LUND UNIVERSITY

Byggnadsmaterialforskning vid LTH : Del 2. Betongforskning

Bergström, Sven Gabriel

Published in:
Cement & Betong

1971

Link to publication

Citation for published version (APA):
Bergström, S. G. (1971). Byggnadsmaterialforskning vid LTH : Del 2. Betongforskning. *Cement & Betong*, *46*(4), 441-458.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Del II. Betongforskning

UDK 691
666.97

1. Inledning

I en tidigare artikel /1/ har författaren översiktligt redovisat forskningsområden och forskningsprojekt inom avdelningen för byggnadsmateriallära vid LTH. Författaren underströk att vi i allmänhet inte arbetar med materialbundna projekt utan med funktionsbundna projekt. Vi följer som regel en och samma funktionsegenskap tvärs över materialgränserna och vinner därigenom i bredd, i möjlighet att jämföra olika material i samma funktion på lika villkor. I gengäld når vi inte så djupt inom de enskilda materialgrupperna.

Trots detta skall denna artikel ägnas åt vår forskning inom en avgränsad materialgrupp – betong och närbesläktade material.

En stor del av vår betongforskning är spin off från vår tvärgående forskning inom områdena *beständighet, reologi* samt *fuktfixering* och *fukttransport.* Ett forskningsprojekt avser den nu så aktuella materialtypen *fiber- och polymerförstärkt betong.* Som uppdrag har vi utfört försök med enbart *krossballast,* vidare med *naturlig lättballast (pimpsten).* Några intressanta examensarbeten har utförts rörande *inverkan av skillnader mellan blandningskonsistens och gjutningskonsistens* på den färska och den hårdnade betongens egenskaper, vidare rörande *korrosion på armering i betong av HCl från PVC-bränder.*

Liksom i föregående artikel tillkommer prioriteten till vårt eget försöksmaterial och våra teoretiska betraktelser de namngivna projektledarna.

2. Frostbeständighet

Projektledare: Civilingenjör Göran Fagerlund.

I del 1 omnämndes en metod att bedöma spröda, porösa materials frostbeständighet med uttrycket

grad av frostbeständighet = $S_{krit} - S_{akt}$

Här är S_{krit} = den kritiska vattenmättnadsgraden bestämd i frysförsök

S_{akt} = vattenmättnadsgraden i konstruktionen, t.v. bestämd med kapillär uppsugning.

Metoden har naturligtvis tillämpats även på cementbruk, betong och närbesläktade material. Fig. 1 och 2 visar förhållandena för två cementbruk med data enligt figurerna, membranhärdning ca 1 år, ingen avsiktlig luftinblandning. I figurerna har inlagts beräknade värden på den vattenmättnadsgrad S_{kap}, som motsvarar att hela den kapillära porositeten är vattenfylld, vidare beräknade värden på S_{krit} under antagande att det frysbara vattnet i de kapillära porerna måste ges 9 % expansionsutrymme. Den kapillära porositeten kan lätt beräknas, se t.ex. /2/. I figurerna anges vidare den uppmätta S_{kap} (stämmer som synes väl med den beräknade) samt S_{akt} efter 144 timmars vattensugning. Det senare värdet överstiger naturligtvis S_{kap}, som uppnås redan efter $\sim$ 1 dygn.

Fig. 1 och 2 ger anledning till eftertanke. Man kan först konstatera att det beräknade värdet S_{krit} ganska väl motsvarar den vattenmättnadsgrad vid vilken påtagliga E-modulförluster uppstår vid frysningen. Man

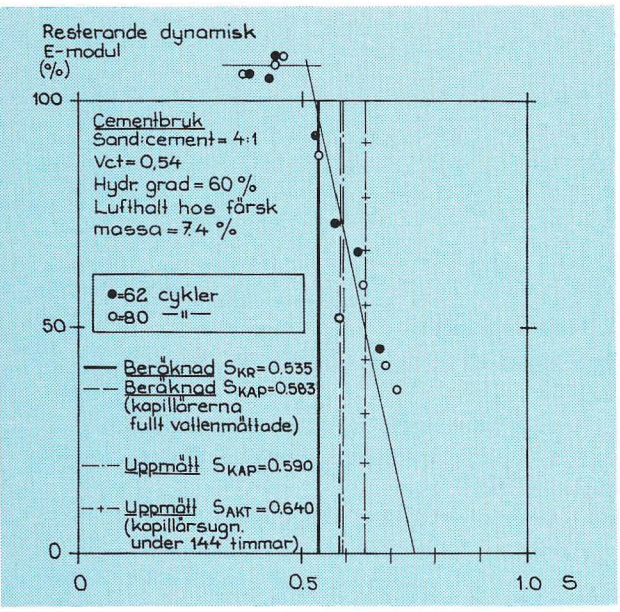
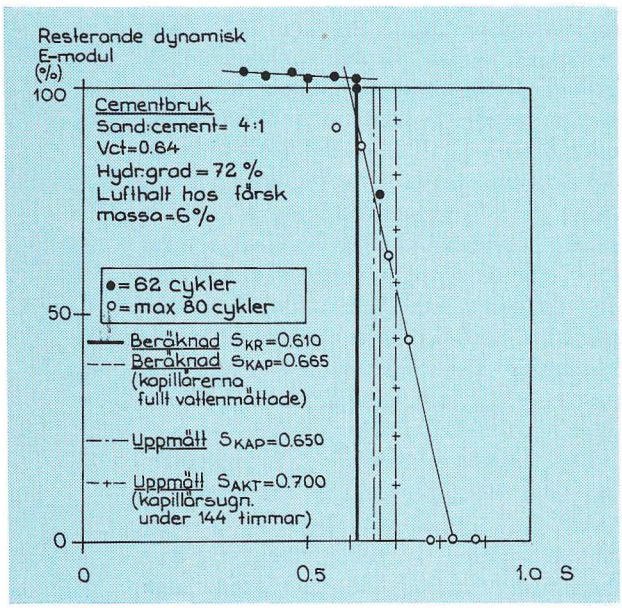


Fig. 1. Resterande dynamisk E-modul efter frysning av cementbruk med vct=0,54 och hydratationsgrad 60 %.
Olika vattenmättnadsgrader har markerats.

Fig. 2. Resterande dynamisk E-modul efter frysning av cementbruk med vct=0,64 och hydratationsgrad 72 %.
Olika vattenmättnadsgrader har markerats.



kan vidare konstatera att S_{krit} är större för cementbruket med det högre värdet på vct, vilket kvalitativt stämmer med andra experimentella och teoretiska studier: S_{krit} ökar när materialet blir mer permeabelt.

Slutligen kan konstateras att båda cementbruken har dålig frostbeständighet. Den kritiska vattenmättnadsgraden passeras redan under det första dygnets vattensugning ($S_{kap} > S_{krit}$), vilket är sämre än för det lösbrända tegel, som redovisades i del I. Om de två cementbruken skall bli frostbeständiga erfordras luftinblandning.

Ett annat intressant exempel på metodens användning visar fig. 3 och 4, avseende två olika fabrikat av högtrycksånghärdad gasbetong med ungefär samma densitet (502 resp 516 kg/m³). Gasbetongen i fig. 3 är cementbaserad och mer finporig än den kalkbaserade gasbetongen i fig. 4. Graden av frostbeständighet är väsentligt olika hos de två fabrikaten. I fig. 3 har S_{krit} inte uppnåtts ännu efter 10 dygns vattensugning medan i fig. 4 S_{krit} passeras redan under det första dygnet. Skillnaderna ligger huvudsakligen i S_{akt}, mindre i S_{krit}.

3. Reologi — krympning hos betong

Projektledare: Civilingenjör Lennart Ahlgren, professor Sven G. Bergström och tekn. lic. Anders Nielsen.

Våra reologistudier rörande betong och närbesläktade material har dels gällt krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong, redovisat i del I, – dels en studie av betongs krympning. Den senare undersökningen har gjorts på uppdrag av Statens Betongkommitté och har bl.a. haft till mål att med europeiska betongkommitténs (CEB) rekommendationer /3/ som underlag ge anvisningar om hur krympningen kan beräknas med hänsyn till

betongsammansättning
klimat
konstruktionens dimensioner
tiden

Enligt CEB kan krympningen ε_r vid varje tidpunkt beräknas som produkten

$$\varepsilon_r = \varepsilon_c \, k_b \, k_e \, k_p \, k_t \qquad (1)$$

där ε_c beror av miljön (relativa fuktigheten)

k_b beror av betongsammansättningen

k_e beror av konstruktionens dimensioner karakteriserade av en "teoretisk tjocklek" = förhållandet mellan sektionens area och dess halva omkrets.

k_p beror av armeringsmängden. (Här sätts $k_p = 1$ eftersom vi endast intresserar oss för krympningen hos den oarmerade betongen)

k_t anger krympningens tidsberoende.

