Nationella artiklar

1990-2014

av

Bertil Persson

Bertil Persson Betongteknik AB **Organisationsnummer 556739-5404**
Daggpilsgränd 23, 233 63 Bara **Telefon mobil 0739 335111**

Rapport 2024:311 ISBN- 978-91-89891-11-1

Bertil Persson Betongteknik AB Tfn 0739 33 51 11
Daggpilsgränd 23, 233 63 Bara info@bertil-persson.se

Innehållsförteckning

13 års studier visar att silikastoft gör brobetong mera beständig. Husbyggaren 3/2003, 40-49.

16 balkar i försök med högpresterande betong. Bygg & Teknik 1991/7. 1991. Stockholm, 38-42.

Alkalibeständigt lim, avjämningsmassa och homogen plastmatta bästa kombinationen på betonggolv. Betong 2/2004, 60-62.

Autogen krympning hos högpresterande betong. Betong 94_2. Stockholm, 17-20, 29.

Beräkningsprogram för torktid hos betong. Bygg teknik. 02_2012, pp. 61-64.

Beräkningsprogram för torktid hos betong. Bygg & teknik. 02/2012, pp. 61-64.

Beräkningsprogram TORK för val av vct i byggfuktfri betong. Bygg & Teknik. 95/7. 1995. Stockholm, 22-25.

Beständighet hos betong med krympningsreducerande åtgärder, Bygg & Teknik 2006/07, 63-66.

Betong anpassad för ett effektivt byggande. Bygg & Teknik 7/96. 1996. Stockholm, 27-31.

Betong kan brandsäkras med plastfibrer, Husbyggaren 2/2008, 24-28

Betongfundament och andra effekter av vindkraftverk. Bygg & teknik. 07/12, 48-50.

Betongstomme kunde begränsat WTC-katastrofen. Husbyggaren 4/2003, 18-27.

Betonguttorkning med Byggcement. Bygg & Teknik 07/2000, 30-32.

Borrade tunnlar för miljöns skull. Husbyggaren 1/2001. 2001, 20-24.

Brandspjälkning i betong kan undvikas. Husbyggaren 2/2003, 18-28.

Brosystemet mellan Honshu och Shikoku: Japanska rekordbroar. Bygg & Teknik 3/99. Stockholm. 1999, 56-60.

Bruksenergi dominerar livscykelkostnad. Husbyggaren 2/2004, 36-43.

Byggfuktfri betong 10 år. Husbyggaren 2/2001. 2001, 8-12.

Byggfuktfri betong blev 10 år. FÖRENINGEN SVERIGES BYGGNADSINSPEKTÖRER. KONTAKTBLAD ÅRGÅNG 28 NR 2, 2001/27-28.

Den problematiska krypgrunden. Byggindustrin 29/1990, 39-41.

Effekt av injektering i betongsprickor. Bygg & Teknik 7/2013, 34-43.

Effektivitet för vindkraft lägst i Skåne 2003 till 2011. Bygg & teknik. 03/2012.

En fuktfri platta på mark. Cementa 1/1991, 11-13.

Energi, ljud och rörliga skuggor från vindkraftverk. Bygg & teknik 2/2009, 96-100.

Fel materialval leder till fukt och mögel. Bygg & Teknik 5/01. Stockholm. 2001, 58-59.

Femton stycken bjälklag i uttorkningsförsök med högpresterande betong Bygg & Teknik 1993/7, 37-39.

Flytmedelsfri betong med glasfillerinblandning i snabbyggt malmöhus. Husbyggaren 1/2000, 26-29.

Fuktfördelning i betonggolv med vattenburen värme - inverkan av betongtyp, rördjup och temperatur. Bygg & Teknik, 2007/07, 53-60.

Fuktklassning av byggnader gynnar husägare och försäkringsbolag. Husbyggaren 1/2002, 16-24.

Fuktsäkra betongbjälklag. Betong 94/3. Stockholm. 1994, 14-16, 29.

Förebygger plastfibrer brandspjälkning även hos självkompakterande betong. Husbyggaren 2/2002, 26-30.

Förprovning av golvsystem borgar för en god innemiljö. Husbyggaren 6/2002, 10-18.

Förspända balkar i högpresterande betong – ekonomiska och miljömässiga fördelar". Co-author. Bygg & Teknik 7/98. Stockholm. 1998, 16-19.

Grundkrypning hos betong vid förhöjd temperatur. Betong 95/1. 1995. Stockholm, 8-12, 29.

Golvsystem kan testas i förväg med ny provningsmetod. Husbyggaren 2/2007, 14-19.

Hållbarhet hos självkompakterande betong med kalkstensfiller. Bygg & Teknik 07/2002, 35-38.

Hög betongkvalitet utesluter fuktproblem. Husbyggaren 5/2001, 10-14.

Hög fukt- och fillerhalt bakom brandspjälkning hos självkompakterande betong. Bygg & Teknik2003/06, 34-36.

Hög lönsamhet med högpresterande betong. Bygg & teknik 7/2001, 22-25.

Höghållfast betong – självuttorkning och hållfasthet. Bygg & Teknik 90/7. Stockholm. 1990, 21-25.

Högpresterande betong – en match för management. Byggforskning 90/6. Stockholm. 1990, 26-27.

Högpresterande betong ett aktuellt BML-projekt. Lunds Tekniska Högskola, LTH. Lund. 1990, 36-37.

Högpresterande betong ger fuktfri platta på mark. Betong 91/1. Stockholm. 1991, 8-10.

Högpresterande betong torkar även i vatten. Betong 92/1. Stockholm. 1992, 14-16.

Högpresterande betong utan byggfukt. Cementa 3/90. Stockholm. 1990, 18-19.

Högpresterande betong utan formaldehyd. Bygg & Teknik 1994/7. Stockholm, 13-16.

Högpresterande betong – möjligheternas material. Byggforskning 91/5. 1991. Stockholm, 26-27.

Högpresterande självkompakterande varmbetong. Bygg & teknik 07/2009, pp. 32-36.

Ideal partikelfördelning i högpresterande betong. Betong 95/3. 1995. Stockholm, 6-8, 39.

Inblandad plastfiber minskar spjälkning vid brand. Husbyggaren nr 2. 2008, 28-32.

Inlandsbaserad vindkraft industrialisering i smyg. Husbyggaren 6/2000. 2000, 30-34.

Innerskärgård industrialiseras med vindkraft. Bygg & teknik. 04/2012, 20.

Internationellt arbetsmöte beträffande högpresterande betong. Betong 2/96. 1996. Stockholm, 27-29.

Japanska försök avseende hållfasthet och E-modul i väggar av vibreringsfri betong. Betong 2/99. Stockholm. 1999, 16-17.

Kan ny japansk teknik rädda våra stränder. Husbyggaren 5/2000. 2000, 8-10.

Kloridinträngning i kalkstenfillerbetong. Bygg & Teknik 2004/08, 58.

Kloridinträngning i kalkstenfillerbetong. Bygg & Teknik 2004/08, 58.

Krypning hos förspända balkar i högpresterande betong. Betong 2/98. Stockholm. 1998, 13-15, 34.

Lågfrekvent buller kan stoppa landsvindkraften. Bygg & teknik 06/2010, 58-59.

Lättklinkerisolerad krypgrund med minskad mögelpåväxt. Bygg & Teknik2003/02, 22-28.

Materialkostnader för modern husbyggnadsbetong. Betong 1/1998, 30.

Materialkostnader för självkompakterande betong. Betong 4/1998, 25.

Mekaniska egenskaper hos självkompakterande betong. Bygg & teknik. 7/2012, 70.

Miljonprogrammet – ful ankunge eller politisk dundertabbe? Husbyggarens jubileumsskrift 2001, 26-33.

Minsta avstånd mellan vindkraft och bostäder. Bygg & teknik. 03/2012, 53-56.

Modern betong och filigranform förutsättningarna för ett rekordbygge i Malmö. Husbyggaren 6/99. 1999, 34-43.

Modern betongteknologi efter nya recept. Husbyggaren 2/2006, 32-36.

Modern tunnelbetong skonar miljön. Husbyggaren 1/2004, 44-52.

Modernt byggande förödande för energikonsumtionen. Bygg & Teknik 2004/05, 35-39.

Mögel i småhusgrunder kan undvikas till rimliga kostnader. Husbyggaren 5/2002, 10-17.

NORDTEST för kontroll av självuttorkning hos betong. Bygg & Teknik 5-6/99. Stockholm. 1999, 49-52, 58-60.

Nytänkande för moderna hus. Framsteg inom FORSKNING OCH TEKNIK 1992. IVA Nytt 1992:5. 1992, 44-46.

Optimal betong i 90-talets byggande. Byggforskning 93/5. 1993. 16-17.

Oväntade egenemissioner från golvmaterial. HUSBYGGAREN, nr 1 2003, 18-25.

Plastisk krympning hos självkompakterande betong utan byggfukt. Bygg & Teknik 2004/07, 41-43.

Plastmattor limmade på betong – karbonatisering och emissioner. Bygg & Teknik 7/98. Stockholm, 45-49 1998.

Problem vid mattläggning på högpresterande betong – inverkan av ytans fukttillstånd. Betong 4/1996, 21-23.

PVC-matta – ett nödvändigt ont på barnklinik i Lund. Husbyggaren 3/2000. 2000, 8-12.

Rekordbågar i högpresterande betong. Bygg & Teknik 7/97. Stockholm, 36-37.

Renovering av krypgrundläggning för småhus, Bygg & Teknik 2006/08, 21-25.

Renovering av krypgrundläggning för småhus - långtidsuppföljning, Bygg & Teknik 2008/08, 64-70.

Silikastoftbetong – efter 13 år. Bygg & Teknik2003/07-08, 42-47, 68-71.

Självkompakterande betong – en tyst revolution inom byggandet. Husbyggaren 2/2000. 2000, 20-24.

Självkompakterande betong motståndskraftig mot sprickbildning och brand. Husbyggaren 4/2002, 10-16.

Självkompakterande betong, SKB, vid brandtemperatur. Betong 3/2003, 27-28.

Självkompakterande husbyggnadsbetong i Okayama, Japan – och i Malmö. Husbyggaren 2/99. 1999, 6-13.

Självtorkande golv – en tillämpning av högpresterande betong. Cement- och Betonginstitutet, CBI. Stockholm. 1993, 27-32.

Snabbtorkande betong gav ej upphov till sjuka hus. Betong 7/1995, 20-21.

Självuttorkning i praktiken. Bygg_ Teknik 7_1997, 12-18.

Sprickbildning i vältbetonggolv. Bygg & teknik 07/2011, pp. 56-64.

Stora emissioner från avjämningsmassor vid kompatibilitetstest. Betong 2/2000, 23.

Sulfatnedbrytning i kalkstenfillerbetong. Bygg & Teknik 2005/05, 65.

Sveriges billigaste bostadshus byggdes i betong. Betong 2/2001, 14-15.

Tillverkning och vissa egenskaper hos högpresterande betong. Bygg_ Teknik, 2007, 26-28, 2008, 54-55.

Tioårsjubileum för snabb/självtorkande betong. Betong 3/2002. 2002, 25-26.

Tunnel genom vattenförande sediment – utan föregående injektering. Bygg & Teknik 1/99. Stockholm. 1999, 28-29.

Tål Bo-01-husen tidens tand? Husbyggaren 4/2001, 8-11.

Undvik svartmögel och fukt – bygg med byggfuktfri betong. Byggindustrin. Stockholm. 19/2001, 12.

Uttorkning av byggfukt i golvsystem under stålsyllar. Bygg & Teknik. 7/2008, 53-56.

Uttorkning av byggfuktfri självkompakterande betong efter vattenlagring, vind eller värme. Bygg & Teknik 2005/07, 27-30.

Uttorkning av ytfukt i byggfuktfri betong. AMA-nytt Mark Hus 1/1996, 20-23.

Vindkraft på land dyr och bullrig. Bygg & Teknik, 2008/05, 70-77.

Vindkraftverk och god livsmiljö oförenliga. Bygg & Teknik 05/2011, 60-67.

Värmegolv, ”självkompakterande betong” och fuktskador. Bygg & Teknik. 3/2002, 59.

13 års studier visar att silikastoft gör brobetong mera beständig. Husbyggaren 3/2003, 40-49.

13 års studier visar gör brobetong mer

AV DOCENT BERTIL PERSSON

Ölandsbron är för gemene man det mest ökända exemplet på dålig brobyggnadsteknik, där man 1972, med dåtidens bästa betong, åstadkom i stort sett 20–25 års beständighet. Vid projektet minimerades kostnaderna för betongen med en låg cementhalt och hög inblandning av havsvatten som följd. Till råga på allt valde man lokalt stenmaterial som var lite billigare än urbergsballast. Entreprenören ställde förslagen på förbilligandet vilka godkändes av myndigheten – beställaren.

Redan efter tio år uppdagades problem med kloridinträngning och armeringskorrosion som kostade fyra gånger mer att åtgärda än vad det ursprungligen kostade att uppföra bron. Om ca fem procent av cementen i betongen byts ut mot silikastoft ökar brobetongens beständighet mångfalt i och med att kloridinträngningen och även frostavskalningen – för anläggningsbetong avgörande kvaliteter – minskar. Här redovisas resultat som framkom efter 13 års studier finansierade av dåvarande BFR och NUTEK samt av Cementa och Elkem, Norge.

Silikastoft är ett i Sverige föga använt tillsatsmaterial i betong. I Danmark, Norge, Frankrike, Canada, m fl länder används silikastoft då höga krav ställs på beständighet eller hållfasthet. Silikastoft består av ytterst små kvartskorn, endast ca 1/100-del så stora som cementkornen. Silikastoft uppkommer bl a som ett restmaterial vid tillverkning av kiselstål, t ex

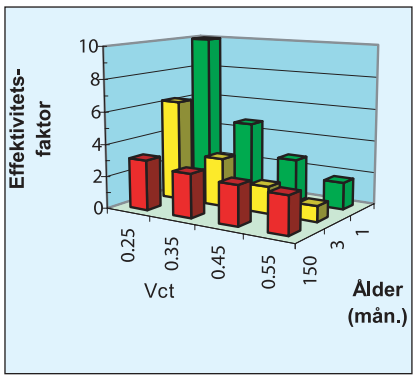


Fig 1. Effektivitetsfaktor för silikastoft med avseende på tryckhållfasthet.

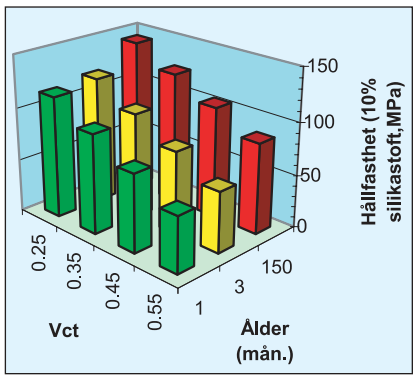


Fig 2. Tryckhållfasthet hos betong med 10% silikastoft.



