 0,1 mm brede revner. Sandsten smuldrer helt. Kraftige rødfarvninger ses omkring (og op til flere cm fra) sten med højt jernindhold (brunjernsten).



Betoncylinder efter påvirkning med 700°C.

Flinten er sprukket og kan være grønlig farvet, men også rødbrun med brunsort randzone (formentlig oprindelig blåsort flint).

Prøvelegemerne har klang som træ og smulder let ved håndtering. Resttrykstyrken udgør 7% af koldstyrken i middel over 2 brændinger á 3 standardcylindre.

700-800°C

Betoncylinder efter påvirkning med 800°C.

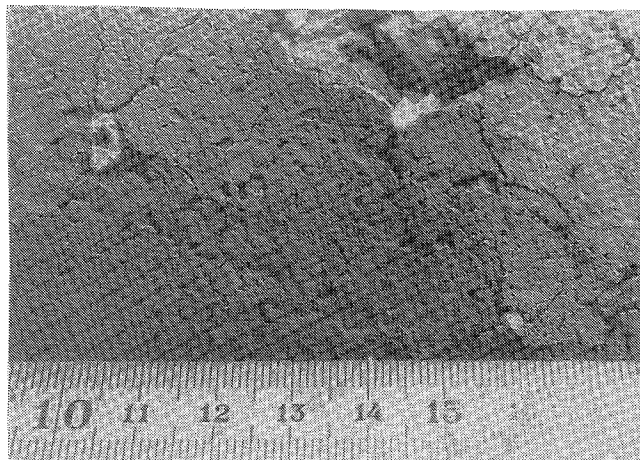
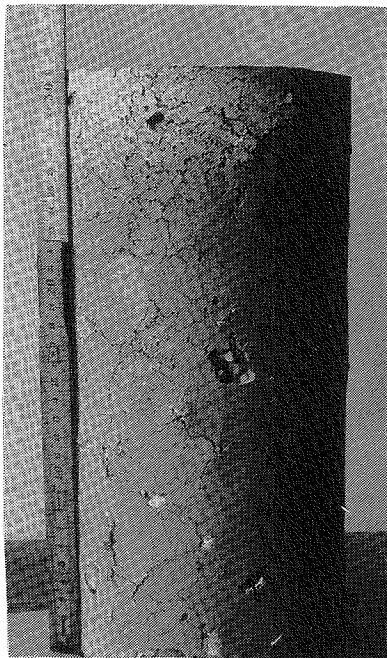
Ifølge Harmathy [1-37], p. 52, vil de resterende hydratiserede calciumsilikater i cementpastaen dehydrere ved dette temperaturniveau med maksimal intensitet omkring 710°C, hvorved pastaen svinder kraftigt.

Trykstyrken af ren cementpasta - lagret i luft efter branden - tabes helt (Nekrasov [1-115], p. 20).

Beton med nedknust kvartsholdigt tilslag mister helt sin trækstyrke (Thelandersson [1-92], p. 110).

Egne prøvelegemer, brændt til 800°C (20 MPa-beton af rapidcement med danske sømaterialer) har kraftige revner, der typisk er 0,4-0,6mm brede efter brændingen og vokser langsomt ved lagring i luft.

Overfladen er grå-grønlig og små tilslag kan give en rosa changering. Sandsten er stadig smuldrede og ofte med kraftige orange eller rødbrune farver (andre er hvide).



Krystalvækst på overflade efter påvirkning med 800°C.

Standardcylinder efter påvirkning med 800°C. Bemærk højden er 31 cm.

Flint er sprukket med ca. 2 mm dybe sprækker og kan være hvide - eller rødlig-hvide - med en grøn overflade eller en grøn zone á ca. 1/10 mm tykkelse i dybde med sprækernes bund.

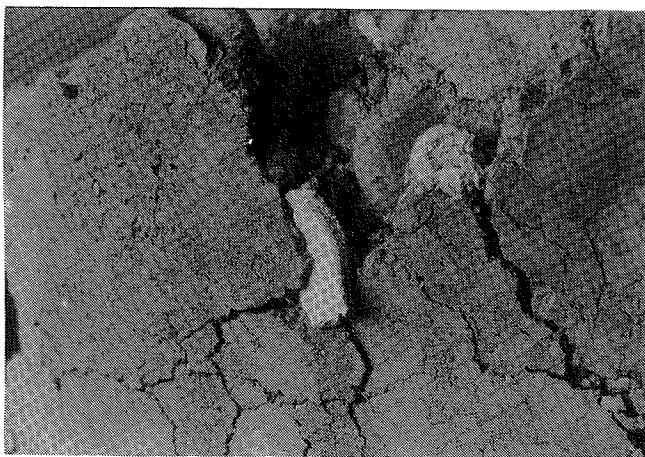
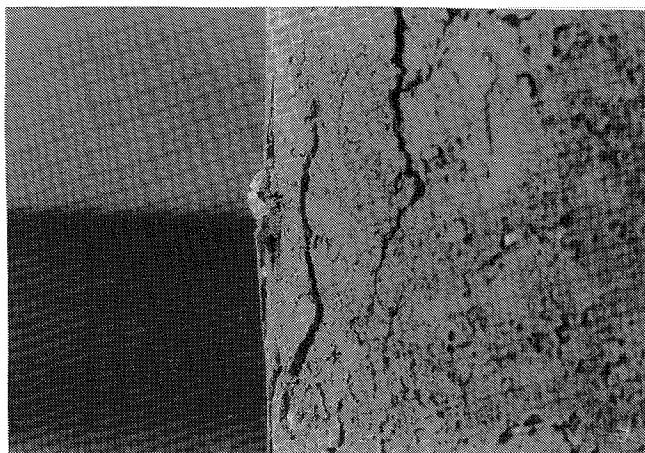
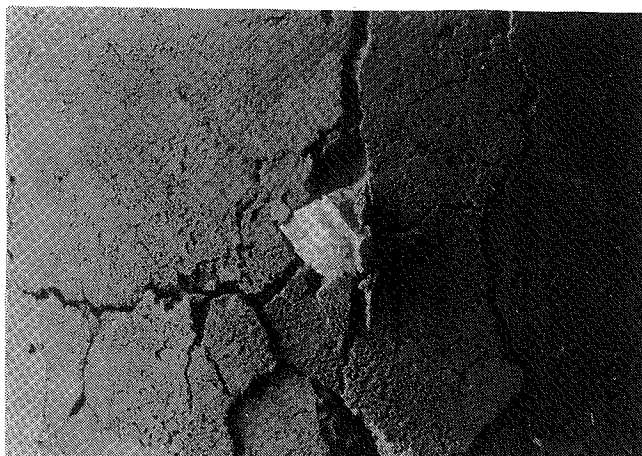
Muslet brud, som kendes hos normale ikke brændte flintesten, forekommer ikke.

Granit er stadig hel.

Klangen er som for papmaché.

Ved længere tids luftlagring (f.eks. en uge og derover) vokser store porøse kalkkrystaldannelser frem fra prøvelegemernes overflade, idet denne yderligere sprækker op og revnerne ses at stråle ud fra sådanne punkter.

Resttrykstyrken andrager 4% af koldstyrken i middel over 3 brændinger á 3 standardcylindre.



Krystalvækst på overflade efter
påvirkning med 800°C.

800-900°C

Ahrens og Hellmers opgiver at højkvarts om-
dannes til tridymit ved 870°C med heraf
følgende volumenudvidelse på 14% (jfr. f.eks.
Zoldners [1-105], p. 1107 eller Lie [1-51],
p. 147).

Ved 816°C (1500 F) observerede Abrams
[1-1], p. 37, ødelæggelser af cementpas-
taen omkring tilslagene i kalkstensbeton og
1 cm dybe revner i prøver af ex-ler-beton
med sand som fint tilslag.

Forfatteren har ikke selv foretaget bræn-
dinger med dansk sømateriale-beton til mere
end 800°C, da denne beton her må anses for
totalt nedbrudt.

900-1000°C

Ved opvarmning over ca. 900°C vil kalkstens-
tilslag med dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) svinde,
og kvartstilsag får ustabile volumenforhold.
(Zoldners [1-106], p. 5).

1000-1200°C

Omkring 1200°C kan den hydratiserede cement-
pastas trykstyrke andrage 35-40% af koldstyr-
ken (Nekrasov og Tarasova [1-115], p. 18) og
ved ca. 1150-1260°C vil feldspat smelte
(Ingberg [1-38], p. 825).

VAND-CEMENTTALLETS BETYDNING
FOR STYRKEUDVIKLINGEN

Væsentligst for debatten om dette spørgsmål i litteraturen har utvivlsomt været Malhotras undersøgelse fra 1956 [1-54], hvor det konkluderes (p. 91), at variationer i v/c-tallet i området fra 0,375 til 0,65 er uden betydning for betoner med tilslag-cementforhold 3,0, henholdsvis 4,5 under opvarmning til 600°C (der anvendtes flodgrus af især flint med maksimal kornstørrelse 10 mm som tilslag, varmprøvning af 10 cm terninger og den vel høje opvarmningshastighed af 60°C/min).

Effekten forklarer Malhotra ved, at det overskydende vand, der ikke forbruges til hydratisering, vil fordampe uanset mængden.

Saemann og Washa [1-77] (1957) fandt nær samme variation af trykstyrken med temperaturen indenfor 232°C for betoner og mørtler med v/c henholdsvis 0,48 og 0,84 og tilslag-cementforhold 5,5 og 9,75 for betonerne og 2,0 henholdsvis 4,5 for mørtlerne.

Lankard et al. [1-48] slutter (p. 65), at dette bekræfter Malhotras resultat, idet Malhotra kun fandt afvigelser, som følge af tilslag-cementforholdet over ca. 200°C.

Herover ses det derimod af Malhotras resultater, at 50% varmtrykstyrke nås ved 510°C for en beton med tilslag-cementforhold $t/c = 6,0$ mod ved 450°C for en beton med $t/c = 4,5$.

En mager beton med lavt cementindhold vil da udvise et mindre styrketab end en tilsvarende cementrig beton i området over ca. 200°C.

Den procentvise styrkeudviklings uafhængighed af vand-cementtallet synes bekræftet af Nasser (via Erving [1-39] p. 11) og af Weigler og Fischer (1963) [1-98], p. 496.

I det sidstnævnte arbejde undersøgtes prøver med v/c = 0,4 og 0,5 samt 0,6; men med et konstant tilslag-cementforhold.

Kun de vandlagrede prøver viste større forskelle i den relative trykstyrke omkring 200°C , hvorimod der for andre temperaturniveauer og for prøver tørret inden brænding på alle temperaturer ikke forekom systematiske forskelle med vand-cementtallet, uanset om der blev afkølet hurtigt eller langsomt.

De vandlagrede prøver havde naturligvis også et større vægttab op til 200°C jo højere vand-cementtal, hvor vægttabskurverne i alle andre tilfælde viste ens forløb og dermed uafhængighed af v/c.

Der forekom dog en tiltagende revnedannelse med øget vand-cementtal, hvad der kan være forårsaget af de større indre overflader i cementpastaen og deraf følgende hurtigere genlaskning af calciumilten ved fugtoptagelse under afkølingen.

Dette stemmer desuden med det forhold, at effekten mindskes ved brænding af ældre prøver (84 d. mod 7 d.).

Abrams [1-1] finder ingen forskelle i de relative trykstyrker, hverken varmprøvet og ubelastet, varmprøvet og belastet til 0,4 gange trykstyrken, eller koldprøvet ubelastet, når udgangstrykstyrken varieredes.

Forsøgene gjaldt kalkstensbeton med v/c = 0,42, henholdsvis 0,55, samt t/c = 6, henholdsvis 8, kvartsholdig beton med v/c = 0,40, henholdsvis 0,51, samt t/c = 6, henholdsvis 8, og ex-lerbeton med sand og v/c = 0,59, henholdsvis 0,78, samt t/c = 5, henholdsvis 3, hvor t/c betyder tilslagscementforhold i vægt.

Dette forhold har altså ikke haft indflydelse på disse resultater, hvad der naturligvis kan skyldes, at tilslagene her arbejder dårligt med cementpastaen.

Hos Harada et al. [1-31] ses ved varmeprøvning efter en meget langsom opvarmning ($0,125^{\circ}\text{C}/\text{min}$), at for såvel beton med grus, som med ex-ler falder styrken kraftigere med v/c = 0,45 og t/c = 3,9 end med v/c = 0,70 og t/c = 5,7, altså igen mindst styrkefald for den magreste beton.

Der er således grund til at gå ud fra, at den relative trykstyrke under og efter brand er uafhængig af vand-cementtallet, når dette er større end ca. 0,4, omend revnebilledet efter afkøling kan være mere omfattende for høje v/c.

Desuden ses, at dersom tilslagene har rimelige egenskaber, vil en mager beton miste mindre af sin trykstyrke end en fed beton.

Derimod vil variation af vand-cementtal under ca. 0,40 have indflydelse på trykstyrken, da man her ikke når en fuld hydratisering af cementpastaen, og uhydratiseret cement forekommer som en slags fint tilslag deri, hvorfor lavere v/c må mindske det relative styrketab af pastaen.

Dette er eftervist af Nekrassov [1-64], p. 90, der har prøvet 2 cm cementpastaterninger med v/c = 0,25; 0,30; 0,35; 0,41 og 0,45 og fandt procentvise resttrykstyrker på henholdsvis 1,07; 1,00; 0,44; 0,31 og 0,26 efter 350°C og 0,43; 0,46; 0,44; 0,20 og 0,11 efter 700°C (talserierne er ordnet i samme rækkefølge).

Thelandersson [1-92] fandt for spaltetrækstyrken såvel under som efter brand, at en svag beton med v/c = 0,75 og t/c = 7,0 fik et noget større trækstyrketab end en stærkere med v/c = 0,55 og t/c = 4,65, sandsynligvis skyldes dette, at trækstyrken er særlig følsom overfor tilslagets bevægelser, og behøver derfor ikke at hænge sammen med forskellene i v/c, og dermed i udgangsstyrkeniveauet, som det er foreslået i artiklen.

ALDERENS BETYDNING FOR STYRKEUDVIKLINGEN

Forskelle i betonens alder før branden (15 henholdsvis 29 uger) ser ikke ud til at have haft nogen indflydelse på Malhotras resultater [1-54], p. 93.

Man må dog være opmærksom på den styrke-tilvækst, der kan forekomme inden for de første 200°C, som følge af resthydratisering under varmepåvirkning.

Denne vil naturligvis afhænge af betonens hydratiseringsgrad og fugtindhold før branden.

For mørtelprøver fandt Weigler og Fischer [1-98], p. 495, at vandlagring før brand gav en tilvækst i den relative reststyrke ved 200°C, der var størst for de yngste prøver: 7 døgn gamle mod 84 døgn.

Effekten heraf vil dog være udlignet igen ved 600°C. For tørrede mørtelprøver viser resultaterne derimod en lidt lavere relativ styrke fra 200°C, for de 7 døgn - end for de 84 døgn gamle.

Med hensyn til styrkeudviklingen efter branden opgiver Weigler og Fischer [1-98], p. 497, mindre tilvækster under vandlagring og mindre fald ved luftlagring for de ældste eller alternativt varmebehandlede prøver end for de yngste.

En forklaring på disse forhold kan være, at de ældede prøver alt andet lige har en tættere struktur med mindre indre overflader og viser derfor efter branden en mindre effekt af revnedannelser som følge af vandoptagelse over disse ved luftlagring og ligeledes mindre virkning af udfyldende krystalvækst i hulrummene ved vandlagring.

At krystalstrukturen for de ældste prøver er mest udbygget bekræftes af de vejninger, som er foretaget i det omtalte arbejde (p. 501), hvor 84 døgn gamle, tørrede prøver mistede mere i vægt ved opvarmning ud over 200°C end 7 døgn gamle, hvorimod prøver, vandlagret før branden, ikke udviste vægtforskelle.

En kortvarig forbehandling på 24 timer i vakuum ved 20°C eller i ovn ved 100°C af i øvrigt vandlagrede mørtelprøver giver heller ikke væsentlige forskelle i trykstyrken ved 200°C (Fischer [1-21], p. 73 og 92), idet de forskelle, som forbehandlingen medførte udlignes.

Endelig slutter Maréchal [1-55], p. 132, at alderen (28 døgn til 1 år) kun har indflydelse på trykstyrken af varmepåvirket beton op til 130°C, idet de yngste betoner ved deres styrketilvækst under varmepåvirkningen når op på de ældre betoners niveau.

I forbindelse med praktiske vurderinger af betons styrke under og efter en brand, kan det med andre ord være rimeligt at se bort fra betonens alder med mindre, der foreligger helt specielle forhold, der kan forårsage, at en efterhydratisering ikke kan finde sted for de yngre betoner.

DEN STATISKE BELASTNINGS BETYDNING FOR STYRKEUDVIKLINGEN

Mange forfattere slutter, at en trykbelastning under varmepåvirkningen vil reducere betonens styrketab.

Således finder Malhotra [1-54], at ubelastede betonprøver fik 15-25% lavere varmtrykstyrker (over ca. 400°C) end prøver belastet konstant med ca. 20% af koldbrudstyrken.

Af resultaterne ser det ud til, at forskellen øges med temperaturen, begyndende omkring 100-200°C.

Også Abrams [1-1], p. 37, noterer sig en effekt af belastningen på 5-25% højere trykstyrker i forhold til ubelastede prøver ved varmprøvning.

En kalkstensbeton havde således uændret trykstyrke op til ca. 650°C med en trykbelastning på 40% af koldtrykstyrken mod en relativ trykstyrke på ca. 75% for ubelastede prøver.

Også for en beton med kvartstilslag opnåedes en forbedring af trykstyrken på 15-20% helt op til omkring 700°C.

For exler-beton havde prøverne først fordel af belastningen over ca. 370°C.

For samtlige prøver gjaldt, at reststyrken efter afkøling for ubelastede legemer lå væsentligt under varmstyrken.

Dette ses også af resultaterne opgivet hos Weigler og Fischer [1-96], p. 41 (eller [1-97], p. 482 eller Fischer [1-21], p. 82 - alle tre gengiver her de samme resultater).

Der opnås forbedrede reststyrker efter afkøling for prøver, belastet med 33% af koldstyrken under brand.

Effekten, der var mest udtalt for beton med tilslag af tungspat, indtraf dog først over ca. 350°C for kvartsholdig beton og var nærmest modsat for exlerbeton.

Schneider [1-81], p. 126, finder arbejdskurver for varm beton med kvartstilslag og belastet med henholdsvis 0%, 10% og 30% af koldtrykstyrken.

Disse arbejdskurver bliver stejle jo større belastning, der er påført, med andre ord stiger såvel E-modul som trykbrudspænding medens brudtøjningen aftager, når det konstante lastniveau under opvarmningsfasen øges.

Iagttagelserne gælder såvel for en maksimal temperatur på 250°C, som på 450°C, dog mest udtalt for den sidste.

Lignende forhold blev observeret af Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 44-45, over et bredt temperaturinterval op til ca. 700°C og ved statiske belastninger under opvarmningen på 0%, 10%, 17 - 22,5% og 45% af kold-trykstyrken. Dog var forbedringen i trykbrudspændingen ikke signifikant ved øgning af belastningsniveauet.

Fischer [1-21], p. 82, 88 og 121, finder arbejdskurver for beton med kvartstilslag, opvarmet til 600°C og afkølet.

Den statiske last under varmpåvirkningen androg henholdsvis 0%, 17%, 33% og 50% af koldtrykbrudstyrken, og de tre sidste tilfælde gav stort set samme forløb af restarbejdskurven, men væsentligt stejle end for den ubelastede beton.

Det vil sige, at belastningens størrelse ikke havde indflydelse på egenskaberne efter afkøling.

Af resultaterne hos Abrams [1-1], p. 52, ses for beton med tilslag af kalksten kvarts og ex-ler, at belastningens størrelse, der androg 25%, 40% og 55% ikke havde nogen væsentlig betydning for varme-trykstyrken ved henholdsvis 204, 482 og 704°C.

Af de mindre afvigelser ses for de to første typer tilslag en tendens til, at en stærkere beton (ca. 40 MPa mod ca. 28 MPa) med mindre tilslags-cementforhold, og dermed federe blanding i modsætning til en svagere og mere mager, udviste små fald i varmtrykstyrken med øget belastningsniveau.

Som forklaring på disse forhold angives, at den statiske last hindrer eller mindsker revnedannelsen i betonen (Malhotra [1-54], p. 92, eller Weigler og Fischer [1-96], p. 45). Fischer [1-21], p. 89, foreslår ligesom Thelandersson [1-90] mere præcist, at belastningen introducerer en forspænding af tilslagene, hvorved revnedannelse som følge af forskel i udvidelse af sten og cementpasta hindres, hvad der som hypotese for i hvert fald dele af effekten stemmer med de her opregnede iagttagelser.

I visse tilfælde indtraf forbedringen først omkring 350°C, hvor revner som følge af udvidelsesforskelle normalt fremkommer.

Når lasten øgedes inden for beskudne rammer (0% til ca. 20% af koldtrykstyrken), blev arbejdskurverne i varm tilstand stejle.

Ved større statiske belastninger gav en øgning af disse stagnerende varmtrykbrudspændinger (formentlig da materialet her af andre årsager ikke kan holde til mere) og ved meget store belastninger og små tilslags-cementforhold ligefrem en tendens til et fald.

I afkølet tilstand ses også forbedringen, især ved maksimale temperaturer over ca. 350°C, og øgning af belastningen over ca. 20% af koldtrykstyrken ændrer ikke arbejdskurven, da forbedringen her kan skyldes de færre revner og ikke som i varm tilstand tillige hindringen af tilslagene og dermed hele materialets termiske ekspansion frem til prøvningen.

En hurtig pulserende belastning på 4-5 Hz med maksimalværdi på 33% af koldtrykbrudstyrken er påført prøver af beton med kvarts, henholdsvis tungspat-tilslag i 3 timer, d.v.s. 300.000 pulsationer ved fast maksimal temperatur hos Fischer [1-21], p. 84-85 (og Weigler og Fischer [1-96] og [1-97]).

Prøvernes trykstyrke efter afkøling bedredes herved ligesom ved statisk last, og endog mere over ca. 450°C.

Ved 300°C øgedes belastningsperioden yderligere til 60 og 120 timer, d.v.s. 1 million og 2 millioner pulsationer, hvor kvartsbetonen begyndte at vise tegn på udmattelse og få mindre relativ reststyrke.

Også i dette tilfælde kunne hindret revnedannelse tænkes som hel eller delvis årsag til effekten, da dannelsen må foregå med en vis træghed som følge af de spændings-tøjningsomlejringer og dermed mindre masseflytninger, der skal gå forud derfor efter hver aflastning.

I forbindelse med den foregående diskussion vil det være relevant at omtale den såkaldte transiente (= ikke permanente temperaturforhold) tøjning, som indføres ved analyser af betons krybningsforhold under opvarmning.

Den samlede tøjning for belastet beton under opvarmning opfattes som superponeret af fire bidrag (Anderberg og Thelander-sson [1-3], p. 52):

- 1) Termisk tøjning (incl. svind)
- 2) Øjeblikkelige spændingsafhængige tøjninger (f.eks. tilnærmet elastisk)
- 3) Krybetøjning (tidsafhængig under konstant spænding og temperatur)
- 4) Transient tøjning (fra effekten af temperaturøgning under belastning)

Det transiente bidrag søges som hypotese forklaret som resultat af fysiske og kemiske reaktioner i cementpastaen med omlejrning af vandmolekyler til følge (f.eks. Thelander-sson [1-93], p. 37).

Man konkluderer, at fænomenet ikke kan skyldes forskelle i udvidelse af tilslag og cementpasta, eftersom Hansen og Eriksen [1-29], p. 500, fik større effekt i form af udbøjning for prøvebjælker af ren cementpasta end for mørtelbjælker.

En konklusion om, at tilslagsudvidelse ikke kan være en årsag dertil er imidlertid forkert ud fra resultaterne i den anførte artikel.

Antallet af opvarmede rene cementpasta-bjælker var 6 stk. og dermed under 10% af hele forsøgsserien.

Opvarmningen skete for disse bjælker under vand fra 20 til 40°C. Dels er der altså tale om vandmættede prøver med heraf ændrede mekaniske egenskaber, dels vil det vand, som findes indesluttet i de mest lukkede gelporer kunne bidrage med et voldsomt tryk under opvarmningen.

Til illustration heraf kan anføres, at den termiske udvidelse af et vandvolumen fra 20 til 40°C andrager 6‰, hvor det for et kvartsvolumen andrager ca. 1‰.

Vandtrykket kan derfor introducere trækspændinger i den omkringliggende cementgel, og derved bidrage til de fine revner, man ved forsøgene observerede på bjælkerens træksider, samt forårsage en øget udbygning af den belastede bjælke.

Der er altså heri intet til hindring for en antagelse om, at tilslagenes udvidelsesforhold helt eller delvist kan være årsag til den transiente tøjning.

OPVARMNINGSTIDENS BETYDNING FOR STYRKEUDVIKLINGEN

Visse resultater kunne tyde på, at længden af den totale varmepåvirkningstid kun har ringe indflydelse på styrkeforholdene.

Således slutter Weigler og Fischer [1-96], p. 46, at en forøgelse af tiden med den maksimale temperatur fra 3 til 30 timer kun giver afvigelser på ca. 10% i resttrykstyrken.

Imidlertid var opvarmningshastigheden så lav som 1,9°C pr. min. (cylindre Ø 5 cm og højde 7 cm), hvorfor de temperaturafhængige processer på alle niveauer må skønnes at have haft tilstrækkelig tid til at forløbe i meget vid udstrækning.

Ved samme undersøgelse iagttages (p. 37), at hurtigt afkølede prøver fik et mindre styrketab end de langsomt afkølede, som følge af den kortere totale afkølingstid.

Prøver, der afkøledes hurtigt og opbevarede i luft i 24 timer, besad omtrent samme styrkeniveau, som langsomt afkølede prøver til samme tid efter afkølingens begyndelse. (Max. temp. varierer op til 750°C).

Hos Harmathy og Berndt [1-33], p. 108, ses et noget andet billede, hvortil der sine steder refereres (f.eks. Thelandersson [1-90]).

Her er varmtrykstyrken af cementpasta-cylindre lidt lavere ved 1 times opvarmningstid, end ved 4 timer, for maksimale temperaturer over 3-400°C.

Da cylindrenes mål imidlertid var så store som Ø 4,5 cm og højde 8,9 cm, må termiske spændinger forudses at have indflydelse ved de varmprøvninger, hvor et højere temperaturniveau skal opbygges på en time, og kan på denne måde give en rimelig forklaring på afvigelserne.

For trækstyrken af beton har Thelandersson [1-92], p. 111, kun observeret mindre afvigelser i såvel varm- som restværdierne mellem prøver, der henholdsvis har været opvarmet hurtigt (ca. 10°C/min) og langsomt (ca. 1,5°C/min).

Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 33, undersøgte vægttabet for cylindre $\varnothing$ 7,5 cm, højde 15 cm af kvartsbeton, opvarmet med hastigheder på henholdsvis 1-, 5- og over $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ og fandt, at det fordampelige vand var fjernet fra disse prøver omkring 200°C , uanset opvarmningshastigheden.

Herover ser man af de i arbejdet opgivne kurver en forskydning på $50-100^{\circ}\text{C}$ for de større vægttab, hvad der må være forårsaget af, at de involverede processer kræver en vis tid til at forløbe.

Også afkølingshastigheden vil kunne have en vis indflydelse på reststyrkeforholdene.

Resultaterne hos Weigler og Fischer [1-98], p. 495, viser, at mørtel, afkølet langsomt i ovn, har en noget lavere resttrykstyrke efter 7 døgn end hurtigt afkølede prøver.

Efter 84 døgn vil effekten kun være tilstede ved maksimale temperaturer over ca. 400°C .

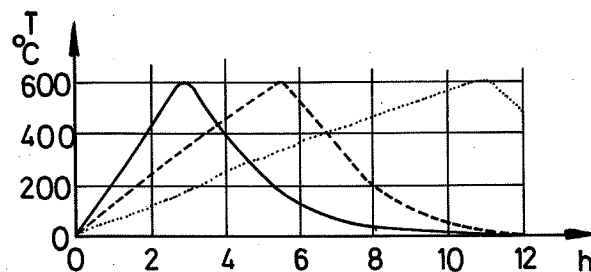
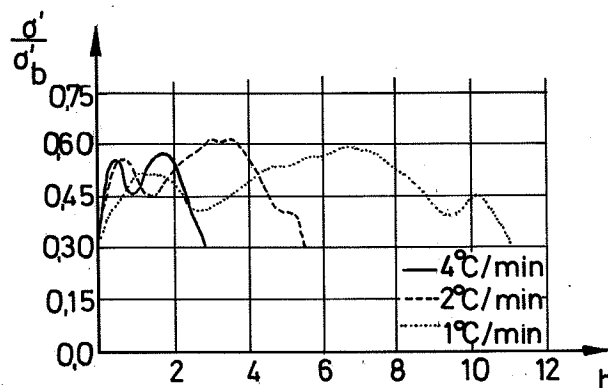
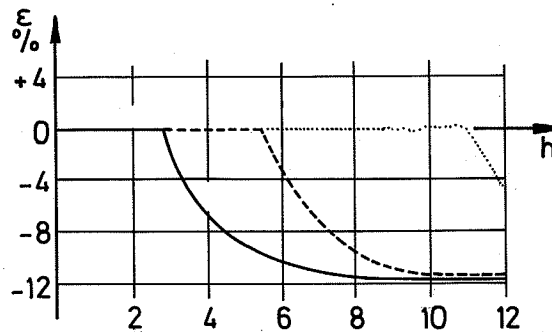
Dette stemmer helt med egne forsøg med beton, og viser bl.a. at svækkelsen af materialet ikke kan skyldes termiske spændinger ved afkølingen (se i øvrigt afsnittet om afkølings- og lagringsbetingelsernes betydning for styrkeudviklingen).

Vandoptagelsen under afkølingsperioden må ske over en vis tid ved de enkelte temperaturniveauer og en langsom afkøling ser ud til at give den kraftigste genlaskning af calciumilten, der jo netop dannes efter påvirkning af maksimale temperaturer over ca. 400°C .

Angående materialernes termiske bevægelser ses af Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 37, at opvarmningshastigheden (henholdsvis 1-, 5- og over $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) kun har ringe indflydelse på tøjningsforholdene ved de fleste belastningsniveauer (0%, 22,5%, 45% og 67,5% af koldtrykbrudstyrken).

De største afvigelser i retning af større positive - og henholdsvis mindre negative - tøjninger ved større opvarmningshastighed forekom ved lastniveauet 45% og ved temperaturer over ca. $400-600^{\circ}\text{C}$, forhold der kunne tyde på en vis tidsafhængighed med hensyn til cementpastaens nedbrydning.

Schneider [1-81], p. 127, fandt dog, at de maksimale tvangskræfter fra hindret længdeudvidelse for betonprøver med en intiel belastning på 30% af koldtrykstyrken var praktisk taget uafhængige af opvarmningshastigheden (1-, 2- og 4°C/min til 600°C).



Tvangsspændinger i betoncylindre med hindrede længdeudvidelser og forskellige opvarmningshastigheder. (Schneider [1-81]).

TERMISKE CYKLERS BETYDNING FOR STYRKEUDVIKLINGEN

En øgning fra 1 til 3 cykler til 300°C med en belastning på 1/3 af koldtrykbrudstyrken medførte ikke større styrketab for beton med tilslag af kvarts eller tungspat (Fischer [1-21], p. 86).

Et termisk program med to cykler til henholdsvis 150-, 300- eller 450°C samt to cykler til 600°C gav heller ikke større tab.

Opvarmningshastigheden var 1,9°C/min og standtiden 3h, så allerede den første cyklus kan formodes at have nået at give en nær fuld effekt af dehydratisationsprocesserne i materialet, hvorimod belastningen hindrer fortsat ødelæggelse som følge af tilslagernes udvidelse. Derimod vil der indtræde et større tab i resttrykstyrken, hvis såvel varmecykelantallet som belastningsniveauet øges (Weigler og Fischer [1-96], p. 44).

Også Campbell-Allen og Desai [1-10], p. 68 og 72, fandt, at langt de største tab i såvel tryk- og trækstyrke som E-modul fandt sted inden for de første 5 varmecykler.

Disse var ganske langvarige, idet opvarmningen foregik langsommere end 1°C/min, standtiden ved henholdsvis 65-, 200- og 300°C var 10h og nedkølingen langsommere end 1,7°C/min.

Der anvendtes ubelastede prøver af mørtel og beton med tilslag af henholdsvis kalksten, expanderet skifer og chamotte.

For kalkstensbeton af cement med højt C₃S-indhold på 65% og lavt C₃A-indhold på 5% iagttages en svag, men jævn aftagen af samtlige styrkeverdier op til 20 varmecykler. En aftagen som ikke ses for cement med 55% C₃S og 13% C₃A.

Hos Crispino [1-15], p. 459, ses en jævn aftagen af trykstyrken indenfor de første 6 varmecykler med standtider på 20 døgn ved 300°C og 350°C for kalkstensbeton og 500°C for beton med tilslag af tungspat.

Såvel vægttab som svind synes at indstille sig på et konstant niveau efter den første varmecyklus (Campbell-Allen og Desai [1-10], p. 68) og bevare sin størrelse op til 20. cykel på 300°C.

Maréchal [1-57], p. 1051, fandt, at svindet ved en fornyet opvarmning ud over den første varmepåvirknings temperatur ville forløbe helt som en fortsættelse af denne efter, at den tidligere maksimale temperatur var overskredet.

AFKØLINGS- OG LAGRINGSBETINGELSERNES
BETYDNING FOR STYRKEUDVIKLINGEN

Der hersker enighed om, at betonens trykstyrke er mindre efter en afkøling i luft, end under selve varmepåvirkningen, f.eks. Malhotra [1-54], p. 85. Saito fandt i 1965, at dette også gjaldt betonens elasticitetsmodul (Lie [1-51], p. 140), og Thelandersson [1-92], p. 113, at spaltetrækstyrken viste samme tendens over 400°C.

Af resultaterne hos Abrams [1-1], p. 37 fremgår, at også trykstyrken falder særligt kraftigt ved afkøling (og lagring i 7 døgn ved 70-80% RF) fra temperaturer højere end ca. 400°C (p. 49-51).

For mørtelprøver viste Weigler og Fischer [1-98], p. 496-498, at der praktisk taget ikke indtræffer noget styrkefald ved afkøling i luft fra 200°C, men et kraftigt tab fra 400°C og 600°C, og at dette tab er størst det første døgn, og stabiliserer sig stort set i løbet af 7 døgn.

For spaltetrækstyrken af beton opgiver Thelandersson [1-92], p. 114, restværdier målt henholdsvis 28 og 7 døgn efter, og samme dag, som afkølingen slutter.

Heraf fremgår klart, at betonen undergår en så kraftig styrkereduktion ved opbevaring efter brænding, at en reststyrkemåling ikke bør foretages umiddelbart efter afkølingen, men i hvert fald ca. 7 døgn derpå.

Fischer [1-21], p. 81, slutter ud fra litteraturen, at højere fugtighedsgrad i lagringsluften giver lavere reststyrker, hvad han ikke mener kan stemme med resultaterne for prøver, der lagres helt under vand.

Opbevares de afkølede prøver under vand vil dannelsen af synlige revner hindres, allerede dannede revner lukke sig og trykstyrken af prøverne stiger (Weigler og Fischer [1-96], p. 39). Forskellen mellem luft- og vandlagrede prøvers trykstyrke bliver særlig markant over ca. 450°C (samme artikel, p. 38). Når prøverne nedsænkes i vandet, foregår en kraftig vandoptagelse under syden og boblen og ledsaget af en varmetoning (Fischer [1-21], p. 81).