I fig. 5 anges krympningens beroende av omgivningens relativa fuktighet enligt olika källor, varvid krympningen vid 50 % RF satts = 1. Slutsatsen är att CEB:s rekommendation ansluter sig till tidigare rön och gängse uppfattning.

Däremot kan vi inte instämma i CEB:s rekommendation betr. inverkan av betongsammansättningen. Vi har i fig. 6 infört beräknad slutkrympning enligt olika metoder för två principiella betongvariationer:

1. Konstant vattenhalt (180 l/m³) – vilket innebär ungefär konstant konsistens – och varierande cementhalt (500–200 kg/m³).
2. Variation från hög kvalitet men lättflytande konsistens (C = 600 kg/m³, vattenhalt 210 l/m³) till låg kvalitet och mycket styv konsistens (C = 135 kg/m³, vattenhalt 135 l/m³). Denna variation motsvarar någon sorts diagonal genom betongtekniken ur synpunkten krympning.

De metoder vi använt förutom CEB:s är

1. metod enligt *Ödman* /5/
2. metod enligt Concrete Manual /7/
3. metod baserad på volymandel cementpasta /6/
4. metod baserad på total vattenhalt i betongblandningen /8/.

Dessa metoder är mer eller mindre etablerade och anses ge en relativt korrekt beskrivning av betongsammansättningens inverkan

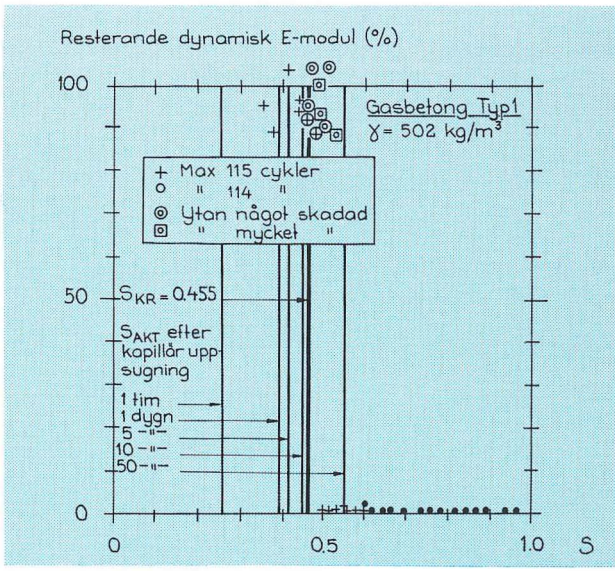
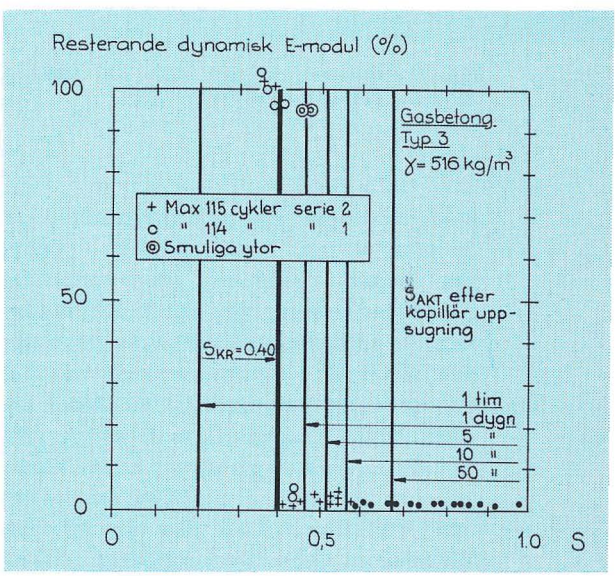


Fig. 3. Resterande dynamisk E-modul efter frysning av en högtrycksånghärdad gasbetong, γ=502 kg/m³, cementbaserad. Olika vattenmättnadsgrader har markerats.

Fig. 4. Resterande dynamisk E-modul efter frysning av en högtrycksånghärdad gasbetong, γ=516 kg/m³, kalkbaserad. Olika vattenmättnadsgrader har markerats.



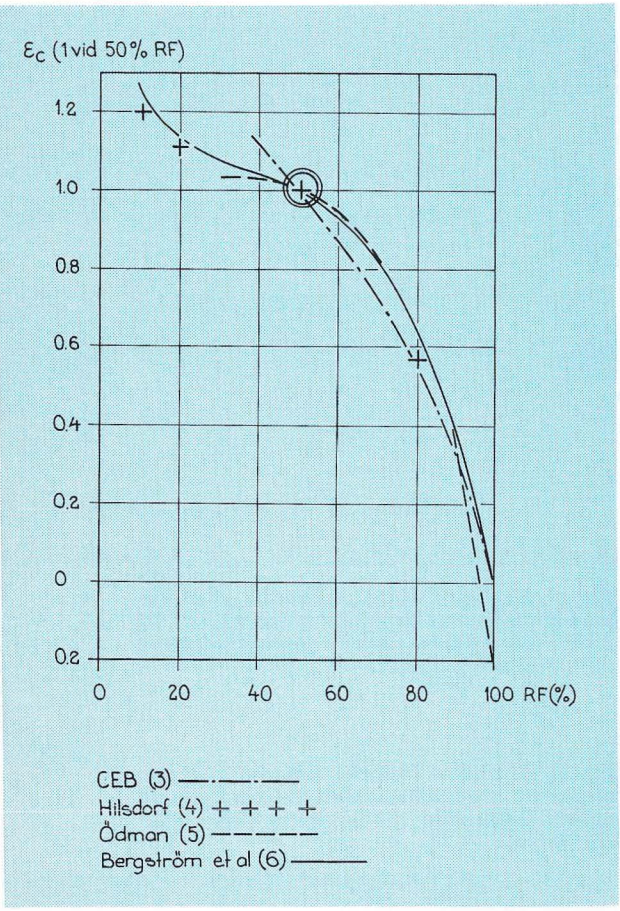


Fig. 5. Krympning (relativt mått) som funktion av relativ fuktighet enligt olika källor.

på krympningen. För betongvariation 1 ger de också ungefär samma tendens – tämligen konstant krympning. För betongvariation 2 ger samtliga fyra jämförelsemetoder fallande krympning när betongen blir magrare, vilket står i överensstämmelse med den etablerade uppfattningen. CEB:s metod avviker ganska drastiskt från de övriga fyra metoderna. Särskilt påfallande är avvikelsen vid betongvariation 2, där krympningen enligt CEB närmast skulle öka när betongen blir magrare. Orsaken till metodens avvikelser från etablerad uppfattning synes ligga däri att den överdriver inverkan av vct.

Det är intressant att notera att den metod som baserats på total vattenhalt /8/ tycks representera ett medelvärde av de fyra etablerade metodernas resultat.

Vi har i våra egna studier av betongs krympning funnit att tidförloppet och dimensionernas inverkan på detta mycket väl kan beräknas med en numera klassisk metod, angiven av Picket /9/. Ett exempel visas i fig. 7. Vi brukar därvid räkna med att krympningens slutvärde är oberoende av konstruktionens dimensioner. I CEB:s metod har man uppenbarligen även tillämpat Picketts eller någon snarlik metod men antagit att slutvärdet minskar med ökande teoretisk tjocklek på sätt som angivits av *Hansen* och *Mattock* /10/. Huruvida detta är ett korrekt antagande kan man idag inte avgöra.

4. Fuktfixering och fukttransport

Projektledare: Civilingenjör Lennart Ahlgren.

Del I innehöll en tämligen utförlig redogörelse för våra fuktundersökningar, varför författaren här nöjer sig med en uppräkning av vad som gjorts inom gruppen betong och närbesläktade material. Listan ser ut så här:

Isotermer för cementbruk, betong, gasbetong, lättballastbetong, kalksandsten och asbestcement vid uttorkning och anfuktning samt övergång från det ena förloppet till det andra. Beräkning av isoterm för betong med godtycklig sammansättning och normal härdning.

Uttorknings- och uppfuktningsförloppet hos konstruktioner av betong, gasbetong och kalksandsten. Studierna syftar till att utveckla metod för beräkning av förloppet. Speciellt har vi intresserat oss för väggar och golv.

