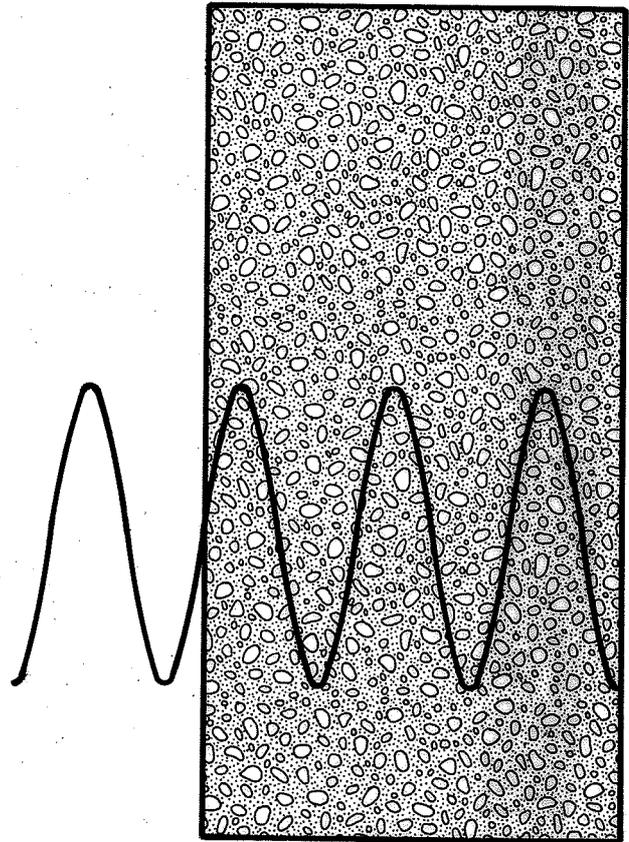


INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **140**



DEL 2

KRISTIAN HERTZ

**BETONKONSTRUKTIONERS
BRANDTEKNISKE EGENSKABER**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole

Lyngby 1980

INDHOLD DEL 2

side

DEL 1 (174 p.) slutter	0
INDHOLD DEL 2	2
RESUMÉ DEL 2	3
SYMBOLLISTE DEL 2	4
VARMEBESTANDIG BETON	6
Forsøg med BST 1200	10
MODELFORSØG MED BETONKONSTRUKTIONER	13
DIELEKTRISK OPVARMNING AF BETONPRØVELEGEMER	15
Indledning	15
Om dielektricitet	16
Direkte dielektrisk opvarmning	18
Opvarmning i mikrobølgeovn	20
Beton og mikrobølgeenergi	22
Konklusion	28
SKALAFORSØG MED MIKROBØLGEOPVARMNING	29
SUMMARY PART 2	32
LITTERATUR DEL 2	33

RESUME - DEL 2

I denne del er behandlet forslag til forbedringer af beton og prøvningsmetoder.

Der omtales først muligheder for at komponere beton, som kan honorere krav om brandbestandighed.

Dernæst fremsættes en ny idé om at anvende mikrobølgeenergi i forbindelse med materialebrandprøvning.

Mulighederne herfor belyses ud fra et litteraturstudium over emnet, og et teoretisk begrundet forslag til metodens realisation opstilles.

Herudover behandles muligheden for gennemførelse af skalaforsøg til kontrol af temperaturfordelingen i dielektrisk opvarmede legemer.

Af økonomiske grunde er en eksperimentel undersøgelse over disse emner endnu ikke gennemført.

Endelig omtales kort, hvorfor skalaforsøg til samtidig bestemmelse af termiske og mekaniske tilstande i brandpåvirkede betonkonstruktioner ikke kan lade sig gøre.

SYMBOLLISTE - DEL 2

A	areal
A	forkortelse for Al_2O_3
a	energi i mikrobølgefelt
$a_{c/o}$	forhold mellem afsat energi i centrum og på overflade
C	forkortelse for CaO
c_p	specifik varmfylde
D	dielektrisk forskydning
D_o	dielektrisk forskydningsamplitude
d	tykkelse
E	elasticitetsmodul
E	effekt
e	tøjning
F	forkortelse for Fe_2O_3
f	frekvens
H	forkortelse for H_2O
i	index
j	index
K	skalaforhold
k	index
l	længde
<u>P</u>	polarisering
Q	effekt pr. volumenenhed
R	radius
S	forkortelse for SiO_2
T	temperatur
t	tid
$\tan\sigma$	tabs-tangent
u	flytning
V	spændingsforskel
v	volumenkraft
x	afstand fra overflade
$x_{(1/e)}$	afstand, hvor $a_x = \frac{1}{e} \cdot a$
α	varmeudvidelseskoefficient
α	dæmpningskonstant
α_1	overgangsmodstand på overflade

δ	faseforskydningsvinkel
δ_{ij}	Kroneckers delta
ϵ'	dielektrisk konstant
ϵ''	tabs-faktor
ϵ_0	permittiviteten i vakuum
ϵ_r	relativ permittivitet
$\epsilon_r' - j\epsilon_r''$	komplex relativ permittivitet
ϵ	elektrisk feltstyrke
ϵ_0	feltstyrkeamplitude
λ	bølgelængde i dielektrikum
λ_0	bølgelængde
λ_i	varmeledningsevne
ν	Poissons forhold
ρ_0	massefylde
σ	mekanisk spænding
ω	vinkelfrekvens

VARMEBESTANDIG BETON

Ønsket om at udvikle varmebestandige konstruktionsdele er af meget gammel oprindelse.

Således udgav f.eks. kejser Neros administration efter Roms brand år 64 en række praktiske regler for nybyggeriet, hvori det bl.a. anbefaledes at anvende vulkanske stenmaterialer på grund af disses brandstabilitet.

I nyere tid er flere typer varmebestandige betoner udviklet, først og fremmest til brug for bygning af industrielle anlæg.

Skærpede brandtekniske krav til vore bygninger kan meget vel tænkes at føre til anvendelse af varmebestandige betoner ved særligt sårbare konstruktionsdele, eller hvor specielt store brandbelastninger måtte nødvendiggøre en beskyttelse.

I første del af dette arbejde er i detaljer gennemgået, hvilke virkninger, der medfører nedbrydning af den normale beton, når den udsættes for varme.

To forhold gjorde sig her særligt gældende: Dels tilslag, der udvidede sig meget forskelligt fra cementpastaen med temperaturen, og dels calciumhydroxiden, der afgav vand over ca. 500°C og optog vand ved afkølingen under kraftig ekspansion.

Princippet i udvikling af en varmebestandig beton er da ganske enkelt at modvirke disse uheldige forhold gennem materialevalget.

Tilslag, der arbejder fuldstændigt som den hydratiserede cementpasta kan formentlig ikke fremskaffes; men så små termiske udvidelser som muligt må være at foretrække.

Hertil kommer et ønske om en overfladebeskaffenhed, som giver et stærkt forbandt til cementpastaen, d.v.s. en ru overflade. En sådan vil bedre kunne overføre spændinger som følge af udvidelsesforskellene og derved hindre revnedannelser langs tilslagernes omkreds.

lette tilslag

Lette vulkanske tilslag såsom tuf og pimpsten er velegnede ud fra disse betragtninger, og prøvning af trykstyrkeforholdene af beton fremstillet dermed bekræfter dette klart (f.eks. Harada et al. [2-7].)

Lette tilslag har i øvrigt oftest en lille varmeledningsevne, der er fordelagtig for temperaturfordelingen over betontværnsnit-tet.

Kunstige tilslag kan også være velegnede. Chamottesten anvendes med held i mange varmebestandige betoner. Expanderet ler kan ligeledes give fordelagtige resultater (f.eks. Fischer [2-6]); men langt fra alle materialer i denne kategori udmærker sig derved (f.eks. Nielsen [2-16]).

Det kan muligvis skyldes glatte overflader og dårligt forbandt af de enkelte korn i visse produkter.

knust tegl

Knuste teglsten må set ud fra det ovenstående være et rimeligt tilslag. En prøvningsserie til belysning af dette materiales egenskaber bør derfor gennemføres, såfremt det skønnes rentabelt i anvendelse.

Et ønske om øget brandbestandighed af den nye beton kunne derved tænkes honoreret samtidig med løsning af et affaldsproblem i forbindelse med den påtænke byfornyelsesproces og løsning af det specielle danske problem med grusreservernes utilstrækkelighed.