Prøvernes vægt øges, hvor de luftlagrede prøver kun undergår mindre vægtstigninger.

Weigler og Fischer [1-98], p. 496, bemærker, at trykstyrken i løbet af det første døgns vandlagring aftager, for derpå at øges tiltagende med højere maksimal temperatur ved varmepåvirkningen.

Effekten gælder såvel for mørtelprøver, hærdet i vand, som i luft før varmepåvirkningen.

Endelig vil porøsiteten, der tiltager under luftlagring, aftage til udgangsniveauet før varmepåvirkningen ved vandlagring (Fischer [1-21], p. 91).

Ældre prøver (197 døgn mod 84 døgn gamle) får mindre styrkeforøgelse ved vandlagring efter varmepåvirkningen (Weigler og Fischer [1-96], p. 38), især ved maksimale temperaturer op til ca. 300°C, hvorimod alderen ikke har indflydelse på styrketabet ved luftlagring.

Et andet interessant forhold er, at en belastning på 33% af koldtrykstyrken under såvel varmepåvirkningen til 600°C, som under den påfølgende 14 døgns luftlagring hindrer revnedannelsen og styrketabet ved lagringen, og kan endog give anledning til en beskeden forøgelse af trykstyrken (lagringstiden på 0-, 3-, 7- og 14 døgn) (Weigler og Fischer [1-96], p. 42).

Aflastes prøverne under lagringen, vil revnedannelsen begynde.

Tilslagets type (ex-ler, tungspat og kvarts) ser ikke ud til at have væsentlig indflydelse på forskellen mellem virkningen af vand- og luftlagring (Weigler og Fischer [1-96], p. 38).

Ud fra litteraturen tegner der sig ikke noget klart billede af årsagerne til de her opregnede fænomener.

Malhotra [1-54], p. 93, foreslår, at styrketabet skyldes ødelæggelse af strukturen, som følge af "revnedannelse etc.", når et prøvelegeme afkøles.

Disse blivende revner skyldes dog ikke alle termiske spændinger, eftersom prøver afgyst i vand, får langt færre revner end prøver, der afkøles langsomt (f.eks. Zoldners [1-105], p. 1101).

Hertil kommer, at prøver fremstillet af højovncement i modsætning til portlandcement ikke giver anledning til forskelle mellem vand- og luftlagring efter at være udsat for 600°C (Fischer [1-21], p. 79).

I denne forbindelse kan nævnes, at egne prøvelegemer af aluminacement med chamotte tilslag, var helt fri for revner efter en påvirkning på 800°C og efterfølgende luftlagring. Effekten må da kunne tilskrives forhold i portlandcementpastaen.

Nekrasov (f.eks. [1-115], p.20) hævder, at årsagen er rehydrering af calciumilte, der i temperaturområdet fra ca. 400°C til ca. 600°C, er dannet ved dekomponering af calciumhydroxiden i cementpastaen.

Denne rehydrering eller genlaskning ledsages af en volumenforøgelse på 2,5 gange (Nekrassow [1-64], p. 31), hvad der giver anledning til revnerne.

Weigler og Fischer [1-96], p. 45, finder denne påstand modsagt af deres iagttagelser over vandlagrede prøvers styrketilvækst og manglende revneudvikling.

Hertil kom, at prøver, der efter afkølingen opbevarede i tørreskab ved 100°C eller i ekssikkator (tørrebeholder med et vandsugende stof og vakuum), dog fik revner og styrketab.

Forfatteren mener ikke, at Weigler og Fischer har et tilstrækkeligt grundlag til at afvise Nekrasovs teori om calciumhydroxidens indflydelse på problemet.

Man kan forestille sig, at de luftlagrede prøver optager vand fra luften i betonens porer under afkølingen.

Egne forsøg viser, at de blivende revner begynder at dannes allerede omkring 200°C -300°C ved afkølingen.

Processen foregår altså i høj grad inden prøverne er helt afkølede (dette er iagttaget ved flere supplerende forsøg med såvel cylindre af beton som af ren cementpasta).

Fugten - og i øvrigt sandsynligvis også kuldioxid - suges ind fra porerne til calciummiltten, der dannes calciumhydroxid og kalk med volumenudvidelse til følge, og dette medfører spændinger og revner i materialet.

På prøver, der udtages af ovnen omkring 300°C , kan iagttages revnedannelsen i løbet af ganske få minutter.

I disse tilfælde vil et samspil dog være sandsynligt med termiske spændinger, hvor de nydannede krystaller efter afkølingen hindrer lukning af revner, opstået ved temperaturforskellene.

For prøver, der nedsænkes under vand, kan man tænke sig den effekt, at calciummiltten diffunderer ud i porerne og der danner de nye calciumhydroxidkrystaller med en sækning af porøsiteten og øgning af trykstyrken til følge.

En sådan teori ses altså at kunne forklare fænomenerne ved vand- contra luftlagring. At man forsøger at tørre prøverne efter afkølingen og dermed efter at væsentlige dele af processen har fundet sted vil selv sagt ikke have nogen særlig effekt.

Højst vil den sidste del af nedbrydningen forhales, ligesom den modsat vil fremmes ved særlig stor luftfugtighed, sådan som forsøgene jo har vist.

Det ses, at de anførte forhold ikke modsiges hypotesen. Derimod ses flere forhold at bekræfte den.

Først og fremmest forekommer sammenfaldet klart mellem temperaturområdet, hvor nedbrydning af calciumhydroxid finder sted omkring 500°C og området, hvor samtlige prøver indeholdende portlandcement får de største styrketab.

Dernæst må den omstændighed veje tungt, at man ved at binde calciumhydroxiden i mere bestandige krystaller kan undgå disse voldsomme styrketab (Nekrassov [1-64]).

Flere af forfatterens egne iagttagelser bekræfter teorien yderligere.

Afkølingsforsøg med beton

En lille serie forsøg med beton af rapid-cement og danske sømaterialer v/c = 0,87 er gennemført til belysning af hypotesens gyldighed.

Tre cylindre, Ø 15 cm, H 30 cm, opvarmedes med 1°C/min til 550°C med standtid 2 timer.

Da afkølingen med hastighed ikke over 1°C/min nåede 250°C udtoges de to prøver. Den ene afgystes i vand, og blev der; den anden afkøledes hurtigt i luften, medens den tredje fik lov til at afkøle langsomt i den højisolerede ovn.

7 døgn efter brændingen trykprøvedes alle tre cylindre samt to referencecylindre fra samme støbning.

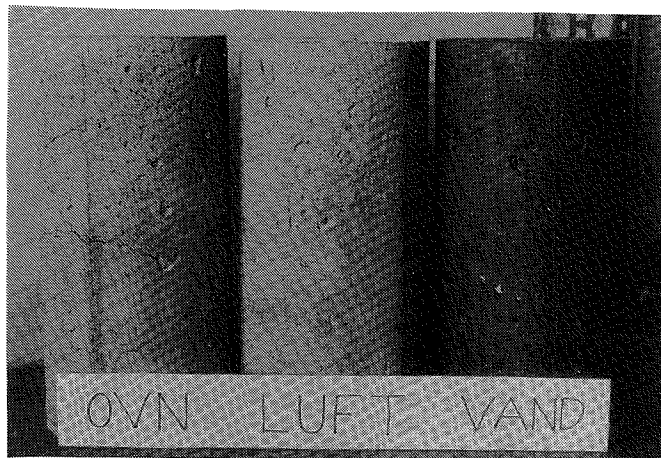
Dette udførtes for tre hold prøver med alder på brændingstidspunktet på henholdsvis et hold á 14 døgn og to hold á 3 måneder.

Resultatet ses i nedenstående tabel:

Alder	vand		luft		ovn		kold	
	σ'_b (MPa)	%	σ'_b (MPa)	%	σ'_b (MPa)	%	σ'_b (MPa)	σ'_b (MPa)
14 døgn	5,58	27	3,59	17	3,19	15	20,6	21,3
3 mdr.	4,13	17	3,68	15	3,23	13	25,1	23,0
3 mdr.	4,87	17	4,47	16	4,64	16	28,2	28,2

Det ses, at de vandlagrede prøver som ventet var stærkest, og at de hurtigt afkølede i luft var lidt stærkere end de langsomt afkølede.

Hertil kommer, at de langsomt afkølede prøver havde større revner end de hurtigt afkølede. Dette kan skyldes, at der ved en langsom afkøling er mere tid på hvert temperaturniveau til at processerne kan forløbe.



Tre cylindre udsat for forskellige afkølingsbetingelser.

Ved fortsat opbevaring under vand i nogle uger af de vandlagrede prøver ses kalk dels udskilt som faste krystaller ved større porer og revner, dels som en opslæmning, der, når prøven tages op i luften, samler sig til et pulver ved porer og revner.

Brækkes prøven fra hinanden ses opslæmningen på brudfladerne som et mælkeagtigt lag. Dette vil naturligvis bidrage til poreudfyldning ved vandlagring.

På prøvelegemer, der har været udsat for 800°C og opbevares i luft derefter, ses efter en til to ugers forløb dannelsen af store porøse kalkkrystaller (diametre omkring 5 mm), som vokser frit frem fra prøvelegemernes overflade.

Specielt ses, at disse krystaller fremkommer på steder, hvorfra særligt store revner udstråler. Se fotos side 1-38 og 1-39.

Brudbilledet har en sådan form, at det kun kan skyldes presset fra krystallen. Disse store koncentrerede vækster kan tænkes at være dannet af brændt kalk fra kalkholdige tilslag, sådan som også Zoldners antager [1-105], p. 1087.

Afkølingsforsøg med cementpasta

At effekten kun optræder ved høje temperaturer op mod 800°C , og altså ikke fordi disse prøvninger har befundet sig over ca. 600°C i lang tid (10 h), er eftervist ved et supplerende forsøg.

To cylindre opvarmedes til 600°C efter den i øvrigt anvendte trapezkurve, blot med standtiden 10 h i stedet for 2 h. Der forekom ingen udblomstringer ved den påfølgende luftlagring i 3 mdr.

For at undersøge vandoptagelsen i forbindelse med afkøling og luftlagring er der gennemført en serie forsøg med ren cementpasta, hvor effekten af overskydende cement, d.v.s. lave vand-cementtal tillige kunne iagttages.

Der støbtes 6 cylindre, $\varnothing = 10 \text{ cm}$, $H = 20 \text{ cm}$, af rapidcement i hvert hold. 4 af disse blev efter 14 døgn brændt til 600°C med opvarmningshastighed $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, standtid 2 timer og afkølingshastighed ikke over $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Når afkølingen nåede 350°C blev den ene cylinder udtaget og placeret i fri luft 60% RF på en vægt, medens de tre andre køledes langsomt ned i ovnen.

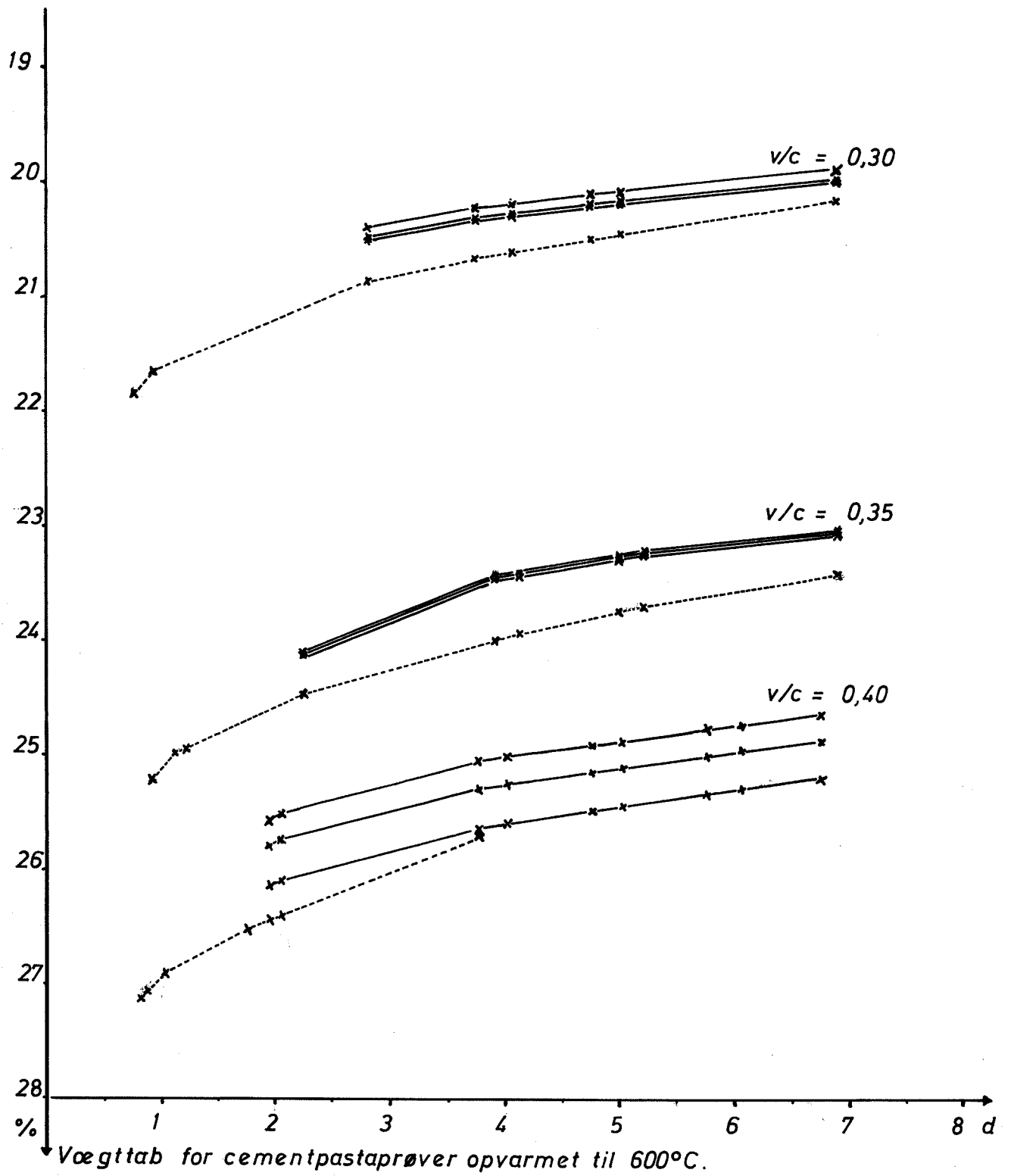
Der foretoges vægtmålinger som funktion af tiden, også omfattende de langsomt afkølede prøver fra det øjeblik, deres temperatur nåede ned på laboratoriets (ca. 2 døgn efter brændingens start).

Vægttabene beregnedes i procent af vægten for den enkelte prøve umiddelbart før brændingen.

Man ser, at de procentvise vægttab ved brændingerne blev mindre, jo mindre vand-cementtal, der benyttedes. Med andre ord får man større fugtbevægelser jo større dele af prøverne, der har været hydratiseret.

Man ser endvidere, at de langsomt afkølede prøver har nået at optage mere fugt ved afkølingen, end de hurtigt afkølede til samme tidspunkt, hvad der jo stemmer helt overens med det tidligere anførte.

Til gengæld optog de hurtigt afkølede prøver fra dette tidspunkt fugt med større hastighed, end de langsomt afkølede.



Generelt sås - ligesom for betonprøverne - større revner på de langsomt afkølede, end på de hurtigt afkølede cementpastaprøver, ligesom en tendens til et mere behersket revnebillede kunne iagttages for lavt vand-cementtal, end for et højere.

Resultatet af trykstyrkemålingerne fremgår af nedenstående tabel.

v/c	0,40		0,35		0,30	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
hurtig afkøl.	-	-	16,0	13,5	27,3	16,6
langsom afkøling	2,3	6,2	10,7	9,0	21,7	13,2
	3,3	8,9	9,7	8,2	21,7	13,2
	3,4	9,1	8,2	6,9	24,2	14,7
	41,0	-	126,0	-	159,3	-
Reference	33,0	-	110,9	-	169,6	-

Det fremgår, at den procentvise reststyrke forbedres med lavere vand-cementtal, hvad der svarer til resultater, som Nekrassow [1-64], p. 91, fandt for trykstyrken ved henholdsvis 350°C og 700°C af 2 cm cementpastaterner med v/c = 0,25; 0,30; 0,35; 0,41 og 0,45.

Det bør dog her bemærkes, at den anvendte russiske cement havde et mindre indhold af C₃S end den danske rapidcement, som her er anvendt.

Årsagen til den større varmebestandighed med de lavere vand-cementtal må søges i, at man her dels har mindre dele af prøverne hydratiserede og dels har den ikke hydratiserede cement som et stabilt tilslag.

Endelig ses det endnu klarere end for betonprøverne, at de hurtigt afkølede opnår højere reststyrker end de langsomt afkølede.

Prøveserien virker således bekræftende på de anførte teorier og specielt viser den cementpastaens betydning for reststyrkeforholdene.

EKSEMPLER PÅ TRYK- OG TRÆKSTYRKEVARIATIONER MED TEMPERATUREN

I forbindelse med undersøgelsen over armeringsståls restvedhæftningsstyrke, der behandles i licentiatarbejdets tredje del, er et større antal referencecylindre trykprøvet efter påvirkning af varierende maksimale temperaturer.

På denne måde er fremkommet en delundersøgelse over resttrykstyrken af dansk beton, udsat for høje temperaturer. Der anvendtes standardcylindre af højden 30 cm og diameter 15 cm. Betonen var udført af Rapidcement og danske sømaterialer og havde et vand-cementforhold på 0,87 og et tilslag-cementforhold på 10.

Hver støbning omfattede fem cylindre foruden de specielle vedhæftningsprøvelegemer.

I en alder af 14 døgn opvarmedes de tre cylindre i en elektrisk ovn med $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ til den maksimale temperatur.

Standtiden ved denne temperatur var 2h, hvorefter der afkøledes med en hastighed ikke over $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

7 døgn efter brændingen trykprøvedes alle fem cylindre og forholdet mellem resttrykstyrken af hver af de tre brændte og gennemsnittet af de to ubrændtes trykstyrke dannedes.

Den gennemsnitlige trykstyrke for samtlige ubrændte cylindre androg 19,5 MPa. Undersøgelsens resultater fremgår af nærværende tabel og optegning. For denne betons elasticitetsmodul og Poisson-forhold henvises til afsnittet om deformationsforhold.

Endelig er der foretaget en optegning af 111 kurver for tryk- og trækstyrkeundersøgelser, hidrørende fra litteraturen på området.

Samtlige data er konverteret til forhold mellem værdierne for brændt og ubrændt beton som funktion af den maksimale temperatur i $^{\circ}\text{C}$.

Maksimal temperatur °C	σ'_b/σ'_{20}	Spredning	Antal brændte prøver
100	0,981	0,0453	12
150	0,906	0,0232	3
200	0,835	0,0450	30
300	0,830	0,0192	9
400	0,674	0,0228	30
500	0,331	0,0233	9
600	0,095	0,0106	30
700	0,069	0,0184	5
800	0,037	0,0086	8

Da tilslagsmaterialet jfr. de foregående afsnit er afgørende for styrkevariationen, er der foretaget en grov opdeling herudfra.

Imidlertid kan også andre parametre ved den anvendte beton og ved prøvningsmetoden have væsentlig indflydelse på resultaterne, hvorfor de vigtigste data for de enkelte kurver er givet i tabelform på siden overfor.

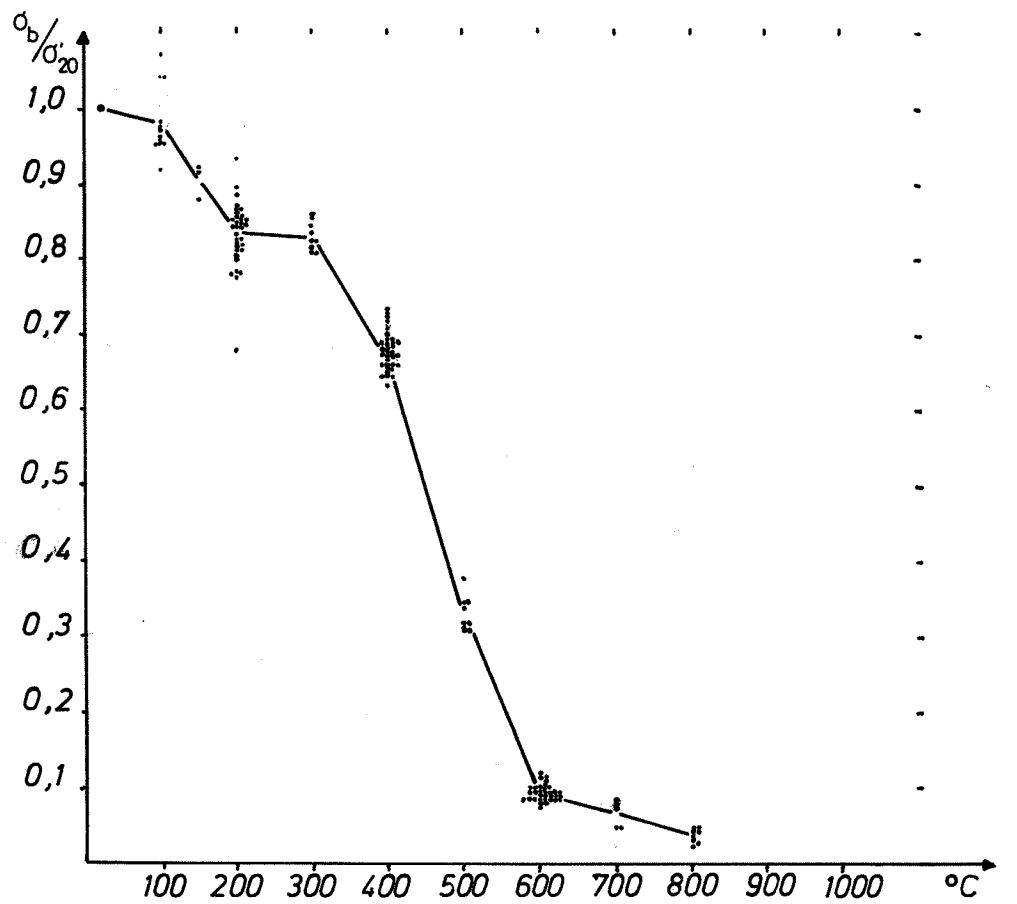
Desværre opgiver langt fra alle forfattere de ønskelige data, og i tilfælde, hvor disse er uoplyst, markeres dette med en streg - .

Med denne opbygning af kurvematerialet er det relativt let, at finde netop de kurver, der i videst muligt omfang udgør fortilfælde for den prøvning, man ønsker oplysning om.

Forfatteren har derimod ikke i forbindelse med dette arbejde set det som sin opgave at opstille anbefalede forløb til brug for beregninger.

Det indsamlede materiale vil kunne ses som et redskab bl.a. til brug ved fastlæggelse af sådanne forløb i overensstemmelse med en passende sikkerhedsfilosofi.

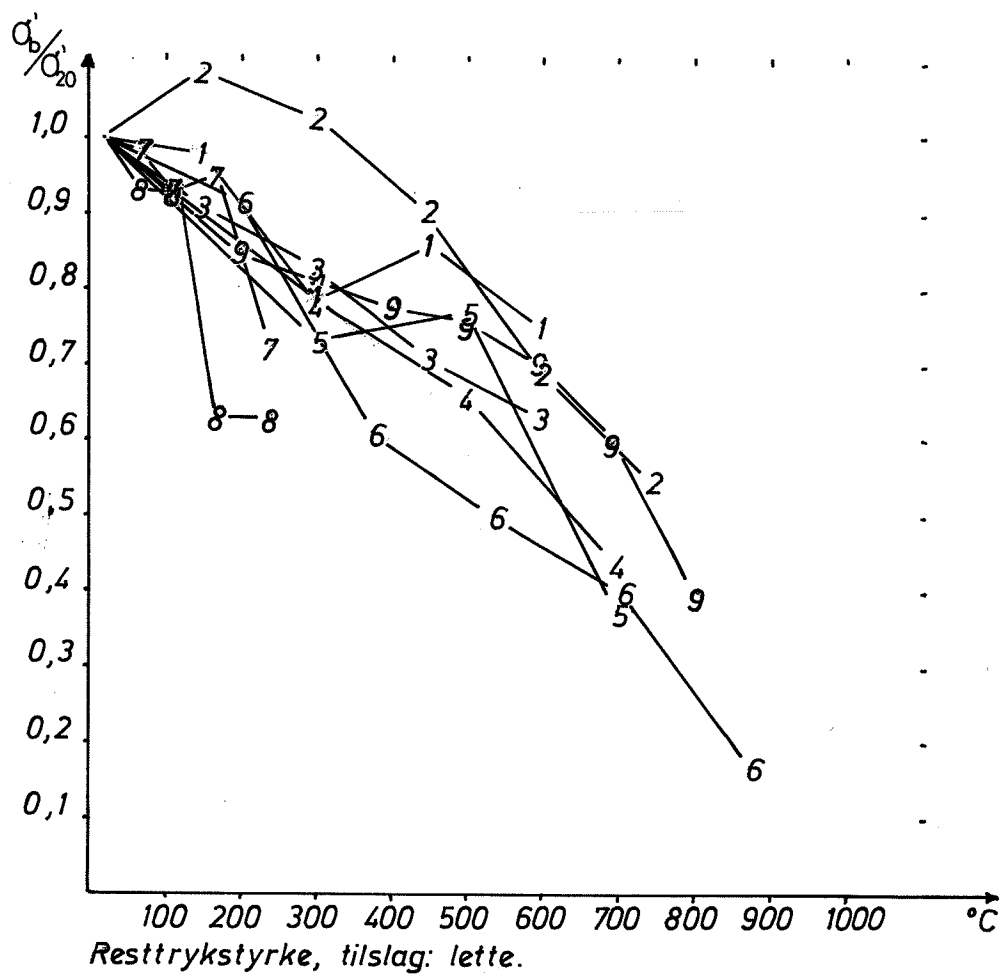
Tilsvarende data for elasticitetsmodul og Poissons forhold er givet i afsnittet om deformationsforhold.



Resttrykstyrke. Egen undersøgelse. Sømateriale, Rapidcement,
 $v/c = 0,87$, $t/c = 10$, $\sigma'_{20} = 19,5 \text{ MPa}$.

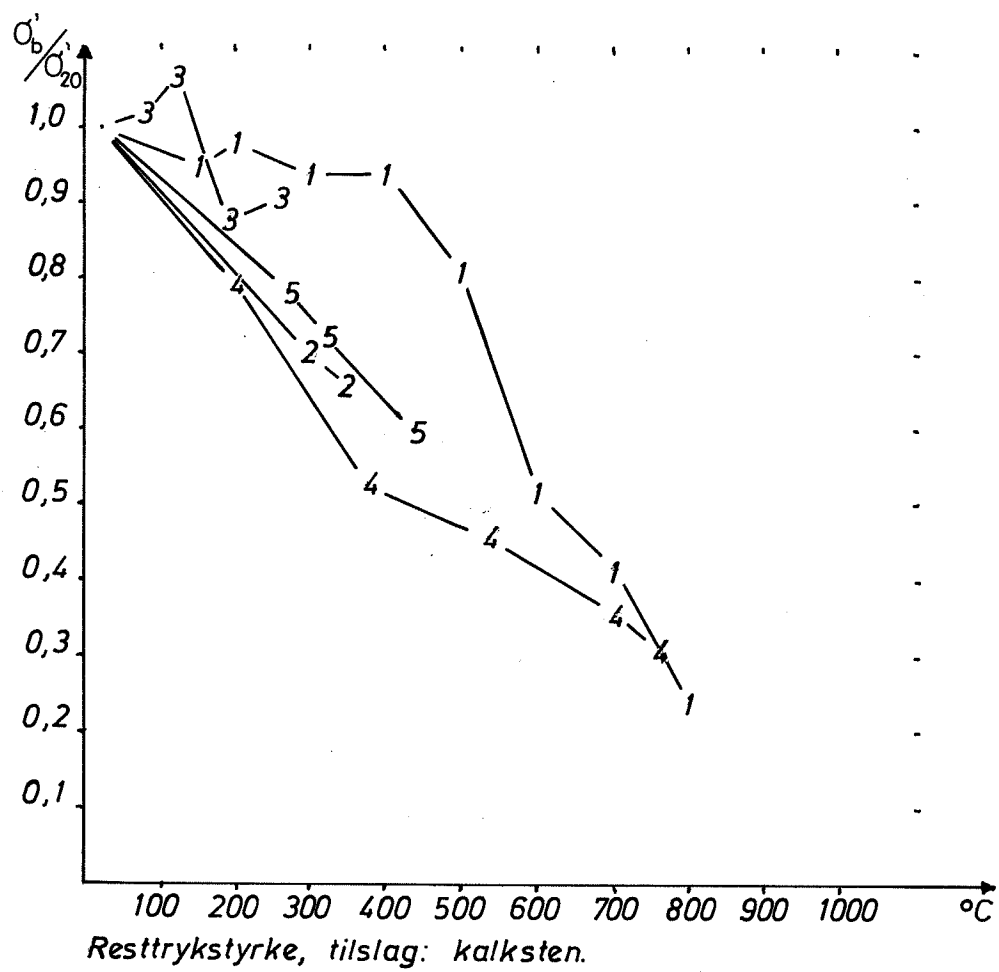
RESTTRYKSTYRKE, tilslag: lette

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Exler	0,6	1,4	-	70	50	2,5	3	20 h. afkøl.	Fischer	1970	1-21
2	Exler	0,6	1,4	-	70	50	2,5	3	hurtig afkøl. 84 dage gl.	Fischer	1970	1-21
3	Exler	0,6	1,4	17,5	70	50	2,5	3	last $\sigma'_b/3$ 197 dage gl.	Fischer	1970	1-21
4	Exler	0,56	2,7	33,8	300	150	-	18	6 h. opv.	Zoldners et al.	1973	1-104
5	Exler	0,45	3,5	42,0	300	150	-	18	6 h. opv.	Zoldners et al.	1973	1-104
6	Exler	0,78	4,8	27,5	150	75	-	-	$\Delta T_{\text{max}} = 83^{\circ}\text{C}$ 3-4 h. opv.	Abrams	1968	1-1
7	Exler	-	-	2,36	150	t	-	-	$\rho = 575 \text{ kg}/\text{m}^3$	Nielsen	1977	1-66
8	Exler	-	-	9,51	150	t	-	-	$\rho = 1550 \text{ kg}/\text{m}^3$	Nielsen	1977	1-66
9	Pimpsten	0,58	-	-	100	50	1,5	1		Harada et al.	1972	1-31



RESTTRYKSTYRKE, tilslag: kalksten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kalksten	0,65	6,7	-	203	102	-	-	-	1	10 min. opv. for hurtigt!	Zoldners	1960	1-105
2	Kalksten	0,40	-	63	-	-	0,083	528				Crispino	1972	1-15
3	Kalksten	0,40	4,9	-	203	102	-	1800				Lankard et al.	1971	1-48
4	Kalksten	0,55	8,2	27,5	150	75					$\Delta T_{\text{max}} 83^{\circ}\text{C}$ 3-4 h, opv.	Abrams	1968	1-1
5	Kalksten	0,65	4,8	-	100	50	1,5	1				Harada et al.	1972	1-31



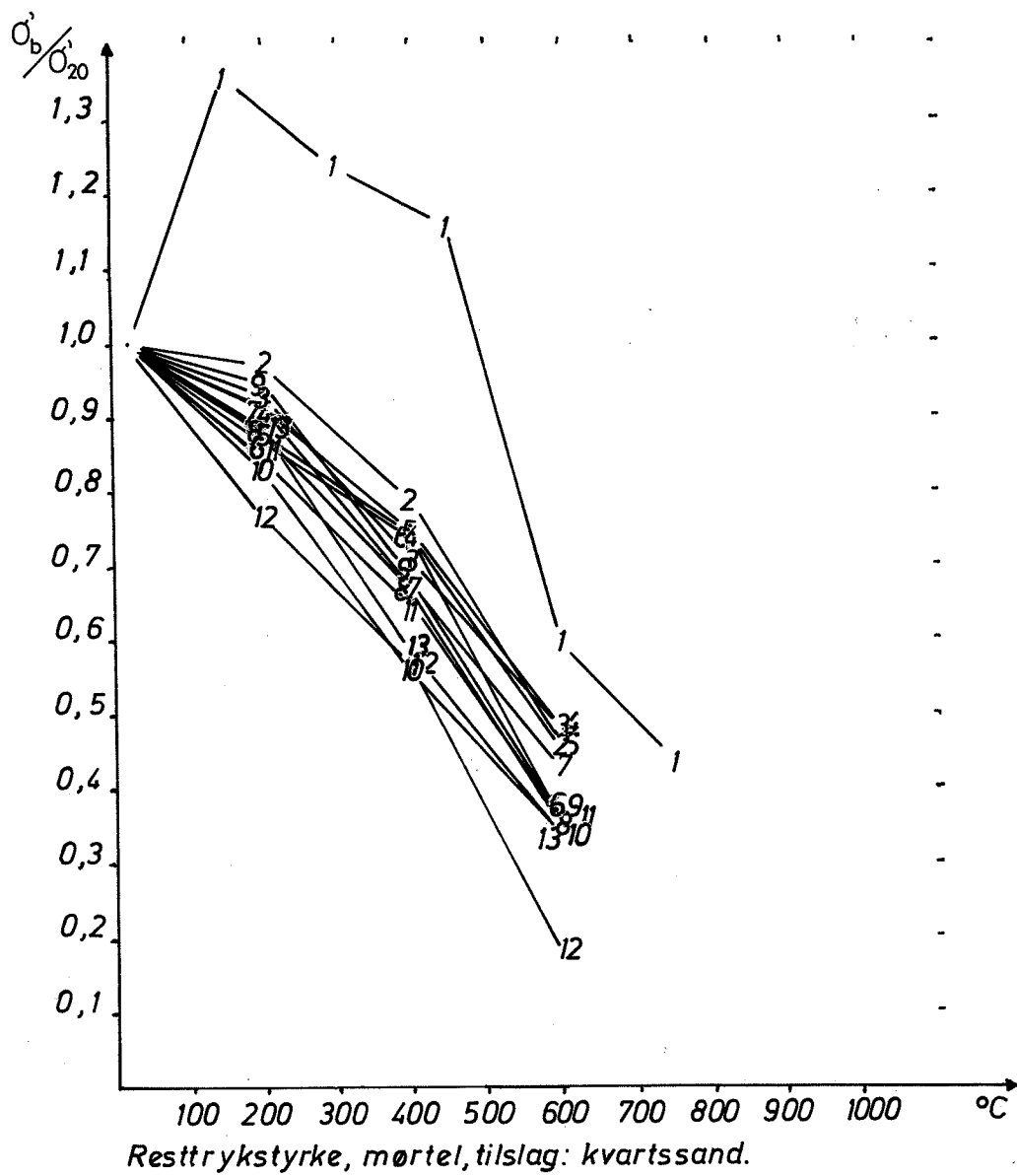
RESTTRYKSTYRKE, tilslag: kvarts/sandsten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Sandsten	0,69	6,3	-	203	102	-	1	10 min. opv. for hurtigt!	Zoldners	1960	1-105
2	Kvarts	0,60	5,1	26,4	70	50	2,5	3	7 dage gl. last: $\sigma'_b/3$	Fischer	1970	1-21
3	Kvarts	0,60	5,1	40,0	70	50	2,5	3	28 dage gl. last: $\sigma'_b/3$	Fischer	1970	1-21
4	Kvarts	0,60	5,1	50,7	70	50	2,5	3	197 dage gl. last: $\sigma'_b/3$	Fischer	1970	1-21
5	Kvarts	0,60	5,1	-	70	50	2,5	3	20 h. afkøl. 84 dage gl.	Fischer	1970	1-21
6	Kvarts	0,60	5,1	-	70	50	2,5	3	hurtig afkøl. 84 dage gl.	Fischer	1970	1-21
7	Flint	0,40	3,0	56	102	51	6	-		Malhotra	1956	1-54
8	Flint	0,45	4,5	48	102	51	6	-		Malhotra	1956	1-54
9	Flint	0,50	4,5	41	102	51	6	-		Malhotra	1956	1-54
10	Flint	0,65	6,0	29	102	51	6	-		Malhotra	1956	1-54
11	Kvarts	0,51	7,7	27,5	150	75	-	-	$\Delta T_{\text{max}} 83^{\circ}\text{C}$ 3-4 h. opv.	Abrams	1968	1-1
12	Sandsten	0,60	4,5	-	100	50	1,5	1		Harada et al.	1972	1-31