Tidig hållfasthet vid brotillverkning i en fältfabrik krävde 7.5% silikastoft i betongen till Ré-bron utanför la Rochelle, Frankrike.

att silikastoft a beständig

på Vargön vid Trollhättan, men tillverkas även kommersiellt. Silikastoft är ett ypperligt filler i betong för att fylla ut utrymmet mellan de grövre cementpartiklarna. Samtidigt har silikastoft puzzolaniska kännetecken d v s liksom flygaska, slagg och andra askor reagerar det med cement till en förening med hög hållfasthet och god beständighet. Man kan därför ersätta en del cement med dessa restprodukter för att på så sätt minska cementförbrukningen och därmed koldioxidutsläpp som ursprungligen härrör från betongtillverkningen. Restmaterialen har s a s redan en gång stått för sin miljöpåverkan. Tysk slaggcement innehåller t ex 70 % slagg och fungerar bra i samband med konstruktioner där kraven på tidig hållfasthet och frostbeständighet är små. Danska betongtillverkare har sedan två decennier trepulverblandningar i sina silor, d v s cement, flygaska och silikastoft som bindemedel. Priset på silikastoft är ungefär tre gånger så högt som cementpriset, varför det ej är lönsamt att från hållfasthetssynpunkt använda silikastoft som ren cementersättning om inte andra fördelar nås samtidigt som ökad beständighet, gjutbarhet etc.

Hållfasthet

Hållfasthet är den mest kända och kontrollerade av betongegenskaperna. Varje betongfabrik av rang har själv möjlighet att trycka kuber, speciellt vid 28 dygns ålder, för att kontrollera att tryckhållfastheten uppfylls med hänsyn till den betongklass som beställts och levererats till bygget. Speciellt vid ung ålder har silikastoft en positiv effekt på tryckhållfastheten, (Fig 1)[1,2]. Med 10 % silikastoft i betongen beräknat på cementvikten erhålls högre hållfasthet hos betongen

Tab 1 – Recept och hållfasthet för brobetonger (kg/m³, MPa)

Material/vct (%)	24 [1,2]	27 [13]	40 [3]	40 [12]	73 [14]
Ballast 16-32 mm				590	?
Ballast 8-16 mm				395	?
Ballast 11-16 mm		800			
Ballast 8-12 mm	1310	60			
Ballast 6-20 mm			1200		
Grus 0-8 mm	550	880		680	?
Sand 0-2 mm		50	800	250	
Flygaska				40	–
Cement	475	500	400	335	270
Silikastoft	48	50	30	20	–
Flytmedel	8	5	5	10.2	–
Luftporbildare	-	-	-	1.0	–
(Flyt)sättmått	50 mm	Ø 710 mm	?	150 mm	?
Hållfasthet, 2 dygn (MPa)		63			
28 dygn	112	141	95	65	30
1 år	139	171			

FÖNSTERGRUPPEN SVERIGE AB

DAGS ATT BYTA FÖNSTER?



VÄLJ K-Line!

1. Du slipper underhåll i minst 20 år.
2. Du får bästa täthet och lägsta U-värde.
3. Du får ett fönster med liten karm/bågdel, 77 mm.
4. Större glasyta ger dig mer ljus inomhus.
5. Avsaknad av utvändiga glaslister försvårar inbrott.
6. K-line passar alla hustyper.
7. Du vädrar utan att behöva flytta blomkrukor och gardiner.
8. K-line är lätta att tvätta.
9. Alla K-line fönster är tillverkade i kompositmaterial.
10. Du får ett tyst fönster med överlägsen ljudreduktion.
11. K-line är barnsäkra. Sido- och bottenhängda.
12. Du bestämmer måtten. Vi tillverkar efter dina önskemål.
13. Kort leveranstid.
14. 15 års garanti.
15. 100% återvinningsbart.



DESIGN AWARD WINNER 1997

Fönstergruppen i Sverige AB
430 22 Väröbacka
Tel: 0340-66 04 00
Fax: 0340-66 04 80
E-post: info@fonstergruppen.se

Försäljningskontor
Plejelvägen 24
239 31 Skanör
Tel: 040-47 56 80
Fax: 040-47 39 60

www.fonstergruppen.se

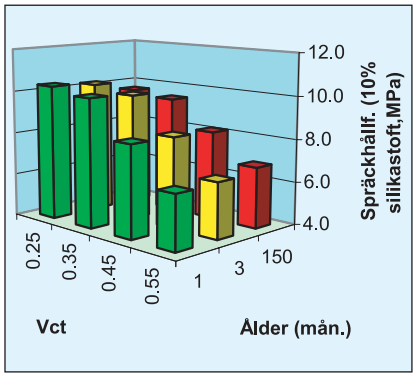


Fig 3. Spräckhållfasthet hos betong med 10% silikastoft.

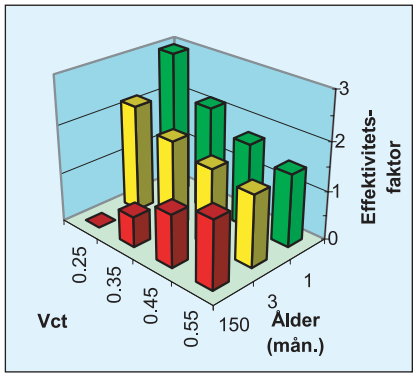


Fig 4. Effektivitetsfaktor för silikastoft med avseende på spräckhållfasthet.

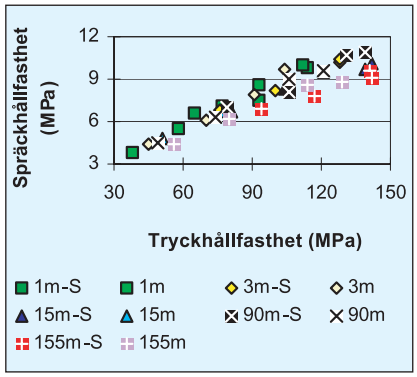
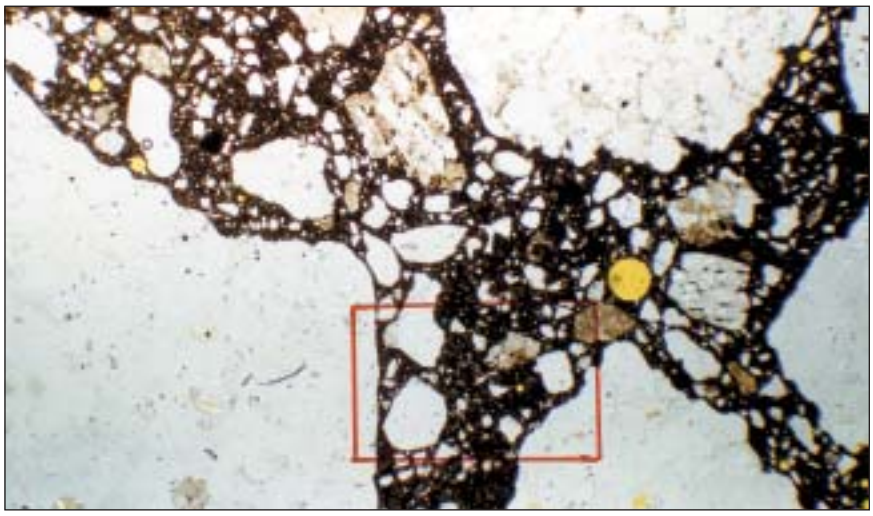


Fig 5. Spräckhållfasthet som funktion av tryckhållfasthet i betong. m = månaders ålder; S = 10% silikastoft.

än om bara cement används som bindemedel, i synnerhet vid ett lågt vattencementtal, vct, hos betongen. Efter 13 år avklingar effekten av silikastoft till två, d v s dubbelt så stor effekt på hållfastheten som erhålls med motsvarande mängd cement. Efter lång tid är det således inte ekonomiskt lönsamt att från hållfasthetssynpunkt använda silikastoft i betong. Eftersom man från produktionssynpunkt behöver hög hållfasthet tidigt är tillväxten på lång sikt av mindre värde. Det var just av denna anledning, tidig hållfasthet vid brotillverkning i en fältfabrik, som silikastoft valdes till bron till Ré utanför Rochelle i Frankrike. (Recept ges i Tab 1)[3]. Tryckhållfastheten på lång sikt ökar även vid användning av 10 % silikastoft i betongen (Fig 2)[1,2]. För draghållfastheten uppmätt som spräckhållfastheten är förhållandena något annorlunda vid användning av silikastoft i betong, (Fig 3)[1,2]. För betong med vct < 0.40 förefaller draghållfastheten att minska, om än obetydligt, då 10 % silikastoft nyttjas i betongen. Effektivitetsfaktorn för silikastoft med avseende på draghållfastheten blir således liten, speciellt vid lägre vct (Fig 4)[1,2]. Detta förhållande gäller även för betong utan silikastoft. Den andel som betongen enligt bestämmelserna får uppta minskar nämligen i förhållande till tryckhållfastheten vid lägre vct i s k högpresterande betong även utan silikastoft. Förhållandet mellan tryck- och spräckhållfasthet är också något annorlunda om 10 % silikastoft används i betongen eller ej (Fig 5)[1,2]. Så småningom minskar draghållfastheten i förhållande till tryckhållfastheten vilket troligen beror på att självuttorkningssprickor uppstår i betongens cementlim då detta innehåller silikastoft. Detta är något som bör beaktas vid beräkning av armering för skjuvning i, men, som ovan nämnts, redan återspeglats i bestämmelserna.



Hög densitet, bra förpackning och låg lufthalt hos betong med vct = 0.24 samt 10% silikastoft beräknad på cementvikten. Korta sidan = 7 mm. (Foto: Hannu Pyy).

Självuttorkning och hydratation

Den avklingande ökningen av draghållfastheten hos betong med silikastoft förklaras främst av en inre självuttorkning hos betongen, även så nära betongyta som två centimeter efter vattenlagring. Till följd av en kraftig inre självuttorkning minskar relativa fuktigheten i betong med silikastoft mer än hos betong utan silikastoft. Mindre fukt finns tillgänglig för hydratation av cementen i en betong med silikastoft än i en betong utan silikastoft. Silikastoftbetongens annorlunda beteende förklaras också av puzzolaneffekten – en reaktion mellan silikastoftet och kalciumhydroxiden i cementen. Silikastoft förbrukar en del av den kalciumhydroxid som annars finns kvar i betong utan detta tillsatsmaterial. Reaktionsprodukten, kalciumsilikathydrat, har hög-

Forts sid 44

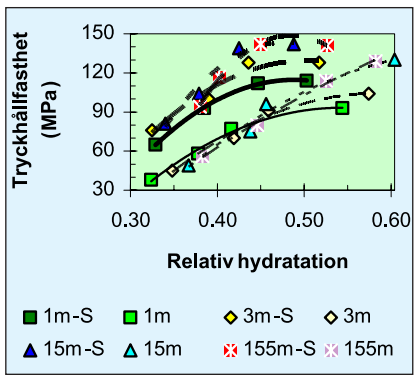


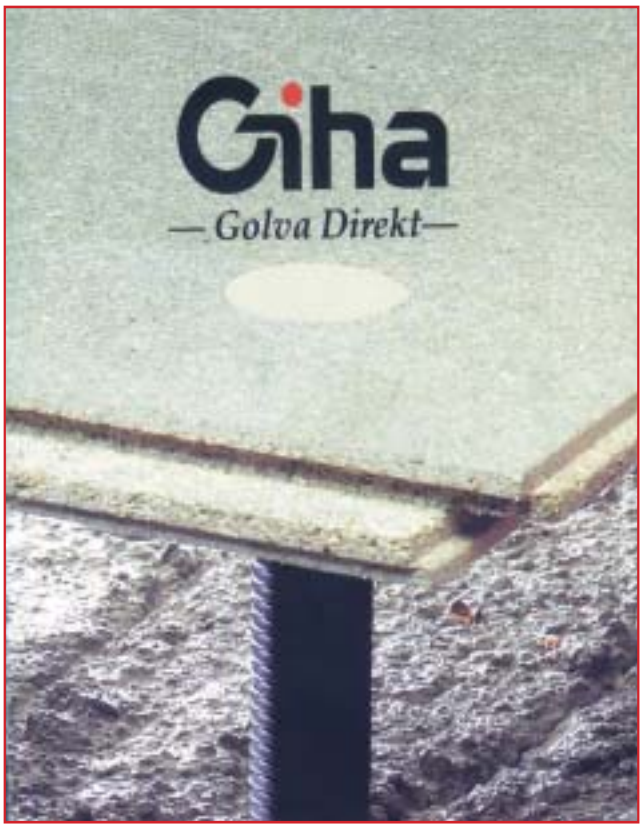
Fig 6. Tryckhållfasthet som funktion av hydratation. m = månaders ålder; S = 10% silikastoft.

Cds rsnq` fnkukxesds

FHG@,Fnkurxrsdl úq dss jnlokdss rxrsdl eď udmshkdq`cd fnku- Nadqndmcd `u jq`eshf ktsmhmf nbg niúl mgdsdq dqgükkdr rm`aas dss ok`ms odqedjs udmshkdq`s fnku ldc gď frs` ju`khsds-

GIHA-Golvet passar b¬de fºr renovering samt nyproduktion och ªr lºsningen vid fukt, mºgel och radonproblem.





FHG@,Fnkuds úq etkks iúl eď qa`qs ldc sq`chshnmdkks roümrjhudfnku k`fs oü qdfk`q-

R`lskhf` FHG@ oqnctjsdq g`q rhm fhum` ok`srh jqdsrknoods- @mshmfdm eď q üsdq`muúmcmhmf dkkdq üsdquhmmhmf.dmdqfhüsdquhmmhmf-

0.- --3

0.- --3

HISAB
HULTFREDS INDUSTRISNICKERI AB

Giha SYSTEMET GIHAGOLVET VENTINSPECT

Ifka_bod 64 10/ 6/ S^o_bod
Qbi,c^u7 -01-*3/ -4 31 Jl_7 -4-*3/0 43 3-
t t t+efp^_+pb dlo^k+`^oipplk=efp^_+pb

Giha SYSTEMET GIHAGOLVET VENTINSPECT

l` s`bj-l`f uhkk uds` ldq nl FHG@,Fnkurxrsdl

M`lm^^^

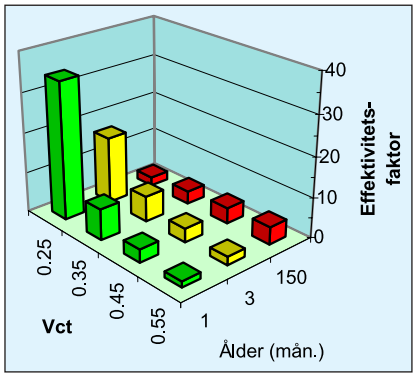


Fig 7. Effektivitetsfaktor för silikastoft vid självuttorkning med avseende på relativ fuktighet, RF.

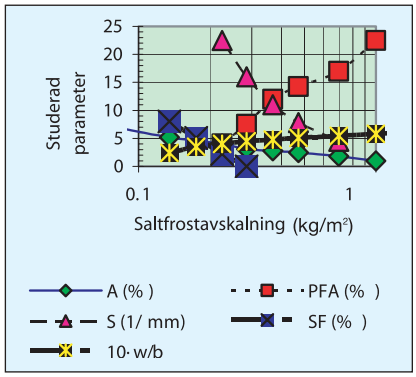


Fig 8. Effekt av lufthalt, A (%), flygaska, PFA (%), specifik yta hos luftporer, S (1/mm), silikastoft, SF (%) och vbt, w/b (x10) på saltfrostavskalning hos betong.