Med hensyn til calciumhydroxidens uheldige indvirkning på betonens holdbarhed under - og især efter varmpåvirkning, er den logiske forholdsregel at reducere betonens indhold heraf.

puzzolaner

Anvendelse af puzzolaner er her en mulighed, der har været forsøgt. Et puzzolan er et materiale indeholdende højreaktivt silicium eller aluminium, som ved normal temperatur og under tilstedeværelse af vand kan reagere med calciumhydroxid, hvorved der dannes forbindelser med egenskaber, som dem, der opnås ved hydratisering af cement.

Den romerske beton var baseret på et sådant materiale, der hentedes fra lokaliteten Pozzuoli nær Napoli, hvorefter navnet.

Nasser og Marzouk [2-13] undersøgte virkningen af langvarige opvarmninger (fra 7 til 180 døgn) af beton tilsat pozzolith og flyveaske.

Der sporedes en vis forbedring i betonens trykstyrke op til ca. 150°C, hvorover der forekom et fald, hvis størrelse øgedes med varmepåvirkningstidens længde.

Forbedringen må skyldes en accelereret reaktion mellem puzzolanerne og calciumhydroxiden. Faldet derimod kan være foranlediget af calciumsilikat-hydraternes dekomponering under den langvarige påvirkning ved 200°C, hvor reaktionshastigheden for denne proces er maksimum.

Zoldners og Wilson [2-24] forsøgte at tilsætte henholdsvis flyveaske, kvartsmel og exlerstøv til beton med exler-tilslag.

Virkningen ved 300-, 500- og 700°C var ret beskeden på resttrykstyrken ved 40% erstatning af cementen, og manglede helt ved 25%. Den procentvise restbøjningsstyrke blev derimod generelt forbedret (med op til 20%).

Effekten ved simpel tilsætning af puzzolaner ser således ud til at være beskeden, sandsynligvis fordi man ikke derved har nået at binde al calciumhydroxiden samt fordi de forbindelser, som er dannet ved processerne har været relativt let nedbrydelige ved opvarmning.

I denne sammenhæng må især gøres opmærksom på, at de anvendte puzzolaner alle havde meget lave indhold af aluminiumsil-ter.

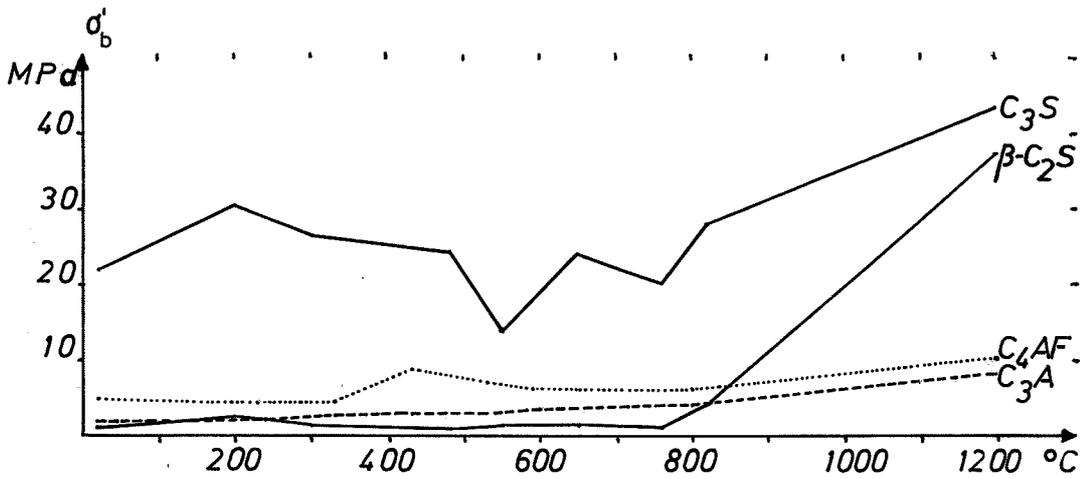
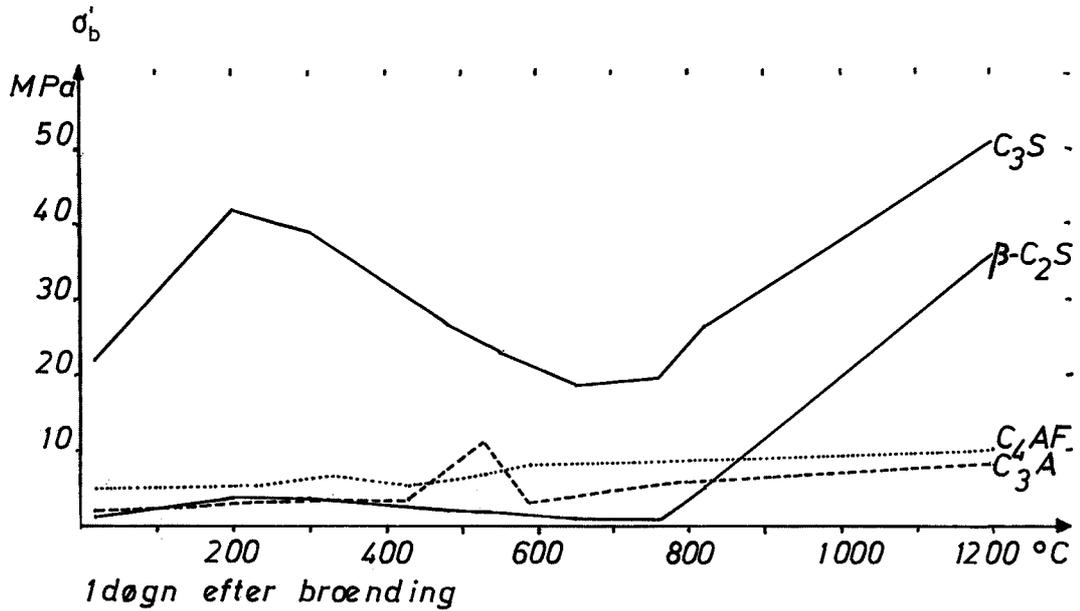
I Sovjetunionen har man siden halvtredserne systematisk søgt at udvikle varmebestandige betoner, baseret på portlandcement. (Nekrasov og Tarasova [2-25] og [2-14] samt Petzold og Röhrs [2-19]).

chamotte

Der anvendes i de mest grundliggende typer chamotte som tilslag såvel i form af grus, sand og mel.

Cementpasta med fintformalet chamotte får en trykstyrketilvækst inden for de første 100°C ved opvarmning, og et kraftigt fald i trykstyrken forekommer først over ca. 800°C.

Indtil 800°C er faldet moderat og udgør ialt kun ca. samme størrelse som tilvæksten (Nekrasov og Tarasova [2-25], p. 41).



28 døgn efter brøending

Absolutte værdier for resttrykstyrker af klinkermineralerne tilsat 300 vægt pct. chamotteemel.

Nekrassow [2-14]. (Sammenlign med fig. p. 1-18 del 1).

Til sammenligning indtræder det kraftige trykstyrkefald med fintformalet kvarts i cementpastaen omkring 400-600°C.

De anvendte chamotter har ret høje indhold af Al_2O_3 på 30-40%, og disse medgår til dannelse af stabile calciumaluminasilikater, som f.eks. $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ foruden forbindelserne mellem kvarts og calciumilte, som f.eks. $3CaO \cdot 2SiO_2$ (Nekrassow [2-14], p. 57).

For yderligere oplysninger om chamottebeton henvises til den detaljerede beskrivelse i de anførte referencer. Ved proportionering af en chamottebeton med rent danske materialer, må man dog erindre sig, at dansk cement har et særligt stort indhold af C_3S i forhold til de cementtyper, der er anvendt i de russiske varmebestandige betoner.

vandglas

Muligheden af at blande cement og vandglas til et varmostabilt materiale har været kendt i mange år. Beskyttende foringer i fyrkedler er bl.a. udført på denne måde, men materialet har også vist sig velegnet ved langt højere temperaturer, hvad der ligeledes er omtalt i ovennævnte østeuropæiske referencer.

aluminacement

Endelig vil varmebestandighed kunne opnås ved anvendelse af aluminacement i stedet for portlandcement.