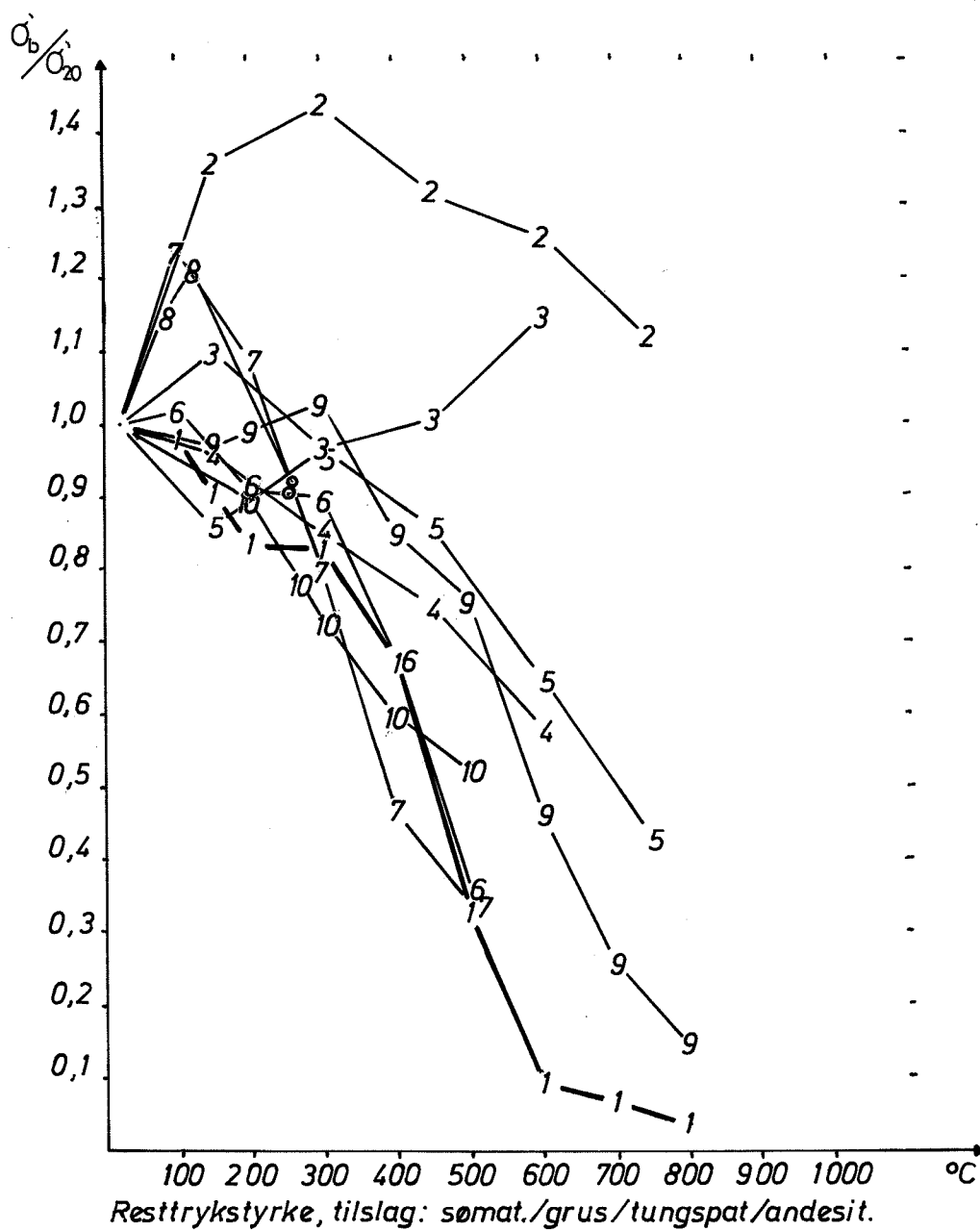
RESTTRYKSTYRKE, mørtel

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kvarts	0,60	-	-	60	30	-	-	hurtig afkøl. 7 dage gl.	Fischer	1970	1-21
2	Kvarts	0,40	3	-	60	30	4	3	hurtig afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
3	Kvarts	0,40	3	-	60	30	4	3	84 dage gl. hurtig afkøl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
4	Kvarts	0,50	3	-	60	30	4	3	hurtig afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
5	Kvarts	0,50	3	-	60	30	4	3	hurtig afkøl. 84 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
6	Kvarts	0,60	3	-	60	30	4	3	hurtig afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
7	Kvarts	0,60	3	-	60	30	4	3	hurtig afkøl. 84 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
8	Kvarts	0,40	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
9	Kvarts	0,40	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 84 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
10	Kvarts	0,50	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
11	Kvarts	0,50	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 84 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
12	Kvarts	0,60	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 7 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98
13	Kvarts	0,60	3	-	60	30	4	3	langsom afkøl. 84 dage gl.	Weigler+Fischer	1963	1-98



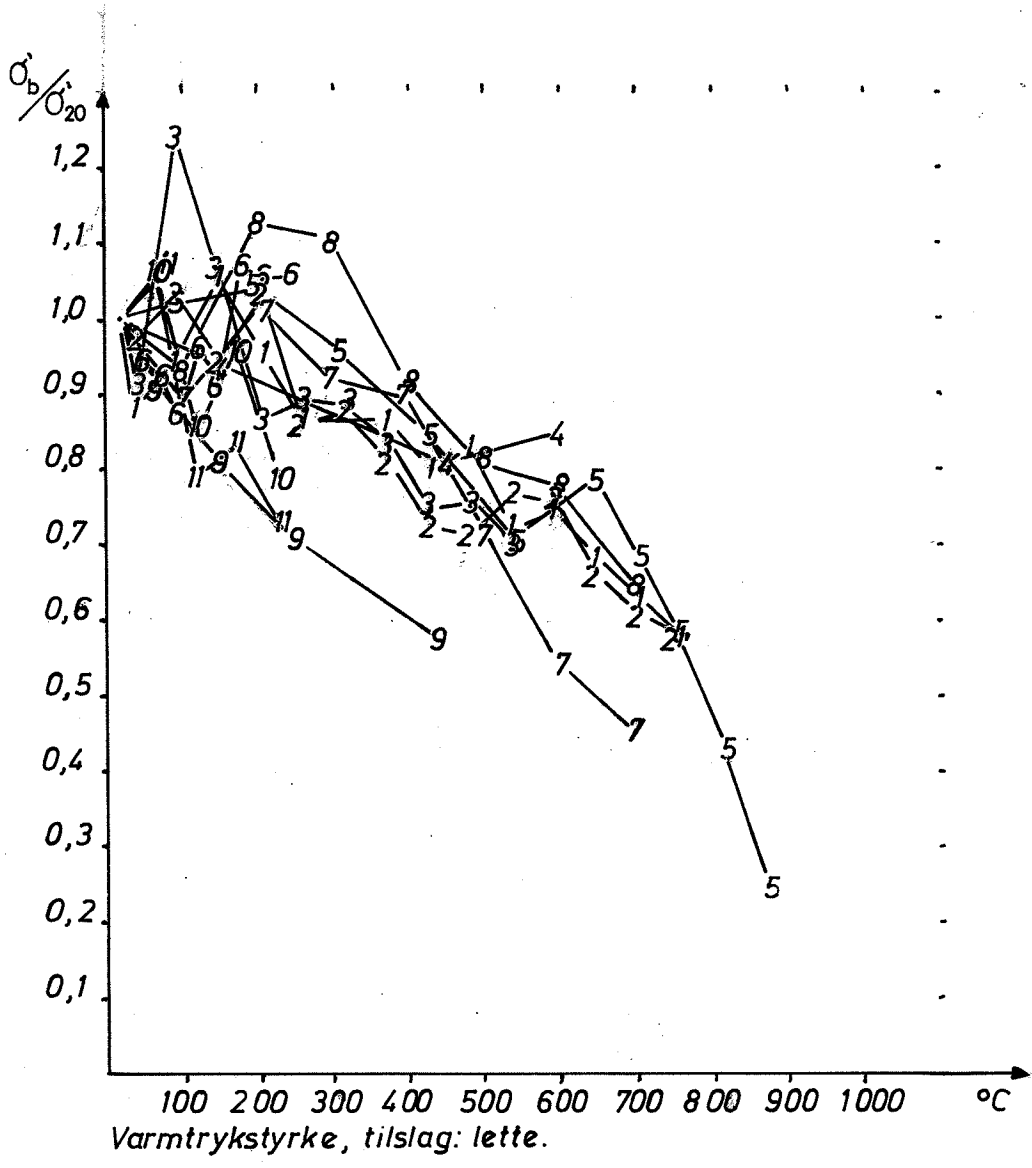
RESTTRYKSTYRKE, tilslag: sømat./grus/tungspat/andesit

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold		σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	sømat.	0,87	10	20	300	150	1	1	2	14 d.gl. prøvet 7 d. efter bra.	Hertz	1980	egen
2	tungspat	0,60	5,1	-	60	30	-	-	-	hurtig afkøl. 7 dage gl.	Fischer	1970	1-21
3	tungspat	0,60	8,7	53,3	70	50	2,5	3	3	197 dage gl. last: $\sigma_p/3$	Fischer	1970	1-21
4	tungspat	0,60	8,7	-	70	50	2,5	3	3	langsom afkøl. 197 dage gl.	Fischer	1970	1-21
5	tungspat	0,60	8,7	-	70	50	2,5	3	3	hurtig afkøl. 84 dage gl.	Fischer	1970	1-21
6	grus	-	-	26	70	t	-	6-7	6-7	2-3 h. opv.	Nekrassow	1961	1-64
7	grus	-	-	23,6	70	t	-	6-7	6-7	2-3 h. opv.	Nekrassow	1961	1-64
8	grus	0,42	5,3	-	203	102	-	1800	1800		Lankard et al.	1971	1-48
9	grus	0,62	6,8	-	203	102	-	1	1	10 min. opv. for hurtigt	Zoldners	1960	1-105
10	andesit	0,65	5,6	-	100	50	1,5	1	1		Harada et al.	1972	1-31



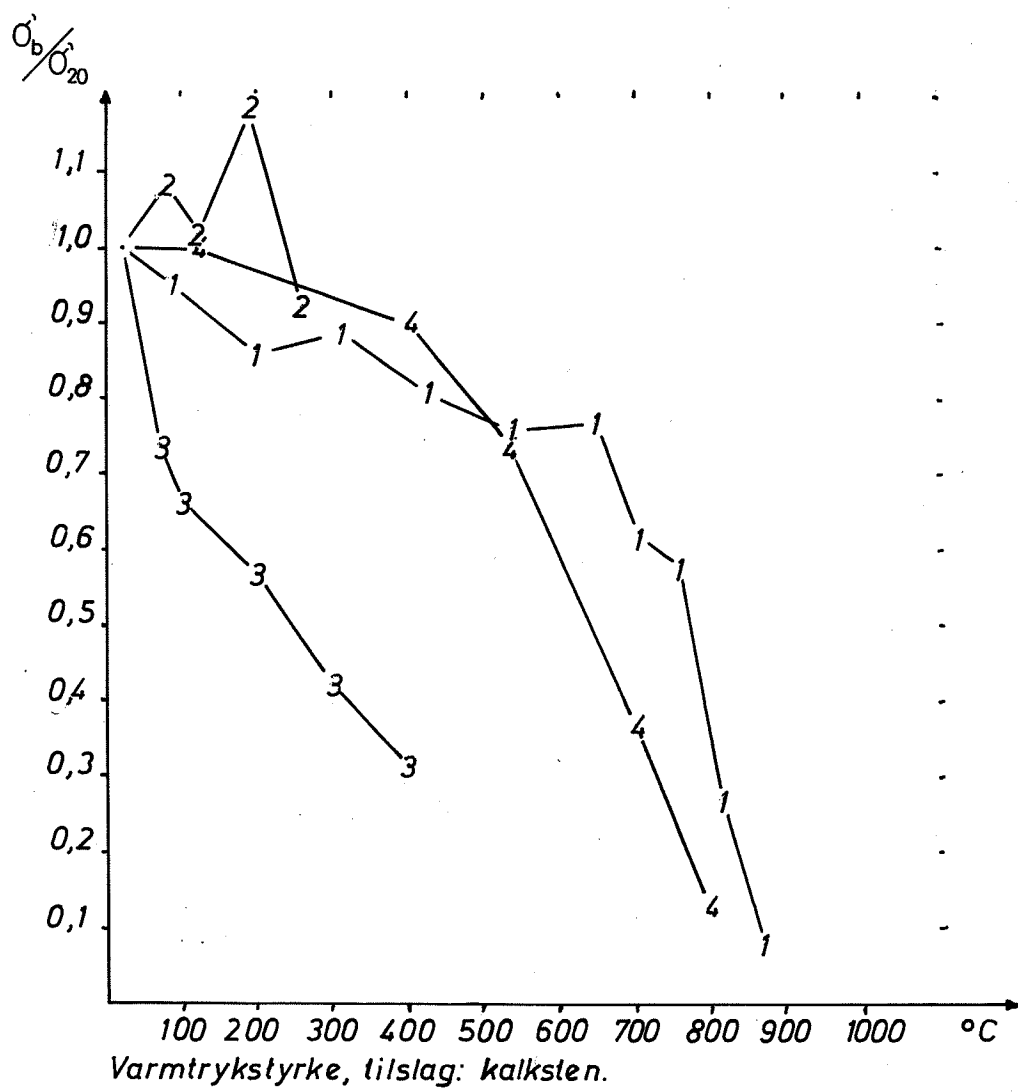
VARMPTRYKSTYRKE, tilslag: lette

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold			σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	exler	0,79	6,1	18,3	89	45	-	-	-	-	1 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
2	exler	0,79	6,1	18,3	89	45	-	-	-	-	4 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
3	exler	0,79	6,1	18,3	89	45	-	-	-	-	24 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
4	exler	0,60	1,4	17,5	70	50	2,5	3			$\sigma'_p/3$ last	Fischer	1970	1-21
5	exler	0,78	4,8	27,5	150	75	-	-			$\Delta T_{\text{max}} 83^{\circ}\text{C}$	Abrams	1968	1-1
6	exler	0,81	2,7	35,1	305	152	-	24				Saemann+Washa	1957	1-77
7	exler	0,45	2,2	38,4	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
8	exler	0,65	3,8	21,0	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
9	exler	-	-	-	-	-	-	-				Maréchal	1970	1-55
10	exler	-	-	23,6	150	t					$\rho = 575 \text{ kg/m}^3$	Nielsen	1977	1-66
11	exler	-	-	9,51	150	t					$\rho = 1550 \text{ kg/m}^3$	Nielsen	1977	1-66



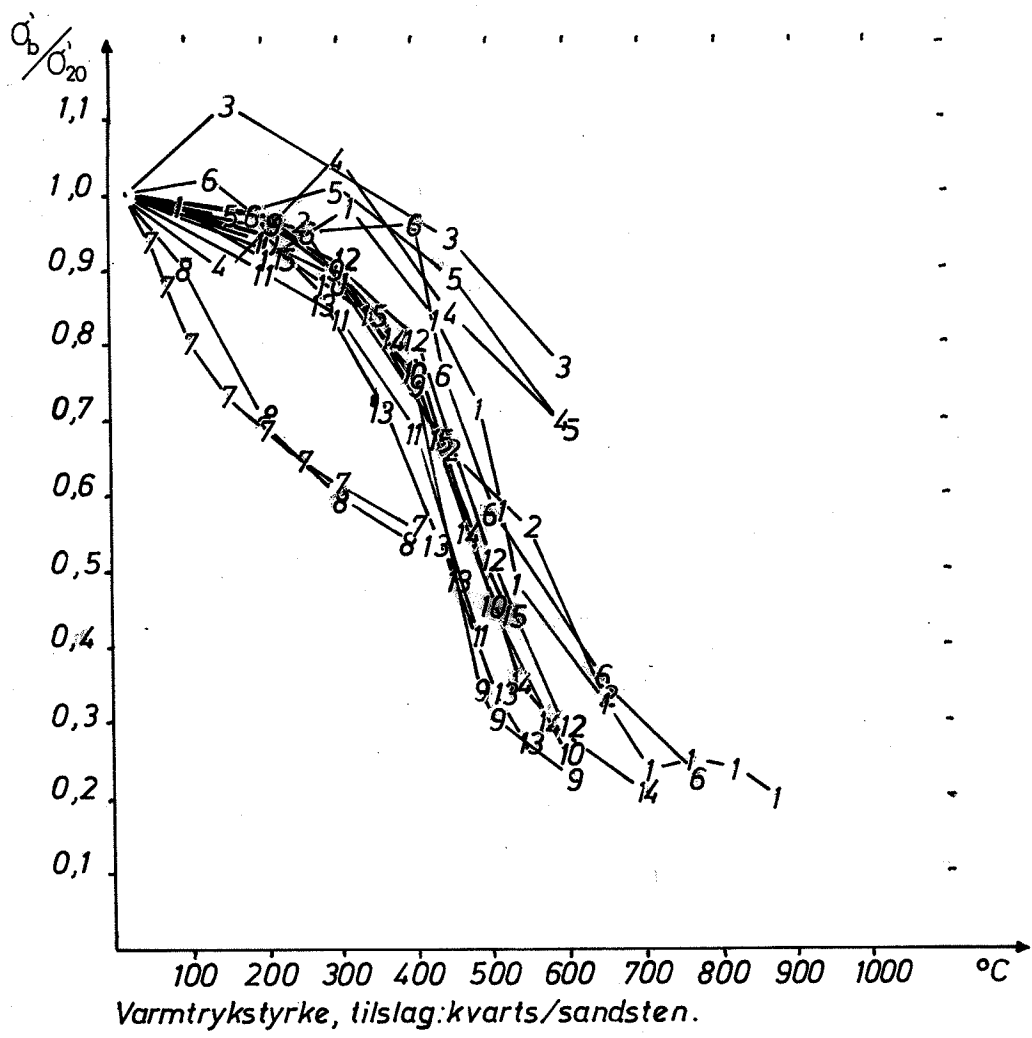
VARMPTRYKSTYRKE, tilslag: kalksten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kalksten	0,55	8,2	27,5	150	75	-	-	$\Delta T_{\text{max}} = 83^{\circ}\text{C}$ 3-4 h. opv.	Abrams	1968	1-1
2	Kalksten	0,40	4,9	-	203	102	-	1800		Lankard et al.	1971	1-48
3	Kalksten	-	-	-	-	-	-	-	Kalkstenen er kvartsholdig	Maréchal	1970	1-55
4	Kalksten	-	-	-	70	t	-	-	8 h. opv.	Graf et al.	1960	1-24



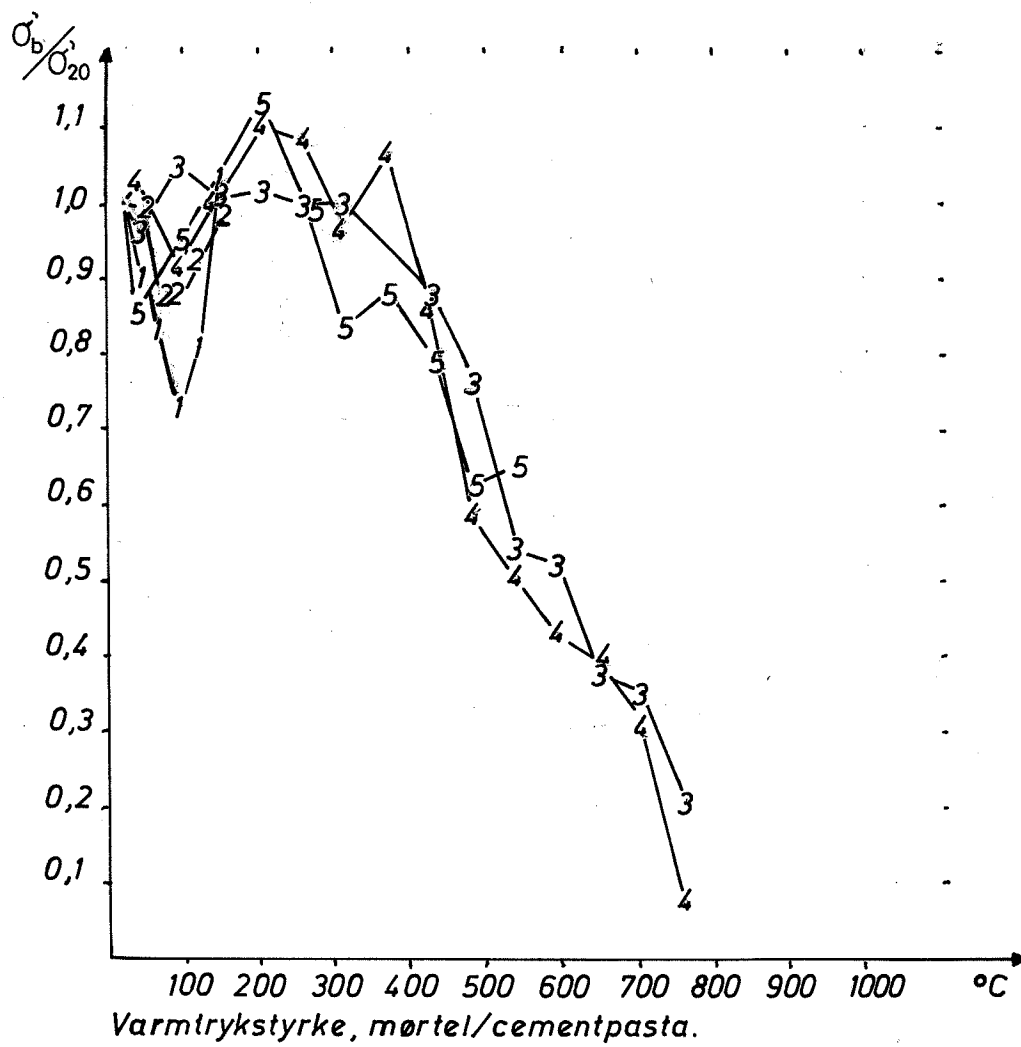
VARMTTRYKSTYRKE, tilslag: kvarts/sandsten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kvarts	0,51	7,7	27,5	150	75	-	-	-	-	$\Delta T_{\text{max}} 83^{\circ}\text{C}$ 3-4 h. opv.	Abrams	1968	1-1
2	Kvarts	0,80	-	27	300	80	2	2	-	-		Schneider	1977	1-81
3	Kvarts	0,60	5,1	26,4	70	50	2,5	3	-	-	7 dage gl. last: $\sigma'_p/3$	Fischer	1970	1-21
4	Kvarts	0,60	5,1	40,0	70	50	2,5	3	-	-	28 dage gl. last: $\sigma'_p/3$	Fischer	1970	1-21
5	Kvarts	0,60	5,1	50,7	70	50	2,5	3	-	-	197 dage gl. last: $\sigma'_p/3$	Fischer	1970	1-21
6	Kvartsit	0,60	4,9	-	150	75	5	2	-	-		Anderberg og Thelandersson	1976	1-3
7	Kvartsit	-	-	-	-	-	-	-	-	-		Maréchal	1970	1-55
8	Sandsten	-	-	-	-	-	-	-	-	-		Maréchal	1970	1-55
9	Flint	0,40	3,0	56	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
10	Flint	0,40	3,0	48	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
11	Flint	0,45	4,5	48	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
12	Flint	0,45	3,0	-	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
13	Flint	0,50	4,5	41	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
14	Flint	0,50	3,0	26	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-54
15	Flint	0,65	6,0	29	102	51	6	-	-	-		Malhotra	1956	1-56



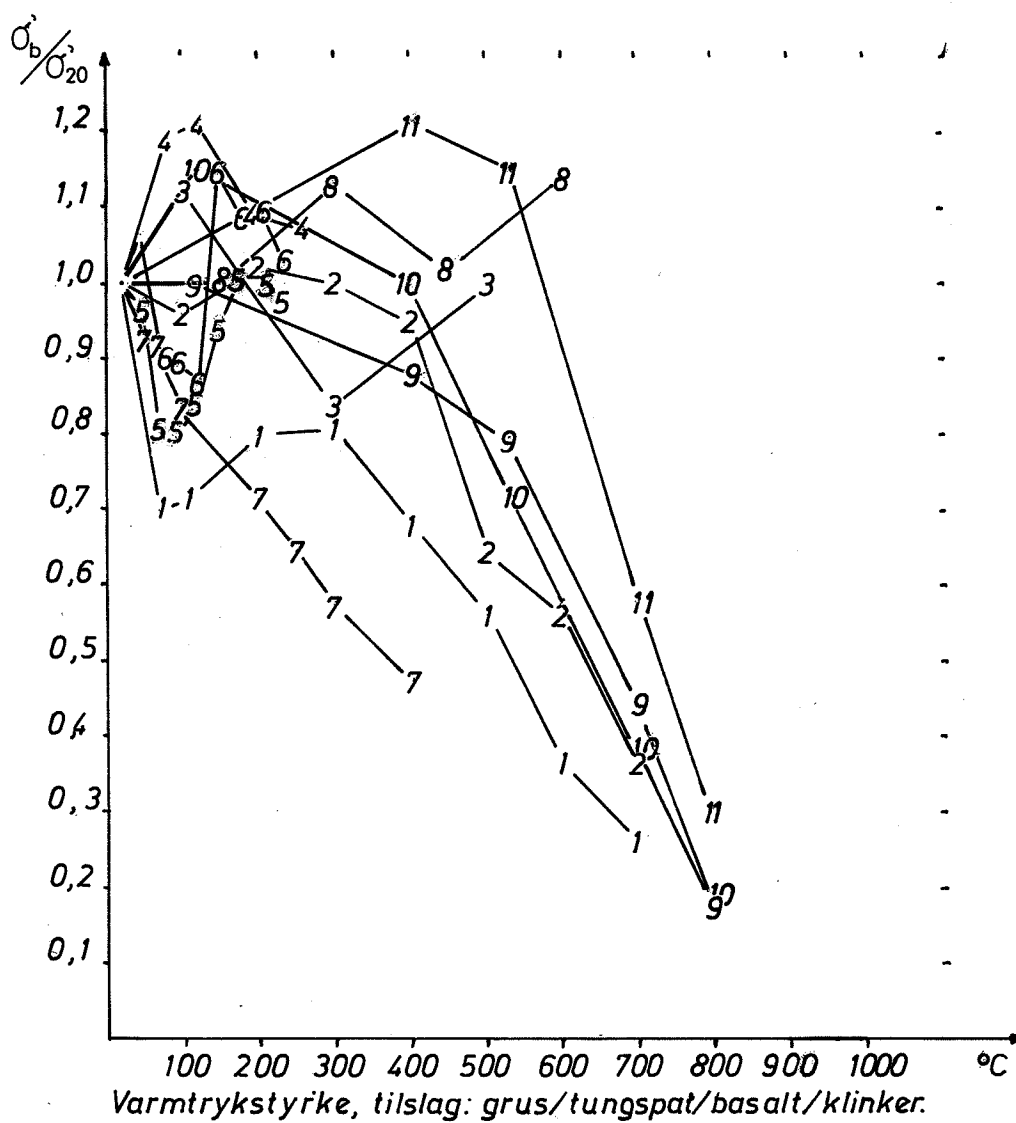
VARMTTRYKSTYRKE, mørtel og cementpasta

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Sand	0,48	2,0	43,1	152	76	-	24	Mørtel	Saemann+Washa	1957	1-77
2	Sand	0,84	4,5	17,6	152	76	-	24	Mørtel	Saemann+Washa	1957	1-77
3	Sand	0,33	0	71,8	89	45	-	-	Cementpasta 1 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
4	Sand	0,33	0	71,8	89	45	-	-	Cementpasta 4 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
5	Sand	0,33	0	71,8	89	45	-	-	Cementpasta 24 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33



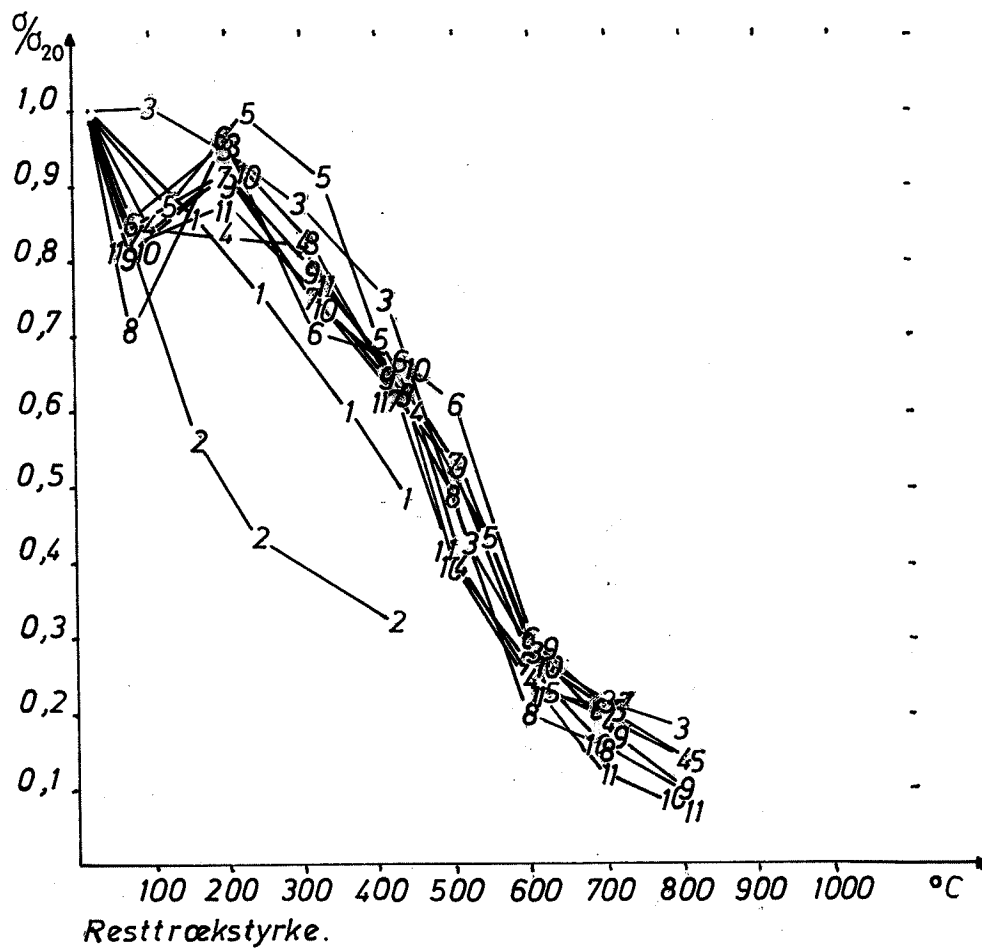
VARMPTRYKSTYRKE, tilslag: grus/tungspat/basalt/klinker

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		σ'_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Grus	0,45	3,9	47,8	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
2	Grus	0,70	5,7	23,9	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
3	Grus	-	-	26,0	70	t	-	6-7	2-3 h. opv.			Nekrassow	1961	1-64
4	Grus	0,42	5,3	-	203	102	-	1800				Lankard et al.	1971	1-48
5	Grus	0,48	5,5	43,2	305	152	-	24				Saemann+Washa	1957	1-77
6	Grus	0,84	9,8	20,1	305	152	-	24				Saemann+Washa	1957	1-77
7	Porfyr	-	-	-	-	-	-	-				Maréchal	1970	1-55
8	Tungspat	0,60	8,7	53,3	70	50	2,5	3	197 dage gl. last: $\sigma'_b/3$			Fischer	1970	1-21
9	Grus	-	-	-	70	t	-	-	8 h. opv.			Graf et al.	1960	1-24
10	Basalt	-	-	-	70	t	-	-	8 h. opv.			Graf et al.	1960	1-24
11	Klinker	-	-	-	70	t	-	-	8 h. opv.			Graf et al.	1960	1-24



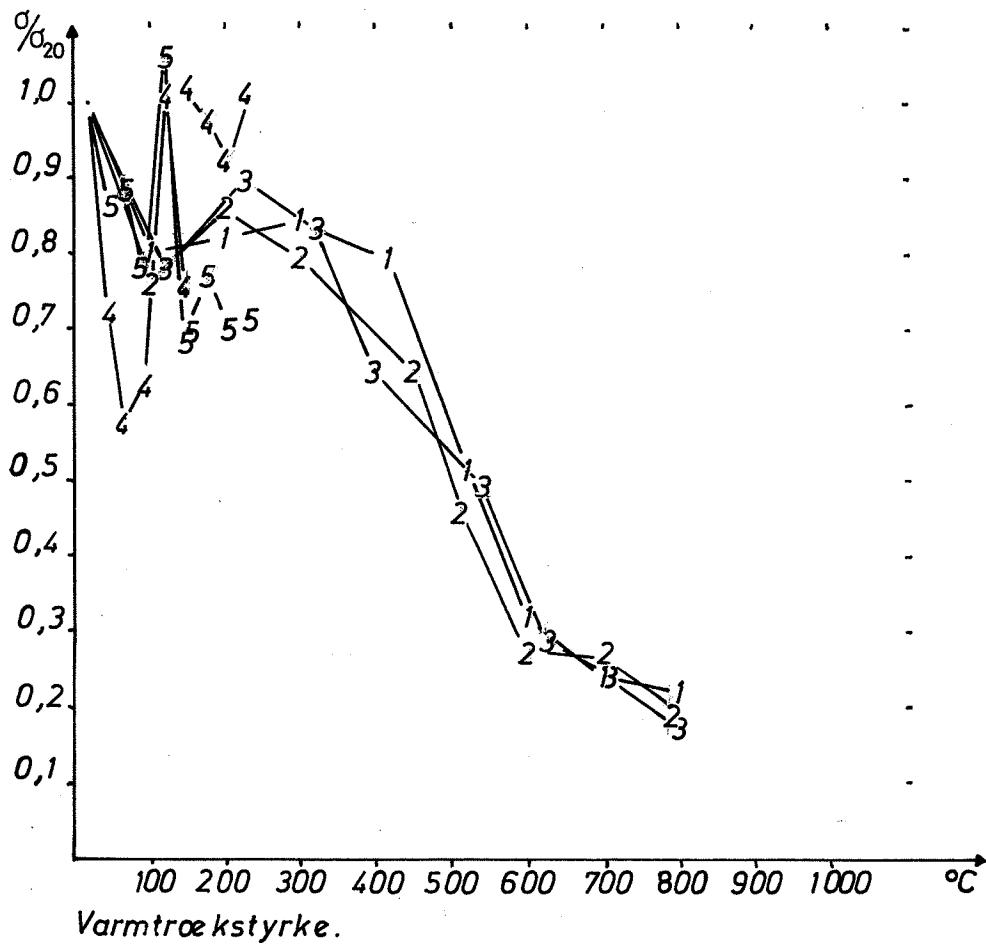
RESTTRÆKSTYRKE

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		σ_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Sandsten	0,60	4,5	-	100	50	1,5	1				Harada et al.	1972	1-31
2	Kalksten	0,65	4,8	-	100	50	1,5	1				Harada et al.	1972	1-31
3	Kvarts	0,55	3,0	3,92	188	94	1,5	2				Thelandersson	1972	1-92
4	Kvarts	0,75	4,0	2,53	188	94	1,5	2				Thelandersson	1972	1-92
5	Kvarts	0,55	3,0	3,93	188	94	12	4				Thelandersson	1972	1-92
6	Kvarts	0,50	3,0	5,38	100	50	8	4				Thelandersson	1972	1-92
7	Kvarts	0,50	3,0	5,38	100	50	15	4				Thelandersson	1972	1-92
8	Kvarts	0,50	3,0	5,38	100	50	27	4				Thelandersson	1972	1-92
9	Kvarts	0,68	4,7	4,16	100	50	8	4				Thelandersson	1972	1-92
10	Kvarts	0,68	4,7	4,16	100	50	15	4				Thelandersson	1972	1-92
11	Kvarts	0,68	4,7	4,16	100	50	27	4				Thelandersson	1972	1-92



VARMTREKSTYRKE

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		σ_{20} (MPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kvarts	0,55	3,0	3,92	188	94	1,5	2				Thelandersson	1972	1-92
2	Kvarts	0,75	4,0	2,53	188	94	1,5	2				Thelandersson	1972	1-92
3	Kvarts	0,55	3,0	3,93	188	94	12	4				Thelandersson	1972	1-92
4	-	0,48	2,0	5,14	-	-	-	24	Mørtel			Saemann+Washa	1957	1-77
5	-	0,84	4,5	2,89	-	-	-	24	Mørtel			Saemann+Washa	1957	1-77



AFSKALNING

Ved afskalning forstår man det fænomen, at større eller mindre partier af en brandpåvirket betonkonstruktions overflade sprænges af.