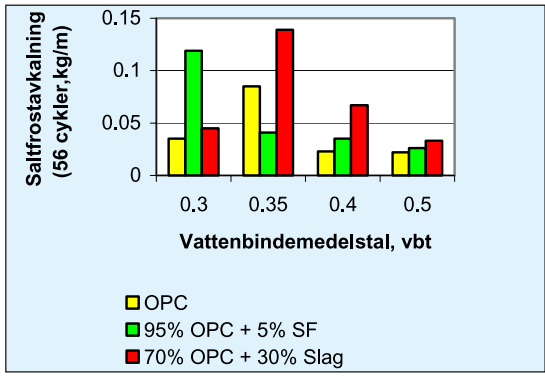


Fig 9. Saltfrostavskalning efter 56 frys-cykler hos betong med rent Portland-cement, OPC, 5% silikastoft, SF eller 30% slagg.

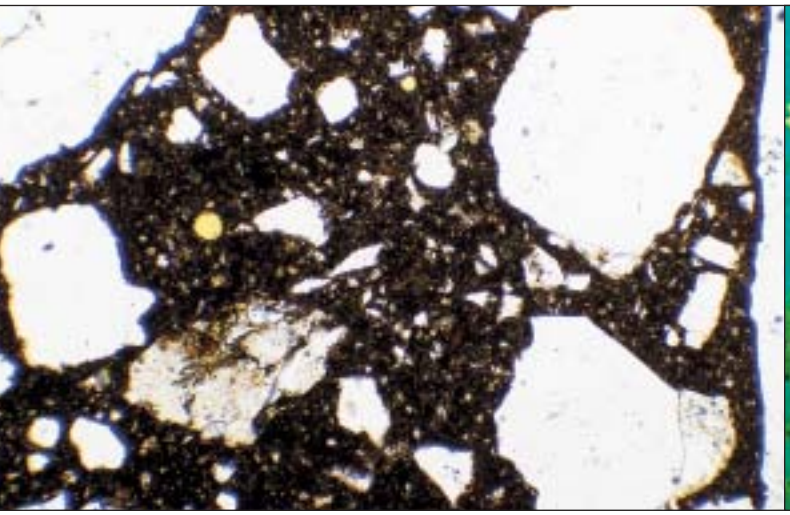
Forts från sid 42

re hållfasthet än kalciumhydroxid och lakas inte heller ut ur betongen som är fallet med kalciumhydroxid. Puzzolanreaktionen ger en tätare och starkare betong som resultat (Tab 1). Betongen med 10 % silikastoft, med ett lågt vct blir dock något mera skör än en betong utan silikastoft i och med att draghållfastheten i betongen med 10 % silikastoft och lågt vct minskar något på lång sikt, (Fig 3). I och med att en del av kalciumhydroxiden förbrukas i betong med silikastoft blir också hydratationsutvecklingen annorlunda i förhållande till tryckhållfastheten i jämfört med vad som är fallet i betong utan silikastoft, (Fig 6)[1]. En tätare struktur hos silikastoftbetongen innebär också att en finare porstruktur uppstår med en lägre relativ fuktighet, RF, vid självuttorkning i betong med 10 % silikastoft än i betong utan detta tillsatsmaterial, (Fig 7)[1]. Speciellt vid ett lågt vct torkar betong med silikastoft även under vatten som är fallet i högpresterande betong[2]. Enligt trettonårsstudien förefaller det som om vct, då en tillräcklig mängd vatten finns närvarande i betong för att möjliggöra en fullständig hydratation, är något högre än vad som tidigare uppmätts, vct = 0,43 mot vct = 0,39 tidigare[4] (Fig 7). Självuttorkning ger också upphov till en inre krympning i betongen varvid dragkrafter uppstår i cementlimmet med mikrosprickor som följd. Självuttorkning har emellertid andra gynnsamma effekter på betongens egenskaper:

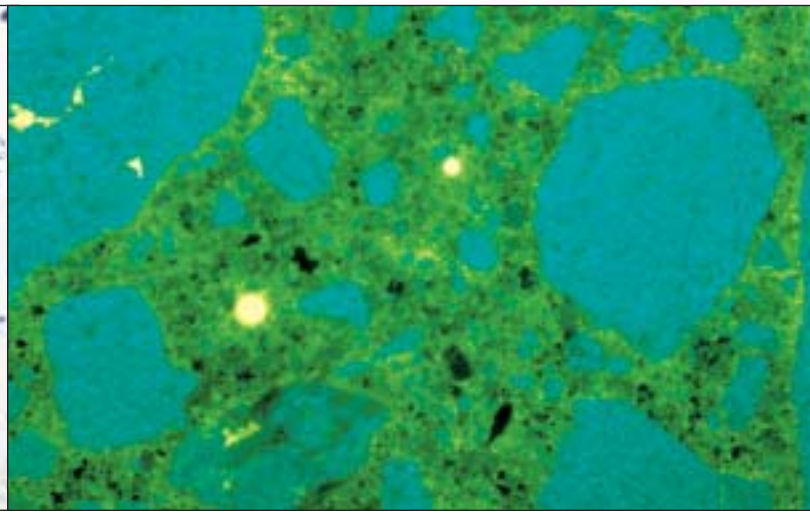
- Mindre mängd frysbart vatten i en självuttorkad betong än i en betong utan självuttorkning.
- Mindre kloridinträngning i självuttorkad betong eftersom klorider inte kan förflytta sig i luft.
- Mindre risk för fuktskador på ytbeläggningar som limmas till betongen eller till avjämningsmassa som läggs på betongen.

Den minskade vatteninträngningen i en silikastoftbetong jämfört med vatteninträngningen i en betong utan silikastoft kan också bero på en inre självuttorkning och därmed en inre krympning av betongen. Då ytan på betongen utsätts för vatten sväller denna med stora skillnader i töjning och spänning närmast ytan som följd. Om betongen i övrigt är spänningsfri kan den därmed bli förspänd med ca

Forts sid 44



Delområde av betong med korta sidan = 1.7 mm. (Foto: Hannu Pyy).



Flourecerat område av betong med mycket låg porositet i vidhäftningszonen mellan ballast och cementlim. Korta sidan = 1.7 mm. (Foto: Hannu Pyy).

www.strateg.se



Ytong Helvägg revolutionerar byggandet

Nu kan du också bygga sunda stenhus med ett prefabricerat byggsystem. Lösningen heter Ytong Helvägg. Ett nyutvecklat helväggselement från Yxhult som revolutionerar det murade byggandet!

- Ytong Helvägg går mycket snabbt att montera.
- Ytong Helvägg monteras med kran direkt från bil.
- Ytong Helvägg levereras skräddarsydd – i längder upp till sju meter och i våningshöjd upp till tre meter.
- Ytong Helvägg ger villor och flerbostadshus fogfria fasader med lågt fuktinnehåll.

Läs mer om Ytong Helvägg på www.yxhult.se där du även kan beställa broschyrer.

YXHULT
ETT FÖRETAG I PLENA-GRUPPEN

Dalby tel: 046-20 55 00, fax: 046-20 11 33 **Göteborg** tel: 031-704 45 20, fax: 031-704 45 30
Kumla tel: 019-58 60 00, fax: 019-58 61 91 **Stockholm** tel: 08-13 61 90, fax: 08-618 39 85 **Internet** www.yxhult.se

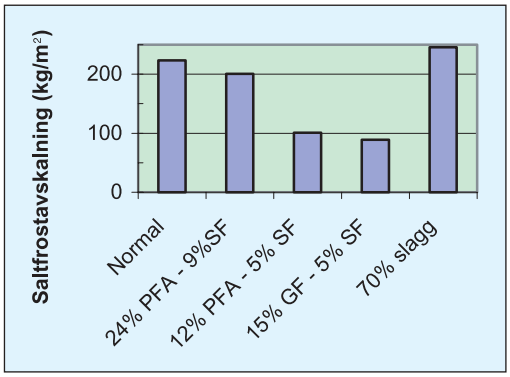


Fig 10. Saltfrostavskalning efter 56 frys-cykler hos normal betong och självkompakterande med olika kombinationer av flygaska, PFA, glasfiller, GF, silikastoft, SF, och slagg.

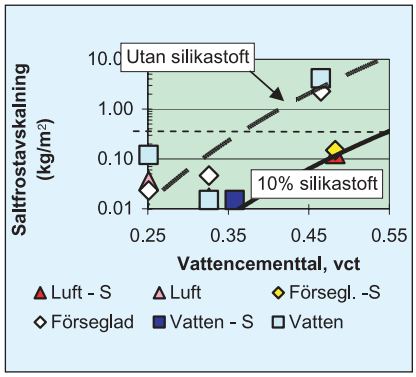


Fig 11. Saltfrostavskalning efter 56 cykler hos betong med och utan silikastoft. S = 10% silikastoft.

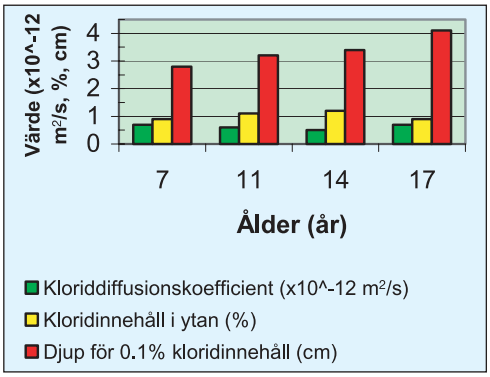


Fig 12. Långtidsdiffusion av klorider vid Farøbron.

Forts från sid 44

12 MPa i ytan medan betongens inre delar får dragspänningar. Detta är en trolig förklaring till varför betongen blir mer eller mindre vattentät, t o m torkar i vatten.

Frostbeständighet

Frostbeständighet mot en treprocentig koksaltlösning är en av de egenskaper som diskuteras mest i fråga om beständighet med silikastoft i betongen. Generella studier av saltfrostbeständighet hos ett mycket stort antal betonger tyder på att denna ökar med en ökande mängd silikastoft i betongen (Fig 8)[5]. Enligt Figur 8 har halten av silikastoft samma inverkan på frostbeständigheten som lufthalten och avståndsfaktorn för luft i betongen: värdet av dessa parametrar ökar samtidigt som saltfrostavskalningen minskar. Det förefaller vara logiskt att en tätare betong med 10 % silikastoft ger minskad vatteninträngning och därmed mindre frostavskalning hos betongen än vad som är fallet för betong utan silikastoft. Figur 8 visar att mängden flygaska och vattenbindemedelstalet, vbt, hade motsatt effekt jämfört med

Psbofdbp _lpq^aperp h^k molgbhqbo^p bccb

Pqoĉkd_bqlkdp ?^p_vddk^a fkkb_ĉo j lkqbofkd ^s cĘo abipvpqb j j ba pqlo kldo^kkebq+ Abq pqĉiibo ho^s mċ fkpq^ii^qflkbok^ cĘoiĉddp mċ bqq pvpqb j ^qfphq l`e dbkl ¬ kċdlq j ^k j ċpqb q^ eĉkpvk qfii oba^k kĉo mi^kiĘpkfk _Ęog^o q^ clo j + Mofk`fmbok^ ªkkp f ?^p_vddk^appvpqb Sfkpq7 Iĉdob _vddhlpqk^abo l`e _ĉqqob aofcqbhlkl j f+

?^p_vddk^abk cĘo _lpqĉabo+ Mobpbkqbo^p kr mċ pqo^kd

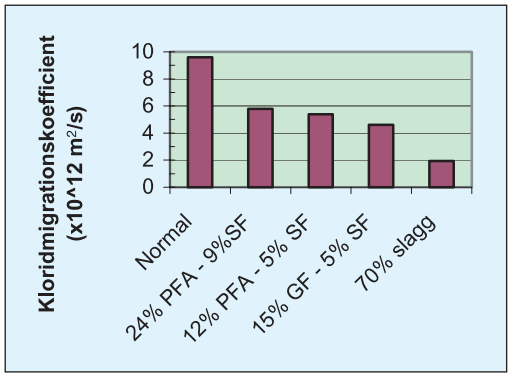


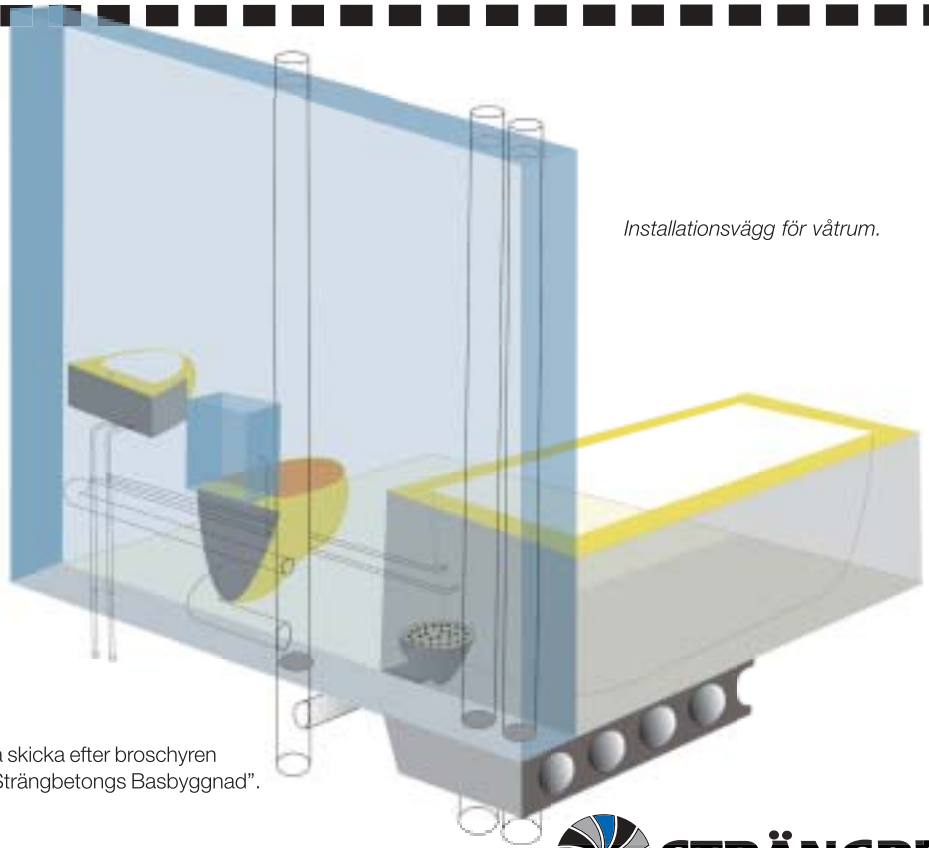
Fig 13. Kloridmigrationskoefficient hos normal betong och självkompakterande med olika kombinationer av flygaska, PFA, glasfiller, GF, silikastoft, SF, och slagg.

mängden silikastoft. Ökande mängd flygaska i betongen respektive ökande vbt gav större frostavskalning. Enligt andra resultat erhölls ett motsatt resultat d v s saltfrostavskalningen minskade med ökande vbt (Fig 9)[6]. Figur 9 tyder också på att frostavskalningen ökade med en ökande mängd silikastoft i betongen. Mest förödande för saltfrostbeständigheten var dock att använda slaggcement. En annan undersökning[5,6] gav samma resultat som d v s en ökande mängd slagg respektive en ökande mängd flygaska i betong minskade saltfrostbeständigheten (Fig 10). Enligt Figur 10 förbättrade silikastoft däremot saltfrostbeständigheten i betongen jämfört med vad som erhölls för en betong utan silikastoft, såväl i kombination med flygaska som med glasfiller. Här föreliggande studier av 13 år gammal betong tyder på att man med 10 % silikastoft i betongen kan åstadkomma acceptabel saltfrostavskalning vid vct < 0,55 även utan att luftporbildare används (< 0,5 kg/m³ avskalning efter 56 frostcykler). För betong utan silikastoft och utan luftporbildare krävs vct = 0,35 för att nå samma saltfrostbeständighet som för betong med 10 % silikastoft med vct = 0,55 (Fig 11)[1]. En ökad saltfrostbeständighet för betong med 10 % silikastoft jämfört med betong utan detta tillsatsmaterial kan ha sin förklaring i en minskad kloridinträngning i betongen.