Den problematiske calciumhydroxid forekommer da slet ikke, og hvis et stabilt tilslag som chamotte anvendes, opnår den hårdnede beton en god modstandsevne over for varmepåvirkning. Et hovedværk om disse materialer er Harders og Kienow [2-8], hvortil henvises.

Forsøg med støbemasse

Færdige blandinger kan købes, og for at få en idé om anvendeligheden til brandstabile konstruktioner er to simple materialeforsøg gennemført.

Af en kvalitet BST 1200 støbemasse udstøbtes til hvert forsøg under vibrering 6 stk. prøvecylindre med diameter 10 cm og højde 20 cm.

I en alder af 14 døgn blev 3 prøver brændt, medens 3 prøver anvendtes som reference.

I det første forsøg opvarmedes med 1°C pr. min. til 800°C, der blev holdt i 2 h, hvorpå afkøling med ikke over 1°C/min.

Vægttabet ved brændingen androg ca. 8% af prøvens vægt umiddelbart før brænding, og i den påfølgende uges luftlagring forekom kun en ubetydelig vægtforøgelse, ca. 0,08%.

Klangen af de brændte prøver var som glas, og trykstyrkerne efter en uges luftlagring fremgår af den viste tabel.

	Resttrykstyrke (MPa)	Vægttab (%)	Vægtøgning (%)
Brændt prøve:	35,7	7,9	0,07
Brændt prøve:	27,6	8,0	0,08
Brændt prøve:	23,6	8,5	0,09
Reference-prøve:	58,2		
Reference-prøve:	60,2		
Reference-prøve:	54,5		

Gennemsnitlig androg resttrykstyrken 50,2% af referenceprøvernes trykstyrke.

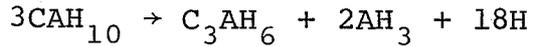
I det andet forsøg blev de 3 cylindre i en alder af 14 døgn placeret i en 40°C varm ovn, hvor vandfordampere tilvejebragte en relativ fugtighed på 75%.

Fugtigheden kontrolleredes med en hygrogaf. Efter 2 døgn i dette miljø, nedsænkedes prøverne under vand i yderligere 2 døgn, stadig ved 40°C. Trykprøvning foretages til samme tid som i første forsøg og nærværende skema viser resultatet:

	Resttrykstyrke (MPa)	Vægtøgning behandling%	Vægttab lagring%
Behandlet prøve:	41,8	2,4	2,2
Behandlet prøve:	46,1	2,4	2,2
Behandlet prøve:	39,7	2,5	2,3
Reference-prøve:	58,6		
Reference-prøve:	58,3		
Reference-prøve:	57,3		

Reststyrken var altså på kun 73,2% i gennemsnit efter fire døgn i et fugtigt, varmt miljø.

Årsagen til denne effekt skal søges i omdannelser af de instabile aluminhydrater CAH_{10} og C_2AH_8 til den mere stabile C_3AH_6 , f.eks. efter reaktionen



(Neville [2-15], p. 86).

Denne ligesom andre anvendelser af materialer, baseret på aluminacement, må derfor stærkt frarådes til konstruktioner, der kan blive udsat for svag varme og fugt.

Eksempler kendes på total forvitring af danske skorstensforinger, udført af sådanne støbemasser.

Erfaringer fra udlandet med aluminacementbetoner viser, at selv om nedbrydningen sker væsentligt langsommere ved lavere temperaturer, akkumuleres virkningen, så man med årene alligevel kan konstatere alvorlige svækkelser.

Varmebestandige betoner, baseret på aluminacement, kan derfor næppe forsvares anvendt, hvor fugtighed kan forekomme; men har dog stadig mangfoldige industrielle anvendelser.

MODELBRANDFORSØG MED BETONKONSTRUKTIONER

Tanken om at anvende modeller af betonkonstruktioner til brandforsøg kan umiddelbart forekomme nærliggende ud fra den økonomiske fordel, dette ville indebære i forhold til omkostningerne ved fuldskalaforsøg.

Visse forfattere beretter da også om endog ganske omfattende modelforsøg, f.eks. Issen [2-12] og Elleriis og Tejlgaard [2-5].

Desværre er en sådan fremgangsmåde en fysisk umulighed.

Et konstruktionsmodelforsøg, der både skal vise temperaturfordeling og spændings-tøjningsforhold, skal udføres under anvendelse af modellove, der mindst opfylder følgende tre fysiske sammenhænge.

- 1) Newtons 2. lov indeholdende gradienter af normalspændinger, volumenkræfter og accelerationsbidrag.

Med tensornotation følgende, f.eks. Askegaard og Nielsen [2-1], skrives dette

$$\sigma_{ij,j} = \rho_0 (\ddot{u}_i - v_i)$$

hvor σ er spænding, ρ_0 massefylde, u flytning, v volumenkraft og i og j retningsindices.

- 2) Hookes lov (eller anden konstitutiv betingelse) med termisk udvidelse, f.eks.

$$\sigma_{ij} = E \left(\frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_{kk} \delta_{ij} + \frac{1}{1+\nu} e_{ij} - \frac{1}{1-2\nu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right)$$

hvor E og ν er elasticitetsmodul og Poissons forhold, e tøjning, α lineær varmeudvidelseskoefficient, ΔT temperaturændring og δ_{ij} Kroneckers delta.

- 3) Fouriers differentiaalligning (hvor varmetransport som følge af dampstrømning egentlig burde medregnes)

$$c_p \rho_0 \dot{T} = \lambda T_{,ii} + Q$$

hvor c_p er specifik varmefylde, λ varmeledningsevnen og Q tilført effekt pr. volumenenhed.

Modellove, der samtidigt opfylder disse sammenhænge, kan ikke etableres, hvis beton skal være modelmaterialet, og en modelbeton, der opfylder dem, er praktisk taget utænkelig.

I de anførte arbejder er kun 2) og 3) opfyldt. Man arbejder med et skalaforhold for flytning på $K_u = 2$, for tid på $K_t = 4$ og for flytningshastighed på $K_{\dot{u}} = 2$, hvad der klart strider med kravet $K_{\dot{u}} = K_u/K_t = 0,5$.

Man har ikke opfyldt 1), der netop kobler spænding med tid og gennem 2) tøjning med tid.

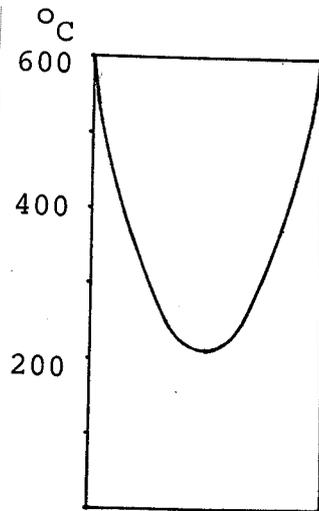
Desuden ser man uden kommentarer bort fra spændingsgradienter og dynamiske virkninger.

De sidste kan være afgørende for revnedannelsen.

Hos Issen [2-12] eftervises, at temperaturbillederne i proto- og modelbjælker af beton er identiske, hvad der jo skyldes, at 3) er opfyldt.

Derimod siges intet om overensstemmelsen for de parametre, der må afhænge af 1).

Modelforsøg kan altså højst finde anvendelse til delundersøgelser, f.eks. af temperaturfordelinger og ikke direkte til vurdering af en betonkonstruktions bæreevne under og efter brand.

DIELEKTRISK OPVARMNING AF BETONPRØVELEGEMERINDLEDNING

Temperaturprofil
standardcylinder
normal opvarmning
10 °C pr. min.

Principielt kan man vurdere et betonkonstruktionselements brandmodstandsevne på to måder. Enten en afprøvning af hele elementet eller en beregning. Det sidste vil ofte være at foretrække, da det 1) er billigere, 2) kan gøres før konstruktionselementet er støbt og 3) en sådan beregning vil kunne varetages samtidig med den normale statiske beregning. Problemet er blot at skaffe oplysninger om betonens styrkeegenskaber især efter en brand (reststyrken er mindre end varmstyrken, hvorfor reststyrken ved lagring i luft efter branden i mange tilfælde vil være af størst betydning i en beregning). Termiske spændinger i profilet indgår lettest som en belastning i beregningen, hvorfor man er interesseret i den rene materialestyrke for betonen opvarmet på en måde, der ligner temperaturforløbet på de kritiske steder af konstruktionen under en normal brand. Imidlertid må et betonprøvelegeme have en vis størrelse, og en standardcylinder med diameter 15 cm og højde 30 cm var at foretrække bl.a. af hensyn til homogeniteten med normaltemperaturberegningerne. Et sådant prøvelegeme vil umuligt kunne give nogen idé om styrken, hvis det i en normal ovn opvarmes på den ovenfor anførte måde, idet der i dets indre vil opstå temperaturforskelle på ca. 300°C og heraf følgende spændingsforskelle.