Dette indtræder hovedsageligt på et tidligt stadium af branden i reglen indenfor de første ca. 20 minutter, og fænomenet kan antage eksplosionsagtig karakter med store kastelængder for sprængstykkerne og ledsagelse af et højt lydtryk.

Fra perioden efter betonens genopdagelse foreligger et ret omfattende, men spredt erfaringsmateriale, begyndende med iagttagelser i forbindelse med Gary's undersøgelser omkring 1911.

Disse erfaringer har givet anledning til mange hypoteser angående afskalningens årsager.

Følgende er foreslået:

- 1) Påsprøjtning af slukningsvand
- 2) Kvartstilslag
- 3) Granit/gneistilslag
- 4) Hurtig temperaturstigning
- 5) Asymmetrisk opvarmning.
- 6) Tynde tværsnitsdele.
- 7) Meget frit vand i betonen
- 8) Lav permeabilitet
- 9) Lukkede porer med vand
- 10) Tæt armering
- 11) Udformning med hjørner og krumme overflader
- 12) Lav trækstyrke som følge af dårlige tilslag
- 13) Forspænding
- 14) Indspænding
- 15) Sammensætning af meget forskellige tværsnitstykker.

Ad. 1)

Påsprøjtning af slukningsvand angives flere steder som en mulig årsag, f.eks. Green [1-25], p. 7. Meyer-Ottens [1-59] refererer, at disse påstande kendes helt tilbage til Bernander i 1959, men at Barends i 1966 eksplicit viste, at vandpåsprøjtning ikke øgede afskalningens omfang ved sine forsøg.

Der kan således ikke være tale om en hovedårsag, men højst et fænomen, der forstærker virkningen af andre.

Ad. 2)

Meyer-Ottens [1-59] omtaler endvidere, p. 8 og p. 12, at flere forfattere, bl.a. Endell 1929, angiver overgangen fra lav- til høj-kvarts ved 573°C som afskalningsårsag, hvad man nu mener at have tilstrækkelig erfaring til at afvise.

Ad. 3)

Tilslagenes mineralogi kan derimod være sådan, at der frigøres gasarter eller vand, såsom CO₂ fra kalk, indesluttet i flint eller sandsten, og vand i flint eller forvitret feldspat og gneis.

Disse mekanismer giver afskalninger i form af små (få cm store) flager ud for yderligt liggende tilslagskorn.

På grund af flagernes eksplosionsagtige afsprængning fra overfladen betegnes de springere.

Forfatteren er bl.a. bekendt med fænomenet fra brandøvelser i betonkonstruktioner med bornholmsk granit som tilslag.

Ad. 4)

Det er velkendt, at en relativ hurtig temperaturstigning er nødvendig for at afskalning skal optræde. Anderberg [1-4] siger, p. 60, at han kun for åbningsfaktorer

$$\frac{A\sqrt{H}}{A_t} \geq 0,04 \text{ m}^{0,5}$$

og brandbelastninger $q \geq 250 \text{ MJ/m}^2$, d.v.s. ret hurtige forbrændinger, observerede afskalninger i forbindelse med sin omfattende forsøgsserie.

Alle afskalninger forekom i øvrigt mellem 15 og 20 minutter fra forsøgenes starttidspunkt.

Den hurtige opvarmning medfører såvel store temperatur- som fugtgradienter i de brandpåvirkede konstruktionsdele.

Begge dele må, som det ses af det følgende, have indflydelse på problemet.

Ad. 5)

Ved asymmetrisk opvarmning forstærkes især temperaturgradienterne, hvorved tryk - henholdsvis trækspændinger - opstår ved overfladen, henholdsvis et stykke fra denne.

Meyer-Ottens [1-59] redegør p. 14 for Saito's (1966) og Ehm's (1966) opfattelse af afskalningens opståen som følge af trykbrud i overfladezonen; men viser ved en simpel elastisk beregning, at størrelsesordenen af trykspændingerne i tosidigt opvarmede skiver selv ved overlejring med ret høje ydre trykbelastninger (14 MPa) ikke overskrider betonens to-aksede tryk-brudbetingelser.

Det forhold, at der her er regnet elastisk og altså ikke kompenseret for betonens plasticitet ved opvarmningen er på den sikre side for betragtningen.

Hertil kommer, at hypotesen ikke på nogen måde vil kunne forklare det forhold, at afskalning kun optræder når betonen indeholder fugt (over ca. 2 - og aldrig under 0,5 vægtprocent).

Trykspændingerne, forårsaget af temperaturgradienterne, må derfor antages højest at være en medvirkende årsag til afskalning.

Ad. 6)

I tynde tværsnitsdele med flersidig brandpåvirkning vil særligt store fugtgradienter kunne opbygges ved en hurtig opvarmning, da fugten her kun kan strømme til de eksponerede overflader og ikke søge indad til koldere zoner af konstruktionen. Se i øvrigt pkt. 7.

Ad. 7)

For alle tværsnit vil tilstedeværelsen af meget frit vand give anledning til store fugtgradienter ved hurtig opvarmning.

Shorter og Harmathy [1-82], p. 313, fremsatte i 1961 en teori om afskalningens forløb.

De havde noteret sig, at kun fugtholdig beton gav afskalning, og at beton, der oprindeligt havde vist afskalning ikke gjorde det efter en udtørring til en dybde af 2-3 cm fra den ydre overflade.

Ligeledes havde de bemærket, at tørre materialer ikke fik afskalning trods høje temperaturgradienter, hvorefter sluttedes, at gradienterne og de heraf følgende termiske spændinger ikke i sig selv kunne forårsage fænomenet.

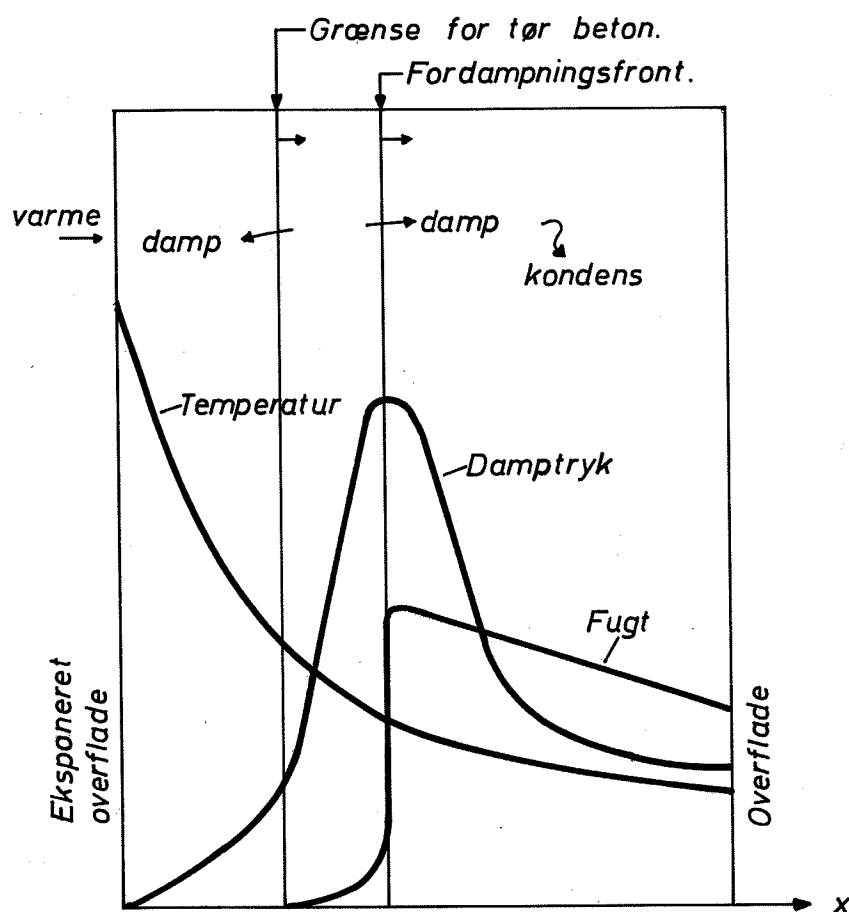
Dette parret med visuelle iagttagelser førte til en antagelse om, at en fordampningsfront parallel med den ydre overflade må trænge ind i tværsnittet i takt med temperaturstigningen.

Den dannede vanddamp søger dels ud til den eksponerede overflade, og dels ind i tværsnittet, hvor en afkøling og fortætning finder sted.

Herved dannes en meget fugtig zone indenfor fordampningsfronten. Denne zone hindrer i stadig højere grad dampens mulighed for at trænge ind i tværsnittet samtidig med, at modstanden mod strømning til den eksponerede overflade øges som følge af den tiltagende tykkelse af den tørre yderzone.

Da der, som følge af stigende temperaturforskelle mellem den eksponerede overflade og fordampningsfronten, tilføres store varmemængder, stiger det statiske damptryk i dennes niveau, hvilket medfører afskalningen.

Da energien, hidrørende fra de termiske spændinger, samtidig frigøres, bliver afskalningen eksplosiv.



Princip for varme- og fugt-forhold ved afskalning.

Ad. 8)

Teorien udbygges i Harmathy [1-36], p. 77, og det påpeges p. 81, at betonens med alderen aftagende permeabilitet vil øge risikoen for afskalning. Et forhold, der også fremhæves af Zhukov [1-114], p. 28.

Ad. 9)

En hypotese angående udløsningen af den eksplosive afskalning er fremsat af Petrov-Denisov et al. [1-116], der som en grov model betragter betonen som et materiale, der indeholder to typer porer: åbne og lukkede.

I en zone nær fordampningsfronten i retning mod den varme overflade tænkes de lukkede porer stadig at indeholde vand og mættet damp.

Efterhånden som temperaturen stiger, og damptrykket falder i de åbne porer, øges trykforskellene over porevæggene, hvilket i samvirken med temperatur- og svindspændinger medfører revnedannelser.

Herved falder trykket pludseligt i de førhen lukkede porer, og det overophedede vand koger under stærk volumenforøgelse, hvad der virker initierende på afskalningen.

Meyer-Ottens [1-59] behandler p. 23-28 dannelsen af trækspændinger som følge af dampstrømningen mod overfladen ud fra betragtningsmåder, fremsat af Waubke [1-95], og finder at disse trækspændinger kan nå samme størrelsesorden som brudspændingerne for betoner med over ca. 3 vægtprocent fugtindhold.

Desuden fås, at beton af forskellig tryk/trækstyrke tillige har forskelle af samme størrelsesorden i porøsitet, hvorfor styrkeforskellene ikke skulle give sig udslag i forskellige afskalningsforhold.

Dette modsiges dog til dels af Zhukov [1-114], p. 28, der finder, at en beton med granittilslag på 40 MPa giver afskalning over 3 vægtprocent fugt mod 4 vægtprocent for en på 20 MPa.

Der kan på det foreliggende grundlag ikke herske tvivl om, at trækspændinger i betonen som følge af dampens strømning mod overfladen er den væsentligste årsag til afskalningsfænomenet.

To-aksede, termiske trykspændinger nær betontværsnittets overflade vil mindske trækstyrken for påvirkninger med retning vinkelret på overfladen, og således medvirke til afskalning.

Ad. 10)

En tæt armering (Meyer-Ottens [1-59], p.16) vil ligesom grove tilslag (Bogoslovskij og Roitman [1-113]) på grund af sin termiske udvidelse bidrage til dannelse af trækspændinger i cementpastaen og derved medvirke til afskalning.

Ad. 11)

Udformninger med udadrettede hjørner og krumme overflader vil bevirke, at de termiske trykspændinger, orienteret parallelt med disse overflader tilsammen resulterer i udadrettede kraftkomposanter, der forøger de trækspændinger, som dampen forårsager i tværsnittet.

Hertil kommer, at opvarmningen af sådanne zoner er flersidig og derfor særlig hurtig. Dette er grunden til, at brandpåvirkede konstruktioner meget ofte har afsprængninger af hjørner og kanter på søjler og bjælkeundersider.

Ad. 12)

Hvis tilslagene f.eks. på grund af let spaltelighed nedsætter betonens trækstyrke, vil dette selvsagt fremme afskalning, ligesom trykspændinger, orienteret langs overfladen - som tidligere omtalt - kan reducere trækstyrken på tværs og dermed øge afskalningsrisikoen.

Ad. 13)

Effekten heraf er dog særlig stor, hvis trykspændingerne, hidrørende fra temperaturforskelle over profilet, bliver overlejret med ydre trykbidrag fra belastning eller forspænding. Alternativt: tryk, opstået som følge af hindrede termiske udvidelser i forbindelse med indspændinger af hele konstruktionselementer eller blot indspændinger af mindre områder som følge af samvirken mellem tværsnitsdele af stærkt varierende dimensioner inden for det enkelte konstruktionselement.

Ad. 14)

Ad. 15)

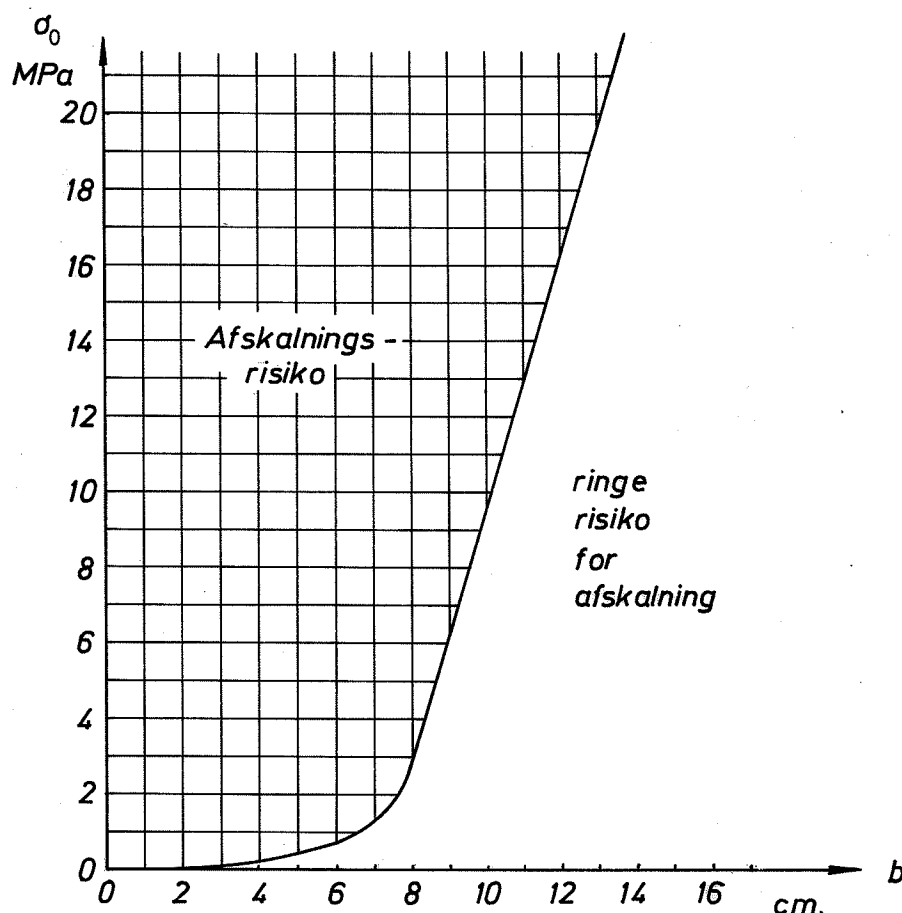
Disse effekter har klart vist sig ved forsøg, hvor f.eks. kroppe i strengbetondragere helt bortsprængtes i de områder, hvor de største trykspændinger optræder, hvad enten det var for oven midt på en simpelt understøttet bjælke eller for neden over en mellemunderstøtning for en kontinuert.

sammenfatning

Sammenfattende kan man sige, at hovedårsagen til de større afskalninger må være påvirkningen fra tryk og strømning af den dannede vanddamp, og at andre fænomener kan optræde, som forstærker denne virkning.

Forholdsreglerne herimod kan derfor opdeles i to kategorier. Nogle, der modvirker selve dampproblemet og andre, som reducerer indflydelsen af de medvirkende årsager.

Til første kategori hører udtørring af konstruktionerne, herunder beskyttelse mod unødige fugtpåvirkninger. Anvendelse af en porøs beton, eventuelt kun som et overflade-



Overslagsdiagram for afskalningsrisiko af dobbeltsidig brandpåvirket tværsnit med tykkelse b og normalspænding σ_0 . Efter Meyer-Ottens [1-59].

lag, der under branden kan isolere. Direkte isolering og beklædning af overfladen, så temperaturstigningen forløber langsommere. Selvom en tværsnitsforøgelse ikke vil have helt samme effekt, da afskalning kan foregå successivt i flere lag, må store tværsnitstykker dog generelt anses for gunstige i denne forbindelse.

Dels tilsikres, at opvarmningen kun sker fra én side, dels vil profilet have plads til dampindtrængning, og dels kan den kraftige armering lægges så dybt (mere end ca. 3-4 cm), regnet fra overfladen, at den ikke vil fremme afskalningen.

Hertil kommer, at det ofte vil være langt billigere at øge dimensionen på selve konstruktionselementet, end at skulle beklæde det i en særskilt arbejdsproces.

Sammenstøbning med særlige overfladematerialer, såsom glasfiberarmeret beton (Jensen og Vesterlørkke [1-43]), viser sig at give en vis isolerende effekt, men tætheden af en sådan skal kan bevirke, at den slår fra, med mindre dampen i profilet kan bortledes til anden side.

En højere trækstyrke af betonen vil naturligvis være en mulig foranstaltning forudsat, at den ikke samtidig sænker porøsiteten.

Indstøbning af overfladearmering til aflastning af cementpastaen er en velkendt mulighed. Stålfiberbeton kunne også forekomme som et rimeligt alternativ, f.eks. som et overfladelag.

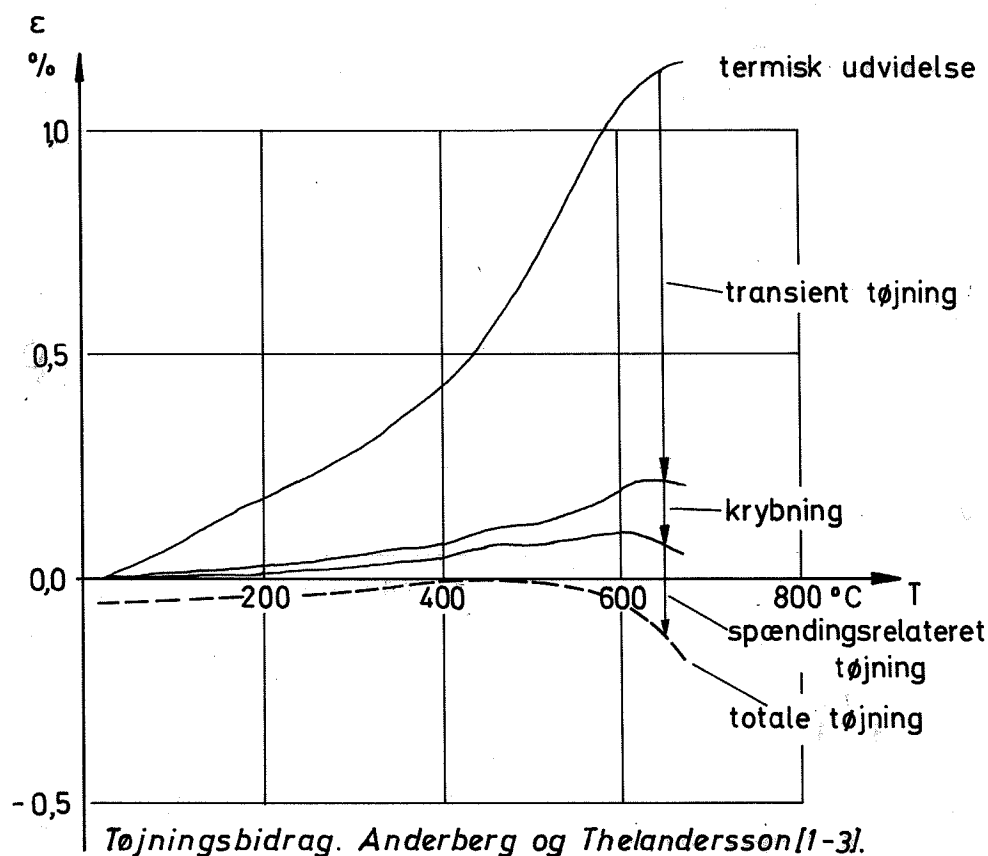
Af forholdsregler, der hindrer effekten af de medvirkende faktorer, kan nævnes:

Anvendelse af affasede hjørner og tværsnit uden for store forskelle i tykkelser mellem de enkelte dele.

Undgåelse af yderligtliggende kraftig armering må ligesom valg af hensigtsmæssige, grove tilslag anbefales.

Endelig bør konstruktionerne i vid udstrækning udformes, så de kan udvide sig ved varmepåvirkning og termiske trykkræfter undgås. Så små forspændingsgrader som muligt må anbefalēs /. Delvis forspænding vil med andre ord også ud fra denne synsvinkel frembyde fordele.

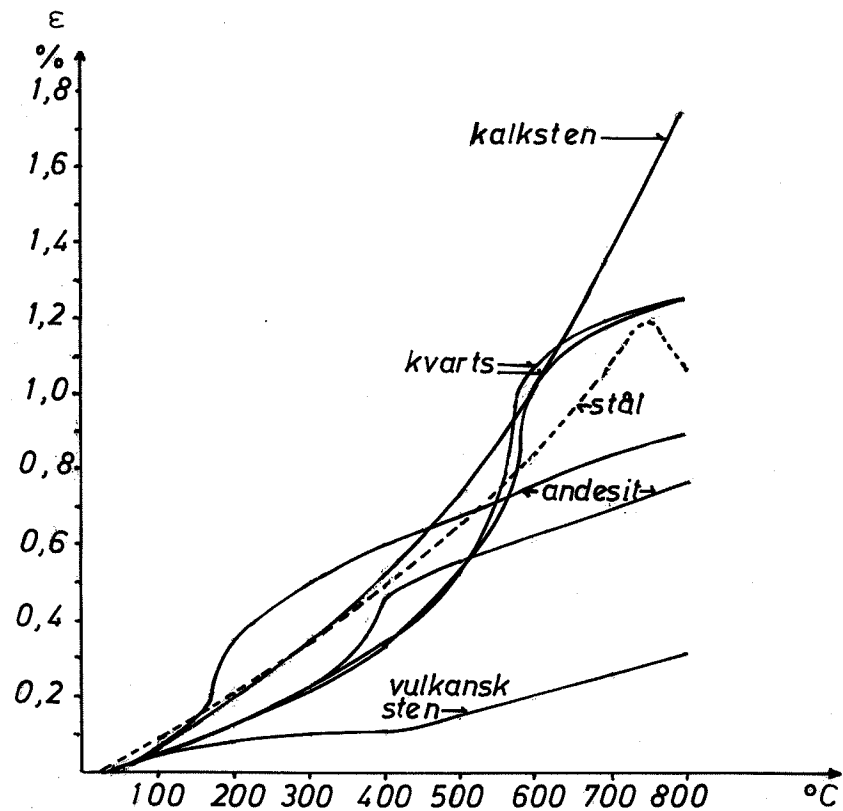
DEFORMATIONSFORHOLD FOR BRANDPÅVIRKET BETON



Betonens deformationsforhold under og efter varmpåvirkning har været ofret ganske megen opmærksomhed i den foreliggende litteratur, hvorfor behandlingen af emnet søges begrænset i denne fremstilling.

Som allerede omtalt i afsnittet om belastningens betydning for styrkeudviklingen er en konstitutiv model for betonens samlede tøjning opstillet hos Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 52, som en sum af fire tøjningsbidrag:

- 1) Den termiske tøjning, der medtager termisk udvidelse som følge af tilslagenes udvidelse, revnedannelse samt svindforhold
- 2) Den momentane spændingsrelaterede tøjning, hidrørende fra arbejdskurven ved den temperatur, hvor belastningen finder sted, og for små belastninger tilnærmelsesvis findes via det temperaturafhængige elasticitetsmodul



Lineær udvidelse af tilslag og stål. Harada et al. [1-31].

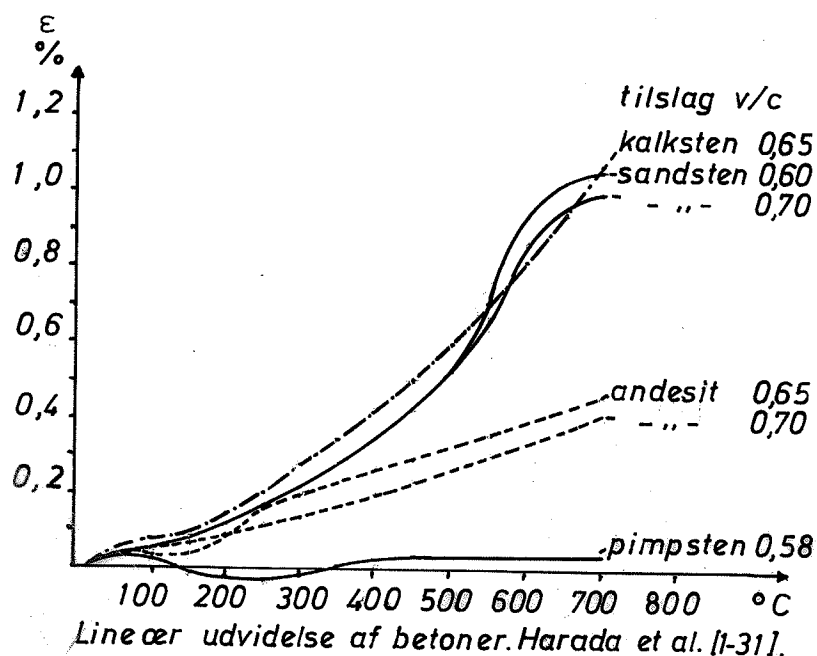
- 3) Krybetøjningen, der afhænger af belastningstiden ved konstant spænding og temperatur
- 4) Den transiente tøjning, som fremkommer ved opvarmning under konstant belastning, og som meget vel kan skyldes en forspændingseffekt af tilslagene og heraf følgende reduktion af den termiske udvidelse.

Termisk tøjning

Tilslagernes art har naturligvis afgørende indflydelse på den termiske udvidelse. Som en illustration er vist udvidelsesforhold for diverse materialer ifølge en japansk undersøgelse, samt udvidelsesforhold for betoner med forskellige tilslag.

Andre undersøgelser viser ret store afvigelser fra de her opgivne kurver, i særdeleshed for kalksten, hvis kvalitet og egenskaber varierer stærkt med lokaliteten.

Hertil kommer, at cementpastaens alder og fugtindhold er af betydning for svindet og dermed den samlede termiske udvidelse.



E-modul

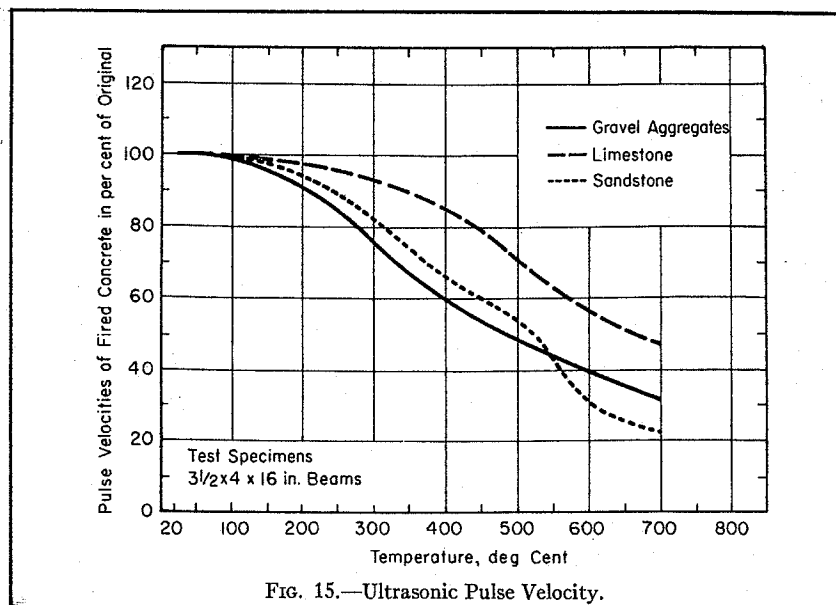
Når det gælder den øjeblikkelige spændingsafhængige deformation, har interessen hovedsagelig koncentreret sig om elasticitetsmodulet og dets variation med den maksimale temperatur, og kun i mindre omfang kendes hele arbejdskurver.

I de tidligere afsnit er betonens elasticitets- og styrkeforhold samt de faktorer, der har indflydelse herpå, behandlet parallelt.

54 kurver fra litteraturen er systematiseret og er på de følgende sider optegnet i ens koordinatsystemer. Der skelnes mellem tilslagsmaterialer og hvorvidt, der prøves i varm tilstand eller efter afkøling, da disse forhold - jfr. de foregående diskussioner - er af særlig betydning for resultaterne.

Andre væsentlige oplysninger er for hver kurve søgt anført i skemaform, såfremt den pågældende reference meddeler sig derom. Mange resultater offentliggøres desværre med mangelfulde beskrivelser af forsøgsomstændighederne.

Specielt henledes her opmærksomheden på nogle målinger af Zoldners [1-105], p. 1106.



Gengivelse af de ofte misbrugte kurver fra Zoldners [1-105].

Disse kurver gengives ofte i sammenfatninger og lærebøger (f.eks. Pettersson og Ödeen [1-69], p. 89), som det dynamiske E-moduls variation med temperaturen.

Imidlertid afbilder kurverne pulshastighedens variation, og da E-modulet er proportional med kvadratet på pulshastigheden, som Zoldners også gør opmærksom på i artiklen, begås derved en fejl.

I denne fremstilling er kvadratet på pulshastighedsreduktionerne derfor medtaget som reduktioner af det dynamiske E-modul.

I forbindelse med arbejdet angående armeringsståls vedhæftning (licentiattrapportens tredje del) er gennemført en serie målinger af det statiske elasticitetsmodul og Poissons forhold for en beton af rapidcement og danske sø-materialer $d_{\max} = 16$ mm, $\sqrt{v/c} = 0,87$, tilslag/cementforhold (t/c) = 10 (jfr. i øvrigt 3 del, p. 3-58).

3 cylinderprøvelegemer med diameter 15 cm og højde 30 cm opvarmedes i en alder af 14 døgn med $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ til den maksimale temperatur, som blev holdt i 2 timer, hvorpå afkøling med hastighed ikke hurtigere end $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

7 døgn efter brændingen trykprøvedes de 3 brændte cylindre samt 2 ikke-brændte referencecylindre i en Amsler 250 t presse.

Forud herfor var hver cylinder pålimet 4 stk. 80 mm strain-gages med gagefaktor $k = 2,27$, parvist serieforbundne. Det ene par placeredes diametralt midt på cylinderens krumme overflade og orienteret efter cylinderens rette frembringere. Det andet par placeredes tilsvarende blot orienteret vinkelret på frembringerne.

Der optegnedes kurver for længde- og tværtøjning som funktion af trykspændingen, hvoraf E-modul og Poissons forhold fandtes som hældninger af begyndelsestangenterne.

Der foretoges 6 brændinger til maksimale temperaturer, der varierede med 100°C spring til 600°C , hvorved ialt 30 prøvelegemer blev omfattet af serien.

Resultaterne fremgår af den viste tabel og er optegnet særskilt (foruden optegningen i forbindelse med sammenstillingen af måleresultater fra forskellige referencer).

Der ses som ventet et kraftigt fald i rest-E-modulet med temperaturen. Faldet er betydeligt stærkere end faldet i trykstyrke, hvad der indicerer en kraftig forøgelse af materialets brudtøjning.

Dette indebærer, at plastiske betragtningsmåder i højere grad kan tillades på de brandskadede konstruktioner, end under normale forhold.

Variationen i E-modulet med temperaturen ses at være meget jævn, og kurven har ikke den for trykstyrken af samme materiale så karakteriske vendetangent ved mikrorevnernes fremkomst omkring 300°C .