Betongfundament till Öresundsbron med 5% silikastoft. På bilden från vänster: Per-Gunnar Burström, LTH, Fuminori Tomosawa, Tokyouniversitetet och Stefan Sandahl, Skanska.

hqfs^ob+
qfiisboh^ab
^qq
j qĉkhq pĉqq
dbk
j bq+



Installationsvägg för våtrum.

_bqlkd+pb Aĉ0 h^k a r l `hpå skicka efter broschyren ´M0 l¸bhqb0fkd cĘ0 Strängbetongs Basbyggnad”.

STRÄNGBETONG

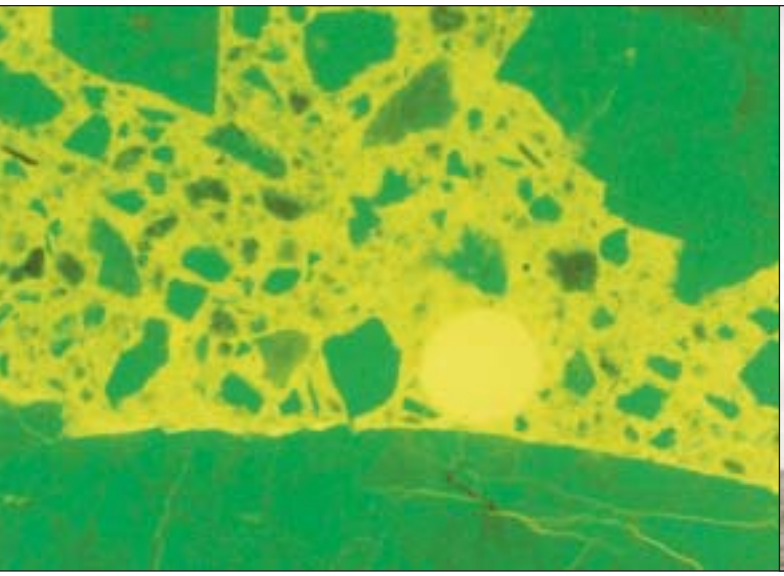
Pmb`f^ifpqbk mċ ^qq _vdd^ fk a r pqofbiiq

Kloridinträngning

Den första danska bron med silikastoft, Ryebron, utfördes för drygt 20 år sedan. Broytan ter sig idag lika skrovlig som vid gjuttillfället, trots trafikbelastning, frostcykler, salt etc. Betongen har vattenbindemedelstalet, vbt = 0,27, samt innehåller 15 % silikastoft beräknat på cementinnehållet. Ingen luftinblandning användes i Ryebron men å andra sidan fryser det inte så ofta och med så låg temperatur i Danmark som i Sverige. En lufthalt av 5 % är av nöden i Sverige i syfte att säkerställa en god frosttålighet hos betong utan silikastoft. Faröbron göts ungefär samtidigt som Ryebron men med flygaska som filler, ca 12 % av cementhalten. Vbt var dock mycket högre, 0,42. På Faröbron har man konstaterat stor kloridinträngning (Fig 12). Halten av klorider nära armeringen är nu nära nog kritisk, d v s katodskydd kan behöva sättas in redan efter 20 år (Fig 12)[9]. Inför Stora Bältbron provades ett stort antal brobetonger med vbt = 0,42 i Halskov nära brons ena landfäste. Kloridinträngningen blev så stor i försöksbetongerna att tiden fram till armeringskorrosion beräknades uppgå till 15 år[10]. Istället togs en synnerligen kloridbeständig betong snabbt fram, mest på teoretisk väg[10]. Betongen innehöll 6 % silikastoft och 12 % flygaska beräknat på cementinnehållet (Tab 1). Livslängden för Stora Bältbetongen har nyligen uppgraderats från 100 till ca 150 år, en stor ekonomisk vinst i sig. Täckskiktet för betong var 75 mm på Stora Bältbron mot 50 mm på Faröbron (30 mm på Ölandsbron). Till Öresundsbron användes också 75 mm täckskikt samt 5 % silikastoft i betongen. Livslängden har beräknats till 100 år. Gemensamt för dessa brobetonger är en lufthalt om ca 5 %, en annan förutsättning för mycket god frostbeständighet (ingen luftporbildare vid Ölandsbron). Fem procent silikastoft i betongen halverar i stort sett kloridinträngningen jämfört med betong utan silikastoft[8,11]. Ytterligare en halvering kan nås genom användning av slaggcement, ca 70 % slagg av bindemedlet (Fig 13)[8]. Slaggbetong kan dock inte användas i nordiskt klimat till följd av dess stora saltfrostavskalning eftersom draghållfastheten med slagg i betongen blir lägre än i betong med rent Portlandscement och/eller silikastoft.

Arbetbarhet

En springande punkt vid all betongtillverkning är arbetbarheten vid gjuttillfället, vilket oftast inträffar en timme efter blandning. Stora Bältbetongen visade sig vara svårare att gjuta än en normalbetong[12], vilket ledde till stora extrakostnader. Ursprungligen hade betongen planerats med kubisk Bornholmsgranit som dock byttes mot norskt grusåsmaterial med en helt annan partikelfördelning och sämre gjutbarhet som följd. Den olämpliga partikelfördelningen i den färska betongen ledde i sin tur till stora doseringar av flytmedel med en försenad bindetid för cementen som följd och därmed förseningar i gjutprocessen. Moderna flytmedel kräver dock betydligt mindre dosering och kan utformas så att man kan styra cementens bindetid på ett bättre sätt än vid tillverkningen av Stora Bältbetongen. Det går alldeles utmärkt att framställa betong med 10 % silikastoft och mycket god gjutbarhet, självkompakterande betong, SKB, (Tab 1) vct = 0,27[13]. Förutom silikastoft användes ett par typer av fin sand från Baskarp, typerna B6 och B7, för att skapa en s k ideal partikelfördelning i den färska betongen. Förutom mycket god gjutbarhet erhöll denna betong en extremt hög hållfasthet, 63 MPa efter två dygn och 171 MPa efter ett år. Betong med vct = 0,27 är troligen mindre känslig mot brandspjälkning eftersom den inte innehåller kalkstenfiller. Det är dessutom ekonomiskt och ekologiskt korrekt att använda fin sand som filler. Det är förvånande att svenska brotillverkare, som var med om att utveckla denna framtidsbetong 1998, ej använder betongen i praktiska sammanhang. Betongen borde vara



Normal betong utan silikastoft med hög porositet i cementlimmet. Korta sidan = 1.7 mm. (Foto: Hannu Pyy).



Till Stora Bältbron användes 6% silikastoft i betongen, bl a till ankrare och pyloner.

idealisk i prefabsammanhang till förtillverkade broelement med stor spännvidd i syfte att konkurrera med stålbroar som blir alltfler. Ytan på denna SKB saknade dessutom synlig ytporositet. Kryptalet var också litet, mindre än ett efter ett år.

Referenser

1 **Bertil Persson.** 13-årig studie av silikastoft i Portlandscementbetong. U03.02. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2003, 25 sid.

2 **Bertil Persson.** Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet TVBM-1009. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992, 400 sid.

3 **Bertil Persson.** Betong anpassat till ett effektivt byggande. Bygg & Teknik. 7/1996, 27–31.

4 **T. C. Powers & T. L. Brownyard.** Studies of Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste; Research Laboratories of the PCA, Vol. 43, ACI Journal, Detroit, 1947, sid. 984–987.

5 **Marianne Tange Jepsen.** Predicting Concrete Durability by Using Artificial Neural Network. Nordic Seminar on Durability of Exposed Concrete Containing Secondary Cementitious Materials. Hirtshals. Red.: Dirch Bager. 2001, 11 sid.

6 **Peter Utgennant, Per-Erik Petersson.** Frost Resistance of Concrete Containing Secondary Cementitious Materials – Experience from Three Field Exposure Sites. ibid. Red.: Dirch Bager, 2001, 17 sid.

7 **Bertil Persson.** Assessment of Chloride Migration Coefficient, Salt Frost Resistance, Internal Frost Resistance and Sulphate Resistance of Self-Compacting Concrete. TVBM-3100. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2001, 86 sid.

8 **Dimitrios Boubitsas, Katarina Paulou.** Self Compacting Concrete for Marine Environment. TVBM-5048. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2000. 55 sid.

9 **E Stoltzer, B Buhr, S Engelund.** The Faroe Bridges. Chloride Penetration Rate Estimated on a Basis of Measurements from 1988 to 1997. Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Barcelona. 2000.

10 **Ervin Poulsen.** Chlorider og 100 års levetid. Dansk Betondag 1990, 66 sid.

11 **Luping Tang, Lars-Olof Nilsson.** Modelling of chloride penetration into concrete – Tracing five years' field exposure. Concrete Science Engineering. Vol. 2. 2000, 170–175.

12 **Bertil Persson.** Bakgrund till val av betong vid Stora Bältförbindelsen. U91.02 LTH Byggnadsmaterial. 1990, 102 sid.

13 **Bertil Persson.** Deformationer hos husbyggnadsbetong – inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krypning och krympning. TVBM-3088 LTH. 1999, 71 pp.

14 **Ingvar Nilsson.** Sprickfri kringgjutning vid reparation av Ölandsbrons pelare. SBUF. 1995, 70 sid. ❑

Prefabutveckling
1 / 2

16 balkar i försök med högpresterande betong. Bygg & Teknik 1991/7. 1991. Stockholm, 38-42.

16 balkar i försök med högpresterande betong

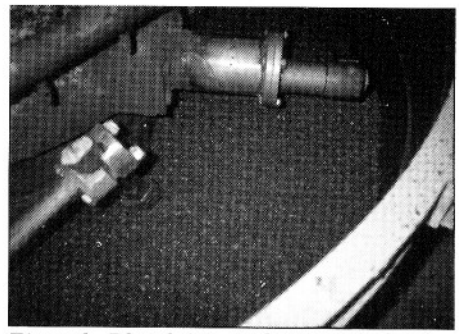
Bertil Persson, avdelningen för Byggmaterial, vid Lunds Tekniska Högskola redogör här för intressanta resultat av utförda försök med högpresterande betong.

I syfte att verifiera våra laboratorieresultat, inom projektet "Högpresterande betongs hydratation och hållfasthet", vid avdelningen för Byggnadsmaterial, BML, LTH, tillverkade Skanska Prefab år 1990 16 st balkar åt oss med tvärsnitt 100 x 200 mm samt längd fem meter. Balkarna provades sedan till brott i LTH:s laboratorium, vid 28 och 90 dygns ålder. Brottprovningen utfördes både med avseende på böjning och skjuvning. Resultaten visar bl a att:

- ❑ Nuvarande Bestämmelser för Betongkonstruktioner, BBK 79, i extrapolerad form, kan användas vid statisk konstruktion av högpresterande betong, K 110 – K 140, balktvärsnitt 100 x 200 mm.
- ❑ Industriellt tillverkad högpresterande betong har bättre gjutbarhet än betong tillverkad med motsvarande recept i laboratorium.
- ❑ Högpresterande betong har sämre hållfasthetsutveckling på lång sikt jämfört med vanlig betong.



Artikelförfattare är Bertil Persson, Byggmaterial, Tekniska Högskolan i Lund.



Figur 1. Blandning av betong med vct = 0,24.

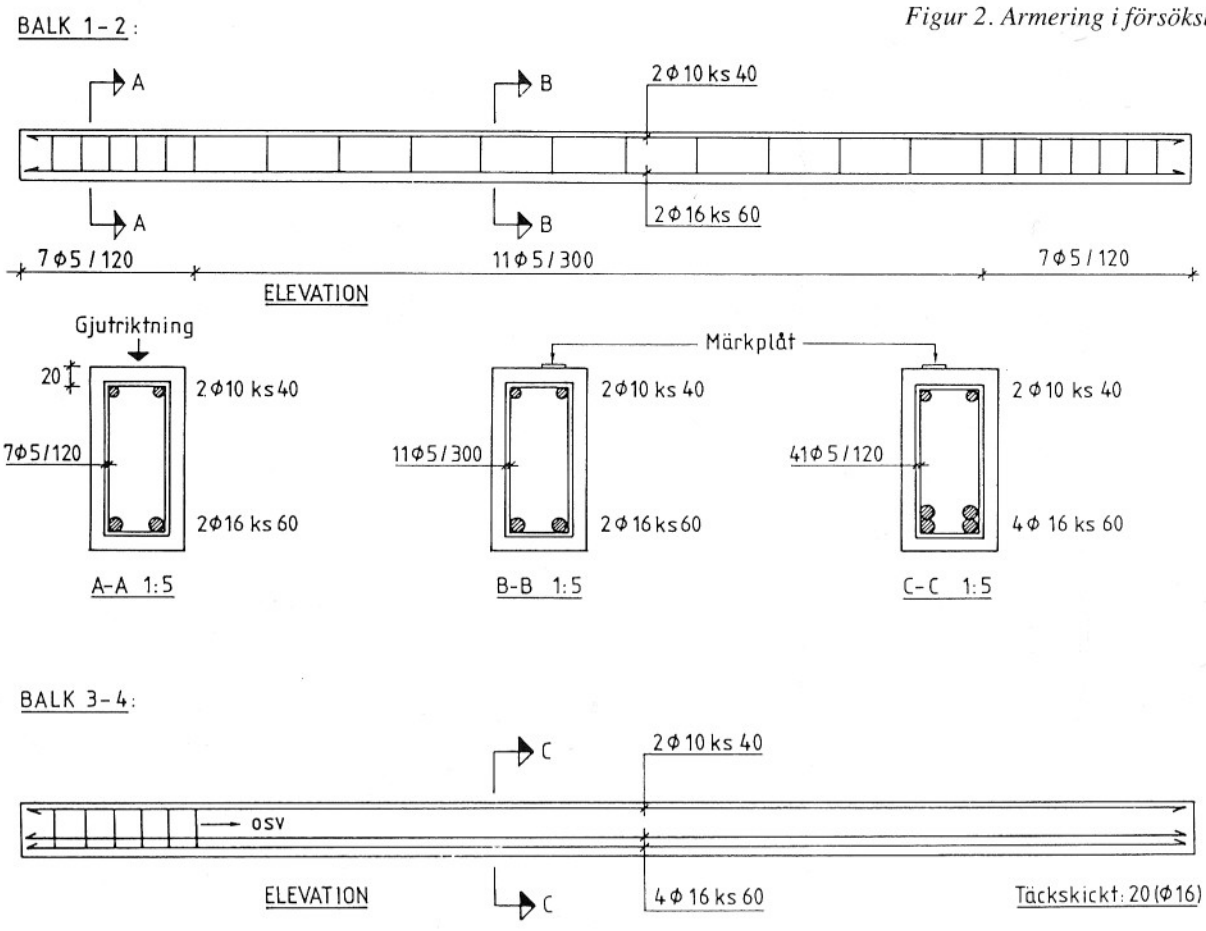
- ❑ Uttorkningen tar längre tid för vanlig betong jämfört med högpresterande.