Da en vurdering ud fra en ren materialebrandprøvning imidlertid er så fordelagtig frem for alene at basere sig på fuldskalaforsøg, finder jeg, at en oplagt mulighed for helt at eliminere ovenstående problemer ikke bør være upåagtet.

En sådan mulighed er dielektrisk opvarmning.

OM DIELEKTRICITET

Enkelte stoffer f.eks. benzén, paraffin og tetraklorkulstof er elektrisk neutrale, men de fleste har molekyler, der udsat for et elektrisk felt vil søge at orientere sig efter dette. Imidlertid kan sådanne drejninger ikke ske ganske uafhængigt af den omgivende struktur.

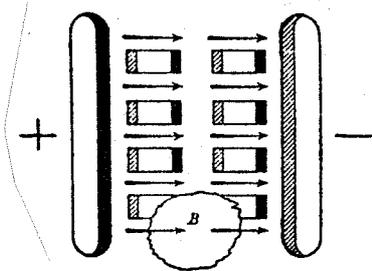
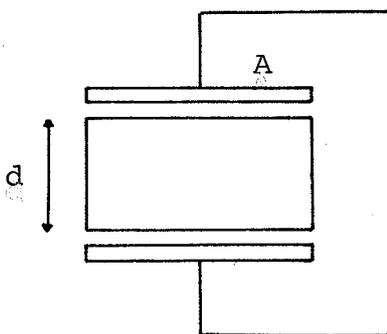


Illustration af et dielektrikums virkemåde.
Fra Hertz [2-10].

En del af den energi, feltet påfører stoffet for at søge at polarisere det, vil medgå til overvindelse af de ydre hindringer for bevægelsen. Denne del vil afsættes som varme, og hvis det elektriske felt skifter retning tilstrækkelig hurtigt, d.v.s. millionvis af gange pr. sekund, vil den afsatte varme være betragtelig, og materialet synes at opvarme sig selv indefra. Dette er den helt afgørende forskel fra den gammeldags metode, hvor varmeenergien afsættes på overfladen for derfra at ledes ind i emnet med ofte store temperaturgradienter til følge.

En forudsætning for den dielektriske opvarmningsmetode er, at materialet, der søges opvarmet, i elektrisk henseende kan opfattes som sammensat af dipoler, d.v.s. dele, der har en vis afstand mellem deres statistiske centre for de positive og de negative ladninger. Et sådant materiale betegnes et dielektrikum. Dipolmomentet for en dipol findes som størrelsen af den positive ladning gange afstandsvektoren fra den negative til den positive ladning. Dersom dipolerne i en rumfangsenhed peger samme vej, vil vi benævne summen af dipolmomenterne heri \underline{P} .



Elektroder med et dielektrikum.

Betragtes to plane elektroder med areal A og afstand d , hvorimellem et dielektrikum er anbragt i et stationært felt, vil ladningen på det dielektriske materiales overflade være $\mp P$ pr. arealenhed og på polfladerne tilsvarende $\pm P$, men tillige en ladning $\pm \epsilon_0 \epsilon$, hvor ϵ_0 er permittiviteten i vakuum, for at opretholde feltstyrken ϵ .

Den samlede ladning på fladerne kaldes den dielektriske forskydning \underline{D} . Der gælder vektorielt

$$\underline{D} = \epsilon_0 \underline{\epsilon} + \underline{P}$$

For stoffer, hvor \underline{P} er parallel med $\underline{\epsilon}$, kan man skrive

$$\underline{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \underline{\epsilon}$$

hvor ϵ_r kaldes den relative permittivitet.

Hvis feltet er tidsafhængigt

$$\epsilon = \epsilon_0 \cos \omega t$$

vil man iagttage, at den dielektriske forskydning vil være faseforskudt en vinkel δ i forhold til feltet (Püschner [2-20]).

$$D = D_0 \cos(\omega t - \delta) = (\epsilon_r' \cos \omega t + \epsilon_r'' \sin \omega t) \epsilon_0 \epsilon_0$$

Altså må man anvende to frekvensafhængige konstanter, der ses indbyrdes at have forholdet

$$\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \tan \delta$$

Skrives $\epsilon = \epsilon_0 e^{j\omega t}$ fås

$$D = (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \epsilon \epsilon_0$$

$\epsilon_r' = \epsilon_r' \epsilon_0$ kaldes den dielektriske konstant og ses at være et udtryk for hvor meget energi, materialet kan indeholde som elektrisk felt, og $\epsilon_r'' = \epsilon_r'' \epsilon_0$ kaldes tabsfaktoren og er et mål for, hvor meget energi der afsættes som varme. Forholdet herimellem vil naturligvis have interesse og benævnes tabstantanten $\tan \delta$. Ofte ses, at ϵ_r' aftager med frekvensen p.g.a. inertie m.m. og ϵ_r'' tiltager. (Tinga og Nelson [2-23]).

ϵ_r' antager oftest værdier fra 1 til 8; men er dog 80 for vand, og $\tan \delta$ går fra 0,0001 for polystyrén til 0,7 for visse glassorter. (Cable [2-3]).

Vand er da også anset for et af de mest modtagelige materialer for dielektrisk opvarmning.

DIREKTE DIELEKTRISK OPVARMNING

Det dielektriske materiale, som ønskes opvarmet og ofte betegnes lasten, anbringes mellem to elektroder, der påføres en passende højfrekvent spænding. Elektroderne udformes af et godt ledende materiale, såsom kobber, sølv, aluminium eller bronze, som to plane flader, hvoraf den ene har jordforbindelse. Andre former anvendes også efter opgaven. Cable [2-3].

Spændingen leveres af en generator, som typisk leverer fra 1 til 30 kW med frekvenser på 2 til over 100 MHz. B.E.D.A. [2-2].

Den afsatte effekt i et legeme med tværsnitareal $A(m^2)$, tykkelse $d(m)$ og lossfaktor ϵ'' vil, ifølge Cable [2-3] p. 331 med frekvensen $f(Hz)$ og spændingsforskellen $V(Volt)$, andrage

$$E = 55,5 \cdot 10^{-12} \cdot V^2 f \epsilon'' \frac{A}{d} (W)$$

Frekvensen kan ikke vælges frit. Af hensyn til radiostøj er der fastlagt bestemte bånd, hvori elektromagnetiske felter til opvarmningsformål skal ligge.

Disse er efter International Telecommunication and Radio Conferences, Geneva, 1959, som anført nedenfor (Okress [2-18]p3) for bølgelængder fra 1 cm til 30 m.

Frekvens	Bølgelængde
13.560 kHz \pm 6,78 kHz	22,1 m
27.160 kHz \pm 160 kHz	11,0 m
40.680 kHz \pm 20 kHz	7,37 m
915 MHz \pm 25 MHz	0,328 m
2.450 MHz \pm 50 MHz	0,122 m
5.800 MHz \pm 75 MHz	0,0517 m
22.125 MHz \pm 125 MHz	0,0136 m