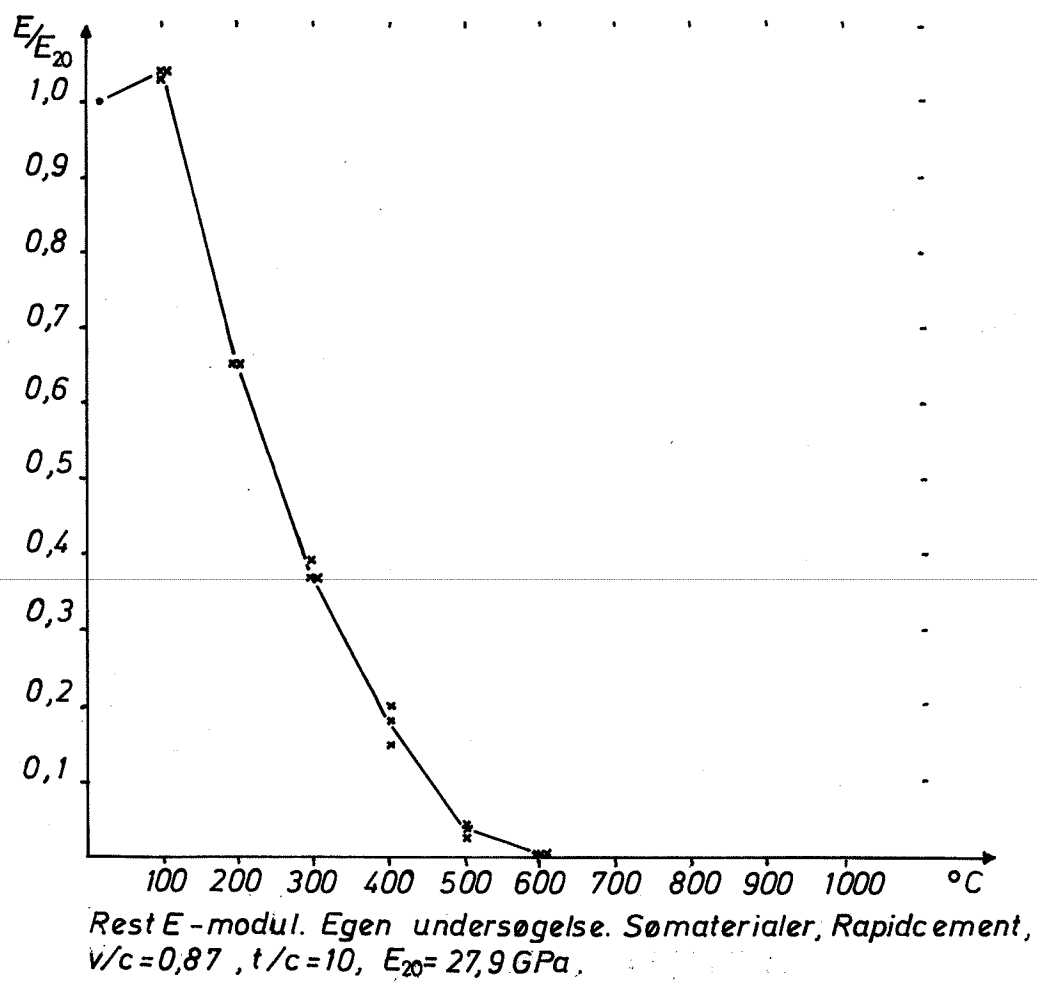
Det lokale maksimum ved 100°C kan være tilfældigt, eftersom et maksimum også forekommer for trykstyrken af de samme prøver, hvorimod det ikke optræder for middelværdier af trykstyrker for et større antal prøver.

En del af forklaringen kunne også ligge i den omstændighed, at E-modulen for beton udvikler sig langsommere med tiden umiddelbart efter støbningen, end trykstyrken.

En resthydratisering ved 100°C kan derfor meget vel tænkes at have større effekt for E-modul, end for trykstyrke af så relativt friske prøver, som der her er anvendt.

$^{\circ}\text{C}$		100	200	300	400	500	600
Støbe- dato		20/9	19/9	13/9	18/9	3/9	17/9
E_{kold}	1	28,7	29,5	27,1	29,5	28,7	27,1
	2	26,4	29,5	27,1	27,1	30,2	23,9
$\bar{E}_{\text{kold}}$		27,5	29,5	27,1	28,3	29,4	25,5
$E_{\text{brændt}}$	3	28,7		10,6	4,18	0,77	0,15
	4	28,2	19,3	10,0	5,12	1,29	0,14
	5	28,7	19,3	10,0	5,70	1,11	0,10
$\bar{E}_{\text{brændt}}$		28,5	19,3	10,2	5,00	1,06	0,13
ν_{kold}	1	0,171	0,182	0,135	0,176	0,143	0,135
	2	0,200	0,176	0,135	0,162	0,163	0,143
$\bar{\nu}_{\text{kold}}$		0,186	0,179	0,135	0,169	0,153	0,139
$\nu_{\text{brændt}}$	3	0,183		0,085	0,067	0,125	0,236
	4	0,163	0,154	0,080	0,082	0,064	0,258
	5	0,160	0,154	0,088	0,091	0,071	0,165
$\bar{\nu}_{\text{brændt}}$		0,169	0,154	0,084	0,080	0,087	0,220
σ'_{kold}	1	18,6	17,7	18,5	17,1	19,9	14,9
	2	17,9	17,7	18,4	16,4	20,2	13,0
$\bar{\sigma}'_{\text{kold}}$		18,3	17,7	18,5	16,8	20,0	14,0
$\sigma'_{\text{brændt}}$	3	19,1		14,4	11,6	6,24	1,20
	4	19,5	14,7	14,2	11,6	8,91	1,26
	5	18,9	14,2	14,1	11,4	6,38	1,33
$\bar{\sigma}'_{\text{brændt}}$		19,2	14,5	14,2	11,5	6,51	1,26
$E/\bar{E}_{\text{kold}}$	3	1,04		0,391	0,148	0,026	0,006
	4	1,03	0,654	0,369	0,181	0,044	0,005
	5	1,04	0,654	0,369	0,201	0,038	0,004
$\bar{E}/\bar{E}_{\text{kold}}$		1,04	0,654	0,376	0,177	0,036	0,005
$\nu/\bar{\nu}_{\text{kold}}$	3	0,984		0,630	0,396	0,817	1,70
	4	0,876	0,860	0,593	0,485	0,418	1,86
	5	0,860	0,860	0,652	0,538	0,464	1,19
$\bar{\nu}/\bar{\nu}_{\text{kold}}$		0,909	0,860	0,622	0,473	0,569	1,58
$\sigma'_{\text{br}}/\sigma'_{\text{kold}}$	3	1,04		0,778	0,690	0,312	0,086
	4	1,06	0,831	0,768	0,690	0,346	0,090
	5	1,03	0,802	0,762	0,679	0,319	0,095
$\bar{\sigma}'_{\text{br}}/\bar{\sigma}'_{\text{kold}}$		1,05	0,816	0,768	0,685	0,326	0,090

Resultater fra måling af elastiske konstanter.



Poissons forhold

For Poissons forhold iagttages et fald indtil 400°C , hvorpå værdien stiger specielt over 500°C .

Stigningen er naturligvis et udslag af dannelsen af de større revner, som vil åbne sig i retning på tværs af trykretningen. Selv om spredningen på måleresultaterne som følge heraf øges over de 400°C , må det principielt af hensyn til anvendelserne være rigtigt at medtage denne effekt frem for f.eks. at anvende små gages mellem de større revner.

Faldet på kurvens første del må hænge sammen med det tiltagende træk i cementpastaen og tryk i tilslagene, som pastaens svind medfører op til $300-400^{\circ}\text{C}$, og som i øvrigt giver den højere klang.

Jo højere den maksimale temperatur bliver i området, jo større del af den samlede trykbelastning på et snit vil da optages ved aflastning af træk i cementpastaen, og jo mindre tværudvidelse fås af kompositmaterialet.

Faldet i Poissons forhold er også set af Philleo [1-74], men fremgår ikke klart af Cruz [1-16], da man her har beregnet værdierne ud fra E- og G-modulerne, hvorved målefejlene herfra forstørres væsentligt.

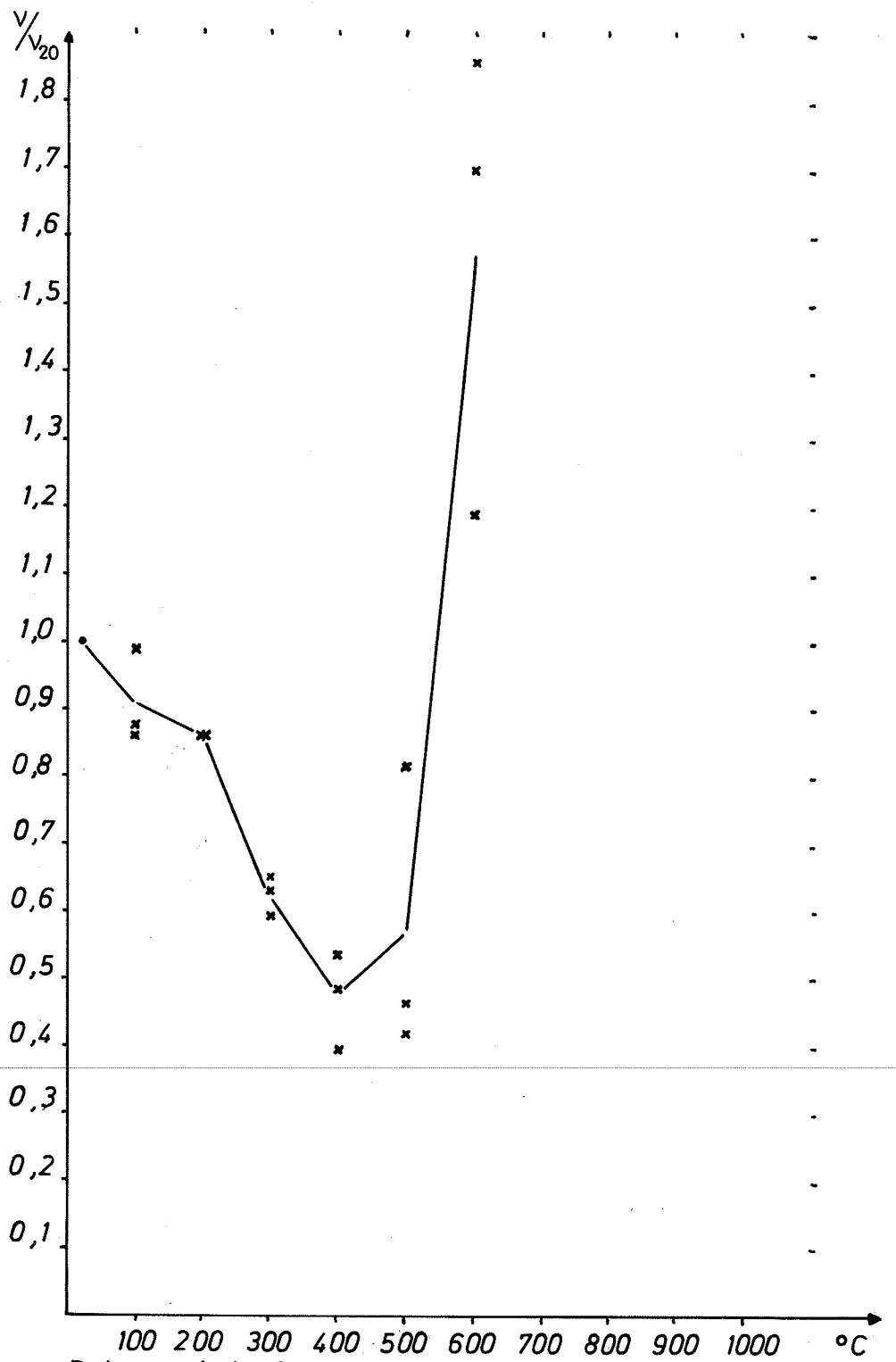
Derimod finder Maréchal et relativt fald af samme størrelsesorden ved 400°C , som det her anførte, og viser at dette fald er ens i varm som i afkølet tilstand.

Maréchals kurve forekommer mere jævn end forfatterens, men er stærkt påvirket af fugt i betonen i ormdet mellem 20 og 100°C , hvor et maksimum forekommer.

Ved gentagende opvarmningscykler observerer Crispino [1-15], p. 452 og 461, aftagende værdier af Poissons forhold omkring 110°C , men øgede værdier ved $300-500^{\circ}\text{C}$, og forklarer dette som et udslag af revnedannelsen.

$^{\circ}\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800
Støbe- dato		7/8	1/8	8/8	31/7	6/8	2/8	26/7
$^{\circ}/\text{oo}$	0	0	-4,4	0	3,3	13,3	13,3	33,3

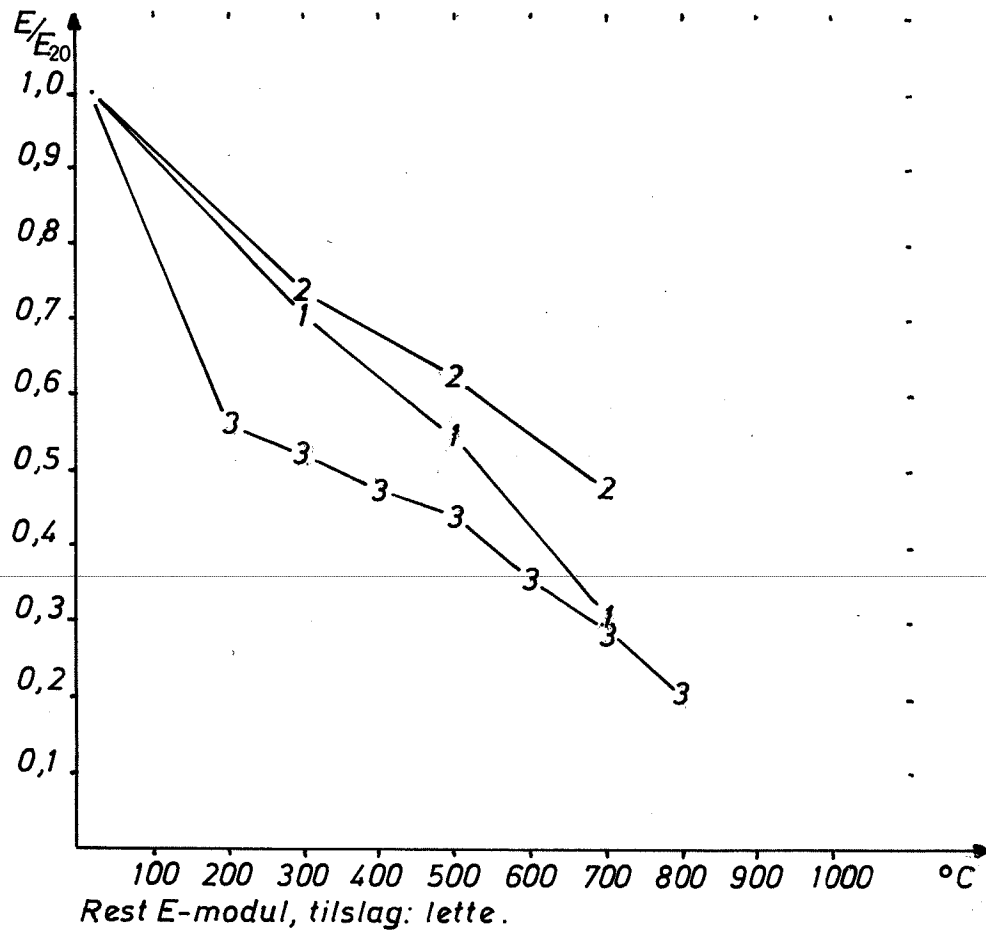
Lineær forlængelse af egne cylinderprøvelegemer
(såvel højde, som to diametre for tre cylindre)



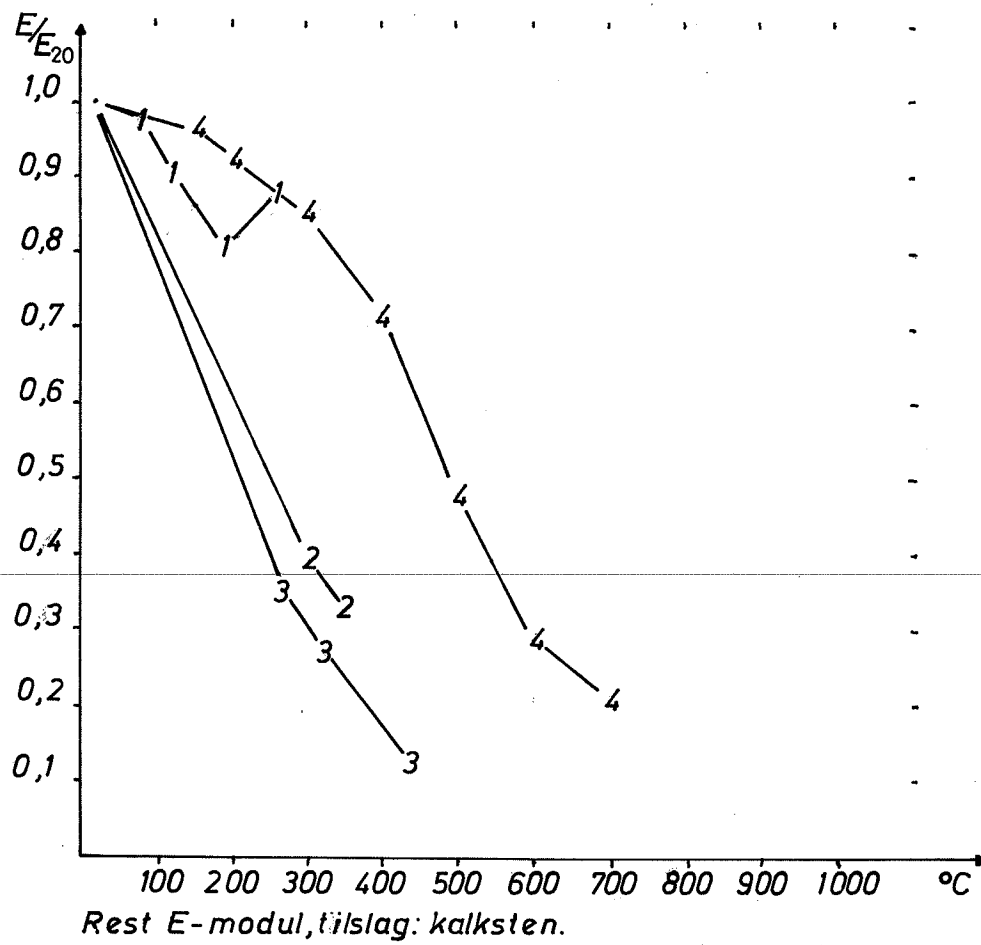
Poissons forhold, restvoerdi, Egen undersøgelse. Sømaterialer,
 Rapidcement, $v/c=0,87$, $t/c=10$, $v_{20}=0,16$.

REST E-MODUL, tilslag:lette

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Exler	0,45	3,5	-	-	-	-	18	6 h. opv. E-dyn,prismer	Zoldners+Wilson	1973	1-104
2	Exler	0,56	2,7	-	-	-	-	18	6 h. opv. E-dyn,prismer	Zoldners+Wilson	1973	1-104
3	Pimpsten	0,58	-	-	100	50	1,5	1		Harada et al.	1972	1-31

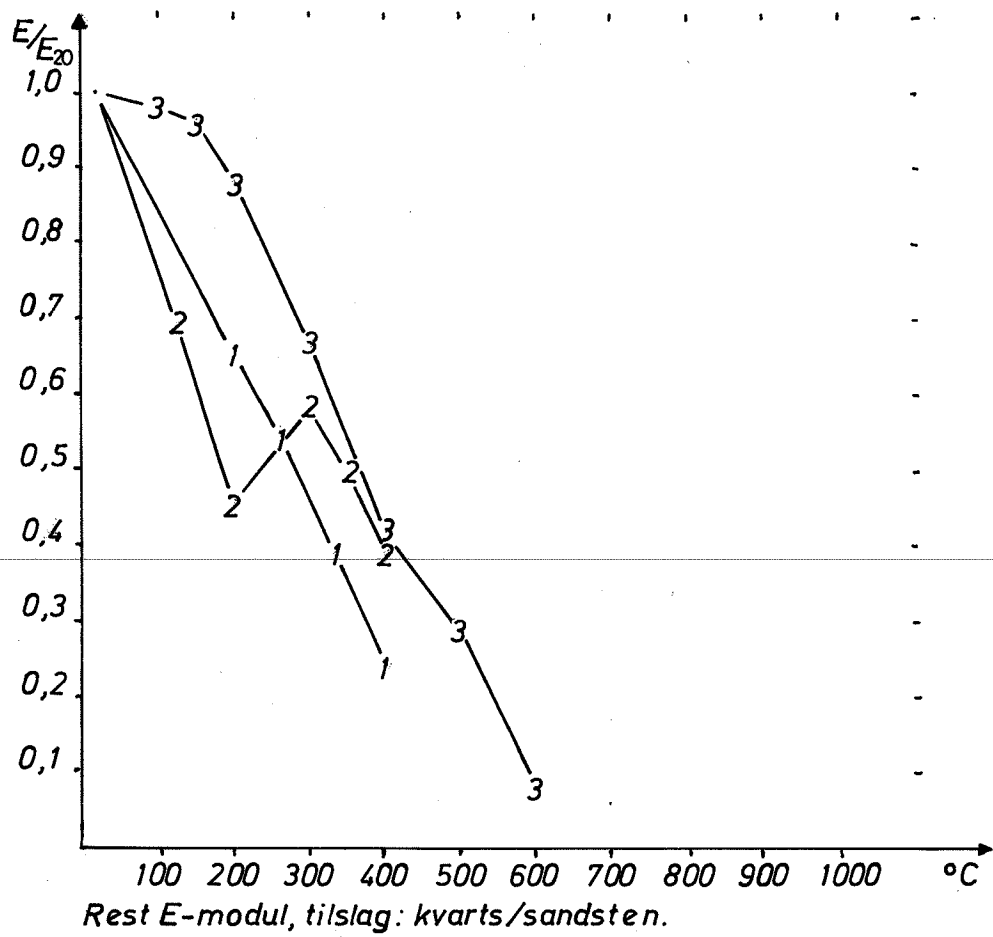


Reference nr.



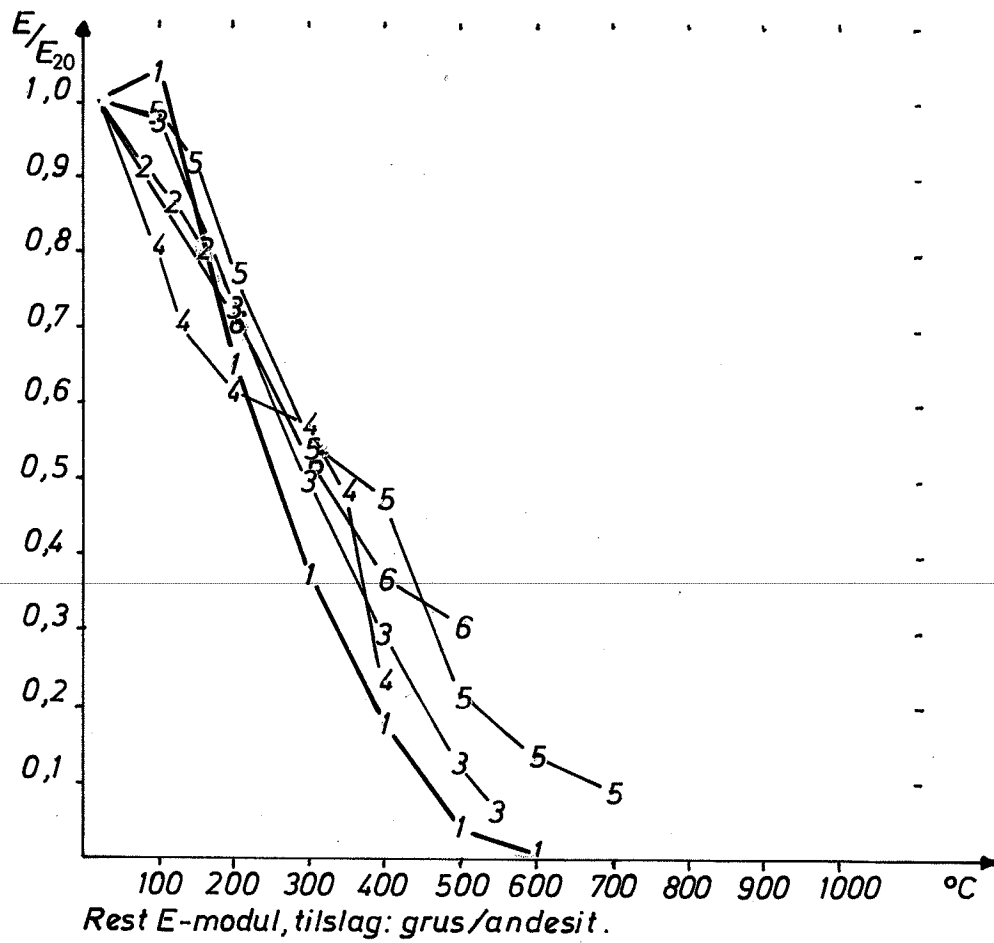
REST E-MODUL, tilslag: kvarts/sandsten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Sandsten	0,60	4,5	-	100	50	1,5	1				Harada et al.	1972	1-31
2	-	0,56	2,5	34	838	p	2,2	-			Bøjning af mørtelbjælke 838x76x51 mm	Sullivan og Pouchen	1971	1-85
3	Sandsten	0,69	6,3	-	406	p	-	1			10 min. opv. E-dyn prisme 406x102x89 mm	Zoldners	1960	1-105



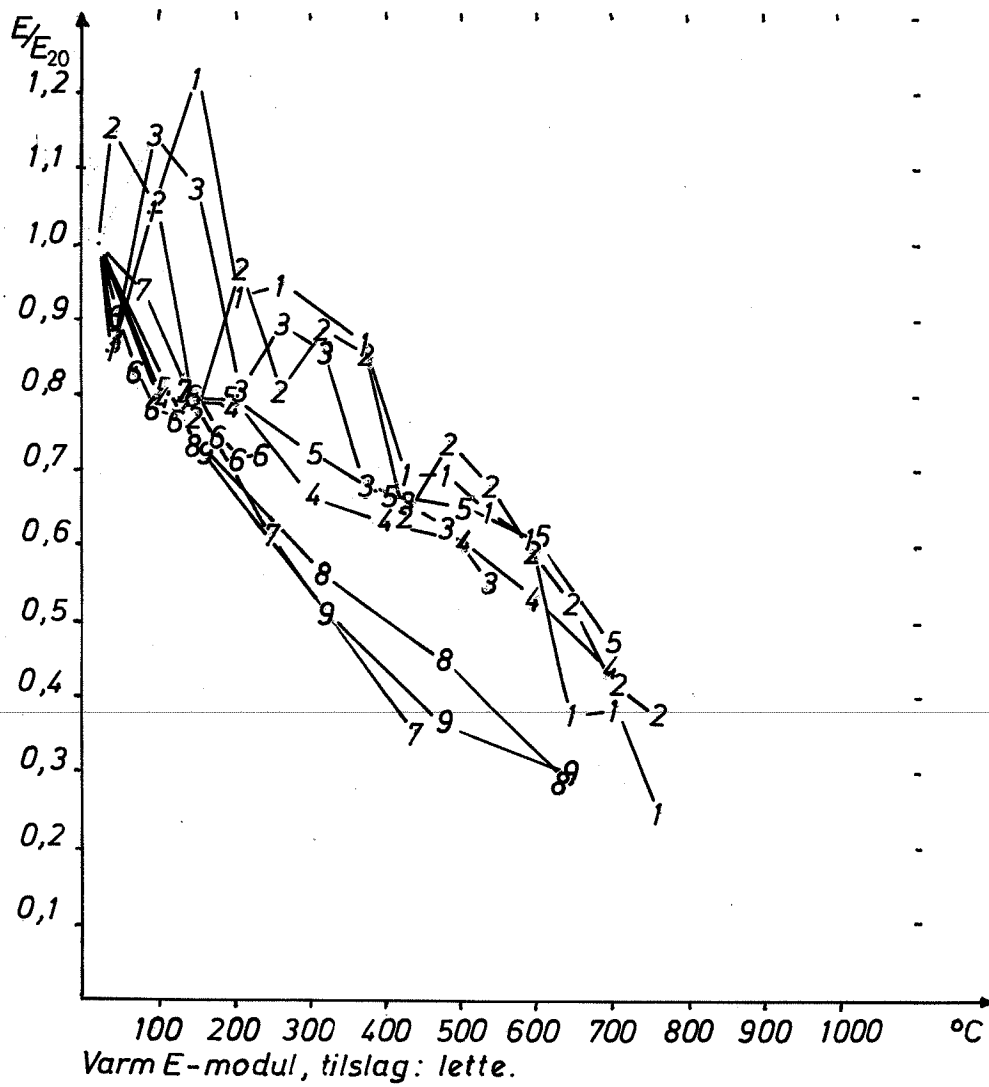
REST E-MODUL, tilslag: grus/andesit

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	E_{20} (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Sømat.	0,87	10	27,9	300	150	1	2	$\sigma_{20} = 17,5 \text{ MPa}$ 14 d.egl. prøvet 7 d. efter bra.	Hertz	1980	egen
2	Grus	0,42	5,3	-	203	102	-	1800		Lankard et al.	1971	1-48
3	-	-	-	-	-	-	-	-		TsNIPS	1954	1-9
4	Grus	0,62	6,9	46	838	p	2,2	-	bøjn. af bjælke 838x76x51 mm	Sullivan+ Poucher	1971	1-85
5	Grus	0,62	6,8	-	406	p	-	1	10 min opv. $\square$ E-dyn. prisme 406x102x89 mm	Zoldners	1960	1-105
6	Andesit	0,65	5,6	-	100	50	1,5	1		Harada et al.	1972	1-31



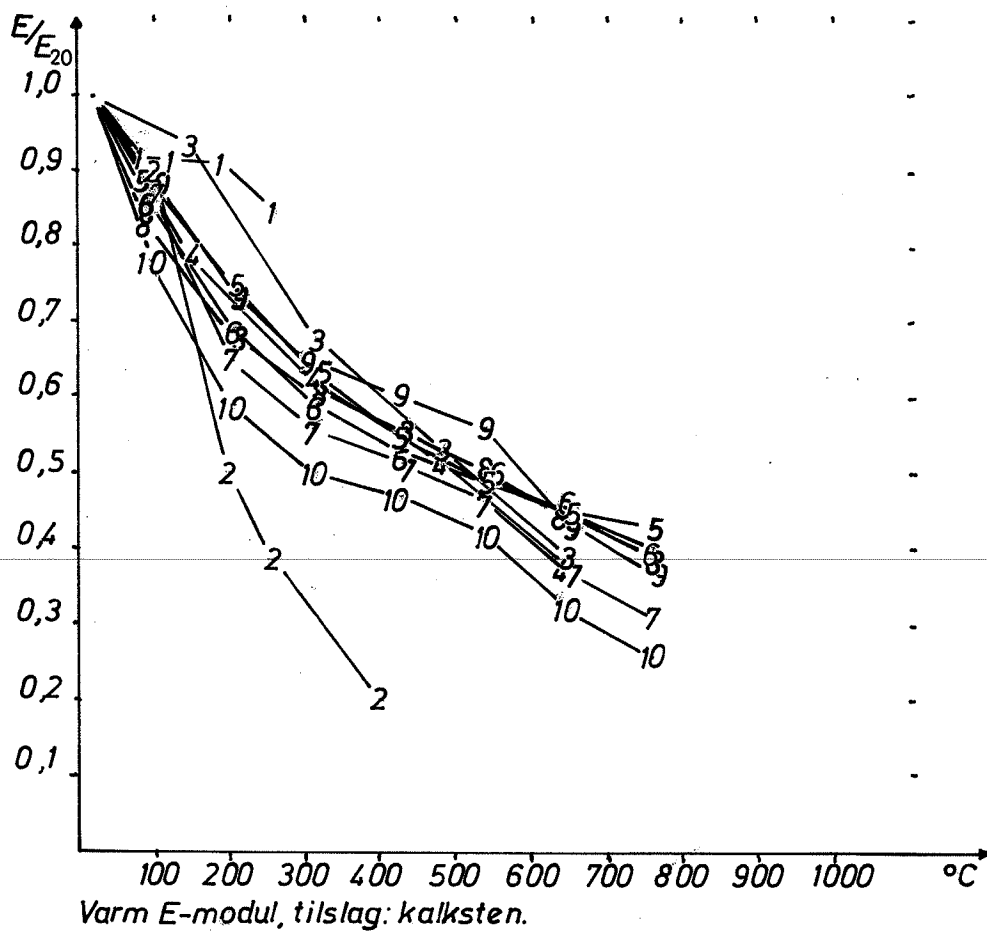
VARM E-MODUL, tilslag: lette

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold		E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Exler	0,79	6,1	6,9	89	45	-	-	-	1 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
2	Exler	0,79	6,1	6,9	89	45	-	-	-	4 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
3	Exler	0,79	6,1	6,9	89	45	-	-	-	24 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
4	Exler	0,45	2,2	-	100	50	0,125	1-2	-		Harada et al.	1972	1-31
5	Exler	0,65	3,8	-	100	50	0,125	1-2	-		Harada et al.	1972	1-31
6	Exler	0,81	2,7	16,8	305	152	-	24	-		Saemann+Washa	1957	1-77
7	Exler	-	-	-	-	-	-	-	-		Maréchal	1970	1-55
8	Exler	-	2,2	20,0	610	35	6,7	0,25	-	Via torsion	Cruz	1966	1-16
9	Exler	-	3,2	19,4	610	35	6,7	0,25	-	Via torsion	Cruz	1966	1-16



VARME-MODUL, tilslag: kalksten

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold		E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Kalksten	0,40	4,9	-	203	102	-	-	1800		Lankard et al.	1971	1-48
2	Kalksten	-	-	-	-	-	-	-	-		Maréchal	1970	1-55
3	Kalksten	0,42	4,5	39,4	610	35	6,7	0,25	0,25	Via torsion	Cruz	1966	1-16
4	Kalksten	0,62	5,7	36,9	610	35	6,7	0,25	0,25	Via torsion	Cruz	1966	1-16
5	Kalkgrus	0,40	-	35,4	152	p	0,7	-	-	Via egen svingning i prisme 152x51x38 mm	Philleo	1958	1-74
6	Kalkgrus	0,60	-	28,2	152	p	0,7	-	-	do	Philleo	1958	1-74
7	Kalkgrus	0,80	-	22,1	152	p	0,7	-	-	do	Philleo	1958	1-74
8	Kalkgrus	0,40	-	37,8	152	p	0,7	-	-	do	Philleo	1958	1-74
9	Kalkgrus	0,60	-	31,4	152	p	0,7	-	-	do	Philleo	1958	1-74
10	Kalkgrus	0,80	-	24,1	152	p	0,7	-	-	do	Philleo	1958	1-74



Kurve nr.