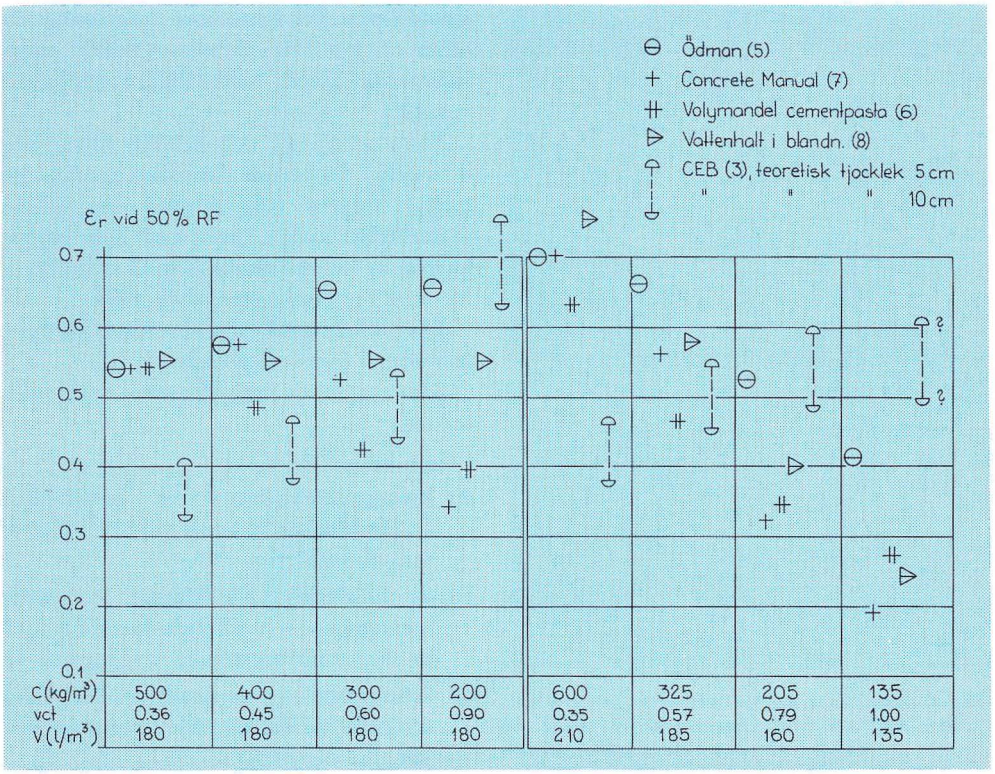


Fig. 6. Krympningens slutvärde vid några olika betongsammansättningar, beräknat enligt olika metoder. Frågetecknen markerar osäker extrapolering.

Fuktmätning i betong med ingjutna givare, baserade på elektrisk ledningsförmåga, vidare med γ-strålning i samarbete med institutionen för Kärnfysik. Slutligen har vi studerat och på praktiska fall tillämpat den i del I nämnda metoden med kupan för att indikera fukttillståndet i undergolv av betong.

Ur en rapport från institutionen för Kärnfysik /11/ återges fig. 8, som visar fuktkvoten som funktion av tiden på avstånd 20 mm från ytan i en vägg under uttorkning. Primärvärdena har bestämts med γ-strålning. Som jämförelse har inlagts fuktkvoter bestämda genom uttorkning och vägning.

5. Betong med enbart krossballast

Projektledare: Civilingenjör Göran Fagerlund.

Etapp 4 har genomförts som examensarbete av nuvarande civilingenjörerna Per-Gunnar Burström, Lars Carlsson och Lars-Göran Mattisson /13/.

Undersökningen har utförts på uppdrag av *AB Sydsten* och avsåg att kartlägga konsekvenserna av en övergång till helt krossad ballast i en framtid med sinande naturgrustillgångar.

I försöken arbetade vi konsekvent med två kvalitetsnivåer, K250T och K400T. Arbetet utfördes i etapper, och resultaten av en av-

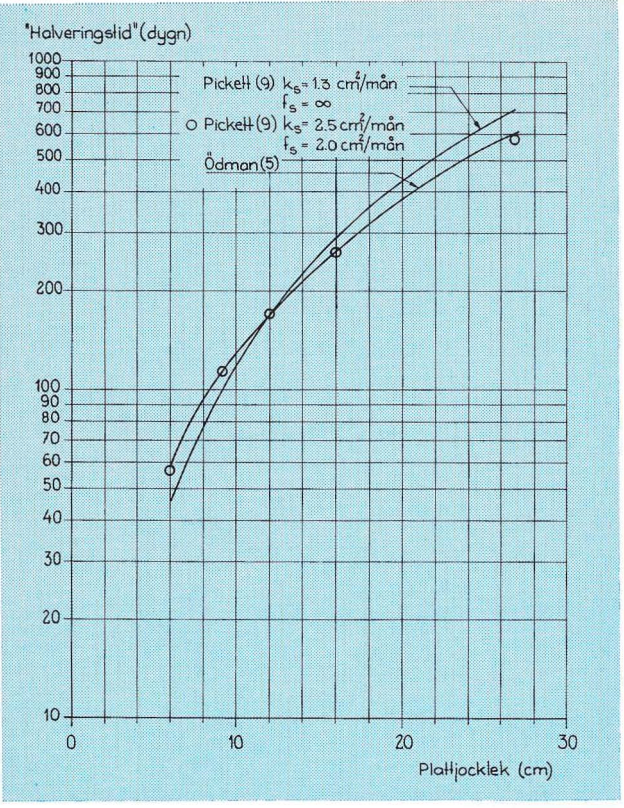
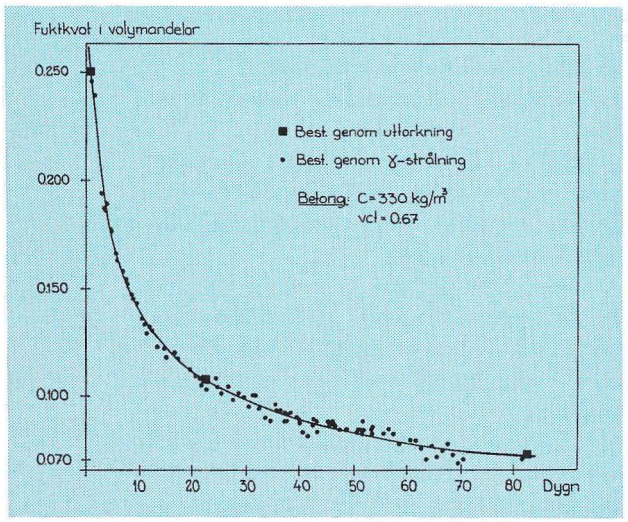


Fig. 7. Erforderlig tid för halva krympningen hos plattor med varierande tjocklek enligt försök av Ödman och enligt beräkningar med Picketts metod med en eller två konstanter anpassade till försöksresultaten.

Fig. 8. Fuktkvot (volym) i uttorkande betong bestämd med γ-strålning och genom torkning—vägning.



slutad etapp fick bestämma programmet för nästa etapp. Här redovisas endast ytterst summariskt några huvudlinjer och huvudresultat:

Etapp 1 K250T och K400T tillverkades dels enligt nuvarande fabriksrecept med naturligt fingrus och krossad stenfraktion (jämförelsebetong), dels med hela ballastkurvan av krossat material med siktkurva så lik jämförelsebetongens som möjligt.

I fallet krossgrus användes samma cementhalt som i jämförelsebetongen.

Som avgörande konsistensmått valdes sättmåttet.

Resultaten visade

att krossgrusbetongens vct blev ca 0,1 högre än jämförelsebetongens vid såväl K250T som K400T

att de förändringar i hållfasthet och vattenseparation som medföljde övergången till krossgrus motsvarade förändringen i vct

att krossgrusbetongens bearbetbarhet enligt subjektiv bedömning blev påtagligt nedsatt.

Konstaterandet att hållfasthetsförändringen motsvarade vct-förändringen var viktigt. Vi kunde alltså i fortsättningen arbeta med samma hållfasthets-vct-kurva som för den normala betongen. Fig. 9 visar försökspunkterna från etapp 1 i jämförelse med den välkända laboratoriekurvan. Konstaterandet har bekräftats av de fortsatta försöken.

I utredningarna för 1965 års betongbestämmelser fann man /12/ att övergång från singel till makadam inte nedsatte hållfastheten hos betong vid samma cementhalt, detta trots att vct höjdes. Vid samma vct skulle man därför kunna förvänta sig högre hållfasthet hos makadambetong. Går man som i detta fall ett steg ytterligare och byter ut även det naturliga gruset mot krossgrus så tycks man dock enligt våra resultat inte vinna ytterligare i hållfasthet.

I etapp 2 och 3 gjordes försök att förbättra den dåliga bearbetbarheten hos krossgrus-

betongen med ändring av gradering, införande av sjösand i fraktion <0,5 mm och vattenreducerande tillsatsmedel (Barra LV) eller luftporbildande tillsatsmedel (Darex AEA). En viss metodik utarbetades för att försöka finna ett objektivt bearbetbarhetsmått. Vi hade på ett tidigt stadium konstaterat att även om sättmåttet indikerade oförändrad konsistens vid övergång från naturgrus till krossgrus så visade Mo-mätaren betydligt högre värden än enligt B5. Vår subjektiva bedömning överensstämde med Mo-mätarens utslag. Vi införde därför uppmätta konsistensvärden i ett diagram enligt fig. 10, där rutorna inringar samhörande värden på Mo och sättmått enligt B5. Om nu en blandningskonsistens noggrant styrs in i t.ex. område T med avseende på sättmått men ligger väsentligt högre än T-området med avseende på Mo-mått så föreligger en starkt indikation på dålig bearbetbarhet. I fig. 10 har ett stort antal av våra försöksvärden inlagts. Dessa studier visade att vi kunde förbättra bearbetbarheten väsentligt genom att arbeta med låg finhetsmodul (M<2,3) och hög fillerhalt hos fingruset, eventuellt också med partikelsprång. Luftporbildande tillsatsmedel förbättrade bearbetbarheten. För att reducera vattenhalten och återställa hållfastheten erfordrades vattenreducerande tillsatsmedel, men höjning av cementhalten torde dock bli nödvändig.