Förblandningar

Inför den industriella tillverkningen genomförde vi betongoptimeringar vid BML omfattande ca 50 st blandningar. Optime-

Vattencementtal	0.24	0.28	0.31	0.57	Anmärkning
Makadam, 8–12	1310	1260	1210	1150	Kvartsit,Hardeberga
Sand, 0–4	550	610	670	810	Hassle-Bösarp
Anläggningscement	480	450	420	300	Degerhamn
Silika	48	45	42	–	Micropoz
Naftalen	28	17	11	–	SP 62, Cementa
Vatten, totalt	116	121	129	171	Inkl. **all** fukt
$f_{1,28\ dygn}$	139	124	116	56	Standardkub
$f_{1,90\ dygn}$	143	136	134	65	– ,, –

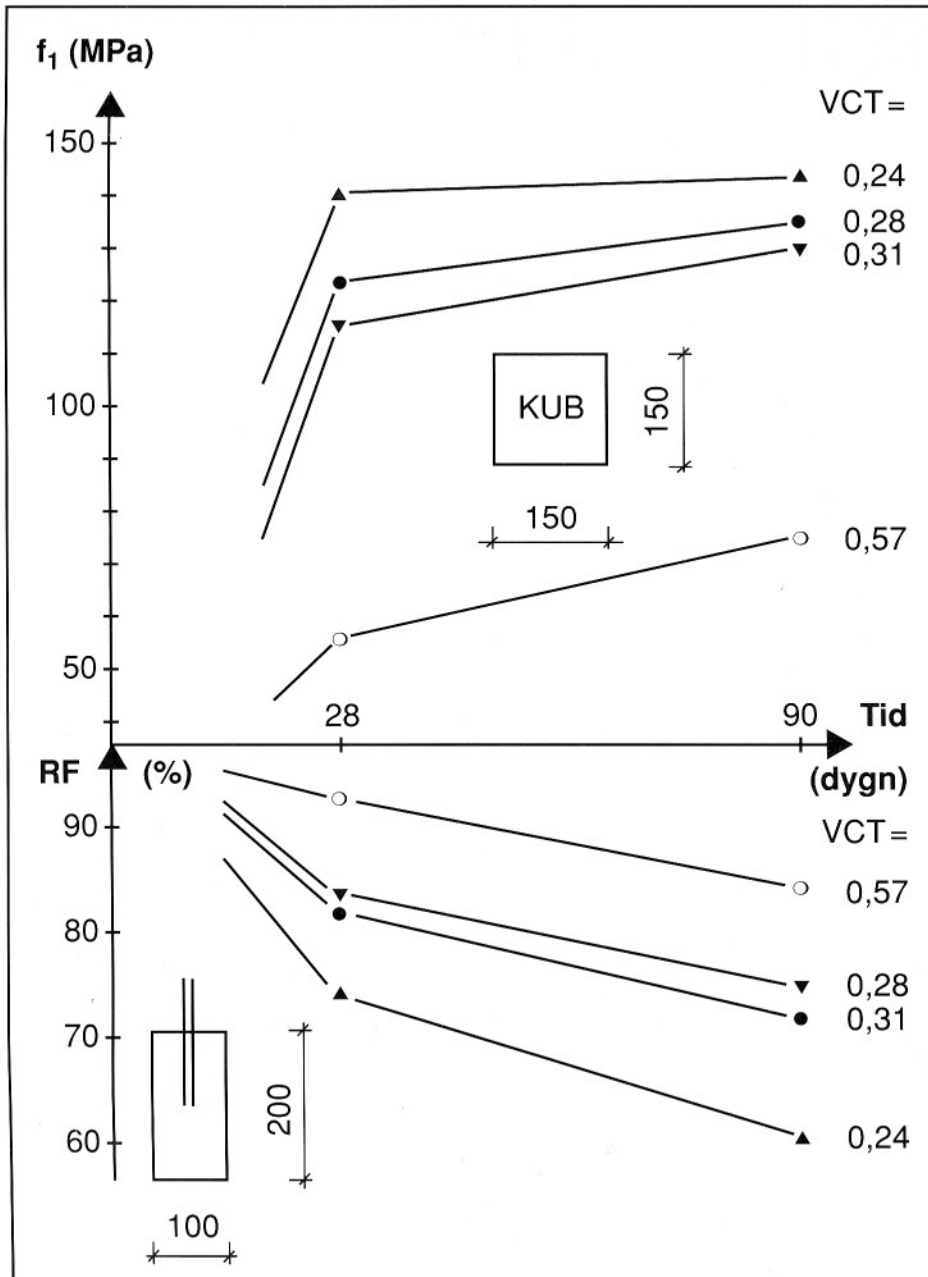
Tabell 1.



Figur 2. Armering i försöksbalkar.



Figur 3. Provbalkar upplagda i LTH:s laboratorium.



Figur 4. Tidsutveckling av tryckhållfasthet, f_1, (MPa) och relativ fuktighet, RF(%) i 16 st balkar, 100 x 200 mm. Avser standardkub respektive mätning i ingjutna mätrör. Vattencementtal, vct, anges till höger i figuren. ILL: STIG DAHLIN

ringarna utfördes med hänsyn till ballasttyp, kornkurva för ballast samt mängd tillsatsmedel. De styrande parametrarna var därvid hög hållfasthet samt god gjutbarhet. Jag följde vid optimeringarna resultat enligt B Persson (1990) nämligen krav på:

- ❒ Partikelsprång
- ❒ Silikatillsats
- ❒ Förlängd blandningstid
- ❒ Efterbehandling i hög relativ fuktighet

För att erhålla en tryckhållfasthet om minst 120 MPa vid 28 dygns betongålder visade det sig nödvändigt att byta grov ballast från amfibolit + gnejs till kvartsitisk sandsten. Den fina ballasten utgjordes av sand från Hassle-Bösarp. Bindmedlet utgjordes av Degerhamn Anläggningscement samt silikastoft Micropoz.

Superplasticeraren var av typ naftalen (SP 62, 42 %). Receptval (kg/m^3) samt tryckhållfasthet (MPa) framgår av *tabell 1* här intill:

Tillverkning

Balkarna tillverkades med ordinarie personal och utrustning vid fabriken. Betongtemperaturen uppgick till ca 30 °C före gjutning.

Tillverkningen såg schematiskt ut enligt följande:

- ❍ Blandning med allt material utom SP 62 i en minut,
- ❍ Blandning med SP 62 i tre minuter, *se figur 1*.
- ❍ Gjutning i stålform med vibratorer, se B Persson (1990),
- ❍ Vibrering i fyra till fem minuter.

Betongen hade bättre "flyt" vid den industriella tillverkningen jämfört med betongen vid förblandningarna. Ett problem vid tillverkningen var bestämning av fuktkvot i ballast, eftersom fuktgivare saknades i fabrikens silor. Kontroll av fuktkvot utfördes därför i efterhand varpå vct justerades.

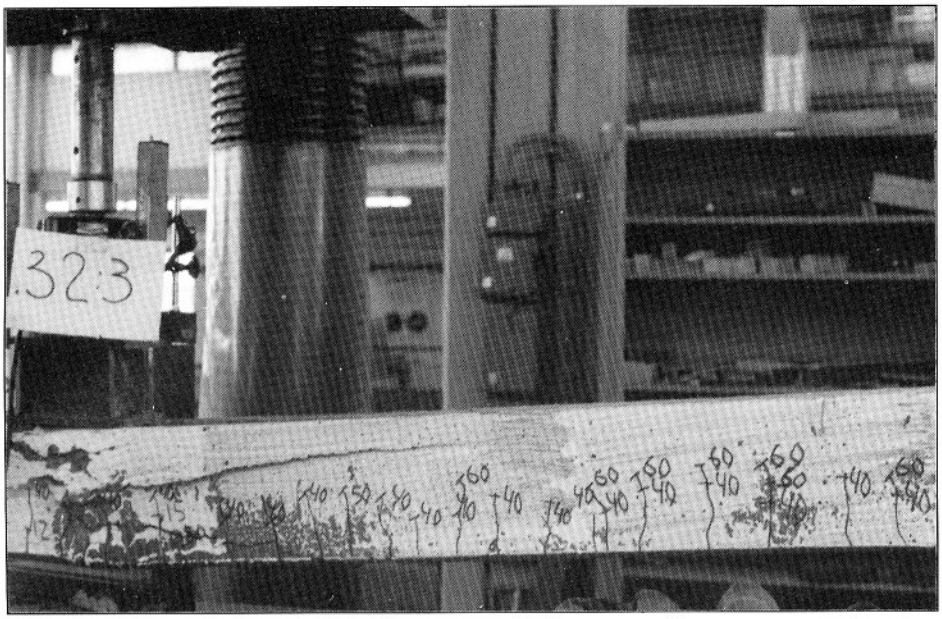
Balkarmering framgår av *figur 2*.

Av *figur 2* framgår att BBK 79 ej är uppfyllda vad gäller krav på täckskikt och inbördes avstånd för armeringsstänger.

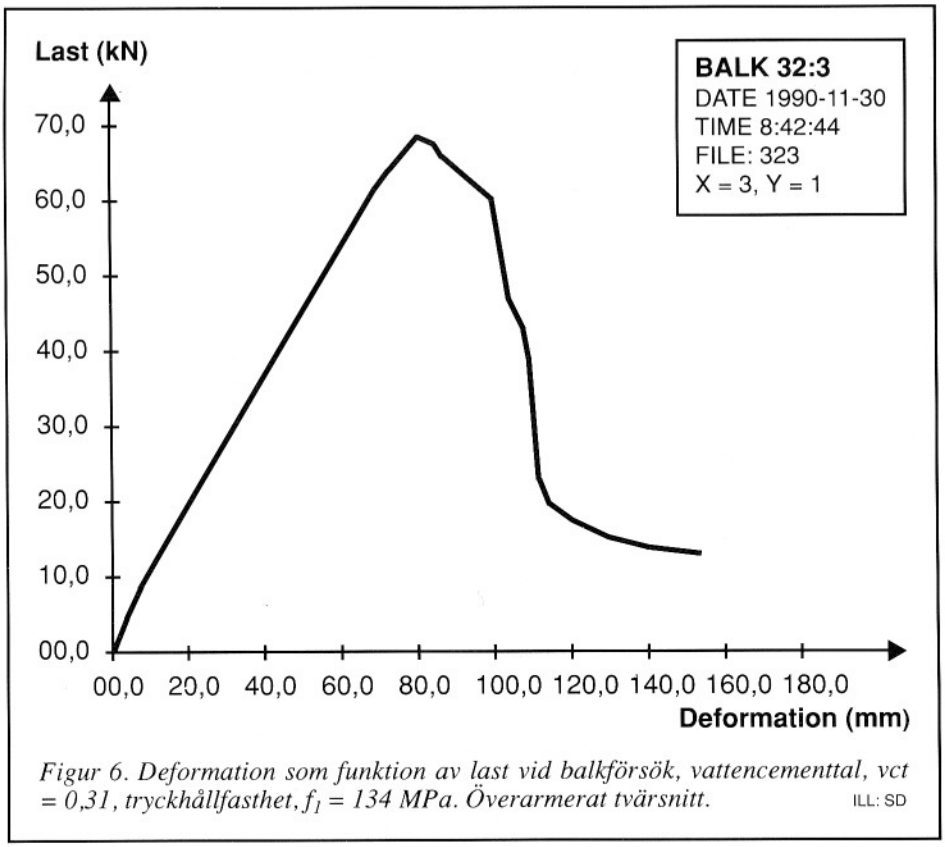
Härdning

Balkarna inpackades i plastfolie omedelbart efter gjutning. De avformades ca 16 timmar efter gjutning och förvarades sedan utomhus ca en vecka. Återstående tid fram till provning lagrades balkarna i BML:s laboratorium, *se figur 3*.

Tidsutveckling av tryckhållfasthet, f_1, (MPa) och relativ fuktighet, RF (%), i balkarna framgår av *figur 4*. Det tar som, framgår av figur 4, mer än en månad att torka ut en balk av tvärsnitt 100 x 200 mm i vanlig betong till RF = 90 %. Uttorkningen av en balk av motsvarande dimension sker, vid högpresterande betong, på mindre än 14 dagar. Å andra sidan avstannar hållfasthetsutvecklingen vid betong med vct = 0,24 redan vid en betongålder av ca 28 dygn på grund av fuktbrist (RF ≈ 73 %). På lång sikt har man således med högpresterande betong en sämre hållfasthetsutveckling än med vanlig betong.



Figur 5. Böjprovning av balk i högpresterande betong med vattencementtal, vct = 0,31, tryckhållfasthet, f_1 = 134 MPa. Överarmerat tvärsnitt.



Figur 6. Deformation som funktion av last vid balkförsök, vattencementtal, vct = 0,31, tryckhållfasthet, f_1 = 134 MPa. Överarmerat tvärsnitt. ILL: SD

Provning

Samtliga balkar provades med avseende på momentkapaciteten med punktlast på halva spännvidden varefter balkfragmenten utnyttjades för bestämning av tvärkraftskapacitet. Vid bestämning av tvärkraftskapacitet, placerades tvärkraften dels på ett avstånd av ca dubbla effektiva höjden från stöd, dels på avståndet tre gånger effektiva höjden från stöd. Exempel på böjprovning framgår av *figur 5*.

Vid provningen noterades last och deformation, se exempel i *figur 6*.

Figur 7 på nästa sida visar skjuvsprickor vid balkprovning, vct = 0,24.

Samtidigt med provning av balkar bestämdes även tryckhållfastheten på standardkuber. Värden på tryckhållfasthet framgår av *tabell 1*. Efter provning kapades vardera balk i tre snitt för inmätning av betongtvärsnitt samt all böjarmering. Skjuvarmeringens läge hade kontrollerats före gjutning. Armeringen dragprovades.

Utvärdering

Eftersom inmätning uppvisade förhållandevis stora variationer i armeringsläge och betongtvärsnitt, beräknades moment- och tvärkraftskapacitet enligt BBK 79 för samtliga provade snitt.

Därvid användes 0,27 % som brottstukningsvärde för högpresterande betong enligt "Förslag till finsk betongnorm, 1990" och 0,35 % för vanlig. Karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{cck} sattes till $f_{cck} = f_1/1{,}41$, dvs en direkt extrapolering av BBK 79. Som karaktäristisk draghållfasthet, f_{ctk}, användes $f_{ctk} = f_1^{0{,}667}/6$ (MPa).

Även denna relation utgör en extrapolering av BBK 79, om man betraktar området under K50. Våra laboratorieresultat från BML, som omfattar ca 800 st trycke- eller spräckprovade cylindrar, uppvisar ett lineärt samband mellan tryck- och spräckhållfasthet hos högpresterande betong, *se figur 8*.

Enligt FIP/CEB "State of the Art, 1990" kan draghållfastheten sättas till $^2/_3$ av spräckhållfastheten varav antagandet ovan.