Tilslag

Vand-cementforhold

Tilslag-cementforhold

 E_{20} (GPa)

Højde på prøve (mm)

Diam. hvis cyl. (mm)

Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

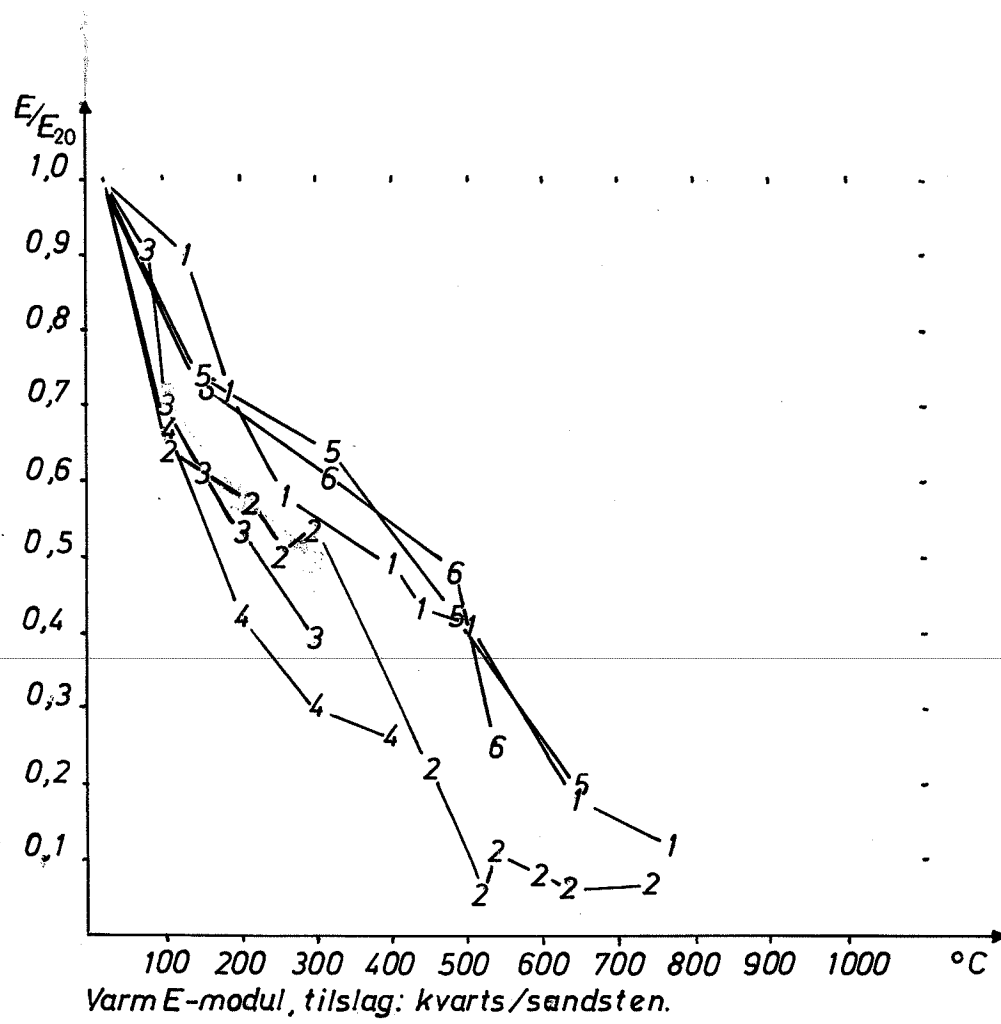
Standtid (h)

Bemærkning

Forfatter

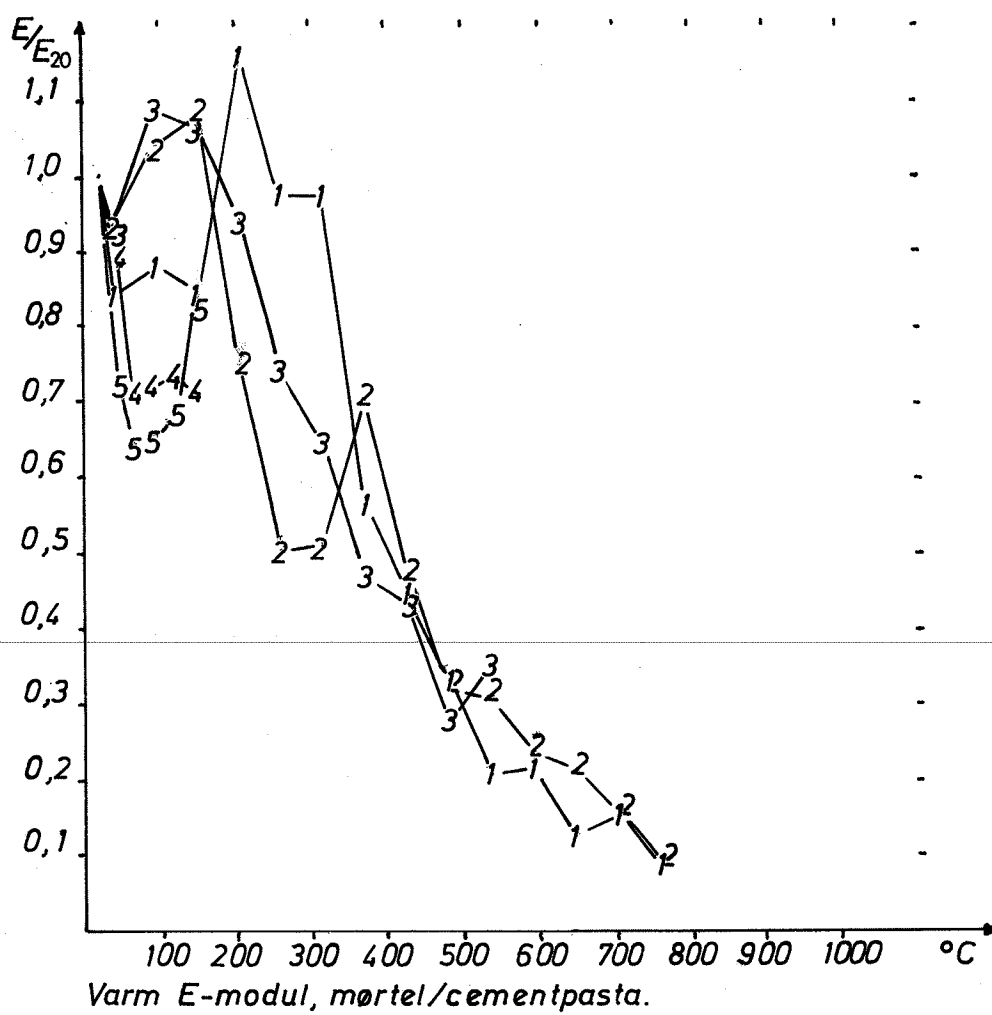
IT

reference nr.



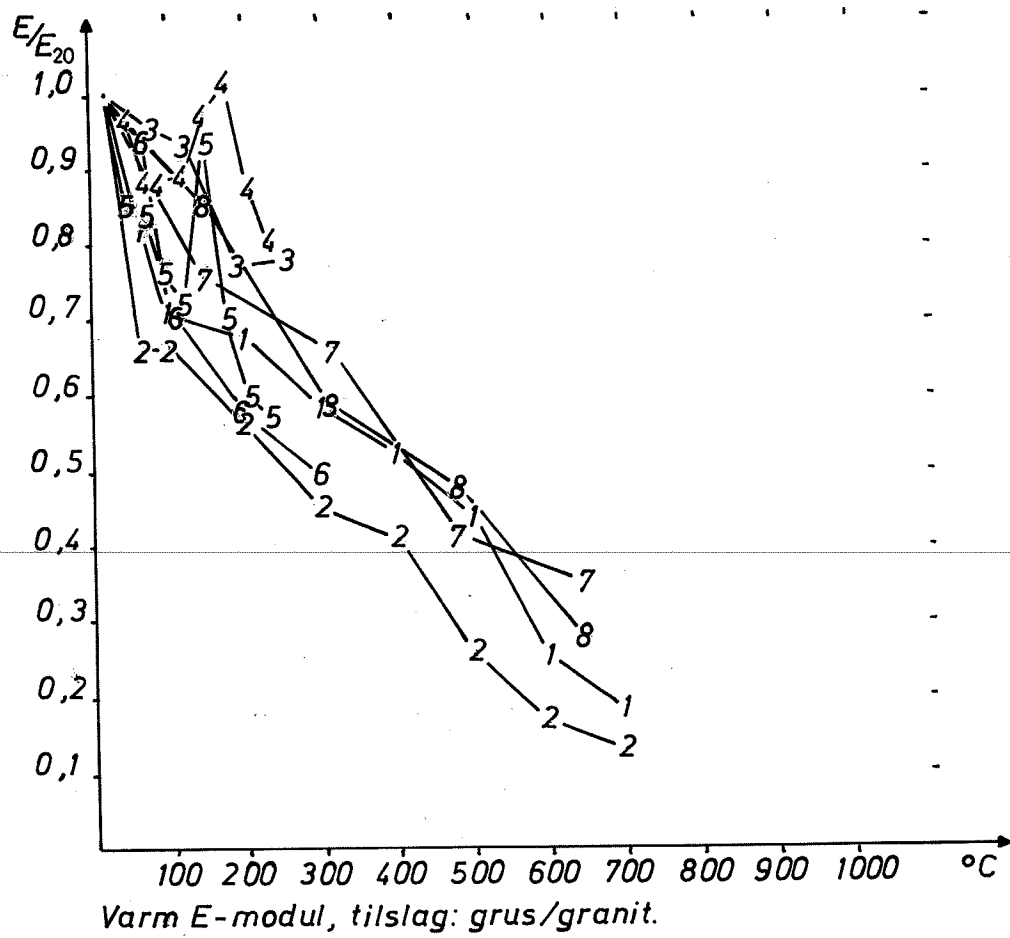
VARME-MODUL, mørtel og cementpasta

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold	Tilslag-cementforhold	E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	-	0,33	0,0	15,0	89	45	-	-	Cementpasta 1 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
2	-	0,33	0,0	15,0	89	45	-	-	Cementpasta 4 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
3	-	0,33	0,0	15,0	89	45	-	-	Cementpasta 24 h. opv.	Harmathy+Berndt	1966	1-33
4	Sand	0,48	2,0	28,0	152	76	-	24	Mørtel	Saemann+Washa	1957	1-77
5	Sand	0,48	4,5	22,5	152	76	-	24	Mørtel	Saemann+Washa	1957	1-77



VARM E-MODUL, tilslag: grus/granit

Kurve nr.	Tilslag	Vand-cementforhold		Tilslag-cementforhold		E ₂₀ (GPa)	Højde på prøve (mm)	Diam. hvis cyl. (mm)	Opv.hast. (°C/min)	Standtid (h)	Bemærkning	Forfatter	År	Reference nr.
1	Grus	0,45	3,9	-	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
2	Grus	0,70	5,7	-	100	50	0,125	1-2				Harada et al.	1972	1-31
3	Grus	0,42	5,3	-	203	102	-	1800				Lankard et al.	1971	1-48
4	Grus	0,48	5,5	29,0	305	152	-	24				Saemann+Washa	1957	1-77
5	Grus	0,84	9,8	24,0	305	152	-	24				Saemann+Washa	1957	1-77
6	Porfyr	-	-	-	-	-	-	-				Maréchal	1970	1-55
7	Grus	0,47	4,4	39,0	610	35	6,7	0,25	Via torsion			Cruz	1966	1-16
8	Grus	0,64	5,7	34,3	610	35	6,7	0,25	Via torsion			Cruz	1966	1-16



Kurve nr.

Tilslag

Vand-cementforhold

Tilslag-cementforhold

v 20

Højde på prøve (mm)

Diam. hvis cyl. (mm)

Opv.hast. ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

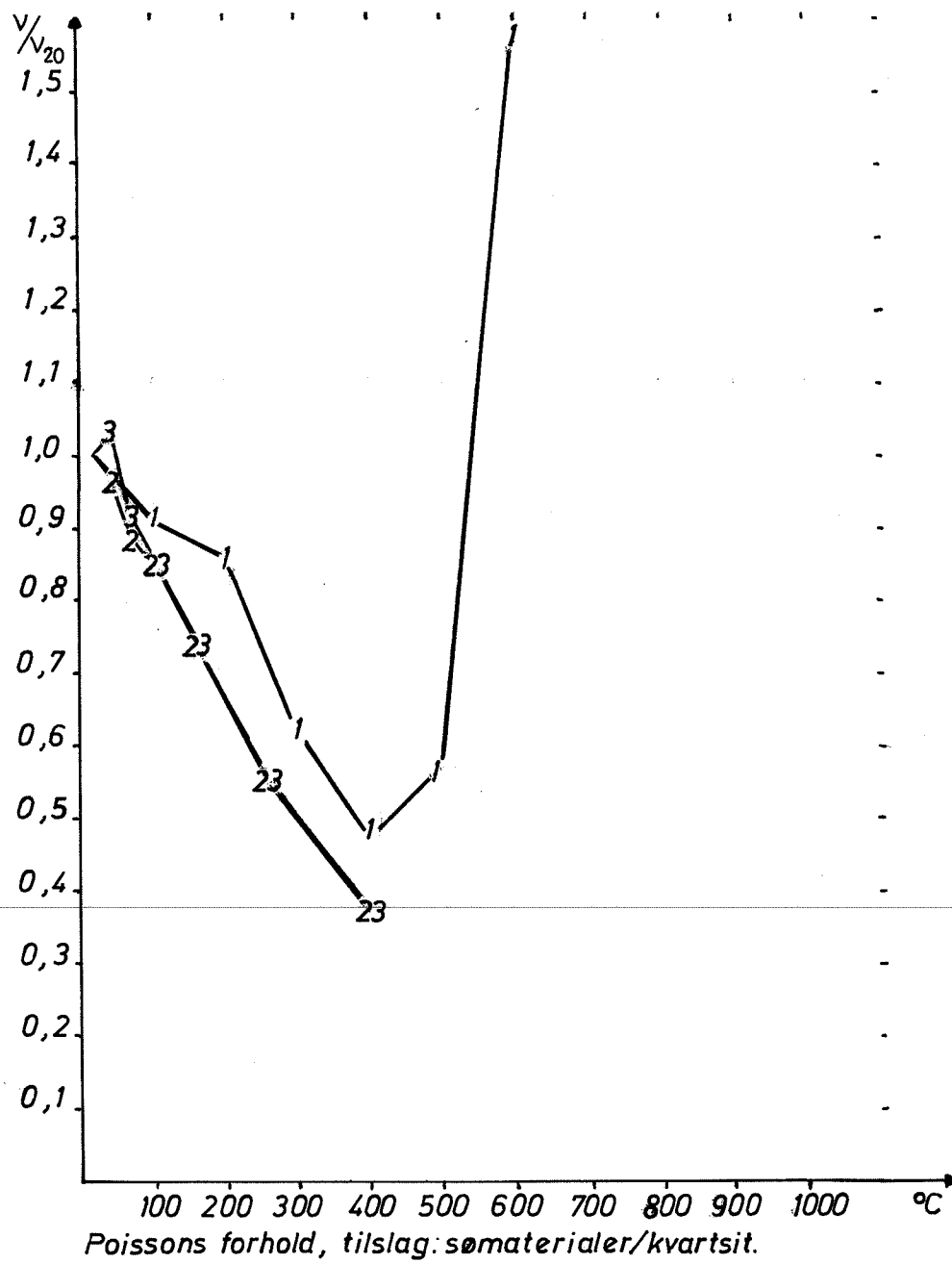
Standtid (h)

Bemærkning

Forfatter

IT

reference nr.



Betonens krybetøjning angives af Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 60, ud fra forsøg med en beton af kvartsittilslog $v/c = 0,6$ og $t/c = 4,9$ at kunne udtrykkes på formen

$$\epsilon_{cr} = \frac{5,3 \cdot \sigma'}{10000 \cdot \sigma'_b(T)} \cdot \sqrt{\frac{t}{3h}} \cdot e^{\frac{3,04 \cdot (T-20^\circ\text{C})}{1000^\circ\text{C}}}$$

hvor ϵ_{cr} er krybetøjningen, σ' den aktuelle last, $\sigma'_b(T)$ betonens trykstyrke ved $T^\circ\text{C}$ og $t =$ tiden. Altså vokser krybetøjningen med kvadratroden af tiden.

Andre forfattere, f.eks. Maréchal [1-56], p. 549, foreslår dog en logaritmisk tidsafhængighed.

Disse tilnærmelsers værdi må formodes at afhænge af såvel det pågældende materiale, som belastningens størrelse og varighed. Til illustration er gengivet kurver fra Crispino [1-15] for kalkstensbeton med $v/c = 0,4$, belastet i 250 døgn med 20% af koldtrykstyrken, der androg 45 MPa.

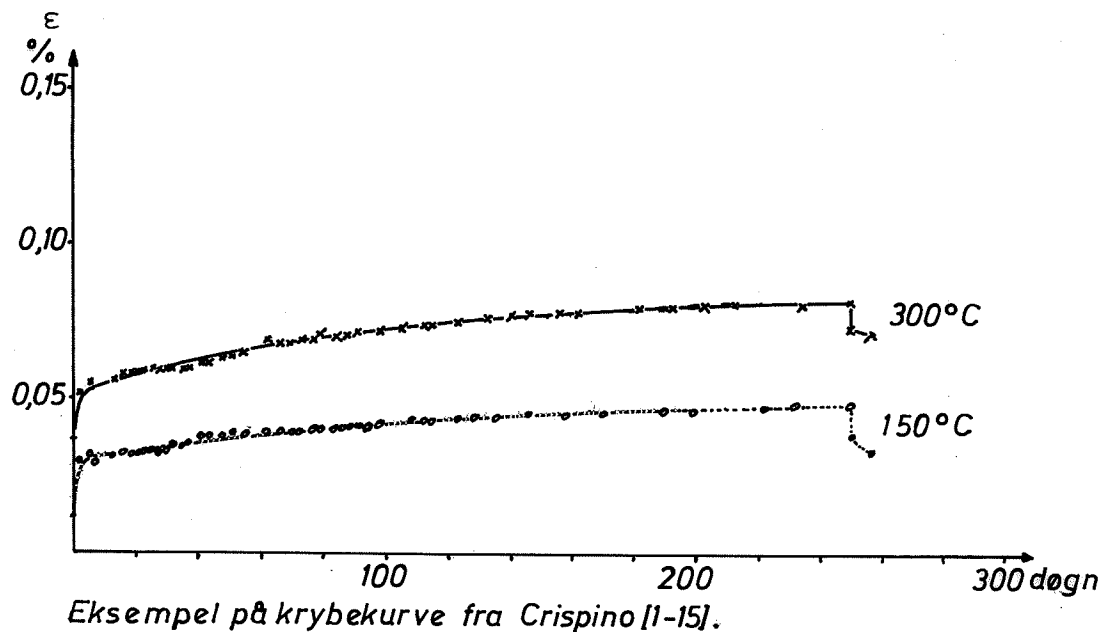
Transient tøjning

For den transiente tøjning angiver Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 62, at den tilnærmelsesvis vil være proportional med henholdsvis belastningen og størrelsen af den termiske tøjning.

Disse sammenhænge synes kvalitativt at stemme med en opfattelse af den transiente tøjning som den del af den termiske tøjning, der hindres ved belastningens forspænding af materialet. (Se side 1-49).

Modellen for den samlede tøjning anvendes af Anderberg og Thelandersson [1-3], p. 74, i forbindelse med en numerisk beregning af størrelsen af de termiske spændinger, som må forventes i $\varnothing 15$ cm cylindre af beton, opvarmet med hastighederne 2-, 4- og $8^\circ\text{C}/\text{min}$.

Imidlertid anvendes i beregningen materiale-værdier hidrørende fra traditionelle materialeforsøg, og det vil sige langsomme opvarmninger, hvor processerne, som varmepåvirkningerne giver anledning til, i vid udstrækning kan nå at forløbe.



Det må derfor formodes, at de i beregningen anvendte arbejdskurver har været betydeligt fladere, d.v.s bl.a. lavere værdier af E-moduler, end man vil have i en hurtigt opvarmet konstruktion.

At beregningerne får til resultat, at den hurtige opvarmning ikke vil give anledning til termiske spændinger af betydning, kan i høj grad være et udslag heraf.

En konklusion af denne karakter (p. 78 og 81) må derfor afvises på det foreliggende grundlag.

Alt tyder fortsat på, at termiske spændinger udgør et væsentligt problem ved hurtige opvarmninger af f.eks. prøvelegemer.

FARVEDANNELSER I BRANDPÅVIRKET BETON

Ofte vil man kunne iagttage, at en brandpåvirket beton har ændret farve, således at der er fremkommet zoner med rosa, grågrøn, brun eller gul farve, alt efter, hvor kraftig opvarmningen har været det pågældende sted.

Dette udnyttes i forbindelse med bestemmelse af, hvilke temperaturer en given del af en brandskadet konstruktion har været udsat for, Green [1-25], og indgår således direkte i vurderingsgrundlaget ved reparationsarbejder efter branden.

fænomenet kan udeblive!

Uheldigvis vil fænomenet ikke optræde altid. Foruden den maksimale temperatur og dennes varighed vil det afhænge af typen af fint og groft tilslag: Green [1-25], p. 6, og tilstedeværelsen af jernforbindelser heri Malhotra [1-54]. Desuden har cementtypen og eventuelle urenheder i pastaen været nævnt som delvis bestemmende faktorer.

Det er derfor væsentligt at bemærke sig, at en manglende farvningseffekt ikke er ensbetydende med lave, maksimale temperaturer.

Hvis en farve derimod optræder, vil den være et tegn på, at en given temperatur er overskredet det pågældende sted. Sammenhængen mellem temperatur og farve er søgt beskrevet i det følgende, der hovedsageligt bygger på arbejder af Bessey [1-68], og egne iagttagelser.

ROSA - 300°C

En lyserød, rosa eller rødlig farvning kan indtræde når temperaturer mellem 250°C og 300°C er nået. Grænsen til det ufarvede område er relativ skarp og kan fastlægges inden for $\pm 3 - 6$ mm.

Bessey [1-68] rapporterer, at kvartssand opvarmet til 200°C ikke ændrer farve på 18 timer. Ved 250°C ændres farven langsomt til fuld styrke på 18 timer og ved 300°C sker det på kun 2 timer. Farven, der er kraftigere for rødligt sand, end for mere blegt sand, holder sig op til omkring 1000°C.

Rødfarvningen ved 250°C - 300°C kendes også for kalksten, sandsten og flint, hvis oprindelige farve bestemmer ændringsgraden.

Meget tyder på, at den omtalte farveændring skyldes dehydrering af jernoxider. Således vil limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) dekomponere ved 300°C med farveovergang fra gul til rød og lepidocrit ($\gamma\text{FeO}(\text{OH})_2$) og gætitt ($\alpha\text{FeO}(\text{OH})$) dehydrerer mellem 250°C og 300°C ligesom den rødbrune hæmatit (Fe_2O_3) udskilles af vandholdige forbindelser omkring 300°C Bessey [1-68] og Meyer Ottens [1-59]. Malhotra [1-54] beretter, at rødfarvningen af hans prøvelegemer først fandt sted ved afkølingen og forklarer dette med, at processen kræver en vis tid for at fuldføres.

Man kunne f.eks. tænke sig, at området omkring jernilterne dehydrerede lidt hurtigere end disse, således at en ligevægt herimellem først indstiller sig på et meget sent tidspunkt med dehydrering og rødfarvning af jernilterne til følge.

Under alle omstændigheder er rødfarvningen et meget hensigtsmæssigt fænomen, idet den indtræder ved netop de temperaturer, hvor de første alvorlige svækkelser af betonens mekaniske egenskaber må påregnes. Man vil derfor ved reparationsarbejder på brandskadede konstruktioner ofte nå til det resultat, at alt rosafarvet materiale bør hugges bort, Green [1-25], p. 21.

GRÅ-GRØN - 600°C

Når temperaturer på omkring 600°C er nået, vil der tit være indtruffet alvorlige revnedannelser og svækkelser af betonen bl.a. på grund af kvartsforandringen ved 573°C .

Samtidig kan der forekomme en grå-grøn farvning (Hansen [1-30]), og temperaturmålinger viser, at dybden, hvori de 600°C er nået, kan fastlægges ud fra en farvning med en nøjagtighed af $\pm 6 - 10$ mm. Altså er grænsen noget dårligere bestemt end for rosa-farvningen. Bessey [1-68], p. 14, forklarer farveændringen ved en reaktion mellem ferrioxid og kalk, der resulterer i calciumferrit med svagere pigmentering.

Herfor taler bl.a., at materialer uden kalk, såsom sandsten og ren flint, kan beholde sin rosa farve helt op til 1000°C . Den relativt dårlige bestemmelse af grænsen for farvningszonen skyldes, at denne faststofreaktion sker trægt, hvorfor resultatet bliver afhængigt af såvel jernoxidemængden som opvarmnings-tiden.

Til hjælp for den visuelle bedømmelse, vil en 10% eddikesyreopløsning kunne fremhæve farveændringen på en brudflade.

Ved egne forsøg sås en grå-grøn toning allerede fra 500°C. Dels var der her tale om relativt langvarige varmepåvirkninger, og dels var den forudgående rosa toning ikke særlig kraftig.

Derimod var den orange farvning af visse sandsten blevet meget markant fra dette temperaturniveau.

Når de ca. 600°C er passeret, vil man kunne observere, at flintetilslaget i vid udstrækning er flækket med lysere og mere hvidligt farvede brudflader end tidligere, samtidig med, at overfladerne ofte fremtræder med en grønlig toning og under en lup viser grønfarvningen sig som en grønspætning.

Fra 700°C kan rødbrun eller brunligsorte farver ses på flintesten.

Fra 800°C ses grøn eller hvid og lyserød flint med grønne zoner i dybde med bunden af de sprækker, der har dannet sig i dens overflade.

Generelt bør alt materiale, der har taget grågrøn frave, borthugges ved et reparationsarbejde.

BRUN - 950°C

En læderbrun farvning af betonen kan forekomme og vil da indicere, at opvarmningen har passeret området 900°C - 1050°C. Bruges farvegrænsen som indikation for den maksimale temperatur 950°C vil dybden for dennes virkning kunne bestemmes med nøjagtigheden $\pm 3 - 6$ mm.

GUL - 1200°C

Over ca. 1200°C vil betonen sintre og en gul farve kan forekomme iblandet brune pletter, hvor jernindholdet er højt. Denne effekt giver en veldefineret grænse, der kan bestemmes ± 2 mm.

FARVE	Maksimal temperatur i °C i grænselaget	Nøjagtighed for dybden heraf (mm)
Normal	300	3 - 6
Rosa	600	6 - 10
Grå-grøn	950	3 - 6
Brun	1200	2
Gul		

Farveændringer i beton med temperaturen.

TEMPERATURFORHOLD

En forudsætning for en analytisk vurdering af en betonkonstruktions bæreevne under og efter en brandpåvirkning er kendskab til den forudgående termiske påvirkning som funktion af tiden.

Herudfra kan fugtforhold og tillægsbelastninger i form af termiske spændinger og damptryk æstimeres.

Disse sammenholdt med virkningen af den statiske belastning danner grundlag for fastlæggelsen af spændings-tøjningstilstanden i et givet punkt til en given tid og skal da vurderes i forhold til styrkeegenskaberne i punktet, der også afhænger af det hygrotermiske forløb.

Kendskabet til temperatur- og fugtfordelinger i betonkonstruktioner stammer dels fra målinger og observationer i forbindelse med brandforsøg og aktuelle brande og dels fra beregningsmæssige metoder af divergerende nøjagtighed.

Der foreligger i dag et stort erfaringsmateriale af den første art, og en samling heraf kunne udgøre et projekt i sig selv. Hertil kommer stadigt finere beregningsprocedurer, der specielt for EDB-metodernes vedkommende i de seneste år har nået et stade, hvor overensstemmelsen med de observerede temperaturfordelinger er ganske overbevisende, jfr. f.eks. Bennet, Claesson og Thelandersson [1-88] eller de nyeste arbejder af Wickström [1-101] og [1-100].

På baggrund heraf har forfatteren ved prioritering af opgaverne i forbindelse med dette projekt fundet, at grundlaget med hensyn til bestemmelse af temperatur- og fugtforholdene allerede er så omfattende, at indsatsen hellere måtte koncentreres om uddybning af andre mere påtrængende emner.

Med den følgende fremstilling søges derfor kun i meget grove træk at redegøre for problemstillingen ved en kortfattet orientering om betonens termiske egenskaber samt en præsentation af visse delløsninger, som er udviklet i løbet af projektet.

BETONS VARMELEDNINGSEVNE

Ved beregning af temperaturprofilen i en varmepåvirket konstruktion er kendskab til betonens varmeledningstal og dets variation med temperaturen af afgørende betydning, specielt fordi denne fysiske egenskab afhænger i betydelig grad af betonens sammensætning.

Tilslagets art har her en væsentlig indflydelse, idet kvartsholdige materialer i sig selv besidder høje varmeledningstal, der kraftigt falder med temperaturen inden for de første 300 graders opvarmning, mens granit og kalksten har lavere og mere konstante værdier jfr. optegningen af kurver for forskellige tilslagsmaterialer.

Mængden af tilslag i forhold til cementpasta er ligeledes af betydning, idet cementpastaens varmeledningstal er væsentligt lavere end de fleste tilslags.

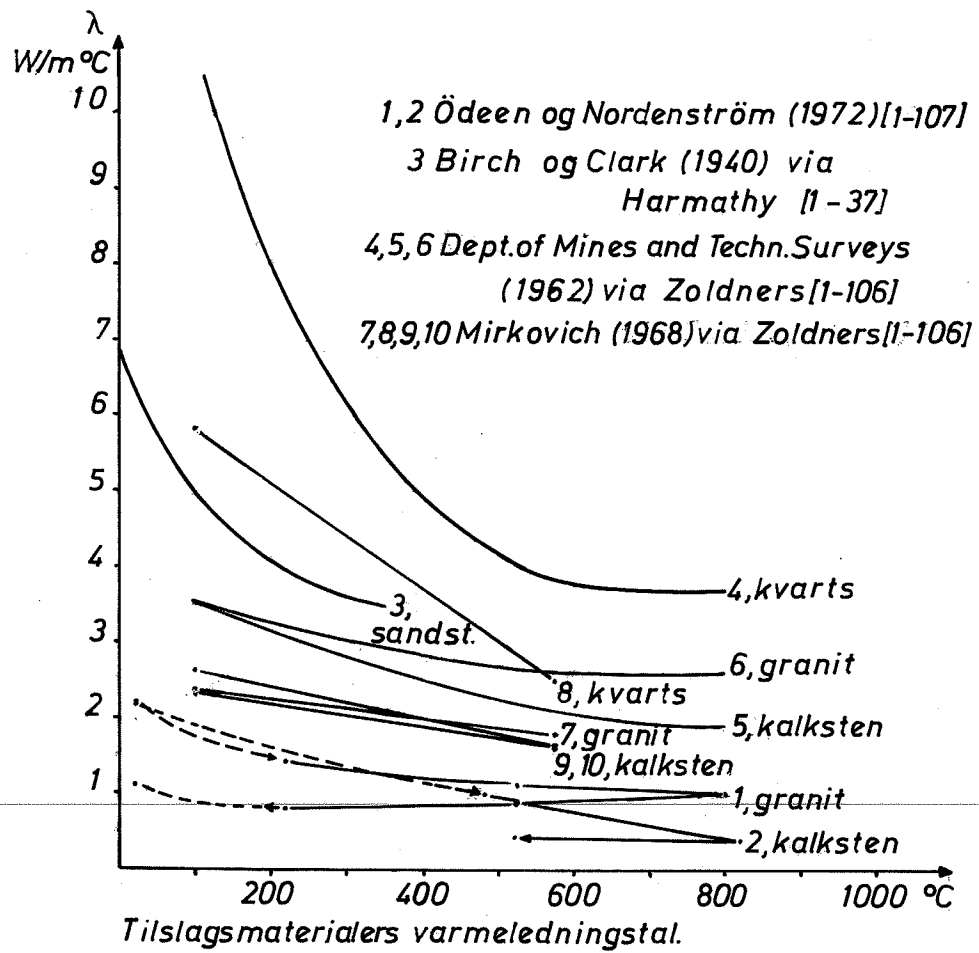
Et højt vand-cementtal vil give en mere porøs cementpasta og dermed lavere varmeledningstal. Jo mere fremskreden hydratiseringen er, og jo mere tør cementpastaen er, jo lavere er varmeledningstallet, da luftfyldte hulrum naturligvis overfører varmen langt dårligere end vandfyldte.

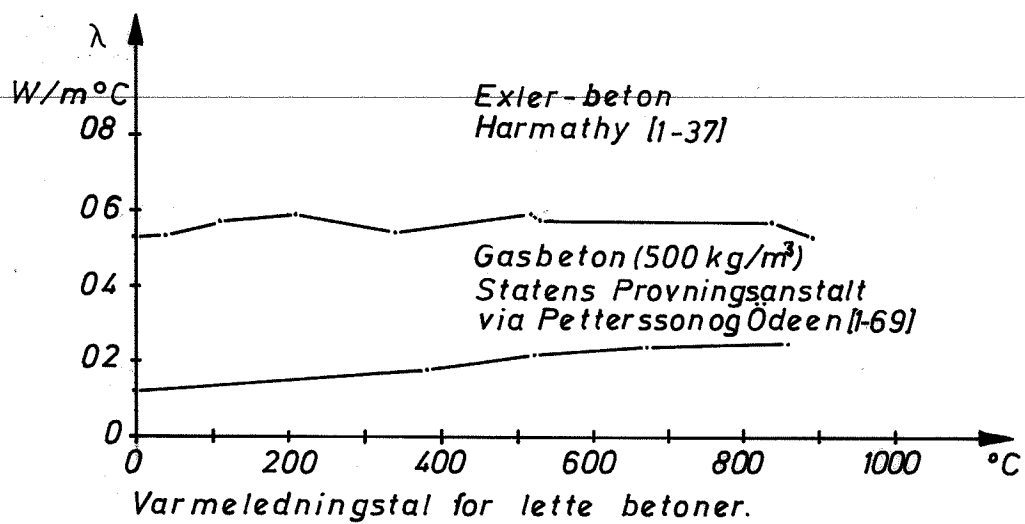
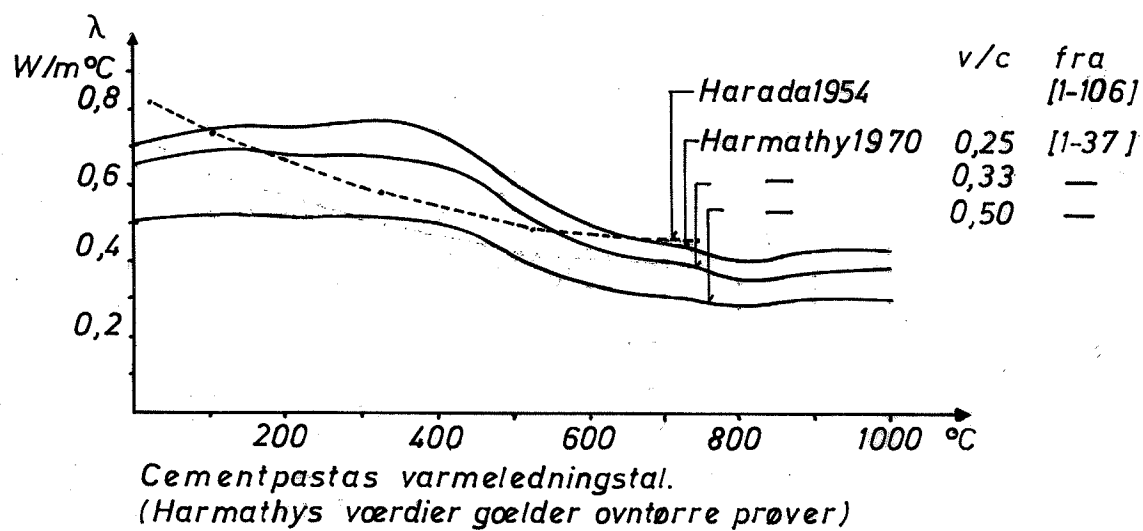
Direkte anvendelse af luft-iblandingsmidler betyder således også reduceret varmeledning.

Ved opvarmning kan varmeledningsevnen inden for de første 60 grader stige; hvad Maréchal [1-57] p. 1048, søger at forklare ved en forøget varmeledning gennem det fysiske bundne vand, samt en svindeffekt, der giver flere indre direkte berøringspunkter i strukturen.

Ved yderligere temperaturstigninger vil fordampningen tage til, hvad der principielt bør ses i sammenhæng med formen og størrelsen af den konstruktion, hvorpå resultatet skal anvendes.

Disse effekter i begyndelsen af en opvarmning er helt afhængige af betonens hydratiseringsgrad og fugtighed samt opvarmningshastigheden.