I etapp 4 fortsattes försöken att förbättra bearbetbarheten och att reducera vattenbehovet eller genom cementtillsats kompensera för det ökade vattenbehovet. Man fann bl.a. gynnsammaste resultat med siktkurvor enligt fig. 11, alltså högt liggande fingruskurva och partikelsprång. Kostnaden för att med en kombination av tillsatsmedel och höjd cementhalt reducera och kompensera för det ökade vattenbehovet beräknades till 2–3 kr/m³.

Samtidigt fann vi att krympningen hos denna betong jämfört med naturgrusbetong blev större och att den var helt bestämd av

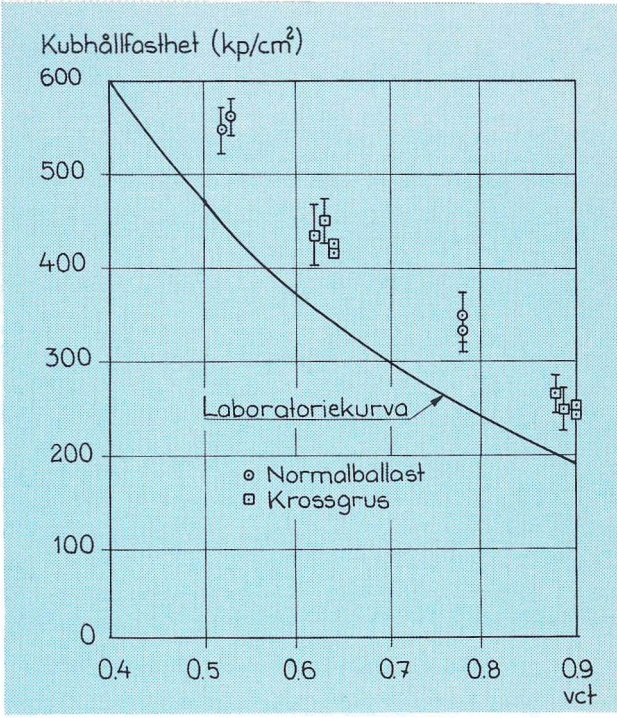
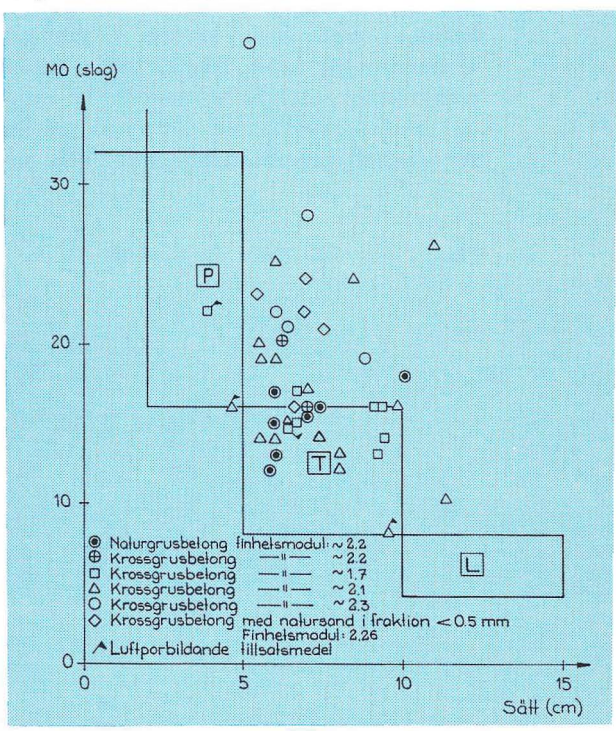


Fig. 9. Samband kubhållfasthet—vct för krossballast och normalballast.

Fig. 10. Diagram för belömning av betongblandningars bearbetbarhet, se texten.



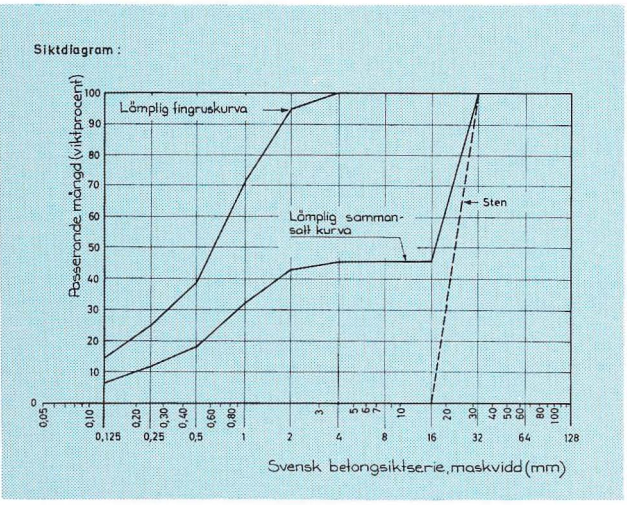
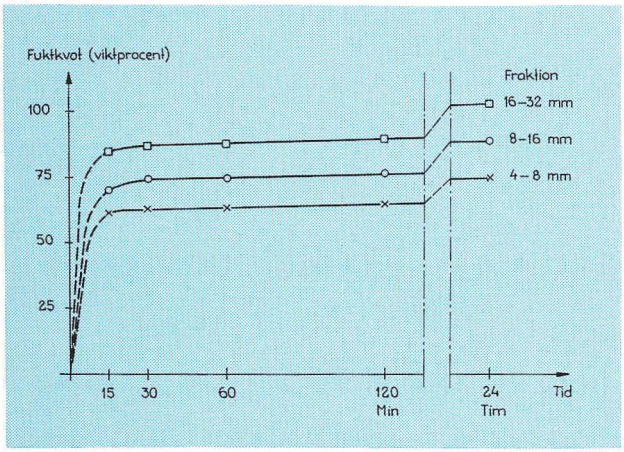


Fig. 11. Lämpliga siktkurvor för krossballast.

betongblandningens vattenhalt, jfr. avsnitt 3 ovan!

Vi undersökte även om krossgrusbetongen hade ett snabbare tillstyvnande än naturgrusbetongen, vilket ibland hävdats. Vi fann att så kunde vara fallet, framför allt i satser med måttliga vattenhalter, men att det snabba tillstyvnandet kunde motverkas genom att väta ballasten före blandning. Detta antyder att tillstyvnandet sammanhänger med vattenabsorption hos det torra ballastmaterialet.

Fig. 12. Vattenabsorbtion hos pimpsten.



6. Isländsk pimpsten som lättballast

Projektledare: Civilingenjörerna Per-Gunnar Burström, Göran Fagerlund och Lars-Göran Mattisson.

Undersökningen utfördes på uppdrag av AB Karlstad Grus och Betong. Avsikten var att undersöka om och hur isländsk pimpsten kunde användas för att åstadkomma en lättballastbetong med en hållfasthet av nivå 300 kp/cm² vid en densitet av 1600 kg/m³. Samtidigt skulle naturligtvis även andra viktiga betongegenskaper studeras.

"Pimpsten är en lava av sura till intermediära magmor, som stelnat under intensiv gasavgång när den slungats genom luften" (citat ur utlåtande av fil. lic. P. G. Andreasson). Materialet har normalt mycket hög halt SiO_2 och är i allmänhet helt amorft.

Pimpsten i vår undersökning hade en kompaktdensitet av 2560 kg/m³ och en densitet som varierade med kornstorleken enligt nedan:

fraktion 4–8 mm $\gamma = 700$ kg/m³
" 16–32 mm $\gamma = 510$ "

Porositeten varierade mellan 71 och 81 %. Den "naturliga" fuktkvoten var mycket hög, 100 % eller däröver. Materialet absorberade snabbt och villigt vatten, se fig. 12.

De betongegenskaper som studerades framgår av schemat i fig. 13. Variablerna och deras variationsområde var:

Cementhalt 300–500 kg/m³
Halt naturligt grus, volymandel av sats 0–40 %
Max stenstorlek 8, 12, 16, 32 mm
Tillsatsmedel, tre olika vattenreducerande.

En fullständig redogörelse för undersökningen kommer att publiceras av projektledarna, varför endast några av de viktigaste resultaten återges här.