Som framgår av *figur 8* ligger kurvan $f_{ctk}=f_1^{0{,}667}/4$ (MPa) väl under de erhållna provresultaten dvs på "säkra" sidan. Detta är dock välmotiverat med hänsyn till den

VÄRSTING

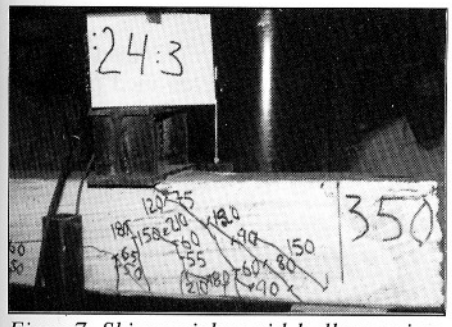
Jag gör det ingen annan kan! Rent och snyggt, högt och snabbt, 56 meter upp! Fasadtvätt med miljövänliga medel.

Tom Edling Mobilkranar

Alviksvägen 124
161 38 BROMMA
Telefon 08-80 43 45
Mobiltelefon 010-78 64 84
Personsök. 0042-779 12

KUNGS
GALLERSPECIALISTEN
– Det är vi som gör galler som kunden vill ha dom!
Ring 08-530400
Kungsprofiler AB, Box 70317, 107 23 Stockholm. Telefon 08-53 04 00

SMG
När du behöver
Stensågar
Betongsågar
Kakelsågar
EPOX Maskin AB Sollentuna
EPOX
Tel. 08-754 71 60



Figur 7. Skjuvsprickor vid balkprovning, vct = 0,24. Jan-Erik Paulsson, Skanska Prefab, observatör.

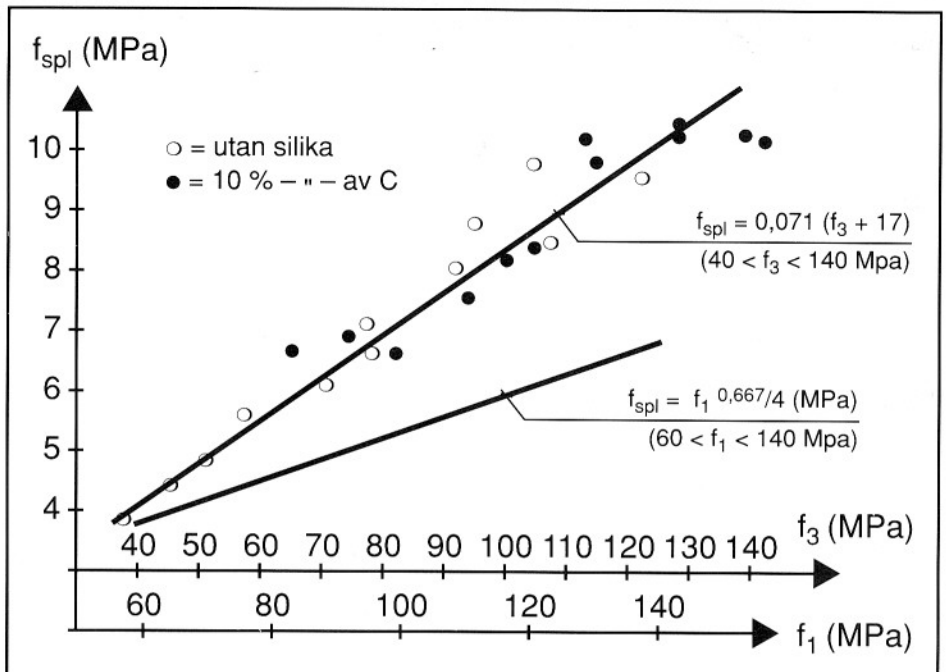
svaga tendens som finns till minskning av spräckhållfastheten hos silikabetong med vct = 0,24, se B Persson (1991).

Resultat

Figur 9 visar kvot mellan erhållen och enligt BBK beräknad momentkapacitet (övre delen) respektive kvot mellan erhållen och beräknad tvärkraftskapacitet (nedre delen).

Kvoten i *figur 9* mellan erhållen och beräknad kapacitet uppvisar, vad gäller böjning, en svag ökning med tryckhållfastheten, från ca 1,02 för vanlig betong till ca 1,05 för högpresterande.

Motsvarande värden på kvoten ligger på mellan 1,4 och 1,6 vid skjuvning. Vid punktlast placerad nära stöd var balkarnas dragarmering i många fall otillräcklig. Provningarna gav i stället böjbrott. Kvot mellan erhållen och enligt BBK beräknad momentkapacitet vid last nära stöd har redovisats i *figur 10*.



Figur 8. Spräckhållfasthet, f_{spl}, som funktion av tryckhållfasthet, f_3. Resultat av ca 800 st cylinderprov vid BML. I figuren markeras även kubhållfastheten, f_1, baserat på jämförande prov med ca 70 st kuber. ILL: SD

Även *figur 10* visar med tryckhållfastheten ökande värden på kvoten mellan erhållen och enligt BBK beräknad momentkapacitet. ■

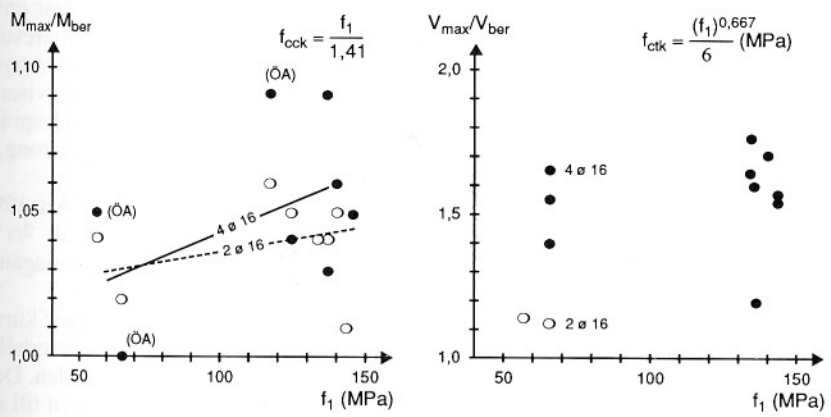
Referenser

1990. *B Persson.* Högpresterande betong – en match för management. Tidskriften Byggforskning nr 6.

1990. *B Persson.* Höghållfast betong – självuttorkning och hållfasthet. Bygg & teknik nr 7.

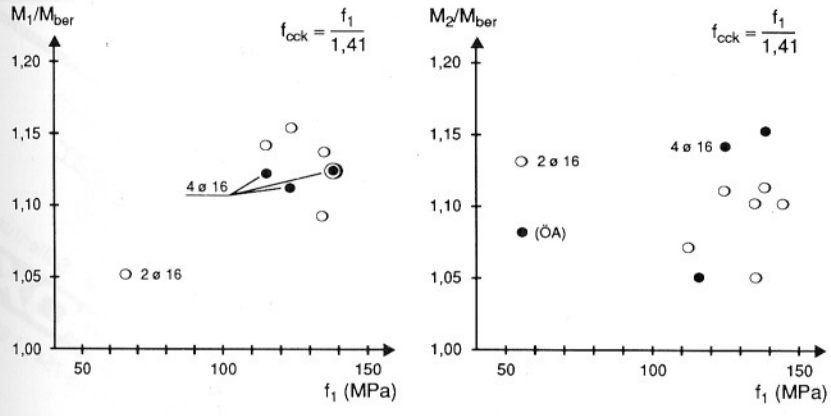
Prel. 1991. *B Persson.* Högpresterande betongs hydratation och hållfasthet. Rapport TVBM-1009. BML, LTH, Lund.

Väl mött på NORDBYGG 92



Figur 9. Kvot mellan erhållen och enligt BBK beräknad momentkapacitet (övre delen) respektive tvärkraftskapacitet (nedre delen). Beteckningar:

M_{max}	*Erhållen momentkap*
M_{ber}	*Beräknad momentkap*
V_{max}	*Erhållen tvärkraftskap*
V_{ber}	*Beräknad tvärkraftskap*
f_{cck}	*Karaktäristisk tryckhållfasthet.*
f_{ctk}	*Karaktäristisk draghållfasthet.*
f_1	*Tryckhållfasthet*
ÖA	*Överarmerat tvärsnitt*
○	*2 ø 16*
●	*4 ø 16*



Figur 10. Kvot mellan erhållen och enligt BBK beräknad momentkapacitet vid last nära stöd.

M_i	*Erhållen momentkap*
i=1	*Stödavstånd 350 – 400 mm*
i=2	*Stödavstånd 500 – 600 mm*
M_{ber}	*Beräknad momentkap*
f_{cck}	*Karaktäristisk tryckhållfasthet.*
f_1	*Tryckhållfasthet*
ÖA	*Överarmerat tvärsnitt*
○	*2 ø 16*
●	*4 ø 16*

Alkalibeständigt lim, avjämningsmassa och homogen plastmatta bästa kombinationen på betonggolv. Betong 2/2004, 60-62.



Text: Bertil Persson
LTH Byggnadsmaterial

Alkalibeständigt lim, avjämningsmassa och homogen plastmatta bästa kombinationen på betonggolv

Använd aldrig någonsin standard akrylatlim vid limning av en ytbeläggning direkt till betonggolv utan i stället alkalibeständigt lim. Med standardlim är risken för dålig lukt stor. Den låga merkostnaden för ett alkalibeständigt lim är en god investering eftersom risken för dålig lukt då minimeras. Bästa kombinationen är ett alkalibeständigt lim med homogen plastmatta om limning skall ske direkt till betongen men använd helst också lågalkalisk avjämningsmassa. Då kan en relativ fuktighet, RF, i betongplattan om 87 procent accepteras dvs. två procent mer än vad som föreskrivs idag. Detta visar resultat av nya försök genomförda vid LTH Byggnadsmaterial med docent Bertil Persson som projektledare.

Projektets mål var att med modern materialteknik söka eliminera olägenheter för inneluftens kvalitet beroende på reaktionsprodukter från golvsystemet. Vidare var målet att klarlägga om nya golvmaterial såsom gummi och polyolefin gav samma fuktfördelning som i ett betonggolv med PVC-ytbeläggning.

Slutligen undersöktes också om limförbandet i nya golvmaterial kunde ta upp mekaniska påkänningar lika bra som golv med en PVC-ytbeläggning.

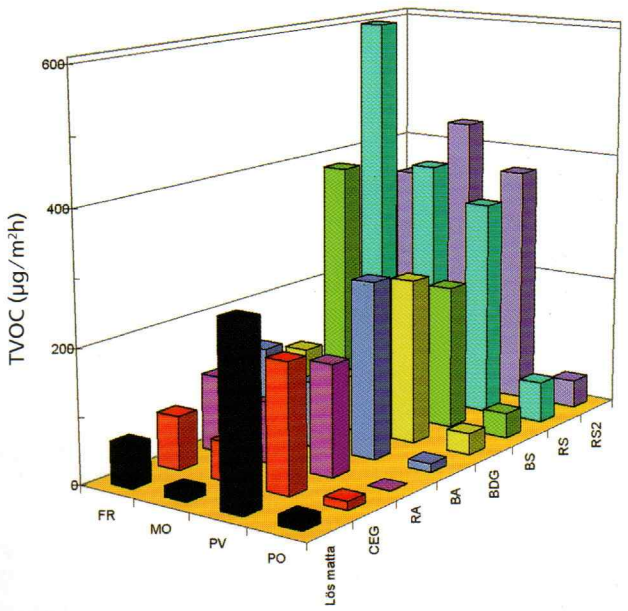
Projektet genomfördes parallellt med uppförandet av ett servicehus, Kv. Stella, Svedala. Ett 80-tal golvprover i full tjocklek lagrades utomhus ca ett halvår före det att avjämning och ytbeläggning limmades till underlaget. Vissa av proverna härdades dock direkt inomhus en månad efter gjutning (relativ fuktighet, RF = 60%) och före det att ytbeläggning utfördes. Golvproverna göts på plattbärlag, vilka i sin tur tillverkades parallellt med de betonggolv som nyttjades på arbetsplatsen. Läggning av lågalkalisk avjämningsmassa utfördes i LTH:s laboratorium. Den lågalkaliska avjämningsmassan (10mm) fick torka i RF = 60% under tio dygn. Efter 10 dygns torkning i RF = 60% utfördes en lätt avslipning av den lågalkaliska avjämningsmassan. Proverna limmades med endera 0.25 kg/m² (linoleum, polyolefin och PVC) eller 0.33 kg/m² lim (gummi) följt av 5 minuters öppethållandetid, *Tabell 1*.

Fuktmätning genomfördes, dels på platsen, dels på LTH, såväl före som efter mätningar av emissioner genomförda vid Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP. I bägge fallen användes kapacitiva fuktgivare (Vaisala HMP44). Efter emissionsmätningarna ett halvår efter limning av ytbeläggningen mättes mattornas fläkningskraft och vidhäftningspåkänning på LTH. I samband med detta mättes även provernas fuktinnehåll, RF.

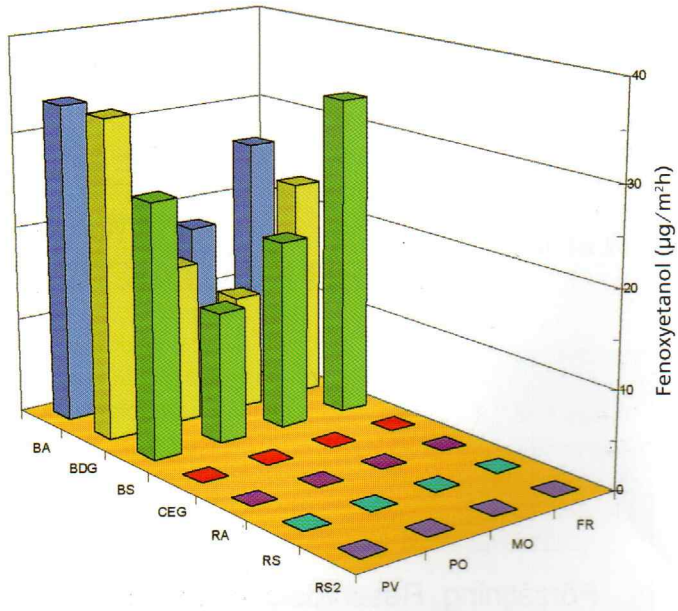
Slutligen utfördes en noggrann analys av fläkning- och vidhäftningsbrottens karaktär.

Redovisning av resultatet

Inga nämnvärda emissioner uppmättes av 1-butanol vilket är glädjande eftersom detta ämne har ett arbetsmiljömässigt betingat gränsvärde i utrymmen där människor vistas. Däremot uppmättes emissioner av 2-etyl-



Figur 1 - TVOC från golvsystem på betong (µg/m²h). A, D, E, G och S = limtyper, B och C = avjämningsmassor, FR och MO = gummiytbeläggning, PV = PVC-ytbeläggning, PO = polyeolefinytbeläggning, R = rå betong, TVOC = "total volatile organic compound", 2 = limning av ytbeläggning efter 1 mån.



Figur 2 - Emission av 2-fenoxyetanol från golvsystem på betong (µg/m²h). A, D, E, G och S = limtyper, B och C = avjämningsmassor, FR och MO = gummiytbeläggning, PV = PVC-ytbeläggning, PO = polyeolefinytbeläggning, R = rå betong, TVOC = total volatile organic compound, 2= limning av ytbeläggning efter 1 mån.

Tabell 1 - Limtyper vid varierande vct och härdningssätt för provkroppar.