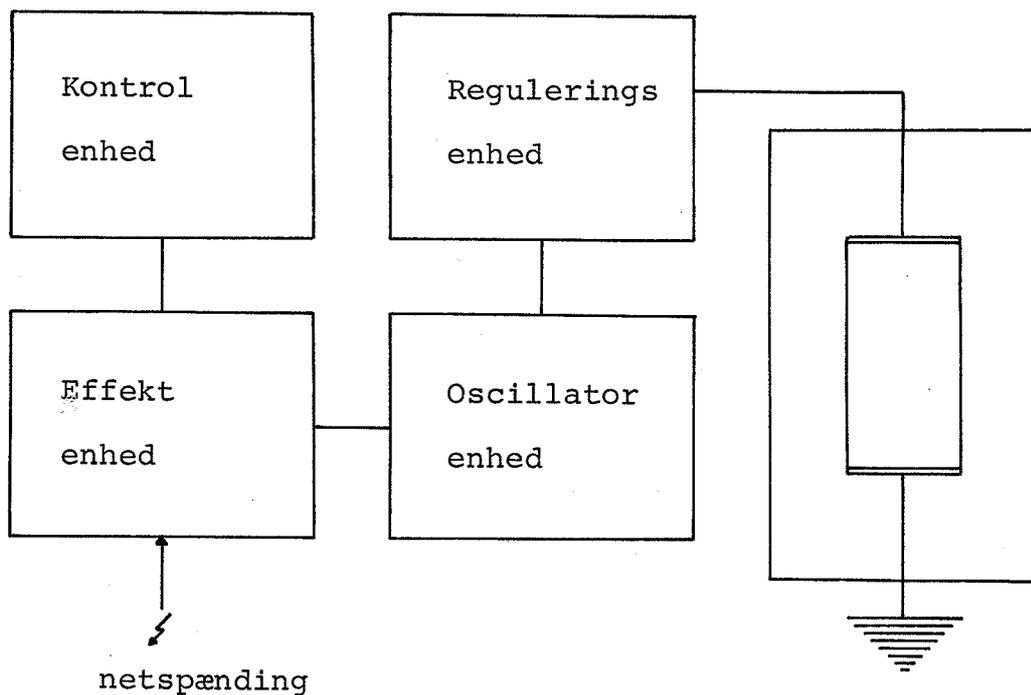
Mest benyttet af disse er frekvenserne 915 MHz og 2.450 MHz.

Tænker man sig en betonprøvecylinder med tværsnit $A = 0,1767 m^2$ og højde $d = 0,3 m$ opvarmet direkte dielektrisk med en afsat effekt på 2,3 kW og en værdi af ϵ'' på 0,5, vil det give et krav til spændingsforskellen på $V = 1,24 kV$ for $f = 915 MHz$ og $V = 758 V$ for $f = 2450 MHz$.

Den normale spændingsforskel ligger på 1 til 5 kV (Cable [2-3]), og da generatorer på over 25 kW er konstrueret, vil den nødvendige generator kunne skaffes. Af eksemplet ses endvidere, at hvis spændingsforskellen ikke skal blive alt for stor, må frekvenser omkring 1 GHz anvendes.

En teoretisk mulig fremgangsmåde for opvarmning af prøvecylindre er da f.eks. at påføre dem elektroder over enderne, og isolere siderne med 100 mm tykke rørskåle med 3 mm asbestpapforing og enderne med 150 mm stenuldsplade.

Da både udviklet damp og høje temperaturer vil virke befordrende for gnistdannelse, kan dette tænkes at blive afgørende for metoden. Eventuelt kan dette afhjælpes ved indførelse af isolerende materiale mellem elektrode og betonoverflade. En videreudvikling af metoden kunne bestå i at anvende elektroderne som stempler i forbindelse med en presse til varmprøvningsforsøg.



Princippet i direkte dielektrisk opvarmning

OPVARMNING I MIKROBØLGEOVN

Mikrobølger er betegnelsen for elektromagnetiske bølger med bølgelængder (λ_0) af samme størrelsesorden som de anvendte kredsløb, d.v.s. i området med $\lambda_0 < \text{ca. } 1 \text{ m}$ og $f > 300 \text{ MHz}$.

Disse tilvejebringes ved hjælp af specielle oscillatorrør: magnetroner, og ved større installationer kan flere rør anvendes samtidigt. Bølgen ledes fra røret (rørene) ad en bølgeleder, et metalrør af bestemte dimensioner, f.eks. et rektangulært aluminiumsrør, $9,5 \times 5,5 \text{ cm}$ med 2 mm tykke vægge. Enden rettes bølgelederen direkte mod lasten eller også munder den ud i et ovnrum, hvori lasten anbringes.

Da metaloverflader reflekterer mikrobølger, anvendes sådanne som begrænsningsflader for ovnrummet. Herved opnås, at bølger, der ikke i første omgang standses af lasten, reflekteres.

Ved bølgelederens indføring i ovnrummet er en roterende metalpropel placeret. Denne har til opgave at sprede bølgeenergien, og i samspil med de reflekterende vægge skabe en rimelig, ensartet bestråling fra alle sider.

Det er af hensyn hertil ydermere påkrævet, at lasten placeres et stykke over bunden af ovnen. Mikrobølgeenergien stråler ind i lasten og afsættes her ved dielektrisk opvarmning. Dæmpningen af den indtrængende mikrobølgeenergi sker for plane bølger efter udtrykket

$$a_x = a \cdot e^{-2 \alpha x}$$

hvor a og a_x er energien ved overfladen og i afstanden x fra denne, og α er dæmpningskonstanten for materialet, der for $\tan \delta \ll 1$ er

$$\alpha = \frac{\pi \epsilon''}{\lambda \epsilon'} = \frac{\pi \epsilon_r''}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r'}}$$

hvor λ og λ_0 er bølgelængden i lasten og i det fri og

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r'}}$$

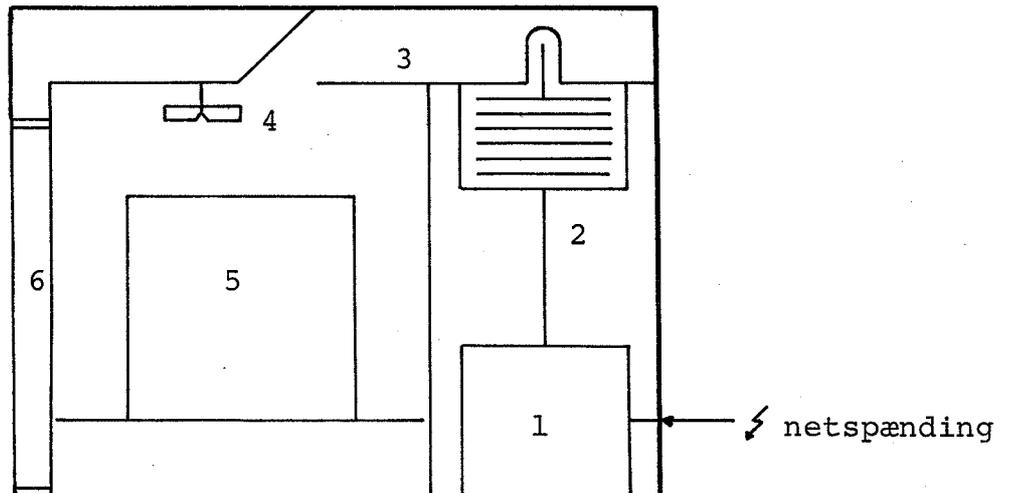
Dybden, hvori energien er reduceret til $1/e$ (0,368) af den oprindelige værdi, er da

$$x_{(1/e)} = \frac{1}{2\alpha} = \frac{\lambda_0}{2\pi \tan\delta \sqrt{\epsilon_r}}$$

(Püschner [2-20]p97, Copson [2-4]p23).

Indtrængningsdybden øges altså med bølglængden og aftager med materialets lossfaktor. Visse materialer, såsom glas og papir, har lave lossfaktorer og er transparente for mikrobølger.

Da mennesker ikke kan tåle mikrobølgefelter af den styrke, der anvendes til opvarmningsformål, har man fastsat en grænse for strålingsintensiteten fra ovne. Den er, efter Public Law 90-602, The Radiation Control for Health and Safety Act of 1968 (trådt i kraft 6. oktober 1971 i U.S.A.), 1 mW/cm^2 , målt 2 inch (5 cm) fra en eventuel lækage oftest optrædende ved døren, målt på fabrikken og 5 mW/cm^2 , hvis den optræder efter leveringen. For at nedsætte strålingsfaren må døren udformes og vedligeholdes omhyggeligt.



Princip i mikrobølgeovn

- 1) Effekt enhed
- 2) Magnetron
- 3) Bølgeleder
- 4) Propel
- 5) Last i ovnrum
- 6) Dør

BETON OG MIKROBØLGEENERGI

Da mikrobølgeopvarmning hovedsagelig har været anvendt til fødevarer og biologisk forskning, foreligger der kun sparsomme oplysninger om bygningsmaterialers forhold i så henseende.