Det uppställda målet – $\sigma_b = 300$ kp/cm²

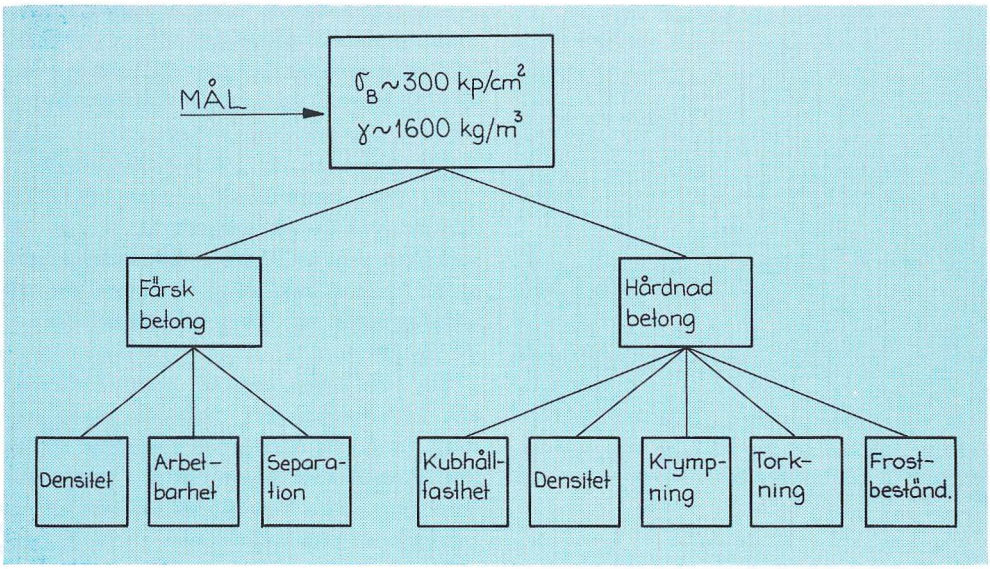
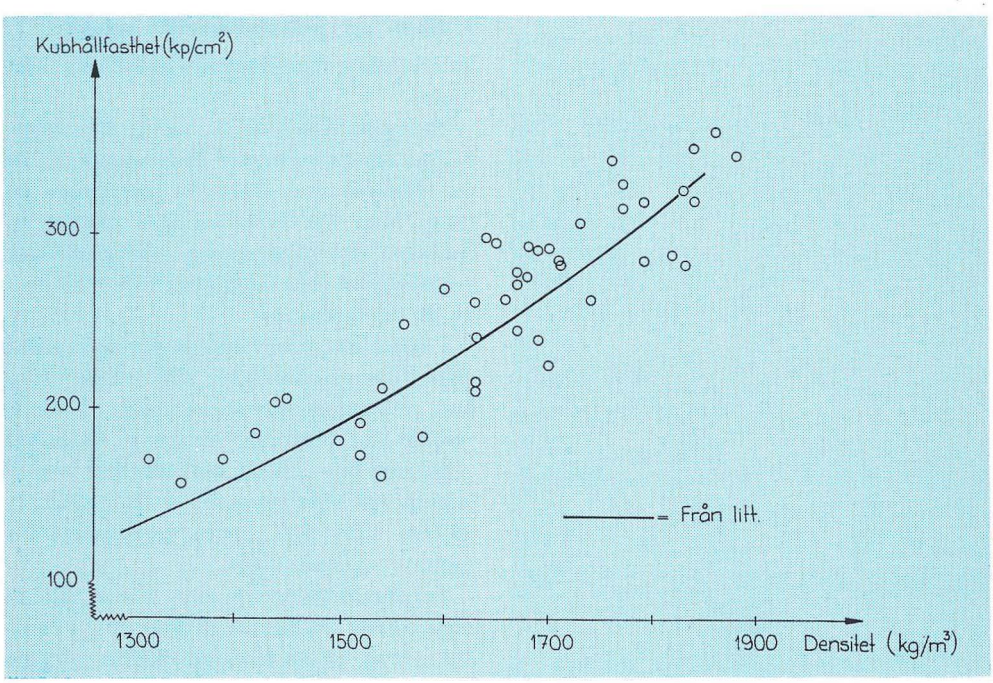


Fig. 13. Undersökta betongegenskaper vid studium av pimpsten som lättballast.

Fig. 14. Samvariation mellan kubhållfasthet och på olika sätt uppnådd densitet hos lättballastbetong.



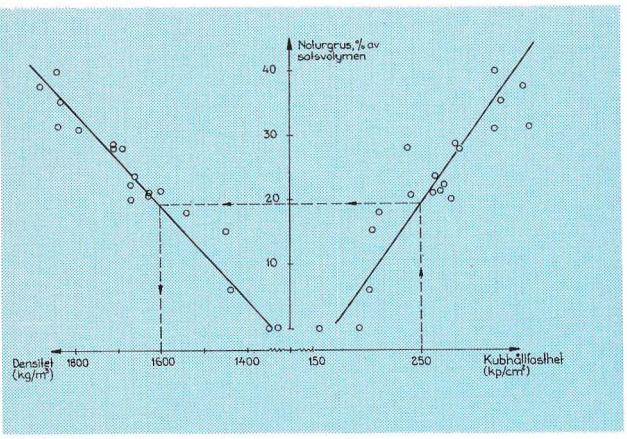


Fig. 15. Samband mellan kubhållfasthet, halt naturgrus och densitet hos pimpstensbetong med cementhalt 450 kg/m³.

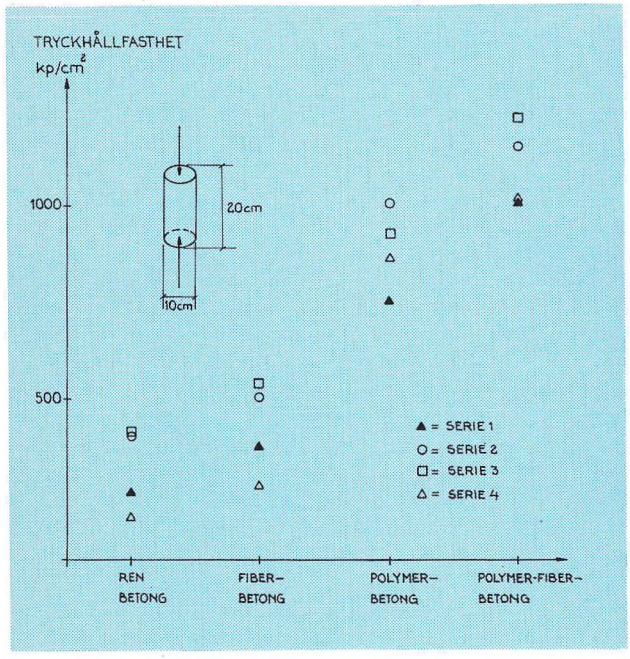


Fig. 16. Tryckhållfasthet hos betong med och utan fiber- eller polymerförstärkning.

vid $\gamma = 1600$ kg/m³ – kunde inte uppnås i dessa försök. Vi nödgades av bearbetbarhetsskäl tillsätta naturlig sand till ballasten och att arbeta med cementhalt 450–500 kg/m³ för att uppfylla hållfasthetsfordran, vilket höjde densiteten till 1700–1750 kg/m³.

En viss samvariation mellan hållfasthet och densitet kunde konstateras, se fig. 14, som även visar en kurva ur litteraturen. Samspelet mellan hållfasthet, densitet och halt naturlig sand vid given cementhalt belyses av fig. 15.

En jämförelse mellan pimpstensbetong och Leca-betong med avseende på krympning visade att krympningsförloppet till en början utspelades långsammare i pimpstensbetongen. Detta berodde på att pimpstenen tjänstgjorde som vattenmagasin i långt högre grad än Leca-kornen. Först när detta magasin blivit någorlunda tömt krympte betongen. Slutkrympningen blev vid samma cementhalt ungefär densamma som för Leca-betong.

7. Fiber- och polymerförstärkt betong

Projektledare: Civilingenjör Lars-Göran Mattisson.

Som nämndes i del I arbetar man idag i många laboratorier med kompositteknik för att förstärka den välkända kompositen betong. Man har huvudsakligen använt två metoder: fiberförstärkning och polymerförstärkning, på sista tiden även en kombination av de två metoderna.

I fallet fiberförstärkning har man provat olika fibermaterial: glas, stål, asbest, cellulosa, polypropen och andra plaster. Lovande resultat har t.ex. rapporterats av Romualdi /14/, som bl.a. arbetat med stålfiber med de ungefärliga dimensionerna $\varnothing = 0{,}25$ mm, $l = 25$ mm. Draghållfastheten synes kunna förbättras maximalt 3 ggr.

Polymerförstärkning har första gången rapporterats av Steinberg et al /15/. Tekniken går ut på att efter uttorkning fylla be-

tongens porsystem med monomer, som sedan genom bestrålning eller värmebehandling bringas att polymerisera. Stora förbättringar av hållfasthet och många andra betongegenskaper har rapporterats.