Vct	Avjämningsmassa (inomhus 1 mån.)	Avjämningsmassa (utomhus 6 mån. + inomhus 1 mån.)	Rå betong (inomhus 1 mån.)	Rå betong (utomhus 6 mån. + inomhus 1 mån.)
0.35	Alkalibeständigt, Standard polyakrylat			
0.37		Alkalibeständigt, Standard polyakrylat	Standard polyakrylat	Alkalibeständigt, Standard polyakrylat
0.48		Alkalibeständigt, Standard polyakrylat	Standard polyakrylat	Alkalibeständigt, Standard polyakrylat
0.75		Alkalibeständigt, Standard polyakrylat	Standard polyakrylat	Alkalibeständigt, Standard polyakrylat

hexanol, ett ämne som ger elak lukt även i små koncentrationer och därför inte kan accepteras i lokaler där människor vistas. Emissioner av 2-etylhexanol begränsades dock till det fall då standard polyakrylatlim användes i kombination med gummiytbeläggning. Emissioner av 2-etylhexanol eliminerades genom att utesluta endera av dessa delar i golvsystemet, företrädesvis standardlimmet eftersom det i vissa fall var önskvärt att använda gummiytbeläggning.

Resultat från projektet visar också att tillskottsemissioner (emissioner utöver delmaterialens egenemissioner) kan undvikas med lämpliga kombinationer av golvmaterial. Inom projektet har en konstant uttorkningstid av ytan valts, en månad i relativ fuktighet, RF= 60%. För lågalkalisk avjämningsmassa valdes 10 dygns uttorkningstid för skikttjockleken 10 mm. Minskas dessa tider får i stället andra åtgärder vidtas:

1. I första hand bör en ytbeläggning med låga egenemissioner väljas, *Figur 1*. Exempelvis accepteras i allmänhet endast en total emissionsnivå, TVOC < 300 µg/m²h, för nya golv i byggnader inom sjukvården i Region Syd.

2. En ytbeläggning med lägre egenemissioner ger även lägre tillskottsemissioner från golvsystemet än vad en så kallad högemitterande ytbeläggning ger, *Figur 2*.

3. En annan synnerligen effektiv åtgärd är att förse betongytan med en lågalkalisk avjämningsmassa, *Figur 3*. På så sätt bryts inverkan av betongens höga alkalitet på lim och ytbeläggning.

4. Om man trots allt önskar limma en ytbeläggning direkt till betongen kan detta från emissionssynpunkt endast ske med vissa typer av ytbeläggningar, linoleum, homogen PVC-ytbeläggning och polyolefinytbeläggning, *Figur 4*.

5. Direktlimning till betong bör under alla omständigheter utföras med ett alkalibeständigt lim, se ovanstående resultat beträffande emissioner av 2-etylhexanol.

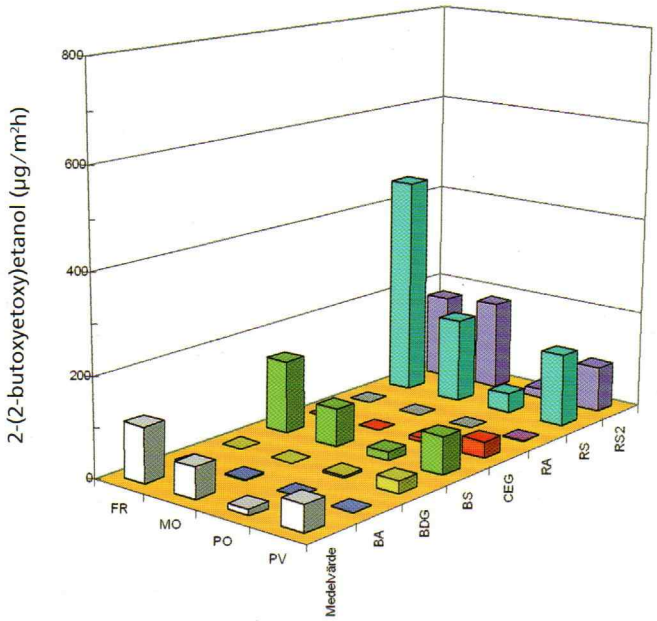
6. Det är dock troligen inte praktiskt möjligt att ha olika limsorter på samma arbetsplats varför ett alkalibeständigt lim generellt bör väljas.

7. Ytterligare en åtgärd är att använda ett alkalibeständigt lim även då lågalkalisk avjämningsmassa av snabbtorkande typ används med en uttorkningstid på mindre än 1 dygn/mm.

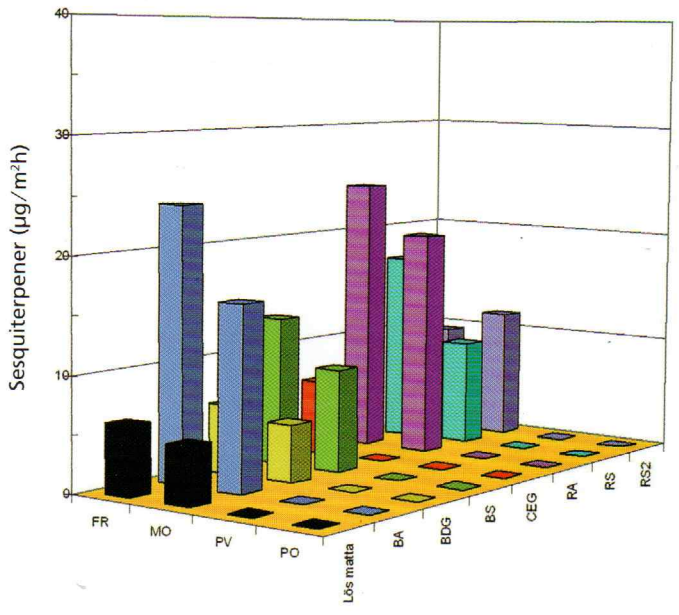
I projektet redovisas även effekten av ytbeläggning på betongens fuktprofil:

1. Polyolefinmattor och gummimattor har större täthet än en PVC-ytbeläggning med fyllnadsmedel.

2. RF efter ett halvår blev därför ca 3 procent högre i ett golvsystem med polyolefinytbeläggning eller gummimattor än RF i golv med PVC-ytbeläggning med fyllnadsmedel.



Figur 3 - Emission av 2-(2-butoxyetoxy)etanol från golvsystem på betong (µg/m²h). A, D, E, G och S = limtyper, B och C = avjämningsmassor, FR och MO = gummiytbeläggning, PV = PVC-ytbeläggning, PO = polyeolefinytbeläggning, R = rå betong, TVOC = total volatile organic compound, 2= limning av ytbeläggning efter 1 mån.



Figur 4 - Emission av sesquiterpener från golvsystem på betong (µg/m²h). A, D, E, G och S = limtyper, B och C = avjämningsmassor, FR och MO = gummiytbeläggning, PV = PVC-ytbeläggning, PO = polyeolefinytbeläggning, R = rå betong, TVOC = total volatile organic compound, 2= limning av ytbeläggning efter 1 mån.

Tabell 2 - Korrekt kombination av material på betonggolv

Underlag/ytbeläggning	Normaltorkande lågalkalisk avjämningsmassa (torktid: 1 dygn/mm)	Snabbtorkande lågalkalisk avjämningsmassa, 10 mm (torktid: < 1 dygn/mm)	Rå betongyta
Gummi	Alkalibeständigt lim	Alkalibeständigt lim	Rekommenderas absolut ej!
Homogen PVC	Standard polyakrylatlim	Standard polyakrylatlim	Alkalibeständigt lim
Linoleum	Standard polyakrylatlim	Standard polyakrylatlim	Alkalibeständigt lim
Polyolefin (ej vid fläkningskraft > 1 N/mm)	Standard polyakrylatlim	Standard polyakrylatlim	Alkalibeständigt lim
PVC med fyllnadsmedel	Standard polyakrylatlim	Alkalibeständigt lim	Rekommenderas absolut ej!

Inverkan av härdningsförhållanden

Härdningsförhållanden påverkar även emissioner från golvsystem. I försöket härdades betongerna endera enbart inomhus eller vattenlagrade ett halvår före det att golvmaterialet limmades till ytan. Under ett halvår utomhus utsattes nämligen proverna för regn som lakade ur aggressiva alkalier från ytan på betongen. Vid högre RF bryter annars aggressiva alkalier, med ett högt pH-värde, ned ett standard polyakrylatlim. Detta leder till en minskad vidhäftning mellan underlag och ytbeläggning. Såväl vidhäftningshållfastheten som fläkningskraften blev avsevärt mindre för prover som härdades direkt inomhus utan föregående urlakning av alkalier än för de prover som utsattes för regn under ett halvår.

För ung betong minskade såväl vidhäftningshållfastheten som fläkningskraften vid RF = 90 %, till mindre än hälften av värdet vid RF = 80 %. I fuktig miljö, RF = 90 %, angrep alkalierna standard polyakrylatlimmet vilket inte skedde för en torrare betong med RF = 80 %. För betong som härdats utomhus skedde ingen minskning av vidhäftningshållfastheten och fläkningskraften vid RF = 90 %. Effekten på PVC-ytbeläggning var dock liten troligen till följd av att mjukgörare migrerade från ytbeläggning in i limmet, vilket satte ned limmets hållfasthet även vid låg RF. Denna effekt är dock inte undersökt inom projektet. Karbonatiseringen var lika stor för betong som hade härdats utomhus ett halvår, som för betong som hade härdats i klimatrum inomhus en månad. Karbonatiseringen har därför inte påverkat resultatet.

Rekommendationer

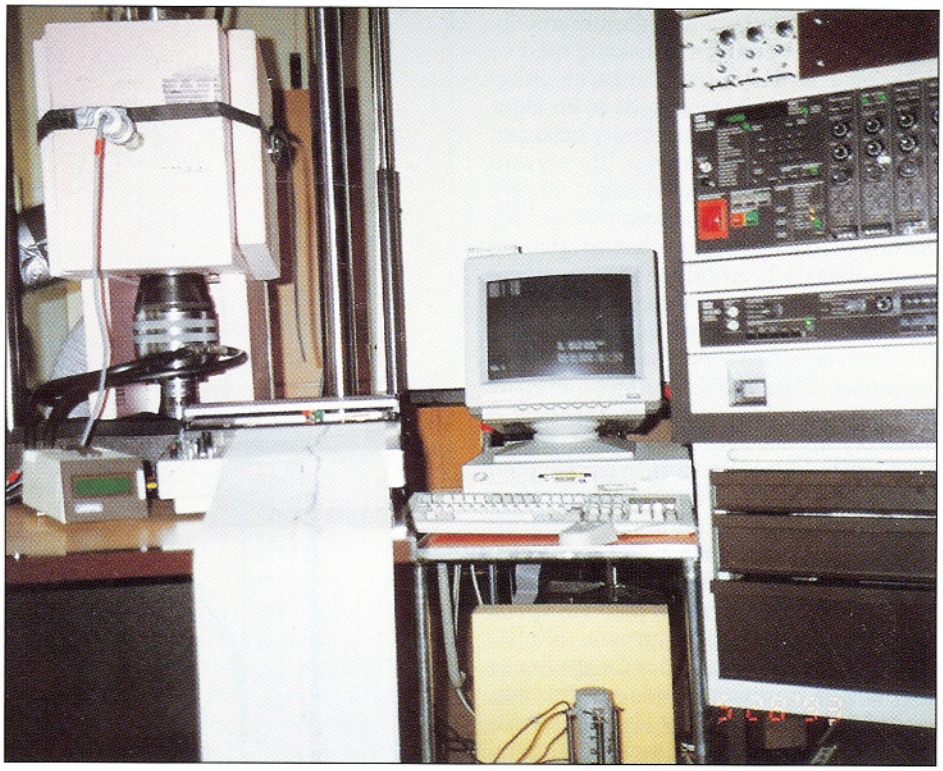
Rekommendationerna delas upp i två avsnitt, dels en högsta RF-nivå vid ytbeläggning, dels en korrekt materialkombination, *Tabell 2*: **1.** RF = 90 procent enligt ByggAMA Hus bör bibehålles som en högsta RF-gräns på ekvivalent mätdjup för linoleum och PVC-ytbeläggning med fyllnadsmedel.

2. RF = 87 procent bör kunna användas som en ny högsta RF-gräns vid användning av gummiytbeläggning, homogen PVC-ytbeläggning och polyolefinytbeläggning i stället för RF = 85 procent som föreskriv idag.



Autogen krympning hos högpresterande betong. Betong 94_2. Stockholm, 17-20, 29.

MTSmaskin med klimatutrustning för studium av tidig sorptionskrypning.



En del av betongens krympning beror på den självtorkning som äger rum vid härdning och kemisk bindning av vatten. Då mängden blandningsvatten är liten, som för högpresterande betong, får denna del en relativt sett större betydelse än för ordinär betong. Delen kallas autogen krympning.

Av Bertil Persson,
LTH Byggnadsmaterial, Lund

Autogen krympning hos högpresterande betong

Bakgrund

Högpresterande betong används sedan ett tiotal år bl a till oljeplattformar i Norge och till höghusstommar i USA. Betongen har i dessa fall, med sin höga specifika hållfasthet (hög påkänning per egentyngd), kunnat hävda sig i konkurrensen med stål. Andra användningsområden som framkommit är vägar och broar t ex vid Falkenberg resp i Stora Bältförbindelsen. Det är den högpresterande betongens goda beständighet som här motiverat de högre investeringskostnaderna jämfört med användning av normal betong. Den högpresterande betongens självtorkande egenskaper har slutligen utnyttjats till s k självtorkande golv för att åstadkomma ett effektivt och fuktsäkert byggande [1].

Med den högpresterande betongens självtorkning erhålls inte enbart fördelar. Självtorkningen förorsakar en s k autogen krympning (självtorkningskrympning). Den autogena krympningen kan försummas för normal betong. För högpresterande betong innebär den autogena krympningen att betongen erhåller en icke försumbar formförändring även under förslutna (membranisolerade) härdningsförhållanden. För en normal betong fordras en yttre uttorkning (viktminskning) för att betongen skall krympa märkbart.

Studier av långtidsdeformationer

Konsortiet HÖGPRESTERANDE BETONG (BFR, Elkem, Euroc Beton, NCC Bygg, Skanska och Strängbetong) har finansiellt gjort det möjligt att genomföra ett doktorandarbete om materialets långtidsdeformationer. Projektet startade år 1992 och beräknas vara avslutat år 1995. I projektet ingår bland annat studier av krympning och krypning samt studier av hydratationsutveckling, fuktförhållanden och hållfasthetsegenskaper hos betongen. Såväl grundkrypning som sorptionskrypning (uttorknings-) studeras. Krypförsöken genomförs i en MTS-maskin med pålastningstider på någon hundradels sekund Detta har gjort det möjligt att särskilja den plastiska deformationen hos betongen från den elastiska. Långtidskrypningen studeras i traditionella fjäderriggar under minst ett år. Resultat från arbetet presenteras i interna rapporter. Denna artikel bygger således på redan publicerade rapporter, [2], [3], [4].

Med autogen krympning menas deformationer hos obelastad, hårdnad betong under membranisolerade förhållanden. Den plastiska krympningen hos betongen, d v s formförändringar hos färsk betong, studeras i ett annat projekt inom konsortiet (CTH Byggnadsmaterial).