Ved meget langsomt opvarmede prøver ses således ingen initial øgning af varmeledningsevnen, ligesom beliggenheden af maksimum - når det forekommer - synes at variere.

Efterhånden som betonen ved opvarmning afgiver det fysisk bundne vand, opstår flere luft- og dampfyldte hulrum, der foranlediger et fald i varmeledningsevnen ud over det, som tilslagene medfører.

Fra ca. 300°C vil revnedannelsen som følge af forskelle i udvidelse af cementpasta og tilslag medføre et yderligere fald, der således er kraftigst for betoner med kvarts- og granitholdige tilslag, da disse udvider sig stærkere end f.eks. mange kalkstenstyper.

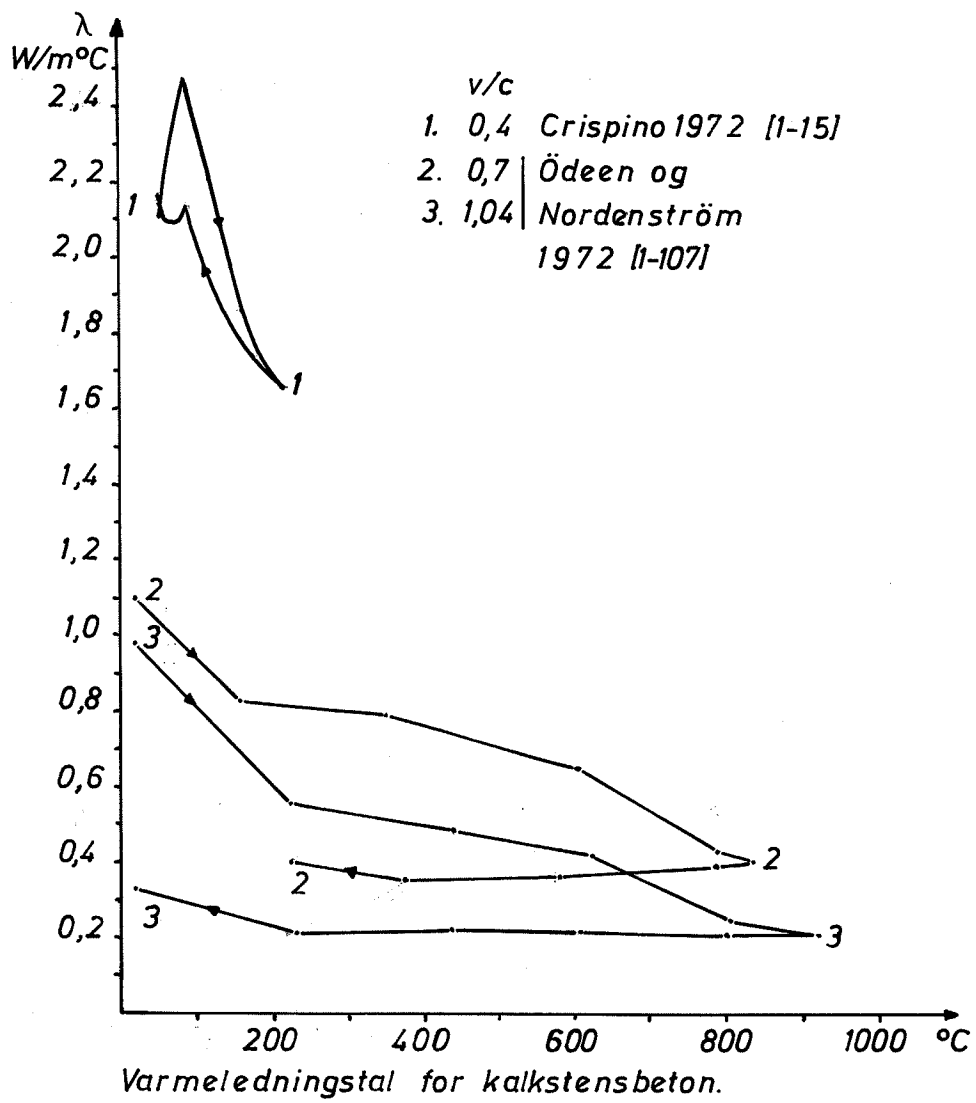
Maréchal [1-55] og [1-57] mener ligefrem, at kornform og fordeling betyder mere for varmeledningen end tilslagets eget varmeledningstal.

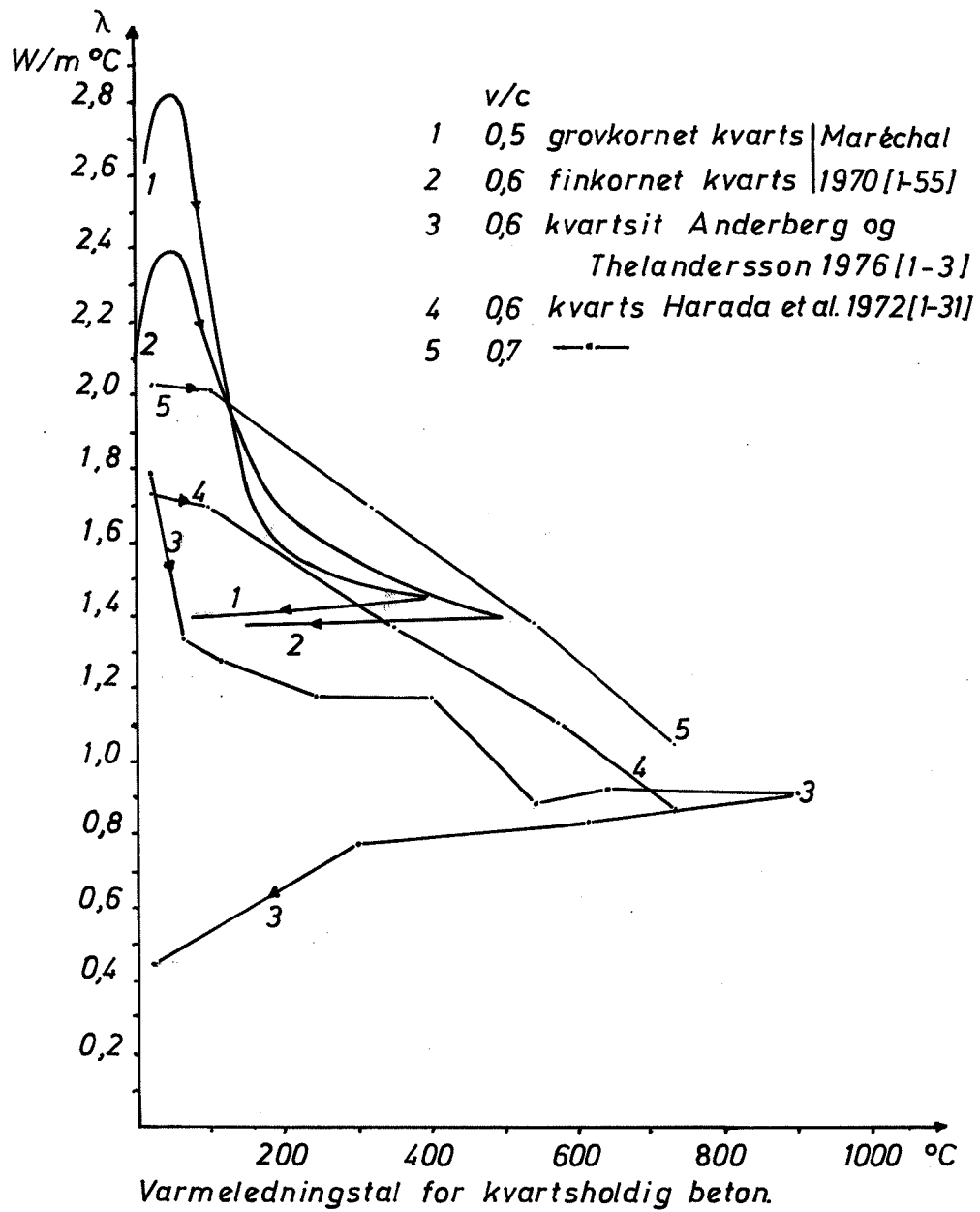
Over ca. 500°C vil calciumhydroxiden gennem sin volumenforøgelse ved genlæskning påvirke revnedannelsen og dermed varmeledningstallet ved afkøling, hvorfor værdien heraf ikke genvindes i så høj grad, som den delvise lukning af revnerne, der hidrører fra forskelle i termisk udvidelse ellers ville medføre.

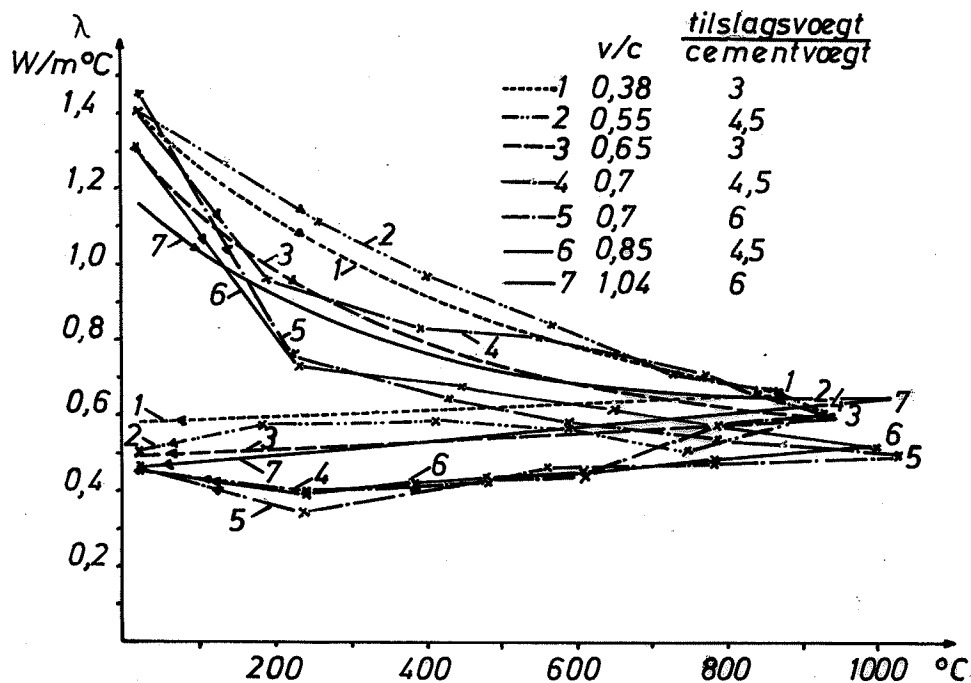
Betoner, der er opvarmet til mere end de ca. 500°C besidder derfor oftest en relativt konstant varmeledningsevne ved afkølingen, hvor de ved mindre maksimale temperaturer udviser en mere stigende tendens (Ödeen og Nordenström [1-107]).

Ud over genoptegning i ensartede enheder af kurver fra litteraturen er i tilknytning til dette afsnit optegnet nogle danske resultater, der ikke tidligere har været offentliggjort, hvorfor en lidt nærmere forklaring hertil gives i det følgende:

I forbindelse med et eksamensarbejde af Østergaard [1-112] blev i 1972 målt temperaturfordelingen gennem tykkelsen af 40 x 200 x 200 mm betonfliser med fire NiCr-Ni termoelementer i hver, medens flisens ene side udsattes for en termisk påvirkning meget nær standardbrandkurven.







Varmeledningstal for granit beton.
Ödeen og Nordenström (1972) [1-107].

Ved tilbageregning med et hertil udviklet EDB-program udledtes de aktuelle varmeledningstal for betonen udsat for denne hurtige opvarmning.

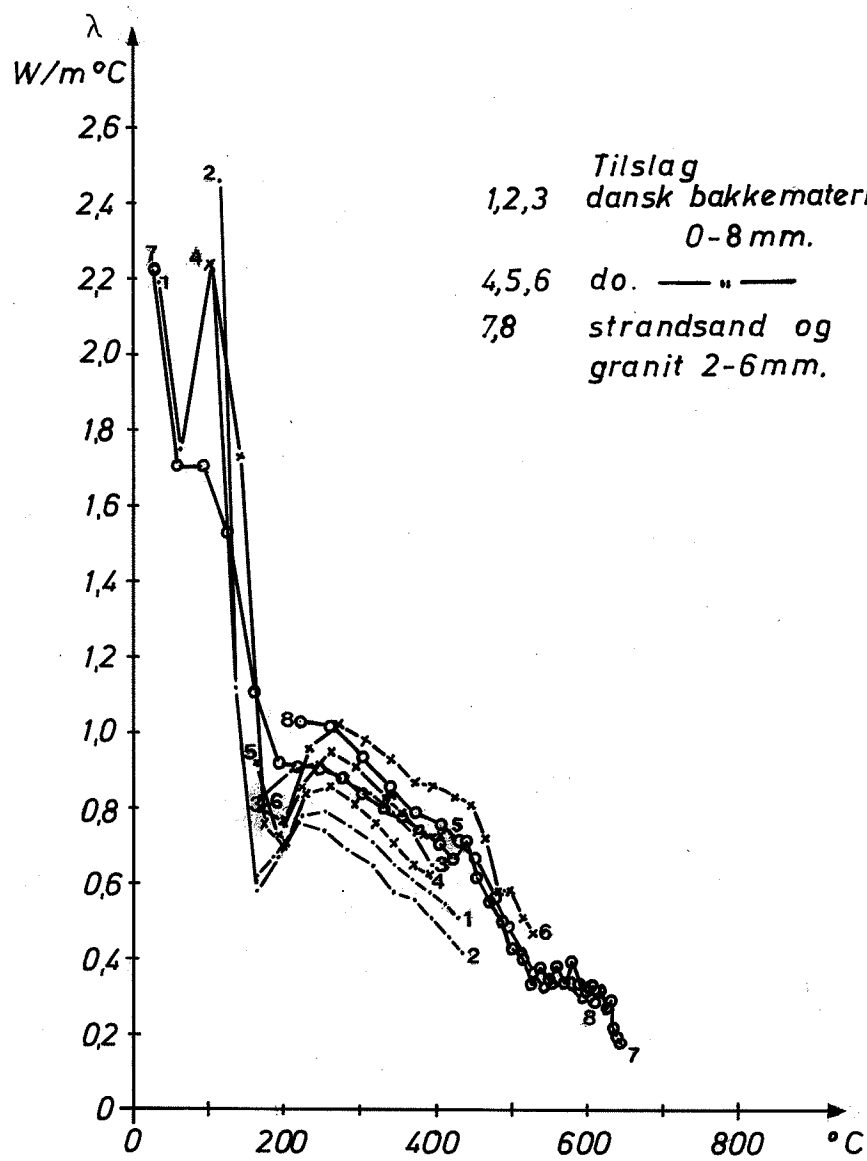
Der anvendtes Super Rapid-cement og kurve 1, 2 og 3 gælder for 0-8 mm bakkematerialer med $v/c = 0,86$ og cylindertrykstyrke 28 MPa.

Kurve 4, 5 og 6 repræsenterer samme tilslag, men $v/c = 0,71$ og cylindertrykstyrken 49 MPa.

Endelig viser kurve 7 og 8 resultater for en beton med sand og 2-6 mm granit som tilslag, $v/c = 0,63$ og cylindertrykstyrke 28 MPa.

De her viste varmeledningstal er beregnet ved hjælp af målingerne over 3/4 af tykkelsen af flisen, vendende bort fra påvirkningen, da overfladen mod denne i de fleste tilfælde blev beskadiget af varmen.

Målinger over de nærmeste 3/4 blev dog også foretaget, og viste trods forsøgsusikkerheden på disse resultater generelt højere værdier for varmeledningstallet, hvad der peger i samme retning, som det tidligere anførte om opvarmningshastighedens betydning.



Varmeledningstal for beton under standardbrand. Østergaard (1972) [1-112].

I tilknytning til et andet eksamensarbejde, Jensen og Vesterlørkke [1-43], blev i 1979 under deltagelse af forfatteren foretaget en måling af en glasfiberarmeret betons varmeledningsforhold på et ASTM-apparat, venligst stillet til rådighed af Höganäs-koncernen.

Betonen havde $v/c = 0,4$ og volumenandelene 4% glasfiber, 20% sand og 76% cementpasta.

Prøven var tør i udgangstilstanden, og resultatet minder da også i formen om de af Harmathy [1-37] givne kurver for tør cementpasta med dyk under opvarmningen ved 3-400°C og ved 700°C.

Derimod opfører denne beton sig væsentligt anderledes efter at glasset smelter.

Dette sker fra ca. 750°C til 880°C, hvad der ses som en endoterm proces på DTA-kurven for materialet.

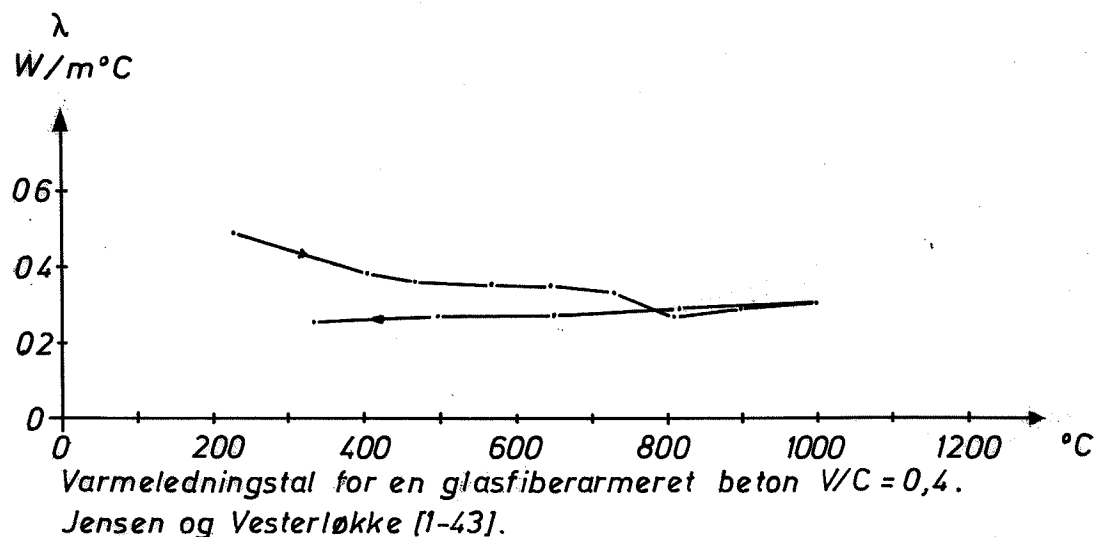
Herefter øges varmeledningstallet noget sandsynligvis som følge af udfyldningen af diverse porer med glasmasse.

Prøver opvarmet til så høje temperaturer blev for øvrigt helt porøse og usammenhængende ved afkøling og lagring.

Man må errindre sig, at varmeledningstallet har stor betydning for fastlæggelsen af temperaturfordelinger i brandpåvirkede tværsnit.

Det ses, at så mange variable har indflydelse derpå, at opgivelse af en enkelt kurve - eller et begrænset interval, f.eks. i normsammenhæng - vil være en grov forenkling, og at adskillige mangfoldigheder af forsøgsresultater vil være påkrævet, dersom varmeledningsevnen skal fastlægges for de normalt anvendte betonkvaliteter.

Fastlægger man værdien skønsmæssigt ud fra kendskab til sammensætningen af den aktuelle beton og til de tidligere omtalte undersøgelser, vil usikkerheden på denne bestemmelse næppe være under ca. 20%, og dermed fås omtrent samme usikkerhed på temperaturfordelingen, hvad der meget vel kan give afvigelser af størrelsesorden 100°C.



En fin termisk beregning vil derfor kun være berettiget, når varmedningstallet er velbestemt.

Harmathy [1-37] søger at opstille en metode til beregning af varmedningstallet ud fra betonens sammensætning, men da den danske cement på grund af sit høje C_3S indhold er væsentlig forskellige fra Harmathys idealtokomponent-cement, og da de danske tilslags termiske egenskaber er dårligt bestemt, vil tillempling af metoden til danske forhold kræve en omfattende dokumentation, som forfatteren af mangel på tid og udstyr ikke ser sig i stand til at tilvejebringe inden for rammerne af det foreliggende projekt.

Indtil et selvstændigt projekt til belysning af disse forhold er gennemført, må man derfor enten affinde sig med en grov bestemmelse af temperaturforholdene eller måle de nødvendige værdier under betingelser, der ligger så nær de korrekte, som muligt.

BETONS VARMEKAPACITET

I modsætning til varmeledningsevnen ser varmekapaciteten for beton ud til kun at udvise mindre variationer ved forskelle i betonens sammensætning og med temperaturen, når man betragter værdierne for tør beton.

Flere forfattere (Lie [1-51] og Pettersson og Ödeen [1-69]) foreslår at regne varmekapaciteten for den tørre beton konstant som $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Resultaterne fra Ödeen og Nordenströms grundige arbejde [1-107] synes at bekræfte det rimelige heri, idet værdien kun stiger 5-10% fra 200- til 600°C .

Ved de eksperimentelle undersøgelser betragtes imidlertid beton under afkøling, hvor man for anvendelserne kunne være interesseret i forholdene ved opvarmning.

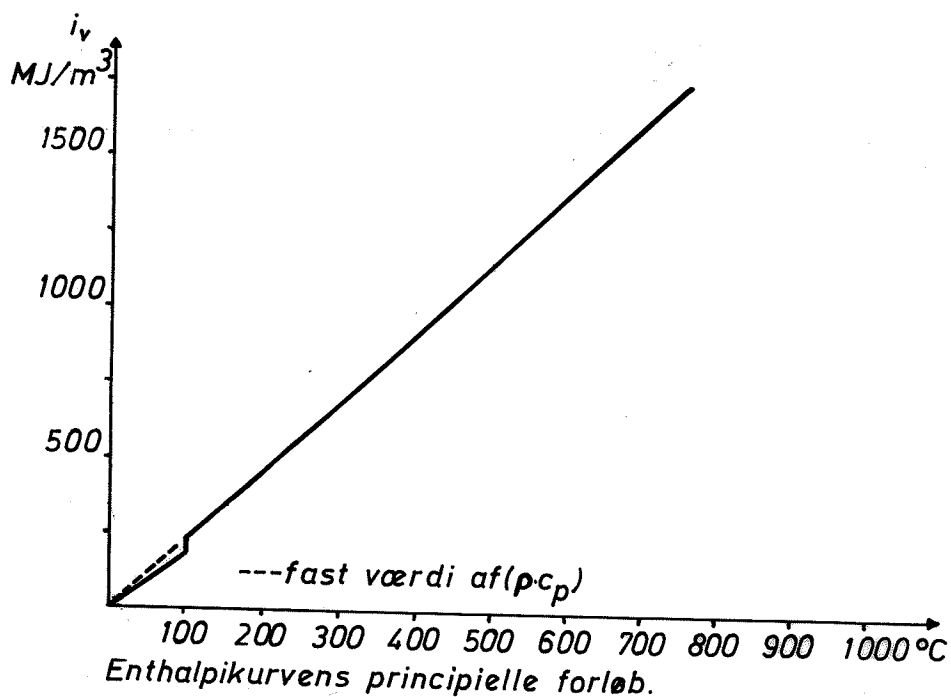
Selvom alle de involverede processer for den tørre beton ikke kan forudsættes at være reversible til samme temperaturniveauer, anser mange forfattere afvigelserne af denne årsag for så beskedne, at man ser bort herfra.

Derimod bør man naturligvis korrigere for fugtens indvirkning på betonens varmebehov under opvarmningen, hvad der specielt giver en lokalt forøget værdi af varmekapaciteten omkring $100-200^\circ\text{C}$, svarende til det frie og det fysisk bundne vands fordampning.

Ved finere beregninger kan man betragte fugten for sig og derved medtage effekten af dens varmeforbrug og strømningsforhold. 1 kg vand bruger ialt 2,6 MJ til opvarmning fra 20- til 100°C samt fordampning.

Fugtindholdet vil for betonkonstruktioner efter nogen tids anvendelse normalt være omkring 1-3 vægt%. Dvs. ca. 1 vægt% for beskyttede - og 2-3 vægt% for særligt udsatte konstruktioner (jfr. div. opgivelser og med støtte fra Neville [1-65] p.429). En realistisk værdi er altså omkring 1,5 vægt% fugt.

Dette vand bruger $1,5 \cdot 26 \sim 40 \text{ kJ}$ pr. kg beton. Tallet skal ses i forhold til betonens samlede varmeforbrug til opvarmningen, der ved 200°C udgør omkring 200 kJ pr. kg beton. Altså er fugtens varmeforbrug af størrelsesorden 20% af det samlede varmeforbrug til 200°C .



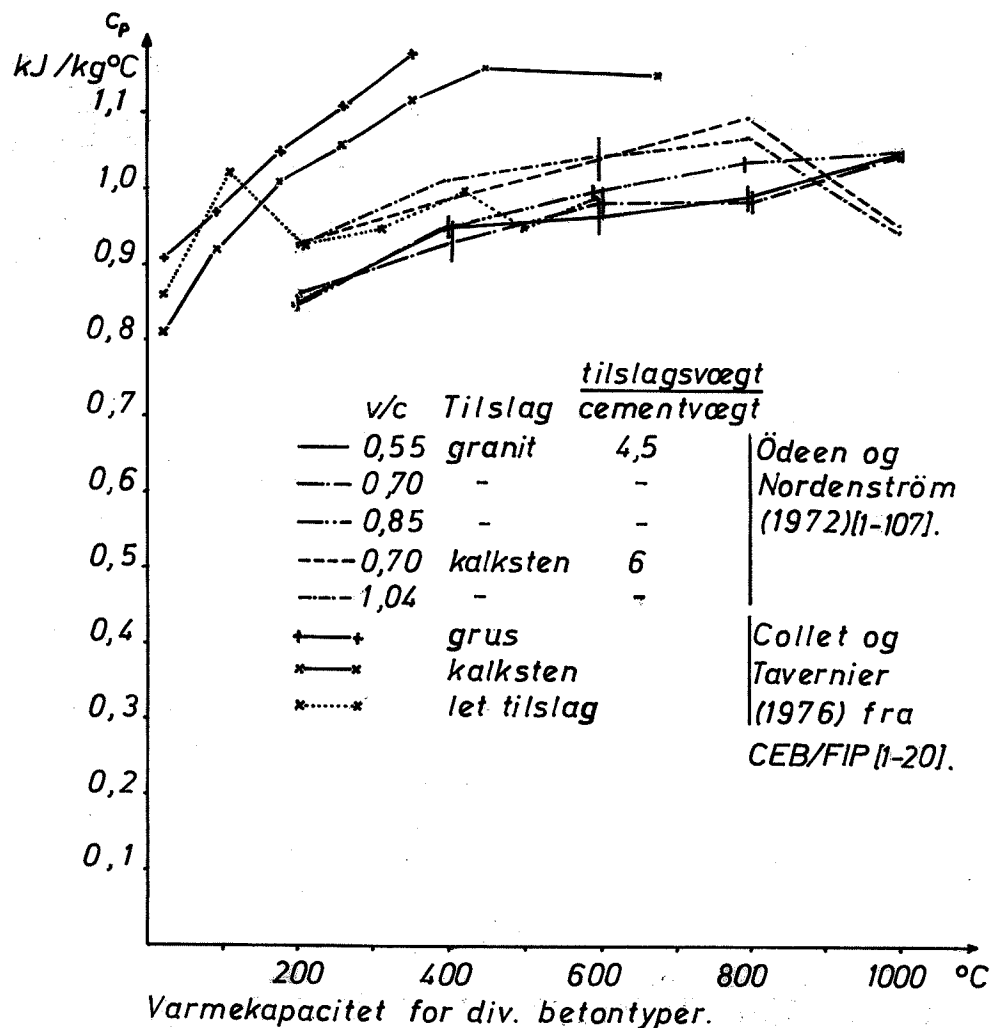
Regner man imidlertid tilnærmet med den konstante varmekapacitet $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, vil denne værdi inden for de første 200°C netop være ca. 20% for høj for den tørre beton.

Heraf ses, at det samlede system beskrives ganske præcist med denne værdi. Det kan med andre ord foren normal betonfugtighed være rimeligt at anvende varmekapaciteten $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ i hele temperaturområdet og se bort fra fugtens indflydelse herpå.

Harmathy [1-37] søger at opstille en model til beregning af varmekapacitetens variation med temperaturen for tør beton ud fra samme præmisser som beregningen af varmeledningsevnen.

Det er karakteristisk herfor, at der optræder en lokalt forøget værdi omkring 500°C , hidrørende fra calciumhydroxidens dehydrering.

Hos Anderberg og Thelandersson [1-3] har man taget hensyn til dette forhold ved at regne med en enthalpikurve, som er modificeret for såvel fordampningens varmeforbrug ved $100\text{--}200^\circ\text{C}$, som calciumhydroxidens varmeforbrug ved $530\text{--}550^\circ\text{C}$. (Angående afvigelsen i temperaturangivelsen, se afsnittet om betonens generelle udvikling ved opvarmning).



Ved temperaturberegning er det produktet af varmekapacitet og massefylde, der anvendes, og massefylden aftager med temperaturen.

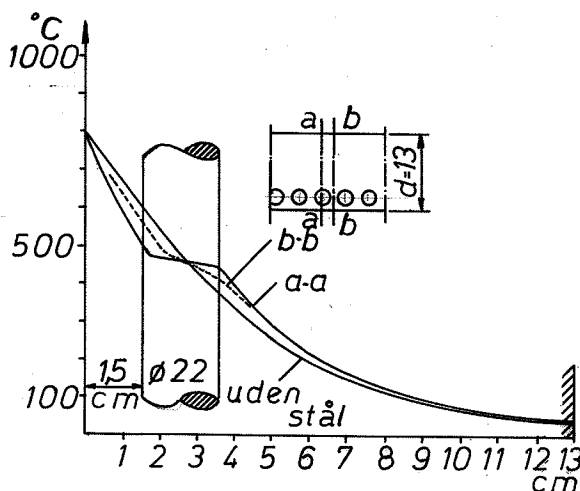
Bruger man f.eks. resultaterne for tør grusbeton fra Zoldners [1-105], (hvor den hurtige opvarmning i arbejdet skønnes rimelig for denne anvendelse), kan faldet i massefylde beregnes til 3,2% ved 500°C, 4,6% ved 600°C og 6,3% ved 700°C.

Altså er et fald i massefylden på omkring 5%.

Ved langsomme opvarmninger bliver faldet sandsynligvis noget større; men det ses at være af samme størrelsesorden, som den svage stigning i varmekapaciteten, som Ödeen og Nordenström observerede over 200°C.

Derfor må en konstant værdi af produktet være forsvarlig at anvende ved praktisk beregning, hvor der eventuelt særskilt korrigeres for fugtens fordampningsvarme og calciumhydroxidens varmekonsum ved dehydrering.

BEREGNINGSMETODER



Temperaturfordeling i 13 cm plade
efter 60 min. standardbrand.

Et væsentligt resultat for temperaturberegning blev offentliggjort af Ehm i 1967, hvor det blev påvist, at hvis temperaturprofilet i en plade beregnes uden hensyn til armeringen - dvs. som homogent betontværsnit - svarer ståltemperaturerne til tværsnittets temperaturer i stålernes centre.

Becker et al. har i 1974 vist, at dette gælder rimeligt nøjagtigt op til en armeringsprocent på 4. Temperaturfordelingerne findes derfor oftest for de homogene tværsnit.

For varmetransporten i sådanne gælder Fouriers varmeledningsligning, hvis man ser bort fra bidragene, der overføres med dampstrømninger. Generelt udtrykkes den som

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

hvor i_v er enthalpien (J/m^3), t = tiden (s), T = temperaturen (f.eks. $^{\circ}\text{C}$) og λ det retningsbestemte varmeledningstal ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$).

For endimensional varmestrøm med tilnærmet fast λ og varmfylde c_p ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$) og massefylde ρ (kg/m^3) fås udtrykket

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}$$

hvor x er en simpel euklidisk koordinat (m).

Ved opdeling af tværsnittet i skiveformede elementer med tykkelser Δx kan det til varmeledningsligningen svarende differensudtryk anvendes for tilnærmet trinvis løsning på en passende regnemaskine, og resultater af denne art er offentliggjort hos f.eks. Ödeen [1-111], Lie [1-51] og Maes et al. [1-53].

For to-dimensionale varmemestrømme er ligeledes opstillet differensudtryk og trinvist fundet løsninger, der er tilgængelige hos f.eks. Ödeen [1-110], Weiss [1-99] og Pettersson og Ödeen [1-69].

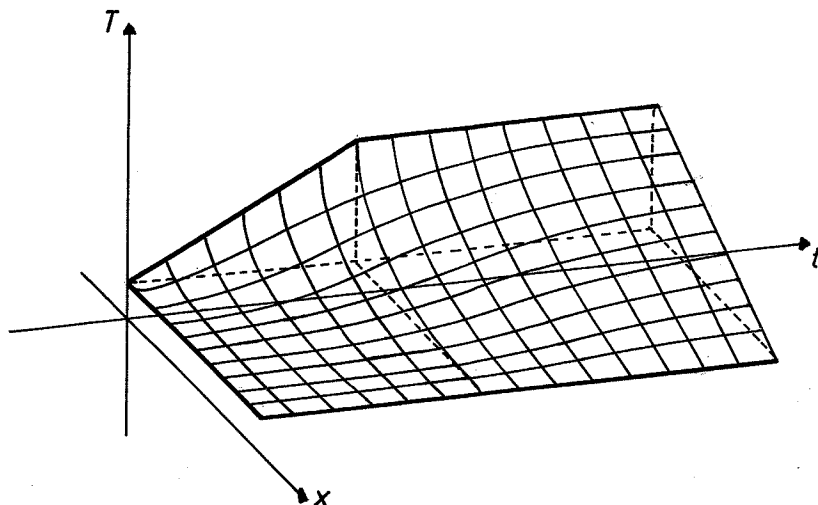
Ligeledes kan finite elementmetoden anvendes til løsning af varmeledningsligningen ved hjælp af et passende variationsprincip. (Zienkiewicz [1-103], f.eks. p. 339 samt Becker, Bizri og Bresler: FIRES - T - A Computer Program for the Fire Response of Structures, og Wickström [1-101] og [1-100]).

Blandt de maskinelle beregningsmetoder er der i de seneste år fremkommet nogle, der på én gang opererer med varmeledning som ovenfor beskrevet og de varmemængder, der transporteres med fugt i materialet.

Således fremkom et program for endimensionale strømninger i beton af Bennet, Claesson og Thelandersson [1-88] i 1976 og fra 1979 kendes resultater for de endimensionale strømme samt en todimensional rotations-symmetrisk undersøgelse af forholdene omkring et varmt punkt begge for meget hurtige opvarmninger (80°C pr. min.), Bažant og Thonguthai [1-7].

De hurtige opvarmninger kan have interesse i forbindelse med undersøgelser af reaktortanke, men også ved vurdering af forholdene ved modelforsøg til bestemmelse af visse termiske tilstande, samt naturligvis ved særligt kraftige brandpåvirkninger.

Som det ses at det foregående, kan temperaturforholdene i et profil bestemmes med praktisk taget vilkårlig nøjagtighed, blot man vil ofre de fornødne midler og den fornødne tid derpå.



Eksempel på en løsningsflade.

Behovet for simple løsninger til varmeledningsligningen må dog ikke underkendes. For mange brandtekniske vurderinger vil afvigelser på 10-20°C ikke være afgørende for resultatet, og da kan en enkel tilnærmelse være langt mere berettiget end en fin, men langsommelig og dyr beregning. Hertil kommer, at usikkerheden på bestemmelsen af varmeledningstallet kan være så betydelig, at afvigelserne på resultatet som følge heraf kan overstige det, man har vundet i nøjagtighed ved anvendelse af en fin metode.