Vi undersöker f.n. de möjligheter som fiber- och polymerförstärkning erbjuder var för sig eller kombinerade. Som fibermaterial har vi dels använt huggen stålfiber med l = 25 mm och ekvivalent diameter = 0,25 mm, dels mässingbelagd, klippt stålfiber med ungefär samma dimensioner. Draghållfastheten för den huggna fibern var ~ 110 kp/mm² och för den mässingsbelagda ~ 210–260 kp/mm². I dessa undersökningar saknade mässingbeläggningen betydelse, så vitt vi kunnat finna.

Högre fibermängd än 1,5 % av betongmassans volym kunde vi inte åstadkomma med vår ännu outvecklade tillverkningsteknik.

Som monomer vid tillverkning av polymerförstärkt betong har vi använt styren, som polymeriserades termiskt. Initiering gjordes genom tillsats av bensoylperoxid. Betongen torkades först till jämvikt vid 105°C, vilket innebar att allt förångningsbart vatten avdunstades. Monomer och initiator infördes genom vakuum och lågt kvävgasövertryck.

I fig. 16 och 17 visas tryck- och draghållfasthet (spräckprov) för ren betong, betong förstärkt med 1,5 % mässingbelagd stålfiber, polymerförstärkt betong och betong förstärkt med både stålfiber och polymer. Fyra betongkvaliteter har undersökts, karakteriserade enligt nedan:

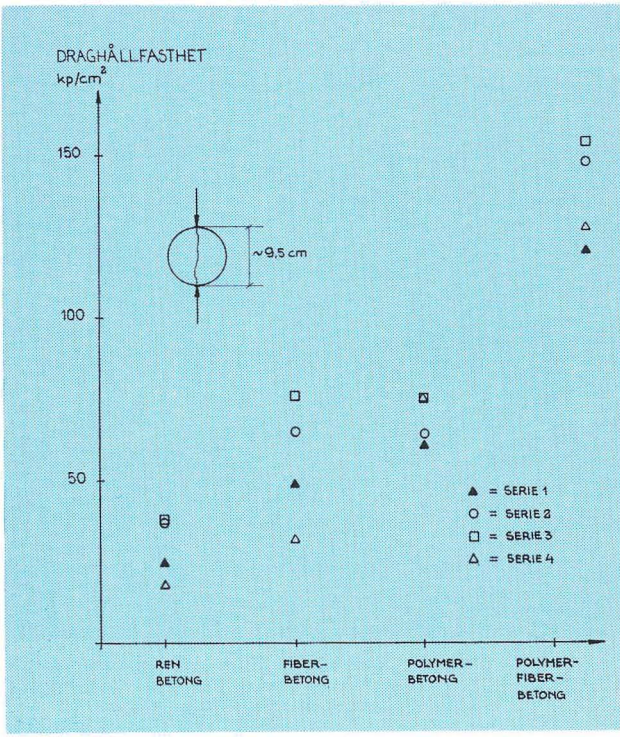


Fig. 17. Draghållfasthet (spräckprov) hos betong med och utan fiber- eller polymerförstärkning.

Serie nr	C kg/m³	vct	$\frac{w_n^*}{C}$	Härdning före uttorkning
1	430	0,51	0,106	1 d vatten
2	430	0,51	0,175	5 d "
3	430	0,51	0,182	10 d " , 18 d luft
4	270	0,86	0,186	5 d "

* w_n är den strukturellt bundna vattenmängden. $\frac{w_n}{C}$ kan maximalt bli ungefär 0,25. Genom att multiplicera siffrorna i denna kolumn med 4 får man ett värde på hydratationsgraden. Denna kan maximalt bli 1, vilket innebär att allt cementet reagerat.

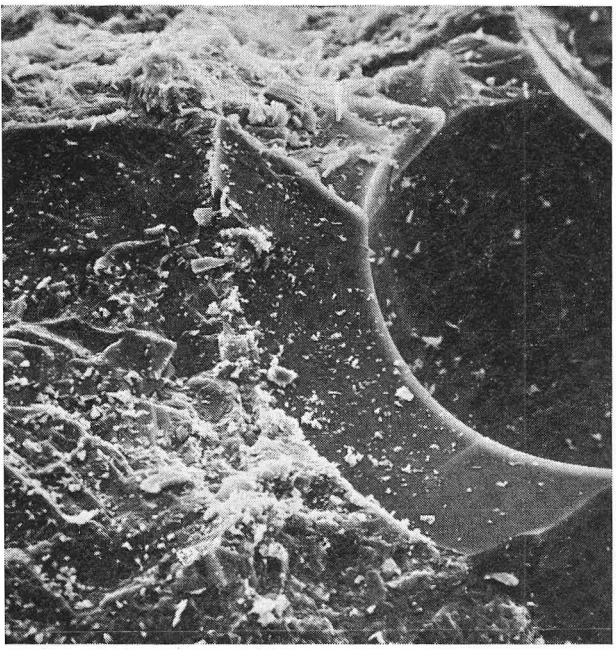


Fig. 18. Scanningbild av polystyrenbelagd luftblåsa. Originalets förstoring 260 ggr. (Foto Zoologiska institutionen, Lunds Universitet).

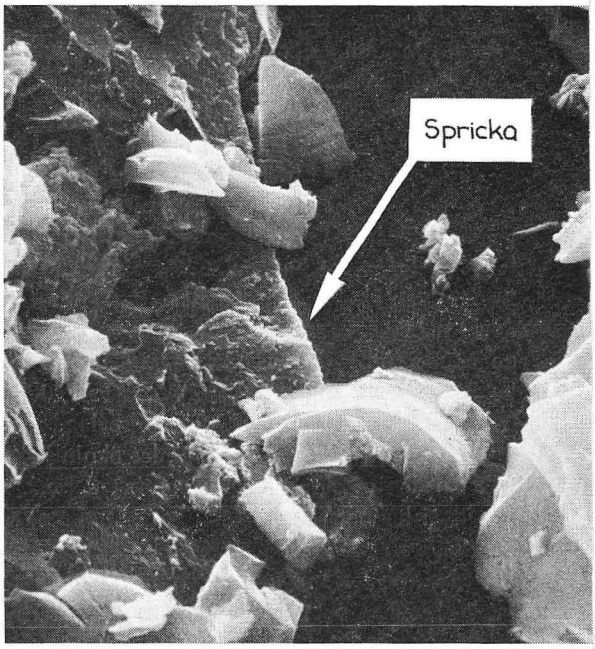


Fig. 19. Detalj av fasgränsen polystyren—betong i föregående bild. Sprickan går i plasten, ej i fasgränsen. Originalets förstoring 6500 ggr. (Foto Zoologiska institutionen, Lunds Universitet).

Som synes är hållfasthetsförbättringen lindrigt sagt frapperande, särskilt när båda förstärkningsmetoderna används samtidigt. Att polymerförstärkning höjer den fiberarmerade betongens hållfasthet torde bl.a. bero på förbättrad vidhäftning mellan fibrer och omgivande cementpasta.

Farhågor för att man på grund av t.ex. kontraktion vid polymerisationen skulle få dåligt förband mellan polystyren och betong har inte besannats. Fig. 18 visar en scanning-bild av en polymerklädd luftblåsa, där vi sedan systematiskt avsökte fasgränsen. Vid 6.500 ggr förstoring på originalfotot (fig. 19) kunde man se en spricka, dock inte i fasgränsen utan i plasten. Fasgränsen tycks vara intakt.

8. Inverkan av skillnader mellan blandningskonsistens och gjutningskonsistens

Två examensarbeten utförda av nuvarande civilingenjörerna Georg Andersson, Kaj Andersson och Benth Lönnberg (ex-arbete 1) samt Mats Albing, Staffan Bergqvist och Roland Moberg (ex-arbete 2).

Handledare professor Sven G. Bergström och civilingenjör Göran Fagerlund.

I kylig väderlek och vid korta transportavstånd kan man räkna med att betongen vid gjutstället har samma konsistens som vid blandarstationen. Är emellertid väntetiden mellan blandning och gjutning lång så hinner betongen styvna innan gjutning. Detta kompenseras med att man blandar med lösare konsistens så att betongen får rätt konsis-

tens vid gjutstället. Kommer då betongegenskaperna, t.ex. hållfastheten, att bli desamma som när man gjuter omedelbart efter blandning?

Frågan har studerats i två examensarbeten, där följande metodik användes (se schema i fig. 20).

Betongen tillverkades sålunda med fem olika konsistensnivåer, sättmått 2, 5, 8, 11 och 14 cm. Sättmått 2 cm var referensblandning. Provkroppar göts vid dessa konsistenser direkt efter blandningen.