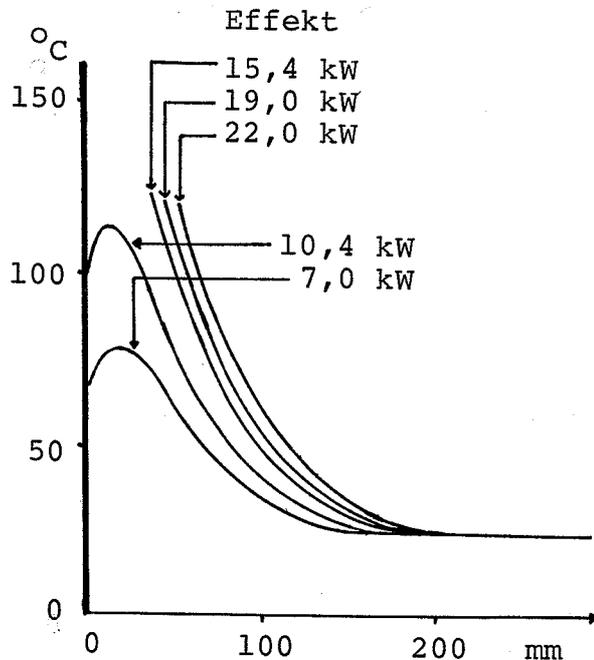
Et standardværk bør dog nævnes: von Hippel [2-11], der bl.a. på tabelform opgiver dielektriske konstanter og $\tan\delta$ for en mængde stoffer, også uorganiske, og opgiver kurver for ændringen af disse størrelser med temperaturen for en række af dem. Bl.a. ses at størknet kvarts vil få en stigning i såvel ϵ' som $\tan\delta$, når temperaturen øges, og at denne stigning sker ved højere temperatur, jo højere frekvens der arbejdes med.

Samme billede fås ved flere andre faste stoffer.

Et supplement til von Hippels tabel gives af Tinga og Nelson [2-23]; men specielt for cement og beton er de dielektriske forhold undersøgt af Hasted og Shah [2-9] især med hensyn til afhængigheden af materialernes fugtindhold. Naturligvis opnår man bedre modtagelighed for mikrobølgeenergi, jo højere fugtindholdet er eftersom vand i sig selv er modtageligt, men selv ved udtørring forbliver betonen i besiddelse af en vis værdi af $\epsilon_r'' \approx 0,3$ og er, som også Alexander Watson konkluderer i Okress [2-18] vol 2, p. 111, altid i stand til at absorbere mikrobølgeenergi. Da man må forvente en stigning af absorptionsevnen med temperaturen samtidig med faldet i fugtighed under en brandprøvning, skønnes det, at en værdi omkring $\epsilon_r'' = 0,5$ vil være et realistisk gæt for forholdene under prøvningen, indtil oplysninger herom foreligger.

A. Watson har i øvrigt udført forsøg med hårdning af betonprøvelegemer i en almindelig 2 kW køkkenovn på 2450 MHz med et betydeligt tab i langtidsstyrken som resultat, men det er jo et velkendt fænomen for hårdning ved høje temperaturer, idet den dannede struktur bliver grovkrystallisk og porøs (f.eks. Neville [2-15]).

Samme Watson udnytter koncentreret mikrobølgeenergi fra en 2 kW, henholdsvis 5 kW kilde på 2450 MHz til punktvis opvarmning af 15 og 23 cm tykke betonplader med spræng-



Dybde fra bestrålet overflade.
Fra Okada et al. [2-17].

ning p.g.a. de herved optrædende termiske spændinger til følge.

Om en lignende anvendelse af mikrobølgeteknikken rapporteres af Okada, Ohwi og Mori [2-17], der blot arbejder med et udstyr på 30 kW og 915 MHz.

Her er temperaturkurver optegnet som funktion af dybden fra den meget koncentreret bestrålede overflade (bølgelederens udmunding var kun 4 cm fra overfladen). Man skulle op på over 15 kW med temperaturforskelle over ca. 100°C før en knusning forekom af et legeme på 30 × 30 × 40 cm.

Effektiviteten af metoden er under disse forhold kun ca. 1/10 af normalt for mekaniske metoder, men der arbejdes mere støj- og støvfrit.

Anvendes $\epsilon'_r \approx 5$ og $\epsilon''_r \approx 0,5$, d.v.s. $\tan \delta \approx 0,1$ fås

$$\alpha = \frac{\pi \cdot 0,5}{0,328 \sqrt{5}} = 2,143$$

$$x_{(1/e)} = \frac{1}{2\alpha} = 0,23 \text{ m}$$

At temperaturerne ved sprængningsforsøget falder så kraftigt med afstanden fra overfladen skyldes naturligvis, at energien ikke udbreder sig plant, men spreder sig fra bølgelederen.

Anderledes vil det forholde sig ved bestråling af en uendelig lang betoncylinder med radius R i et felt, hvor den indfaldende energi kan regnes lige stor i alle retninger. Her vil forholdet mellem den afsatte energi pr. volumenenhed i centrum og på overfladen kunne skrives som

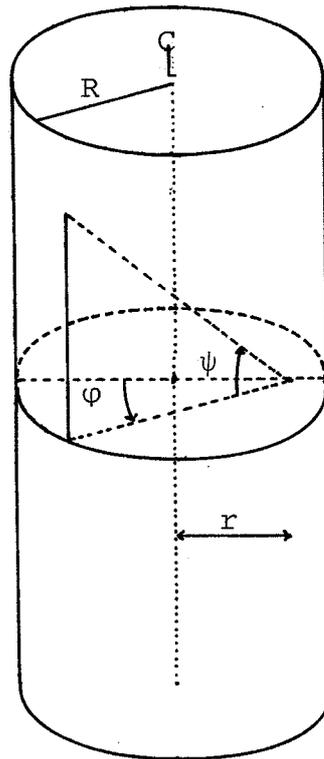
$$a_{c/o} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\psi e^{\frac{-2\alpha R}{\cos\psi}} d\psi}{\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\psi e^{\frac{-\alpha 4R \cos\varphi}{\cos\psi}} d\psi d\varphi}$$

der med $R = 0,075$ m og $\alpha = 2,143$ m⁻¹ giver

$$a_{c/o} = \frac{0,638}{0,796} = 0,80$$

Betragtes et punkt i afstanden r fra cylinderaksen, vil den stråling, som på figuren nedenfor når punktet med en retning karakteriseret ved de to vinkler φ og ψ , tilbagelægge vejlængden

$$\frac{r \cos\varphi + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2\varphi}}{\cos\psi}$$



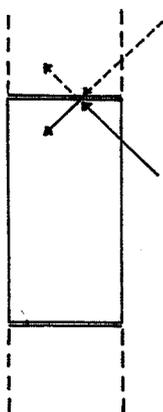
Definition af φ og ψ .

hvorfor den afsatte energi pr. volumenenhed i et sådant punkt vil forholde sig til energien i et punkt i det frie felt (udæmpet stråling fra alle retninger) som:

$$a_r = \frac{2}{4\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\psi e^{-2\alpha(r\cos\varphi + \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2\varphi})} \cos\psi d\psi d\varphi$$

Værdier heraf er angivet i tabellen nedenfor sammen med temperaturfordelingen som følge heraf, når prøvelegemet er blevet opvarmet med 10°C pr. min. i en time og der simultant er sket en termisk udjævning.

r	0,000	0,025	0,050	0,075	m
a _r	0,638	0,649	0,689	0,796	-
T _r	543	550	569	600	C°



Cylinderen er, som man også kunne slutte direkte, en gunstig form, hvis man ønsker jævn opvarmning med mikrobølgebestråling.

En standardprøvecylinder er 0,30 m lang, men for at undgå temperaturgradienter på langs, foreslås det at forsyne denne med skiver af aluminiumsfolie på enderne.

Herved vil den komme til at optage mikrobølgeenergi, som om den var uendelig lang.

Hele dette prøvelegeme tænkes indkapslet i mineraluld for at undgå for store temperaturgradienter fra varmeafgivelsen til det kolde ovnrør. For at få en idé om disse optrædende gradienter, betragtes længden l af en uendelig lang cylinder med radius R . Stykket afgiver effekten $Q(W)$, og der antages tilnærmet en stationær tilstand, hvor hele tværsnittet bidrager lige meget til Q , idet disse bidrag tænkes opvejet af en del af den modtagne mikrobølgeenergi. Cylinder-skallen $l \cdot 2\pi r dr$ med radius r afgiver da $Q \cdot 2r dr/R^2$ og passerer af $Q r^2/R^2$.