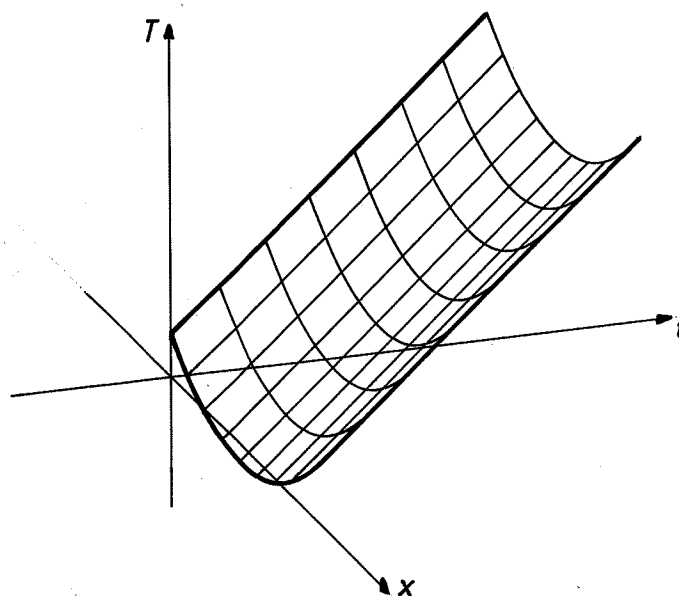
Betragtes varmeledningsligningen for det endimensionale tilfælde

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

hvor a er temperaturledningstallet ($a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$), der her antages konstant, vil løsninger kunne afbildes som flader i et rumligt (x, t, T) -koordinatsystem.

For ethvert punkt på en sådan løsningsflade skal gælde, at den anden afledede (den tilnærmede krumning) i x -retningen skal være proportional med hældningen i t -retningen.

Opfylder fladen de nødvendige randbetingelser f.eks. begrænsende ledekurver på tre sider, repræsenterer den det partikulære integral, der er den eksakte løsning til problemet.



Parabolisk løsningsflade.

En af de simpleste flader, man kan tænke sig som løsningsflade, har konstant hældning i t -retningen og dermed konstant andenafledet i x -retningen, d.v.s parabelledeskurver

$$T = T_0 + C_0 x + C_1 x^2 + 2a C_1 t$$

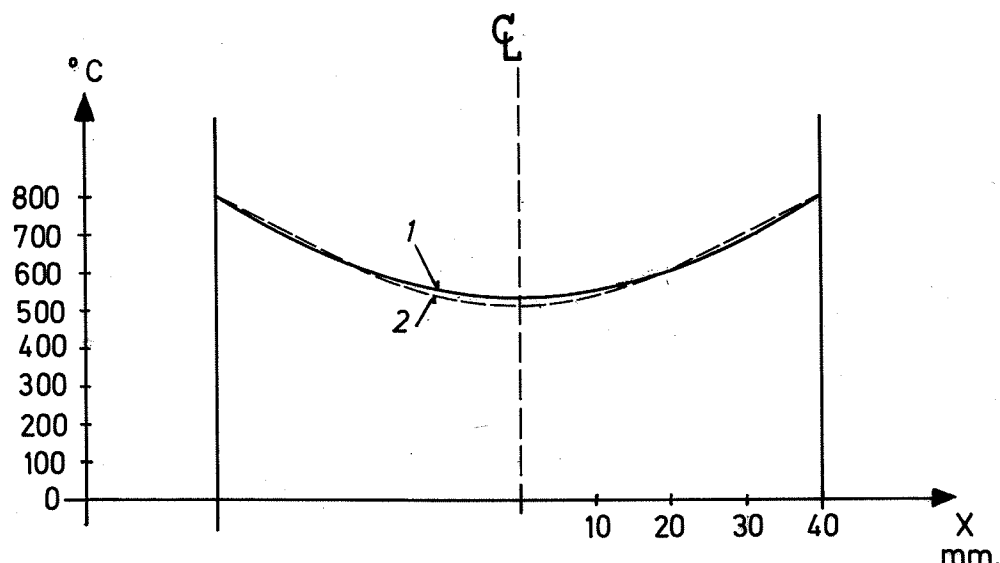
hvor T_0 , C_0 og C_1 er arbitrære konstanter.

Tilfældet svarer til to-sidet opvarmning af et vægprofil med konstant opvarmningshastighed $2aC_1$ på overfladen i uendelig tid.

I virkeligheden skal en opvarmning jo begynde på et tidspunkt, og den rigtige løsning vil da have en retlinet begyndelsesledeskurve, men jo længere tid en konstant opvarmning har varet, jo bedre vil parabelen være som tilnærmet løsning.

I den praktiske konstruktion vil varmeledningstallet λ (W/m°C) udvise faldende tendens ved opvarmning og c_p en svagt stigende (bortset fra fordampningsvarmen), hvorfor a vil falde i løbet af opvarmningsperioden.

Fladen vil derfor i praksis hurtigere konvergere mod den tilnærmede, end betragtningerne ovenfor med fast a vil give.



Temperaturfordeling i strengbetondragerkrop IB-30/108

1) parabel

2) EDB - beregning fra Weiss [1-99]
(efter 1h standardbrand).

Løsningen er dog normalt så grov, at den kun med rimelighed anvendes for langsomme opvarmninger (materialeprøvning) og/eller smalle tværsnit (f.eks. kroppe i strengbetondragere).

For halvuendelige medier kan andre simple løsninger gives. Dersom f.eks. temperaturen øges eksponentielt med tiden, ses umiddelbart af fladens beskaffenhed, at temperaturprofilerne også må blive eksponentielle.

Altså fås løsninger af formen

$$T = T_0 + C_0 x + C_1 e^{(At - \sqrt{\frac{A_1}{a}} x)}$$

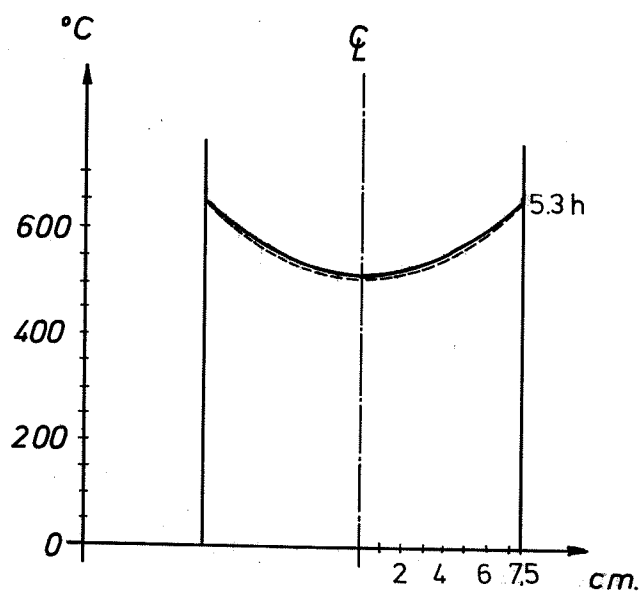
hvor T_0 , C_0 , C_1 og A_1 er arbitrære konstanter.

Dersom problemet kan betragtes som en dæmpet svingning, ses den eksakte løsning at blive

$$T = T_0 + C_0 x + C_1 e^{-\sqrt{v/2a} x} \sin(vt - \sqrt{v/2a} x)$$

hvor T_0 , C_0 og C_1 er arbitrære konstanter og v er vinkelhastigheden, idet overfladens temperatur ved denne løsning forudsættes at variere efter udtrykket

$$T = T_0 + C_1 \sin(vt)$$



*Temperaturfordeling i en
standardcylinder opvarmet 2°C/min.*

— paraboloid

----- fra Anderberg et al. [1-3].

Udtrykket kan få en række anvendelser for tykke konstruktionsdele, idet overfladetemperaturerne herfor ofte vokser efter forløb, der kan ligne en sinusfunktion.

Betragtes omdrejningscylindre, skrives varmeledningsligningen på polær form

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Også her er parablen en eksakt løsning

$$T = T_0 + C \cdot r^2 + 4Cat$$

der især kan være nyttig ved hurtig vurdering af temperaturforholdene i jævnt og langsomt opvarmede cylinderprøvelegemer.

Største temperaturforskel i et sådant profil bliver da

$$\Delta T = \frac{1}{4a} R^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

hvor R er legemets ydre radius.

I visse tilfælde vil led af højere orden dog være af interesse f.eks.

$$T = T_0 + C_1 r^2 + 4C_1 a t + C_2 r^2 t + C_2 \cdot \frac{1}{16a} r^4 + 2C_2 a t^2$$

hvor temperaturen varierer parabolisk med tiden.

Endelig bør nævnes, at superposition kan anvendes på eksakte løsninger til varmeledningsligningen, hvorved mulighederne for at opnå rimelige tilnærmelser til specielle randbetingelser forbedres.

SUMMARY PART 1

A survey is given of the material properties of concrete during and after having been under the exposure to high temperatures.

The basic of this survey is partly a simultaneous critical use of information from the literature, and partly my own observations. The author is, therefore, totally responsible for the derivations of all theories stated in this thesis, unless explicit references are given.

To illustrate the fire technical conditions of individual concretes I have made revisions and drawings of 168 curves of mechanical- and 48 curves of thermal properties. A test series of totally 230 standard cylindres of Danish concrete have given ample opportunity for visual observations and contributed information of the variations of the residual compressive strength to the maximum temperature. The modulus of elasticity and the Poisson ratio have been measured on 30 of these cylindres. Furthermore, to a small extent, I have made investigations to enlighten more specific questions in connection with the theories stated.

LITTERATUR

- [1-1] ABRAMS, M.S.:
Compressive Strength of Concrete at
Temperatures to 1600 F.
ACI, SP-25, pp. 33-58.
Detroit 1968.
Også: PCA, Research and Development
Laboratories, Ser. 1387-1, nov. 1968.
- [1-2] ANDERBERG, Y. MAGNUSSON, S.E. PETTERSSON, O.
THELANDERSSON, S. WICKSTRÖM, U.:
An Analytical Approach to Fire Engineering
Design of Concrete Structures.
ACI-SP-55-16, pp. 409-438.
Detroit 1978.
- [1-3] ANDERBERG, Y. THELANDERSSON, S.:
Stress and Deformation Characteristics of
Concrete at High Temperatures.
2. Experimental Investigation and
Material Behaviour Model.
Bulletin 54.
Lund Institute of Technology.
Lund 1976.
- [1-4] ANDERBERG, Y.:
Fire-exposed Hyperstatic Concrete Structures.
Division of Structural Mechanics and Concrete
Construction.
Lund Institute of Technology.
Bulletin 32, Lund 1973.
Også: Bulletin 55, Lund 76.
- [1-5] BALDWIN, R. NORTH, M.A.:
A Stress-strain Relationship for Concrete
at High Temperatures.
University of London 1974.
- [1-6] BARTHELEMY, B. KRUPPA, J.:
Résistance au feu des structures béton,
acier, bois.
Editions Eyrolles.
Paris 1978.
- [1-7] BASANT, Z.P. THONGUTHAI, W.:
Pore Pressure in Heated Concrete Walls:
Theoretical Prediction.
Magazine of Concrete Research, Vol. 31, no 107,
pp. 67-76. June 1979.
- [1-8] BESSEY, G.E.:
The Visible Changes in Concrete
or Mortar Exposed to High Temperatures.
National Building Studies,
Technical Paper No. 4.
Department of Scientific and Industrial Research.
Building Research Station. London 1950.

- [1-9] BUSHEV, V.S. PCELINTSEV, V.A. FEDORENKO, V.S. YAKOVLEV, A.I.:
Fire Resistance of Buildings.
(Огнестойкость зданий). Oversat på:
National Lending Library for Science and
Technology af J.E. Baker.
Fire Research Station. 1966.
- [1-10] CABELL-ALLEN, B. DESAI, P.M.:
The Influence of Aggregate on the
Behaviour of Concrete at Elevated Temperatures.
Nuclear Engineering and Design, V. 6, No. 1.
pp. 65-77.
North-Holland Publishing Company.
Amsterdam 1967.
- [1-11] CARLSEN, B.E. Jensen, B.:
Branddimensionering af jernbetonkonstruktioner.
Byggeindustrien 12:1976, pp. 44-48.
- [1-12] CARLSEN, B.E. JENSEN, B.C. OLESEN, F.B.
PEDERSEN, E.:
Brandteknisk dimensionering.
En indstilling om indarbejdning af brand-
tekniske dimensioneringsmetoder i DIF's
konstruktionsnormer.
DIF. København 1977.
- [1-13] CEMBUREAU/FIP:
Concrete for Fire Resistant Construction.
Cement and Concrete Association.
Wexham Springs, 1979.
- [1-14] CIB, W14/78/81 (UK):
Draft Recommendations the Basis of Design
for the Fire Protection of Building Structures.
Copenhagen, May 1978.
- [1-15] CRISPINO, E.:
Studies on the Technology of Concretes
under Thermal Conditions.
ACI, SP-34, pp. 443-479.
Detroit, 1972.
- [1-16] CRUZ, C.R.:
Elastic Properties of Concrete at
High Temperatures.
Journal of the PCA Research and Development
Laboratories, Vol. 8, No. 1, pp. 37-45.
Jan. 1966.
Reprinted as: Research Department Bulletin 191.
- [1-17] DESOV, A.E. NEKRASOV, K.D. MILOVANOV, A.F.:
Cube and Prism Strength of Concrete
at Elevated Temperatures.
ACI, SP-34, pp. 423-434.
Detroit, 1972.

- [1-18] ELLERIIS, J. TEJLGAARD, N.:
Model-brandforsøg med betonbjælker.
Eksamensprojekt, Instituttet for Husbygning.
Lyngby 1976.
- [1-19] FIP/CEB:
Guides to Good Practice.
FIB/CEB - Recommendations for the Design
of Reinforced and Prestressed Concrete
Structural Members for Fire Resistance.
1975.
- [1-20] FIP/CEB:
Report on Methods of Assessment of the
Fire Resistance of Concrete Structural
Members.
15.393.
Cement and Concrete Association.
Wexham Springs, 1978.
- [1-21] FISCHER, R.:
Über das Verhalten von Zementmörtel und
Beton bei höheren Temperaturen.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.
Heft 214, pp. 61-128.
Berlin 1970.
Eller: Mitteilungen aus den Institut für
Massivbau an der T.H.Darmstadt, Heft 14, 1967.
Eller: Doctoral Thesis, No. 17.
Technische Hochschule, Darmstadt 1967.
- [1-22] GAZE, R. ROBERTSON, R.H.S.:
Some Observations on Calcium Silicate
Hydrate (I) - Tobermorite.
Magazine of Concrete Research, Vol. 8,
No. 22, pp. 7-12.
London, March 1956.
- [1-23] GERTIS, K.:
Feuchtesorption und nichtisotherme
Mehrphasen-transportvorgänge in Schutzraum-
decken bei Brandeinwirkung.
Bauwirtschaft 33, Heft 6, pp. 173-175.
Universität Essen 1979.
- [1-24] GRAF, O. ALBRECHT, W. SCHÄFFLER, H.:
Die Eigenschaften des Betons.
Versuchsergebnisse und Erfahrungen zur
Herstellung und Beurteilung des Betons.
Springer-Verlag.
Berlin, Göttingen, Heidelberg 1960.
- [1-25] GREEN, J.K.:
Rehabilitering av betong-konstruktioner
etter brann.
Norcem-temahefte 1975. Oversat til norsk
fra artikkel i The Architect's Journal 14.
and 21. July 1971.

- [1-26] GREEN, J.K.:
Some Aids to the Assessment of Fire Damage.
Concrete, January 1976.
- [1-27] GUSTAFERRO, A.H. ABRAMS, M.S. SALSE, E.A.B.:
Fire Resistance of Prestressed Concrete
Beams.
Study C: Structural Behavior During Fire
Tests.
Research and Development Bulletin RD009,
01 B, PCA, Skokie Illinois 1971.
- [1-28] HANNANT, D.J.:
Effects of Heat on Concrete Strength.
Engineering, 21. February 1964, pp. 302.
- [1-29] HANSEN, T.C. ERIKSSON, L.:
Temperature Change Effect on Behavior of
Cement Paste, Mortar and Concrete Under Load.
Journal of the ACI, Proc. Vol. 63, No. 4,
pp. 489-504, 1966.
- [1-30] HANSEN, T.C.:
Textbook on Concrete Technology.
Technical Report No. 10 of the UNDP/UNIDO.
Ministry of Public Works and Electric Power.
Directorate of Building Research.
Bandung Indonesia 1976.
- [1-31] HARADA, T. TAKEDA, J. YAMANE, S. FURUMURA, F.:
Strength, Elasticity and Thermal Properties
of Concrete Subjected to Elevated Temperatures.
ACI, SP-34, pp. 377-406.
Detroit 1972.
- [1-32] HARDERS, F. KIENOW, S.:
Feuerfestkunde - Herstellung, Eigenschaften
und Verwendung feuerfester Baustoffe.
Springer-Verlag,
Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960.
- [1-33] HARMATHY, T.Z. BERNDT, J.E.:
Hydrated Portland Cement and Lightweight
Concrete at Elevated Temperatures.
NRC 8847, Authorized Reprint from Journal
of the ACI, Vol. 63, No. 1, January 1966.
Research Paper No. 280. Division of Building
Research, Ottawa 1966.
- [1-34] HARMATHY, T.Z.:
A Comprehensive Creep Model.
Transactions of the ASME Journal of
Basic Engineering, Vol. 89, Series D. No. 3,
pp. 496-502. September 1967.
Reprinted: Research Paper No. 324 of the
Devision of Building Research, Ottawa 1967.

- [1-35] HARMATHY, T.Z.:
Determining the Temperature History of
Concrete Constructions Following Fire Exposure.
Journal of the ACI, Proc. Vol. 65, pp. 959-964.
November 1968.
- [1-36] HARMATHY, T.Z.:
Effect of Moisture on the Fire Endurance
of Building Elements.
Division of Building Research.
Research Paper 270.
Ottawa 1965.
Eller: Moisture in Materials in Relation
to Fire Tests.
ASTM, Special Technical Publication No. 385,
pp. 74-95, 1964.
- [1-37] HARMATHY, T.Z.:
Thermal Properties of Concrete at
Elevated Temperatures.
ASTM Journal of Materials, Vol. 5, No. 1,
March 1970.
- [1-38] INGBERG, S.H.:
Influence of Mineral Composition of
Aggregates on Fire Resistance of Concrete.
ASTM, Proc. Vol. 29, No. 2, pp. 824-829.
1929.
- [1-39] IRVING, J.:
The Effect of Elevated Temperatures on
Concrete and Concrete Structures.
FIB/3/1.
Wexham Springs, September 1975.
- [1-40] ISSEN, L.:
Scaled Models in Fire Research on
Concrete Structures.
PCA, Vol. 8, No. 3, pp. 10-26.
September 1966.
- [1-41] JENSEN, B.C.:
Beton og brand. Bjælkens brandmodstandsevne.
ATV 1977.
- [1-42] JENSEN, B.C.:
Beton og brand. Mekaniske og termiske
egenskaber ved høje temperaturer.
ATV's Brandgruppe.
Glostrup 1976.
- [1-43] JENSEN, P. VESTERLØKKE, M.:
Glasfiberarmeret beton som permanent
forskalling under brandpåvirkning.
Eksamensprojekt Instituttet for Husbygning,
DTH 1979.

- [1-44] KAKKO, H.:
Brandbeständighet.
Fra FIP-kongres i London, maj 1978.
Nordisk Betong 5:1978, pp. 11-13.
- [1-45] KAPLAN, M.F. ROUX, F.J.P.:
Effects of Elevated Temperature on the
Properties of Concrete for the Cotainment
and Shielding of Nuclear Reactors.
ACI, SP-34, pp. 437-441.
Detroit 1972.
- [1-46] KORDINA, K.:
Das Verhalten von Stahlbeton und
Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff.
Beton, Herstellung, Verwendung, Vol. 13, Heft 2.
Beton-Verlag GmbH.
Düsseldorf, Februar 1963.
- [1-47] LANGDON-THOMAS, G.J.:
Fire Safety in Buildings,
Principles and Practice.
Adam & Charles Black.
London 1972.
- [1-48] LANKARD, D.R. BIRKIMER, D.L. FONDRIEST, F.F.
SNYDER, M.J.:
Effects of Moisture Content on the
Structural Properties of Portland Cement
Concrete Exposed to Temperatures up to 500 F.
Symposium on Effects of Temperatures on
Properties of Concrete.
ACI, SP-25, pp. 59-102.
Detroit 1971.
- [1-49] LEHMANN, H. MÄLZIG, G.:
Über die Heissdruckfestigkeit von Beton.
Tonindustrie-Zeitung und Keramische Rundschau.
Vol. 84, Heft 17, pp. 414-417.
Hermann Hübener Verlag.
Goslar, September 1960.
- [1-50] LIE, T.T.:
Calculation of the Fire Resistance of
Composite Concrete Floor and Roof Slabs.
Fire Technology, NFPA, Vol. 14, No. 1.
Boston, February 1978.
- [1-51] LIE, T.T.:
Fire and Buildings.
Architectural Science Series.
Applied Science Publishers. Ltd.
London 1972.
- [1-52] LUNDSGAARD, H.:
Prøvning - klassifikation - virkelig brand.
Brandværn 7:1978.

- [1-53] MAES, M. KEUSTERMANS, L. VAN GEMERT, D.:
Thermische Schockbelastungen auf Betonwände.
Die Bautechnik, Heft 1.
Januar 1979.
- [1-54] MALHOTRA, H.L.:
The Effect of Temperature on the Compressive
Strength of Concrete.
Magazine of Concrete Research.
Vol. 8, No. 23, pp. 85-100.
London, August 1956.
- [1-55] MARECHAL, J.C.:
Contribution a l'étude des propriétés
thermiques et mécaniques du béton en
fonction de la température.
Annales de l'Institute Technique du
Batiment et des Travaux Publics, No. 274.
Octobre 1970.
- [1-56] MARECHAL, J.C.:
Creep of Concrete as a Function of Temperature.
ACI, SP-34, pp. 547-564.
Detroit 1972.
- [1-57] MARECHAL, J.C.:
Thermal Conductivity and Thermal Expansion
Coefficients of Concrete as a Function of
Temperature and Humidity.
ACI, SP-34, pp. 1047-1057.
Detroit 1972.
- [1-58] MARECHAL, J.C.:
Variations in the Modulus of Elasticity
and Poisson's Ratio with Temperature.
ACI, SP-34, pp. 495-503.
Detroit 1972.
- [1-59] MEYER-OTTENS, C.:
Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen
aus Beton bei Brandbeanspruchungen.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 248.
Wilhelm Ernst & Sohn KG.
Berlin 1975.
Eller: Dissertation Technische Univ.
Fakultät für Bauwesen.
Braunschweig 1972.
- [1-60] MILOVANOV, A.F. KAMBAROV, K.U. MALKINA, T.N.:
(Translated by Maisel, B.)
Fire Resistance of Ceramzite Concrete
Structures.
From Industrial Building No. 5, May 1976,
pp. 17-19.
FIP Notes 76, September, October 1978.

- [1-61] MOFFATT, W.G. HAYDEN, H.W. WULFF, J.:
The Structure and Properties of Materials,
Vol. 3, Mechanical Behavior.
John Wiley & Sons Inc.
New York 1965.
- [1-62] MOFFATT, W.G. PEARSALL, G.W. WULFF, J.:
The Structure and Properties of Materials,
Vol. 1, Structure.
John Wiley & Sons Inc.
New York, London, Sidney 1964.
- [1-63] NASSER, K.W. MARZOUK, H.M.:
Properties of Mass Concrete Containing
Fly Ash at High Temperatures.
ACI-Journal pp. 537-550.
ACI, April 1979.
- [1-64] NEKRASSOW, K.D.:
Hitzebeständiger Beton.
(tysk udg. af: Жароупорный бетон 1959).
Bauverlag GmbH.
Wiesbaden-Berlin 1961.
- [1-65] NEVILLE, A.M.:
Properties of Concrete.
The Pitman Press.
Bath 1977.
- [1-66] NIELSEN, G.:
Lecabetons styrkeegenskaber ved høje
temperaturer.
Kursusarbejde, Instituttet for Husbygning,
DTH, Lyngby 1977.
- [1-67] NIZAMUDDIN, Z. BRESLER, B.:
Fire Response of Reinforced Concrete Slabs.
Journal of the Structural Division.
Vol. 105, No. ST. 8, pp. 1653-1672.
August 1979.
- [1-68] PARKER, T.W. NURSE, R.W. BESSEY, G.E.:
The Estimation of the Maximum Temperature
Attained in Building Fires from Examination
of the Debris, part 1.
The Visible Changes in Concrete or Mortar
Exposed to High Temperatures, part 2.
National Building Studies, Techn. Paper No.4.
Dept. of Scientific and Industrial Research.
Building Research Station.
London 1950.
- [1-69] PETTERSSON, O. Ödeen, K.:
Brandteknisk dimensionering. Principer,
underlag, exempel.
Liber Förlag, Vällingby.
Stockholm 1978.

- [1-70] PETTERSSON, O.:
Brandteknisk dimensionering av
armerade betongkonstruktioner.
Lund 1971.
- [1-71] PETTERSSON, O.:
Den byggnadstekniska brandforskning
i dag och i framtiden.
Institutionen för konstruktionslära.
Kungliga tekniska Högskolan. Bulletin 11.
Stockholm 1964.
- [1-72] PETTERSSON, O.:
Structural Fire Protection.
Report at CIB-W14 Meeting in Copenhagen,
May 1978.
Bulletin 60, Lund Institute of Technology.
Lund 1978.
- [1-73] PETZOLD, A. RÖHRS, M.:
Beton für hohe Temperaturen.
Beton-Verlag GmbH, 216 p.
Düsseldorf 1965.
- [1-74] PHILLEO, R.:
Some Physical Properties of Concrete
at High Temperatures.
Journal of ACI, Proc. Vol. 54, No. 10,
pp. 857-864, April 1958.
Eller: PCA, Bulletin 97, p. 857.
Skokie Illinois, April 1958.
- [1-75] PIHLAJAVAARA, S.E.:
An Analysis of the Factors Exerting Effect
on Strength and Other Properties of Concrete
at Elevated Temperatures.
ACI, SP-34, pp. 347-354.
Detroit 1972.
- [1-76] REICHEL, V.:
How Fire Affects Steel-to-Concrete Bond.
Building Research and Practice, Vol. 6, No. 3.
The Journal of CIB.
May/June 1978.
- [1-77] SAEMANN, J.C. WASHA, G.W.:
Variation of Mortar and Concrete
Properties with Temperature.
Journal of the ACI, Vol. 54, No. 5, pp. 385-395.
November 1957.

SIGEN, R.

Kochtemperaturverformungsmessungen an
Beton- und Spannbeton.

Pro:

KORDINA, F. RUSTACE, J.E.

- [1-78] SAGER, H.:
Hochtemperaturverbundverhalten von
Beton- und Spannstahl.
Fra:
KORDINA, H. ROSTÁSY, F.S.:
Sonderforschungsbereich 148.
Brandverhalten von Bauteilen.
Kolloquium am 07 und 08 Juni 1979.
Technische Universität Braunschweig.
Mai 1979.
- [1-79] SAITO, H.:
Behavior of end Restrained Concrete
Member in Fire.
BRI, Research Paper No. 32.
Building Research Institute.
Tokyo, March 1968.
- [1-80] SALSE, E. LIN, D.T.:
Structural Fire Resistance of Concrete.
Journal of the Structural Division,
Vol. 102, No. ST1.
January 1976.
- [1-81] SCHNEIDER, U.:
Festigkeits- und Verformungsverhalten
von Beton under stationärer
Temperaturbeanspruchung.
Die Bautechnik 4:1977, pp. 123-132.
- [1-82] SHORTER, G.W. HARMATHY, T.Z.:
Discussion on the Fire Resistance of
Prestressed Concrete Beams.
Proceedings of the Institution of
Civil Engineers. Vol. 20, p. 313.
London 1961.
- [1-83] SMITH, P.:
Resistance to High Temperatures.
ASTM-STP 169 B.
Tests and Properties of Concrete.
Capter 25, pp. 388-419.
1978.
- [1-84] STATENS RÅD FÖR BYGGNADSFORSKNING:
Förstärkning av betonkonstruktioner.
J & W's tekniska sekretariat.
Stockholm 1978.
- [1-85] SULLIVAN, P.J. POUCHER, M.P.:
The Influence of Temperature on the
Physical Properties of Concrete and
Mortar in the Range 20°C to 400°C.
Temperature and Concrete, Symposium on
Effects of Concrete. ACI, SP-25, pp.103-135.
Detroit 1971.

- [1-86] SYRKIN, Y.K. DYATKINA, M.E.:
Structure of Molecules and the Chemical Bond.
Dover Publications Inc.
New York, 1964.
- [1-87] THELANDERSSON, S. ANDERBERG, Y.:
Stress and Deformation Characteristics
of Concrete at High Temperatures.
1. General Discussion and Critical Riview
of Literature. Bulletin 34.
Lund 1973.
- [1-88] THELANDERSSON, S. BENNET, J. CLAEISSON, J.:
Calculation of Temperature,
Moisture and Pressure.
Distributions in Concrete Exposed to Fire.
Department of Mathematical Physics,
Division of Structural Mechanics, LTH.
Lund 1976.
- [1-89] THELANDERSSON, S.:
Betongkonstruktioners brandsäkerhet.
Nordisk Betong, No. 5, pp. 11-14.
1977.
- [1-90] THELANDERSSON, S.:
Betongkonstruktioner vid höga temperaturer
- en översikt.
VAST-forskningsråd för byggnadsteknik.
Svenska Kraftverksföreningens Utviklings-
afdeling.
Stockholm 1974.
Eller: Bulletin 43, LTH.
Lund 1974.
- [1-91] THELANDERSSON, S.:
Characteristics of Fire Exposure and
Consequences on Mechanical Behavior of
Concrete.
Lund Institute of Technology, Bulletin 44.
Lund, november 1974.
- [1-92] THELANDERSSON, S.:
Effect of High Temperatures on Tensile
Strength of Concrete.
Nordisk Betong 2:1972.
- [1-93] THELANDERSSON, S.:
Mechanical Behavior of Concrete under
Torsional Loading at Transient, High-
temperature Conditions.
Bulletin 46, Lund Institute of Technology.
Divison of Structural Mechanics and
Concrete Construction.
Lund 1974.

- [1-94] UDDIN, T. CULVER, C.G.:
Effects of Elevated Temperature on
Structural Members.
Journal of the Structural Division,
Vol. 101, No. ST7, pp. 1531-1549.
July 1975.

- [1-95] WAUBKE, N.V.:
Transportphänomene in Betonporen.
Fakultät für Bauwesen,
Technischen Hochschule Braunschweig.
Dissertation 6./6. 1966.

- [1-96] WEIGLER, H. FISCHER, R.:
Beton bei Temperaturen von 100°C bis 750°C.
Beton 2:1968.
Eller: Mehmel-Festschrift p. 87. Beton-Verlag.
Düsseldorf 1967.

- [1-97] WEIGLER, H. FISCHER, R.:
Influence of High Temperatures on
Strength and Deformations of Concrete.
ACI, SP-34, pp. 481-493.
Detroit 1972.

- [1-98] WEIGLER, H. FISCHER, R.:
Über den Einfluss von Temperaturen über
100°C auf die Druckfestigkeit von Zement-
mörtel.
Betonstein Zeitung Vol. 29, Heft 10,
pp. 493-502. 1963.
Eller: Bulletin No. 164.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, pp. 1-13.
Berlin 1964.

- [1-99] WEISS, P.:
Spädbetons brandtekniske egenskaber.
Eksamensprojekt, Instituttet for Husbygning,
DTH.
Lyngby 1976.

- [1-100] WICKSTRÖM, U.:
A Numerical Procedure for Calculating
Temperature in Hollow Structures Exposed
to Fire.
Lund Institute of Technology Department
of Structural Mechanics. Report No. 79-3.
1979.

- [1-101] WICKSTRÖM, U.:
TASEF-2 - A Computer Program for Temperature
Analyses of Structures Exposed to Fire.
Lund Institute of Technology Department of
Structural Mechanics. Report No. 79-2.
1979.

- [1-102] WILCE, B.J.:
High Strength Concrete in the Repair of
Fire Damage.
Concrete, March 1975.
- [1-103] ZIENKIEWICZ, O.C.:
The Finite Element Method in Engineering
Science.
McGraw-Hill.
London 1971.
- [1-104] ZOLDNERS, N.G. WILSON, H.S.:
Effect of Sustained and Cyclic
Temperature Exposures on Lightweight Concrete.
ACI, SP-39, pp. 149-178.
Ottawa 1973.
- [1-105] ZOLDNERS, N.G.:
Effect of High Temperatures on Concretes
Incorporating Different Aggregates.
ASTM, Proc. Vol. 60, pp. 1087-1108.
1960.
- [1-106] ZOLDNERS, N.G.:
Thermal Properties of Concrete under
Sustained Elevated Temperatures.
ACI, SP-25, pp. 1-31.
Detroit 1971.
- [1-107] ÖDEEN, K. NORDSTRÖM, Å.:
Termiska egenskaper hos betong
vid höga temperaturer.
Cement och betong pp. 85.93.
1:1972.
- [1-108] ÖDEEN, K.:
Betongfasaders motståndsförmåga mot brand.
Institutionen för Konstruktionslära.
Kungliga tekniska Högskolan. Bulletin 13.
Stockholm 1964.
Eller: Nordisk Betong 2. 1964.
- [1-109] ÖDEEN, K.:
Betongkonstruktioners brandmodstånd.
Cement och betong. Vol. 46, pp. 91-108.
1:1971.
- [1-110] ÖDEEN, K.:
Fire Resistance of Prestressed Concrete
Double T-units.
CI48, Acta Polytechnica Scandinavia.
National Swedish Institute for
Materials Testing.
Stockholm Fire Engineering Laboratory,
Series No. 48, 1:1968.

- [1-111] ÖDEEN, K.:
Teoretisk bestämning av temperaturförloppet
i några av brand påverkade konstruktioner.
Institutionen för Konstruktionslära.
Kungliga tekniska Högskolan. Bulletin 9.
Stockholm 1963.
Särtryk ur Byggmästaren nr. 4, 1963.
- [1-112] ØSTERGAARD, P.:
Betonelementer og betonelementers samlinger
under brandforhold.
Eksamensprojekt Instituttet for Husbygning,
DTH 1972.
- [1-113] БОГОСЛОВСКИЙ, В.Н. РОЙТМАН, В.М.
МЕШАЛКИН, Е.А.:
Исследование стойкости строительных
материалов и конструкций к взрывообразной
потере целостности в условиях пожара.
Отчет по НИР.МИСИИ.
ВВ. Куйбышева 1976.
- [1-114] ЖУКОВ, В.В.:
Причины взрывообразного разрушения
бетона при пожаре.
Бетон и железобетон 3:1976.
- [1-115] НЕКРАСОВ, К.Д. ТАРАСОВА, А.П.:
Жаростойкий бетон на портландцементе.
Издательство литературы по строительству.
Москва 1969.
- [1-116] ПЕТРОВ-ДЕНИСОВ, В.Г. МАСЛЕННИКОВ, Л.А.
ПИЧКОВ, А.М.:
Тепло- и влагоперенос при сушке и первом
нагревании жаростойкого бетона.
Бетон и железобетон 2:1972.