De blandningar som var lösare än 2 cm sättmått fick sedan vila till dess att konsistensen styvnat till 2 cm, varefter provkroppar göts. Detta simulerar skeendet på gjutplatsen, där betongen efter varierande väntetid gjuts vid samma konsistens. (I varje fall är avsikten att betongen skall ha konstant konsistens). Slutligen tillsattes vatten till de styvnade blandningarna så att ursprunglig blandningskonsistens (5, 8, 11 och 14 cm) återställdes, varefter en tredje omgång provkroppar göts.

I examensarbete 1 varierades blandningskonsistensen genom variation av cementhalten vid oförändrat vct (variation av cementpastamängden). I examensarbete 2 varierades vct vid oförändrad cementhalt. I båda fallen skedde återställandet av ursprunglig blandningskonsistens genom vattentillsats.

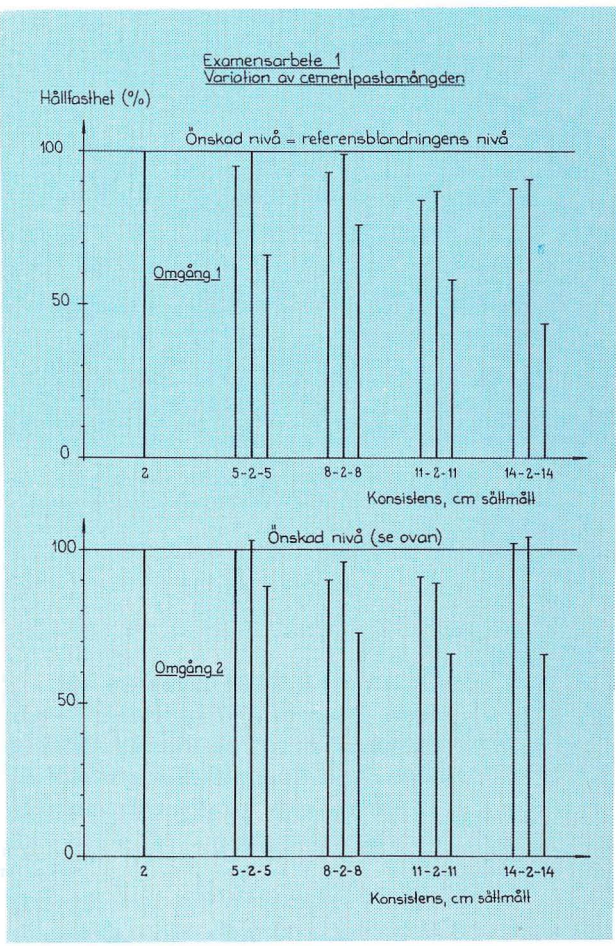
I examensarbete 1 provades endast K250 med en upprepning, i examensarbete 2 K250 och K350. I båda fallen gjordes försöken med Limhamn Std-cement.

De viktigaste resultaten har sammanställts i fig. 21 och 22, där samtliga hållfasthetsvärden satts i relation till det värde som uppnåddes vid direkt gjutning med konsistens 2 cm sättmått. För övriga blandningskonsistenser ges tre hållfasthetsvärden, motsvarande gjutning direkt efter blandning, efter tillstyvnande till 2 cm sättmått och efter uppblötning till ursprunglig blandningskonsistens. Följande slutsatser kan dras:

Blandnings-konsistens sättmått cm	Gjutningskonsistenser		
	direkt efter blandning	efter tillstyvnande	efter vattentillsats
2	② referens-blandning	—	—
5	5	2	5
8	8	2	8
11	11	2	11
14	14	2	14

Fig. 20. Schema över blandnings- och gjutningskonsistenser.

Fig. 21. Hållfasthet vid olika gjutningskonsistenser. K250, konsistensvariation med mängden cementpasta.



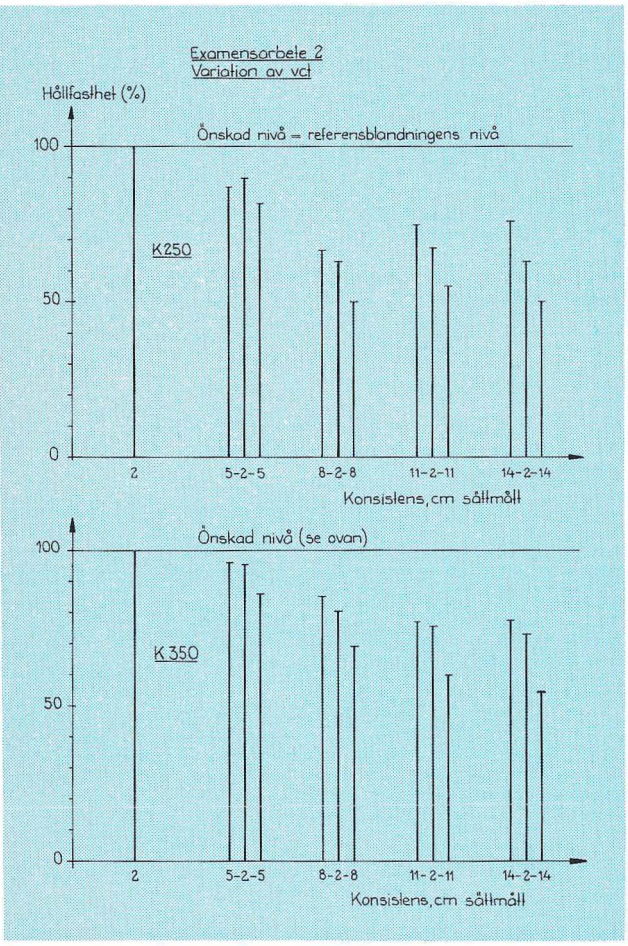


Fig. 22. Hållfasthet vid olika gjutningskonsistenser. K250 och K350. Konsistensvariation med vct.

1. Gjutning vid lösare konsistens har i de flesta fall givit lägre hållfasthet än referensvärdet vid 2 cm sättmått. Hållfasthetsnedgången är naturligtvis störst i fig. 22, där vct höjts för att åstadkomma konsistensförändringen.

2. Tillstyvnandet ger i allmänhet något höjd hållfasthet i de fall där konsistensförändringen åstadkommits med ändring av cementhalten (fig. 21), men fortsatt sänkt hållfasthet där konsistensändringen reglerats med vct (fig. 22). Hållfasthetsstegringen i fig. 21 är i allmänhet inte tillräcklig för att föra upp hållfastheten till önskad nivå.

3. Vattentillsats för att återställa ursprunglig konsistens ger starkt försämrad hållfasthet.

Resultaten överensstämmer kvalitativt med vad som angivits av R. Johansen /16/ i en liknande undersökning i Norge.

9. Korrosion på armering av HCl-gas

Examensarbete av nuvarande civilingenjörerna P. E. Hedlund och Anders Willner, handledning av professor Sven G. Bergström och forskningsingenjör Leif Erlandsson.

I några mycket uppmärksammade redogörelser för bränder, där PVC varit inblanddat, har man konstaterat svår korrosion på blottade metallytor men också på armering i betongkonstruktioner. Korrosion har orsakats av klorväte (HCl-gas), som frigörs vid termisk sönderdelning av PVC. Några sådana fall har redovisats av Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft /17/. En följd av olika larmrapporter blev kongressen Skydd 69 om plast, brand och korrosion i vars handlingar /18/ många intressanta rapporter om frågorna har tryckts. En omfattande studie av gasens inträngningshastighet i betong och konsekvenserna härav har gjorts av *Locher* och *Sprung* /19/. De konkluderade att betongkvaliteten var en viktig faktor i skeendet. Hög resistens hos betongen skulle uppnås om vct begränsades till 0,55. Vidare måste HCl-koncentrationen i brandgaserna vara hög, exponeringen vara i flera dagar, temperaturen väsentligt överstiga +50°C och betongen ständigt hållas fuktig efter ex-

poneringen för HCl-gas om farligt angrepp skulle ske.

Vi har gjort en mycket begränsad studie i ett examensarbete, där vi p.g.a. begränsad tid och begränsade resurser måste förenkla förutsättningarna något.

Vi valde att arbeta med cylindriska provkroppar (fig. 23), där i varje provkropp armeringsstänger placerats så att hela den avsedda täckskiktsvariationen fanns med i provkroppen. Exponering skedde från mantelytan. Vi arbetade med två förhållandevis låga betongkvaliteter, karakteriserade av vct = 0,7 och 1,0. Täckskikten varierades mellan 10 och 45 mm. Vi arbetade med atmosfär mättad med HCl-gas vid 80°C.

Betongen var vid exponeringen 3 mån gammal. Exponeringen för HCl-gas gjordes i 9 timmar. Då vissa källor syntes indikera att vattenbegjutning efter exponeringen kunde förvärra angreppet, doppades hälften av provkropparna i vatten under 1 timme omedelbart efter exponeringen. Därefter lagrades samtliga provkroppar i 20°C, 65 % RF.

Betongens analyserades vid olika tidpunkter med avseende på Cl-halt på olika avstånd från ytan genom välvilligt tillmötesgående från Cement- och Betonglaboratoriet, Limhamn.