Med varmeledningstallet λ og temperaturer T fås varmeledning ligningen

$$(l \cdot 2\pi r) \lambda \frac{dT}{dr} = -Q \frac{r^2}{R^2}$$

hvoraf

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{Q}{2\pi l \lambda} \cdot \frac{r}{R^2}$$

og temperaturfordelingen

$$T_r = T_c - \frac{Q}{4 \pi \ell \lambda} \cdot \frac{r^2}{R^2}$$

Temperaturforskellen mellem centrum og overflade er da

$$\Delta T = T_c - T_R = \frac{Q}{4 \pi \ell \lambda}$$

Tænkes cylinderen isoleret med 10 cm mineraluld med $\lambda_i = 0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, giver en varmebalanceligning for isoleringsoverfladen, at denne får temperatur $T_1 = 100^\circ\text{C}$, og varmemestrømmen bliver $q_1 = 520 \text{ W/m}^2$ til ovnrummet på 30°C , idet der fra overfladen går

$$q_1 = 4,8 (100 - 30) + \frac{5,67 \cdot 10^{-8} (373^4 - 303^4)}{0,81 + \frac{0,522}{6} \left(\frac{1}{0,04} - 1 \right)}$$

$$= 336 + 186 = 520 \text{ W/m}^2$$

og gennem isoleringen kommer

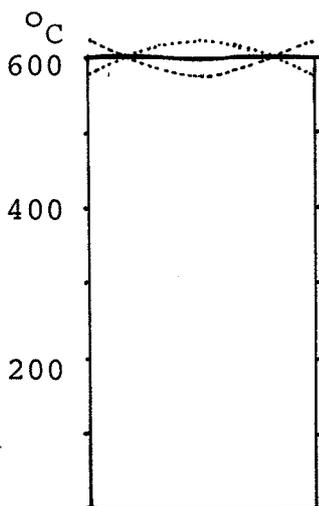
$$\frac{0,15 \cdot 2}{0,35 \ln \frac{0,175}{0,075}} (600 - 100) = 505 \sim 520 \text{ W/m}^2$$

I alt afgives gennem cylindrens side $Q = 520 \pi \cdot 0,35 \cdot 0,30 = 172 \text{ W}$, der giver anledning til en temperaturforskel på

$$\Delta T = \frac{172}{4 \pi \cdot 0,3 \cdot 0,90} = 50^\circ\text{C}$$

mellem centrum og overflade af prøvelegemet, hvor der er regnet med et varmeledningstal for betonen på $0,90 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Da dette varmeafgivelsestemperaturprofil må tænkes overlejet med et modsat profil, hidrørende fra mikrobølgeenergiens aftagen med afstanden fra overfladen, ses, at man ved regulering af mineraluldens tykkelse vil have mulighed for at opnå en praktisk taget homogen opvarmning. En yderligere reguleringsmulighed vil ligge i kombineret af mineraluld af glas og stenmateriale, da det første må formodes at være gennemtrængeligt for mikrobølgeenergi og det sidste kun i mindre grad.



Temperaturprofil standardcylinder mikrobølgeopvarmning 10°C pr. min.

Herved vil man, eventuelt i et vist omfang, kunne få mineralulden til at producere den varme, som opretholdelsen af temperaturforskellen mellem kerne og ovn kræver.

Et prøvelegeme vejer 12,72 kg og med en varmekapacitet på 0,95 kJ/kg°C kræves altså 12,09 kJ pr. grads opvarmning. En rimelig opvarmningshastighed kunne være 10°C/min, da den svarer nogenlunde til den opvarmningshastighed, man vil observere i dybder af 2 til 10 cm af en konstruktion under en brand, og tilmed give en kun ret begrænset risiko for afskalning (når prøvelegemet har været opbevaret ved RH < 50% i størstedelen af hærtningsperioden).

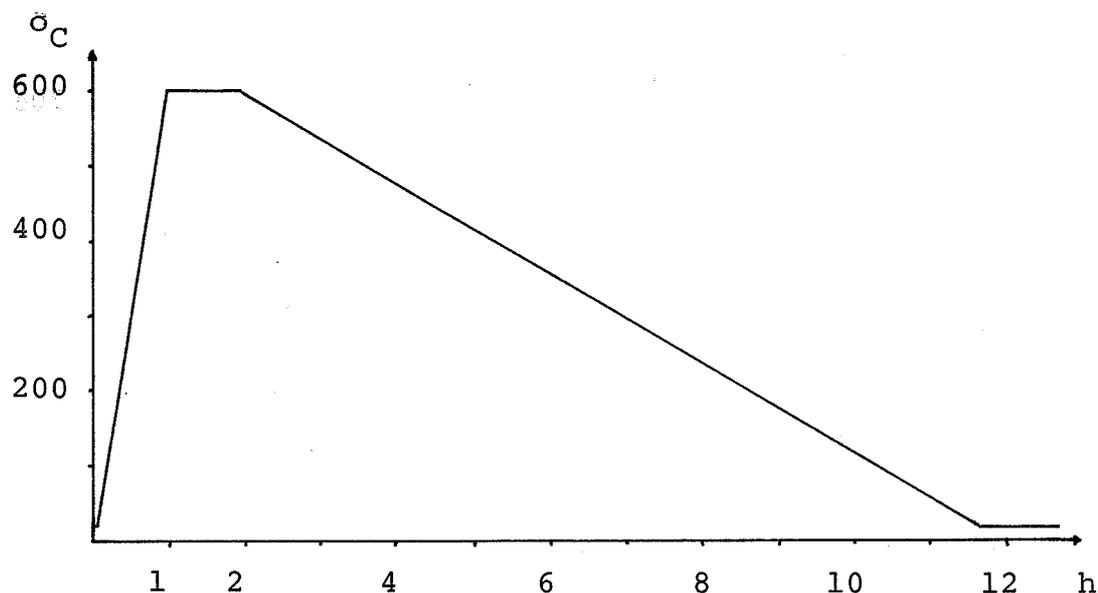
Til denne opvarmning anvendes

$12,09 \cdot \frac{10}{60} = 2,01$ kW, hvortil et varmetab på ca. 200 W giver 2,2 kW pr. prøvelegeme.

En ovn til fire prøvelegemer skal derfor kunne yde ca. 10 kW ved frekvensen 915 MHz, og have et rumfang på ca. 1 m³.

(Der er anvendt den laveste af de to almindelige mikrobølgefrequenser, fordi den største bølgelængde giver den største indtrængningsdybde).

Et muligt videre forløb af prøvningen kunne, efter opnåelse af den for prøvningen karakteristiske maksimaltemperatur, være fastholdelse af denne i 1 time og afkøling med ca. 1°C/min. i en veldefineret varmekasse, således at ovnen frigøres til en ny prøvning.



Temperatur - tids - forløb

KONKLUSION

På basis af de sparsomme oplysninger, der foreligger i litteraturen om bygningsmaterialers modtagelighed for dielektrisk opvarmning, sluttet, at en materialebrandprøvning i en mikrobølgeovn vil være mulig for betonprøvelegemer, og at alt tyder på, at man hermed vil kunne opnå en tilnærmelsesvis jævn opvarmning over cylindertværsnittet, hvilket er aldeles udelukket ved normale opvarmningsmetoder.

Mikrobølgeovn foretrækkes frem for direkte dielektrisk opvarmning, fordi sidstnævnte sandsynligvis kan give problemer med gnistdannelse samt kun vil være mulig for regulære prøvelegemer og ikke f.eks. legemer til test af udtrækningsstyrke etc.

Desuden vil den kostbare del ved begge opvarmningsmetoder, frekvensgeneratoren, være af samme karakter, hvorfor prisforskelle næppe vil være afgørende.

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + Q \quad \text{kravene}$$

$$\frac{K_t}{K_c K_\rho K_T} = \frac{K_\ell^2}{K_{\lambda_i} K_T} = \frac{1}{K_Q}$$

Dæmpningsudtrykket

$$Q_\ell = Q_0 \cdot e^{-2\alpha\ell} \quad \text{giver kravet}$$

$$K_\alpha \cdot K_\ell = 1$$

Vil man derfor gå ned i længde, må man f.eks. gå tilsvarende op i frekvens, idet α er omvendt proportional med λ_0 og dermed ligefrem proportional med frekvensen f .