Korrosion på armeringen angavs med den skala som tillämpats vid kontroll av rostskydd i gasbetongelement /20/, dvs. "Europeisk rostgradsskala för rostskyddsfärger". Skalan anger rostgraden i siffervärden 1–10, där 10 är helt oskadad och 1 är totalt skadad yta. Följande tabeller 1–4 visar de väsentliga resultaten. För varje exponeringstid och täckskikt ges två siffror, t.ex. 4/5. Den första siffran gäller armeringsstångens utsida, som ligger närmast den exponerade ytan, den andra siffran armeringsstångens insida. Den första kolumnen avser noll-värde bestämt före exponering.

Tabellerna visar klart att problemet korrosion på armeringsstänger under inverkan av HCl-gas inte kan negligeras. Dock behövs

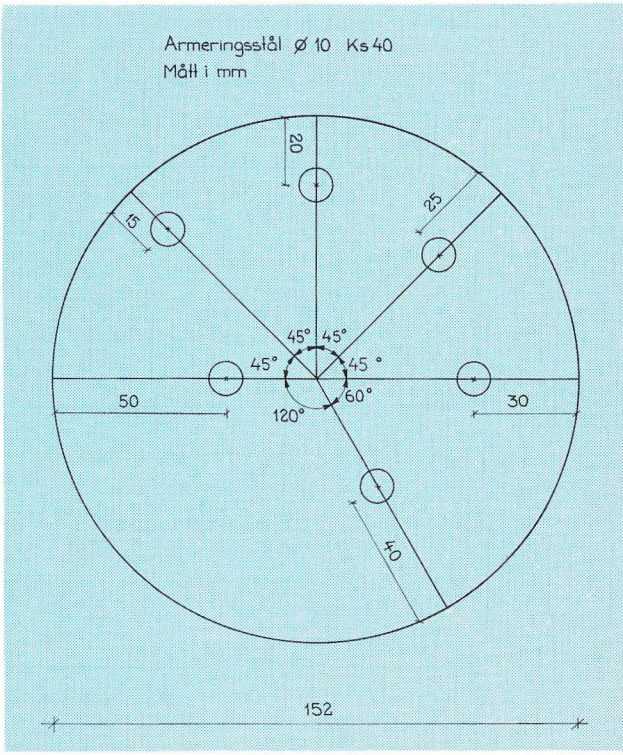


Fig. 23. Tvärsnitt av provkropp vid korrosionsundersökning. De små ringarna är armeringsstänger.

vattentillgång för att korrosionen skall bli av någon större omfattning. Detta framgår av en inbördes jämförelse mellan tabellerna 1 och 2 och mellan tabellerna 3 och 4. Vid vct = 1 har höga skadegrader (låga siffervärden) uppnåtts vid så tjocka täckskikt som 30 à 40 mm, dock endast i vattenbegjutna provkroppar. Vid vct = 0,70, vilket ungefär motsvarar K250, har större skador uppstått in till 20 mm djup, dock alltjämt endast efter vattenbegjutning.

Tilläggas bör att vatten i praktiken tillförs exponerade ytor vid släckning och rengöring.

Tabell 1. Rostgrad på armeringsstål
vct = 1,0, vattenbegjutning

Tid efter exponering / Täckskikt mm	Noll-värde	15 dygn	27 dygn	61 dygn	91 dygn
15	9/10	5/7	4/5	6/4	5/5
20	10/10	5/6	4/6	5/6	5/5
25	9/10	5/8	4/6	5/7	5/7
30	10/10	5/9	4/7	4/7	6/10
40	10/10	7/10	6/10	10/10	6/10
50	10/10	9/10	10/10	9/10	9/10

Tabell 2. Rostgrad på armeringsstål.
vct = 1,0, ej vattenbegjutning.

Tid efter exponering / Täckskikt mm	Noll-värde	15 dygn	27 dygn	61 dygn	91 dygn
15	9/10	10/10	8/10	6/10	10/10
20	10/10	10/10	10/10	6/10	9/10
25	9/10	10/10	10/10	8/10	9/10
30	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10
40	10/10	10/10	9/10	10/10	10/10
50	10/10	10/10	9/10	7/10	10/10

Tabell 3. Rostgrad på armeringsstål.
vct = 0,70, vattenbegjuten

Tid efter exponering / Täckskikt mm	Noll-värde	27 dygn	61 dygn	91 dygn
15	10/10	5/6	6/10	6/7
20	9/10	5/7	9/10	8/9
25	10/10	9/9	7/10	9/10
30	10/10	9/10	8/10	9/10
40	10/10	9/9	7*/10	9/10
50	10/10	10/10	10/10	9/10

* brist hos isoleringen på betongcylinderns basyta.

Tabell 4. Rostgrad på armeringsstål.
vct = 0,70, ej vattenbegjuten.

Tid efter exponering / Täckskikt mm	Noll-värde	27 dygn	61 dygn	91 dygn
15	10/10	8/10	10/10	10/10
20	9/10	9/10	9/10	9/10
25	10/10	9/10	10/10	9/10
30	10/10	7/10	9/10	10/10
40	10/10	9/10	9/10	9/10
50	10/10	9/10	10/10	10/10

Undersökningarna rörande frostbeständighet, fuktfixering och fukttransport har finansierats med anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning. För den fiber- och polymerförstärkta betongen har vi anslag från Styrelsen för Teknisk Utveckling. Uppdragsgivare ifråga om betongs krympning var Statens Betongkommitté, ifråga om krossballast AB Sydsten och ifråga om pimpsten AB Karlstad Grus och Betong.

Examensarbetena har genomförts med våra egna driftskostnadsanslag, dock att Cement- och betonglaboratoriet i Limhamn välvilligt har utfört kloridanalyser och hållfasthetsprovningar kostnadsfritt. Vi tackar alla för hjälpen.

10. Litteraturförteckning

1. *S. G. Bergström:*
Byggnadsmaterialforskning vid LTH. Del I. En översikt. Cement och Betong 1971:2.
2. *S. G. Bergström:*
Kompendium i byggnadsmateriallära FK I. TLTH/VBV Lund 1967.
3. *CEB-FIP:*
International recommendations for the design and construction of concrete structures. Principles and recommendations. June 1970 London and Bradford 1970.
4. *H. K. Hilsdorf:*
Austrocknung und Schwinden von Beton. Stahlbetonbau. Festschrift Rüsch, München 1969.
5. *S. T. A. Ödman:*
Beräkning av fri krympning hos oarmerat betongelement. Nordisk Betong 1967:1.
6. *S. G. Bergström, A. Nielsen, L. Ahlgren och G. Fagerlund:*
Allmän kurs i byggnadsmateriallära. Kompendium TLTH/VBV Lund 1970.
7. *U. S. Bureau of Reclamation:*
"Concrete Manual", 4th Ed. Denver 1942.
8. *U. Bjuggren:*
Krympning hos betong. Betong 1941:4.
9. *G. Picket:*
Shrinkage stresses in concrete. Journ Am Concr Inst, Febr 1946.
10. *T. C. Hansen och A. H. Mattock:*
Influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete. Journ Am Concr Inst, Febr 1966.
11. *K. Jönsson:*
Metod för studium av fuktändringsförlopp i byggnadsmaterial.
Nuclear Physics Report LUNP 7106, April 1971.

12. *Statens Betongkommitté:*
Kommentarer till 1965 års material- och utförandebestämmelser för betong. KB5, Stockholm 1966.
13. *P. G. Burström, L. Carlsson och L.-G. Mattisson:*
Undersökning av möjligheten att använda krossat material i stället för naturgrus vid betongtillverkning.
Inst f byggnadsteknik, Lund 1969.
14. *J. P. Romualdi och J. A. Mandel:*
Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement.
Journ Am Concr Inst, June 1964.
15. *M. Steinberg, L. E. Kukacka, P. Colombo, J. J. Kelsch, B. Manowitz, J. T. Dikeou, J. E. Backström och S. Rubenstein:*
Concrete polymer materials.
First topical report. BNL-50134-USBR
Gen Rep 41. Joint report of Broakhaven National laboratory and US Bureau of Reclamation, Dec 1968.
16. *R. Johansen:*
Transport av fabrikkbetong—optimaliseringsmuligheter. Betongen idag 1964:2.
17. Der Abbrand von Kunststoffen und seine Folgen. Schadenspiegel årg 11, April 1968.
18. Skydd 69. Plastics-Fire-Corrosion. International Symposium and 15th Nordic Fire Protection Day, Stockholm 1969.
19. *F. W. Locher och S. Sprung:*
Einwirkung von salzsäurehaltigen PVC-Brandgasen auf Beton. beton 2-70 och 3-70
20. Svensk byggnorm — supplement SBN-S 25:6.
Gasbetongelementnormer.
Statens Planverk. Publ nr 14 1968.

★