Dette er dog under forudsætning af, at den komplekse dielektriske konstant forbliver uændret. Da denne er afhængig af materialet, temperaturen og frekvensen, må disse faktorer indflydelse vurderes. Materialet forbliver ifølge sagens natur det samme og temperaturen kan vælges til at være den samme i modellen som i den virkelige prøvning. Frekvensen må derimod ændres som førnævnt. Dette skal ske i spring mellem de tilladte frekvenser, og et spring fra 915 MHz til 2.450 MHz er her det eneste rimelige, da praktisk taget alle mindre ovne fremstilles med 2.450 MHz og 915 MHz anses for rimeligt til den store ovn.

Af kurverne i Von Hippel[2-11]skønnes, at en sådan frekvensøgning kun vil have en beskeden indflydelse på de fleste faste stoffers dielektriske konstanter. For kvarts vil tærskeltemperaturen, der er omtalt i det foregående således øges 100°C for hver 100 gange frekvensen øges, hvorfor en afvigelse på maksimalt ca. 5°C herfor kunne blive resultatet.

Dette giver et længdeskalaforhold på

$$\underline{K_\ell} = \frac{1}{K_\alpha} = \frac{2.450}{915} = \underline{2,69}$$

hvor der er forudsat

$$K_{\epsilon_r}'' \approx K_{\epsilon_r}' \approx K_T = 1 = K_c = K_\rho = K_{\lambda_i}$$

De tidligere formulerede krav giver da

$$K_t = K_\ell^2 = \frac{1}{K_Q}$$

hvoraf

$$\underline{K_t = 7,23} \quad \text{og} \quad \underline{K_Q = 0,138}$$

D.v.s. forsøget skal gå 7,23 gange så hurtigt og der skal derfor afsættes 7,23 gange så stor effekt pr. rumfangsenhed. Temperaturstigningshastigheden 72,3°C/min. i modellen vil svare til 10°C/min. i den virkelige prøvning.

Modelprøvelegemet vil få højden 11,2 cm og diameteren 5,6 cm. Skalaforholdet for varmeeffekt bliver

$$K_E = 0,138 \cdot 2,69^3 = \underline{2,69}$$

og for varmeflux

$$K_Q = 0,138 \cdot 2,69 = \underline{0,371} \quad (= 1/2,69)$$

Til opvarmningen kræves $2,2/2,69 = 0,82$ kW ved 72,3°C/min. (svarende til 10°C/m i den virkelige prøvning).

Isoleringsoverfladen kan f.eks. udføres furet, så der dannes en slags køleribber, der kan muliggøre en øget konvektiv varmeafgivelse pr. arealenhed af cylinderen.

Da denne afgivelse kun andrager ca. 7% af den samlede effekt, og da en finjustering automatisk vil indtræde ved variationer i overfladetemperaturen, vil en tilfredsstillende virkning kunne opnås med en rimelig indsats ved forarbejdningen.

Ved at måle temperaturforskellen over isoleringstykkelsen, vil man kunne overtyde sig om, at foranstaltningen virker efter hensigten.

For at modelere situationen for et normalt prøvelegeme med 10 cm isolering i en 915 MHz ovn skal altså anvendes en cylinder af højde 11,2 cm og diameter 5,6 cm med 3,7 cm isolering i en 2450 MHz ovn med en effekt på ca. 820 W.

Opvarmningshastigheden bliver da 72,3 °C/min og forholdsregler mod sprængning som følge af dampudvikling skal tages.

Tilstrækkelige forholdsregler har imidlertid ikke kunnet udvikles inden for rammerne af nærværende licentiatprojekt, hvorfor et sådant skalaforsøg i skrivende stund ikke har kunnet gennemføres, ligesom et forsøg med en 915 MHz ovn af økonomiske grunde har været udelukket.

SUMMARY PART 2

In this part of the thesis I have dealt with proposals for various improvements. First is discussed the possibilities of composing a concrete able to fulfil demands for fire resistance. Then a new idea about the use of microwave energy for material fire tests is proposed. These possibilities are enlightened from a literature study on the subject, and a theoretically based proposal for the realization of the method is made.

Furthermore, I have dealt with the possibility of carrying out scale tests to control the temperature distribution in dielectric heated bodies.

For economical reasons an experimental investigation into these matters has not yet been carried out.

Finally, I have briefly mentioned why scale tests for determining at the same time both thermal and mechanical conditions in concrete constructions exposed to fire cannot be done.

LITTERATUR - DEL 2

- [2-1] ASKEGAARD, V. NIELSEN, J.:
Eksperimentel mekanik.
Forelæsningsnotat,
Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DTH,
Lyngby 1975.
- [2-2] BRITISH ELECTRICAL DEVELOPMENT ASSOCIATION:
Induction and Dielectric Heating.
London 1957.
- [2-3] CABLE, J.W.:
Induction and Dielectric Heating.
Reinhold Publishing Corporation.
New York 1954.
- [2-4] COPSON, D.A.:
Microwave Heating.
The AVI Publishing Company inc.
Westpoint, Connecticut, 1975.
- [2-5] ELLERIIS, J. TEJLGAARD, N.:
Model-brandforsøg med betonbjælker.
Eksamensprojekt,
Instituttet for Husbygning,
Lyngby 1976.
- [2-6] 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.
- [2-7] 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.
- [2-8] HARDERS, F. KIENOW, S.:
Feuerfestkunde - Herstellung,
Eigenschaften und Verwendung feuerfester
Baustoffe.
Springer-Verlag,
Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1960.
- [2-9] HASTED, J.B. SHAH, M.A.:
Microwave Absorption by Water in
Building Materials.
Brit.J.Appl.Phys., Vol. 15, Number 7,
pp. 825-836.
July 1964.

- [2-10] HERTZ, H.:
Untersuchungen über die Ausbreitung
der Elektrischen Kraft.
Johan Ambrosius Barth,
Leipzig 1892.
- [2-11] HIPPEL, A.R. von:
Dielectric Materials and Applications.
The M.I.T. Press,
Massachusetts 1954.
3. oplag 1961.
- [2-12] ISSEN, L.:
Scaled Models in Fire Research on
Concrete Structures.
PCA, Vol. 8, No. 3, pp. 10-26.
September 1966.
- [2-13] NASSER, K.W. MARZOUK, H.M.:
Properties of Mass Concrete Containing
Fly Ash at High Temperatures.
ACI-Journal, pp. 537-550.
ACI, April 1979.
- [2-14] NEKRASSOW, K.D.:
Hitzebeständiger Beton.
(ty. udg. af: Жароупорный бетон 1959).
Bauverlag GmbH.
Wiesbaden-Berlin 1961.
- [2-15] NEVILLE, A.M.:
Properties of Concrete.
The Pitman Press.
Bath 1977.
- [2-16] NIELSEN, G.:
Lecabetons styrkeegenskaber ved høje
temperaturer.
Kursusarbejde,
Instituttet for Husbygning, DTH,
Lyngby 1977.
- [2-17] OKADA, F. OHWI, K. MORI, M.:
The Development of a High-Power Microwave
Circulator for Use in Breaking Concrete
and Rock.
The Journal of Microwave Power, Vol.10,
No. 2.
July 1975.
- [2-18] OKRESS, E.C.:
Microwave Power Engineering. Vol. 1 and 2.
Academic Press.
New York, London 1968.

- [2-19] PETZOLD, A. RÖHRS, M.:
Beton für hohe Temperaturen.
Beton-Verlag GmbH, 216 p.
Düsseldorf 1965.
- [2-20] PÜSCHNER, H.:
Heating with Microwaves.
Philips Technical Library.
1966.
- [2-21] SPARROW, E.M. CESS, R.D.:
Radiation Heat Transfer.
Brooks/Cole Publishing Co.
Belmont, California 1970.
- [2-22] THELANDERSSON, S.:
Betongkonstruktioners brandsäkerhet.
Nordisk Betong, No. 5, pp. 11-14.
1977.
- [2-23] TINGA, W.R. NELSON, S.O.:
Dielectric Properties of Materials
for Microwave Processing - Tabulated.
The Journal of Microwave Power. 8,1.
1973.
- [2-24] ZOLDNERS, N.G. WILSON, H.S.:
Effect of Sustained and Cyclic Temperature
Exposures on Lightweight Concrete.
ACI, SP-39, pp. 149-178.
Ottawa 1973.
- [2-25] НЕКРАСОВ, К.Д. ТАРАСОВА, А.П.:
Жаростойкий бетон на портландцементе.
Издательство литературы по строительству.
Москва 1969.