Resultat från andras forskning

I det så kallade LCPC-försöket (Laboratorie Central des Ponts et Chaussées), [5], studerades långtidsdeformationer hos 8 betonger. Vattencementtalet, vct, hos betongerna varierande mellan 0,27 och 0,62 med en tryckhållfasthet varierande mellan 101 och 46 MPa resp. Krympningen hos betongerna studerades för 1 m långa cylindrar med diametern 0,16 m. Cylindrarna membranisolerades med självhäftande aluminiumfolie. Krympmätningarna på betongcylindrarna påbörjades först vid två dygns ålder, [6], då betongen hade svalnat. I fig 1 ges en sammanfattning av den uppmätta krympningen vid 400 dygns ålder som funktion av vct. Ur de franska försöken kan följande slutsatser dras:

- Den autogena krympningen ökar med minskande vct
- Den autogena krympningen ökar då betongen innehåller silikastoft
- Såväl den totala krympningen som sorptionskrympningen ökar med ökande vct.

Andra franska försök, [7], bekräftar resultaten enligt fig 1. I fig 2 visas den autogena krympningen hos betongcylindrar som funktion av tiden. Diametern var 0,12 m och längden 0,24 m. Membranisolering-

en bestod av självhäftande aluminiumtejp. Fuktkvoten i betongen minskade med ca 1 ‰ på 1 år. Krympmätningarna enligt fig 2 startade då betongen hade en ålder av ca 1,2 dygn. I fig 2 varierades ballasten i betongen vid konstant vct. En styvare ballast (kvartsitisk) gav en något mindre krympning jämfört med krympningen för betong med kalksten som ballast. Betong med silikastoft erhöll en något större krympning än betong utan silikastoft vid konstant vattenbindemedelstal, vbt.

Även japanska försök visade vattencementtalets stora betydelse för storleken av den autogena krympningen, [8]. I fig 3 visas krympningen hos betongbalkar som funktion av tiden. Balkarna hade längden 1,2 m med ett tvärsnitt av 0,1x0,1 m^2.

Mätningarna genomfördes med ingjutna givare. Detta möjliggjorde mätningar redan före avformning. Provkropparna membranisolerades med vinylplast (betongen göts i plastformar). För de provkroppar som användes för studier av sorptionskrympning skedde avformningen vid 1 dygns ålder. Vid låga vct erhölls mycket små skillnader mellan autogen krympning och sorptionskrympning.

Här studerade betonger

I tabell 1 ges recept, tryckhållfasthet etc för de betonger som användes vid våra studier av långtidsdeformationer hos högpresterande betong, [4].

Experimentella rutiner och tänkbara felkällor

Av vardera betongen enligt tabell 1 tillverkades 4 st cylindrar för krympmätningar. Cylindrarna göts ur olika satser m h t de parallellt utförda krypförsöken, [4]. Cylindrarna hade en diameter av 55 mm och en längd av 300 mm. Allt material förvarades vid 20 °C före gjutning. Härdningen skedde vid 20 °C. Som högst erhölls 24 °C i cylindern under härdningen. Avformningen och första mätningen av krympningen utfördes vid 18 timmars ålder. Cylindrarna membranisolerades med 2 mm varmvulkaniserad bhutylduk. Fuktkvoten i betongen minskade som mest med 0,3 ‰ under 1 år vid förvaring i en omgivande relativ fuktighet, RF, av 55 %. Parallellt med cylindrarna göts även 100 mm kuber. Dessa härdades på samma sätt som cylindrarna. Temperaturen i kuberna skilde sig från temperaturen i cylindrarna med högst 0,5 °C. Hållfasthetsutvecklingen i kuberna torde således ha varit densamma som i cylindrarna. Kuberna användes för bestämning av hållfasthet, hydratation och relativ fuktighet, RF. Till de senare undersökningarna användes fragment från hållfasthetsbestämningarna. Till följd av den låga härdningstemperaturen var hållfasthetstillväxten långsam. Med kännedom om hydrationsförloppet kan dock en omräkning ske av hållfasthetstillväxten vid alternativa härdningstemperaturer (mognadsberäkning). I fig 4 visas hållfastheten i be-

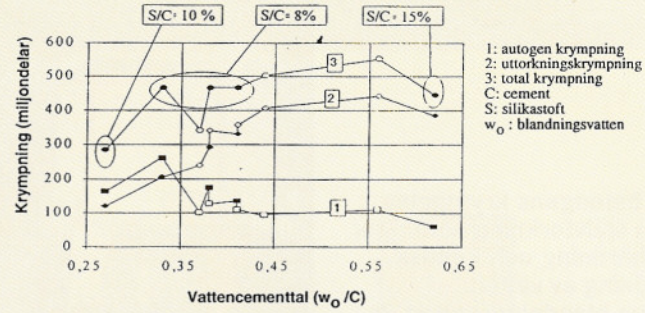


Fig 1. Krympningen efter 400d, enligt [6]

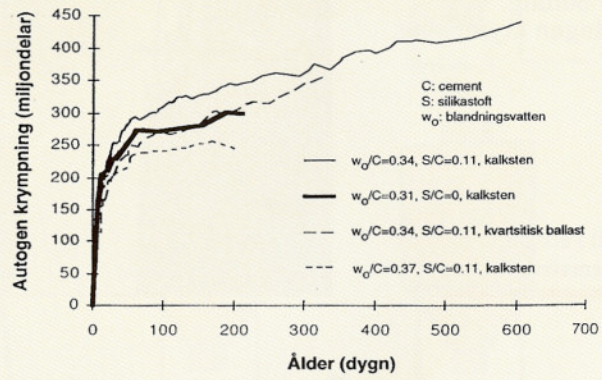


Fig 2. Autogen krympning, enligt [7]

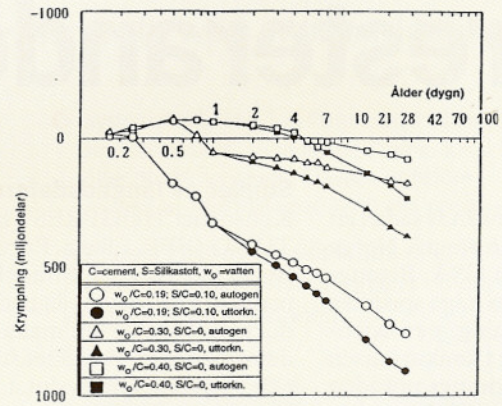


Fig 3. Krympning, enligt [8]

Typ	1	2	3	4	5	6	Anmärkning
Makadam, 12–16 mm	480	960	920	1020	1005	1060	Kvartsitisk sandsten
Makadam, 8–12 mm	480						Kvartsitisk sandsten
Naturgrus, 0–8 mm	850	850	800	765	765	750	Gnejs
Anläggningscement	450	445	450	500	525	540	Degerhamn standard
Silikastoft	23	45	45	50	52	54	Micropoz
Flytmedel (torrvikt)	2,7	5,0	5,5	7,0	7,9	8,7	Flyt 92
Luftporbildare	0,04		0,04				Cementa 88L
Lufthalt (%)	4–7 %	1 %	4 %	1 %	1 %	1 %	
Sättmått (cm)	14 cm	16 cm	17 cm	20 cm	23 cm	5 cm	
Tryckhållfasthet, 100 mm kub, 28 dygn, (MPa)	72	110	93	127	133	143	Membranhärdning
Vct	0,37	0,37	0,37	0,31	0,30	0,25	w_o/C

Tabell 1 Recept (kg/m3), tryckhållfasthet (MPa), etc för här studerade betonger, [4]

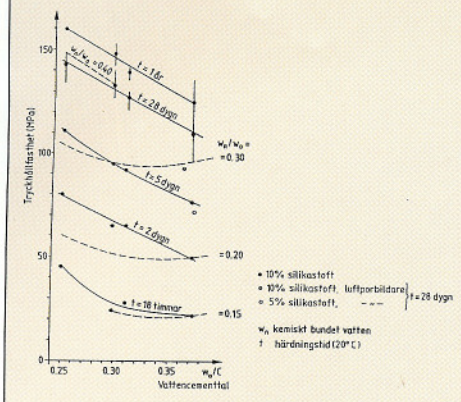


Fig 4. Tryckhållfastheten vid olika ålder som funktion av vattencementtalet

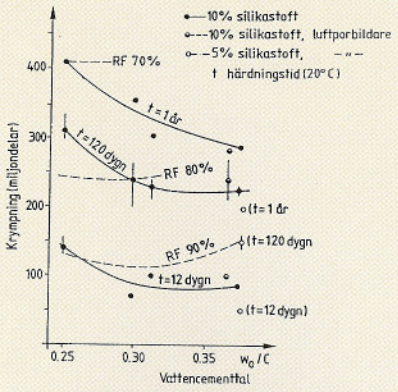


Fig 5. Autogen krympning vid olika ålder som funktion av vattencementtalet

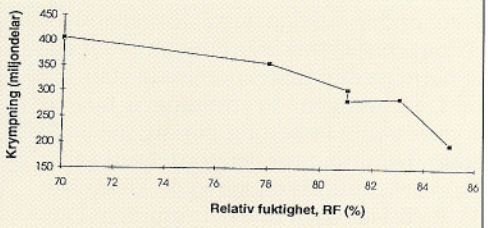


Fig 6. Autogen krympning vid 1 års ålder, som funktion av av relativa fuktogheten, RF, i betongen

tongerna som funktion av vct vid varierande ålder. Hydratationsförloppet framgår av den ökande kemiska bindningen av vatten.

I vardera cylindern göts in 6 st skruvfästen. I dessa fästen fördes efter avformningen in 6 st skruvar med inborrade hål. Skruvarna låstes med brickor och muttrar mot bhutylduken och betongen. Skruvarna var så placerade att mätningarna kunde utföras på tre sidor av provkroppen. Mätinstrumentets anhåll placerades i de inborrade hålen. Kanterna på dessa hål var avplanade för att menlig inverkan av borrskägg eller dylikt skulle undvikas. Mellan varje mätning kalibrerades instrumentet mot en stav utförd i metallen invar – en metall med mycket låg temperaturutvidgningskoefficient. Mätlängden var 250 mm. Cylindrarna förvarades liggande, men vändes mellan varje mätning. Eventuell böjning av provkroppen under försökets gång torde således ej ha påverkat mätresultatet.

Största felkällan härrör troligen från temperaturvariationer under den tidiga härdningen (maximala temperaturen uppgick till 24 °C tämligen oberoende av vct). Mätfelet pga variation i temperatur torde ha uppgått till som mest ca 40 miljondelar. En annan felkälla var fuktförluster. Mycket små variationer av fuktinnehållet i en högpresterande betong ger stora variationer i betongens relativa fuktighet, RF, [9]. Kontroll skedde underhand av provkropparnas vikt. Fuktförlusterna var dock mycket små; de uppgick till ungefär en tredjedel av de förluster som konstaterats vid ovannämnda franska försök, [7].

Egna resultat och allmän diskussion

I fig 5 visas den uppmätta autogena krympningen som funktion av vct vid varierande ålder på betongen vid våra försök.

Den autogena krympningen är således större vid lägre vct. Vid konstant vct är krympdeformationen större i betong med 10 % silikastoft än i betong med 5 % silikastoft. Tillsats av luftporbildare synes ej ha påverkat krympningens storlek vid i övrigt konstanta förhållanden. Sambandet mellan krympningen och relativa fuktigheten, RF, i betongen är tämligen entydigt. I fig 6 visas den autogena krympningen som funktion av relativa fuktigheten, RF, i betongen vid 1 års ålder.

Betongens självtorkning föranleds av den kemiska krympning som äger rum då vattnet binds kemiskt till cementen, [1]. En luftfylld porvolym bildas i betongen. De grövre porerna i betongen töms successivt på vatten. Kapillära krafter från de finare (och ännu vattenfyllda) porerna förorsakar en kontraktion av cementpastan med inre dragspänningar i betongen som följd. Ballasten i betongen motverkar därvid den autogena krympningen. Tryckspänningarna till följd av den förhindrade autogena krympningen tas således upp av ballasten.



Provkroppar för studium av autogen krympning, sorptionskrympning, hållfasthet, relativ fuktighet och hydration

Med hjälp av figurerna 5 och 6 kan ett empiriskt samband tas fram mellan å ena sidan den autogena krympningen, $e_{au\,l}$ ‰, vid 1 års ålder och å andra sidan betongens innehåll av cement, C, silikastoft, S och blandningsvatten, w_o, (kg/m3):

$$e_{au\,l} = 0{,}5 \cdot (1{,}1\text{-}1000 \cdot w_o / (C+2S)^2)$$

$$130 < w_o < 170{,}450 < C < 550{,}20 < S < 60,$$

$$0{,}25 < w_o/C < 0{,}38$$

Ovanstående samband är ej dimensionslöst eftersom det särskilt beaktar bindemedelsmängden i betongen. En ökad mängd bindemedel ger en större autogen krympning. (Krympningen erhålles i ‰ om betongens delmaterial ges i kg/m3.)

Sambandet gäller för en betong med den (enligt tabell 1) provade ballasten. En ballast med en lägre elasticitetsmodul torde ge en större krympning, jämför [7]. Den autogena krympningen, $e_{au\,l}$ erhålles från 0,8 dygns ålder.

Våra resultat överensstämmer väl med andras forskning enligt ovan, om man beaktar åldern hos betongen då krympmätningarna påbörjades. Våra resultat är i det närmaste identiska med [7]. Krympmätningarna påbörjades i detta fall vid ca 1,2 dygns ålder. De japanska krympmätningarna enligt [8] påbörjades redan vid ca 0,2 dygns ålder. Vid ett låg vct (=0,19) erhölls en autogen deformation av 0,3 ‰ fram till 0,8 dygns ålder.

Praktiska konsekvenser

Konstruktörer och byggare måste givetvis beakta den autogena krympningen hos högpresterande betong t ex genom extra armering och/eller temporära fogar. Den totala krympningen hos högpresterande

betong är dock mindre än krympningen hos en normal betong som torkar ut. Högpresterande betong krymper även under membranisolerade förhållanden. Man kan förvänta sig att grövre konstruktioner av högpresterande betong krymper även under fuktiga yttre förhållanden. Betongen självtorkar utom i området allra närmast den fuktexponerade ytan.

Den autogena krympningen hos en högpresterande betong gör sig gällande tidigt. Detta kan vara en fördel vad gäller okontrollerade krympsprickor. Dessa kan då åtgärdas redan under byggtiden. Den autogena krympningen verkar vidare i motsatt riktning mot den temperaturexpansion som sker i betongen pga härdningsvärmet. Detta kan vara gynnsamt vid grövre konstruktioner dvs minska risken för ytliga temperatursprickor i den högpresterande betongen. Effekterna av värmeutveckling undersökes f n i ett annat projekt inom konsortiet (LuTH Konstruktionsteknik).

Slutsatser

Den autogena (självtorknings-) krympningen är försumbar för normal betong (ca 0,1 ‰). Högpresterande betong självtorkar till en låg relativ fuktighet. RF. Denna självtorkning förorsakar en icke försumbar autogen krympning. Enligt våra mätningar kan denna krympning vid låga vattencementtal, vct, uppgå till ca 0,4 ‰ efter ett år, räknat från 0,8 dygns ålder. Den autogena krympningen studerades för betonger med 28-dygns hållfastheter varierande mellan 72 och 143 MPa (vct varierade mellan 0,37 och 0,25 resp).Vid vct=0,37 varierades dessutom betongens innehåll av luftporbildare och kiselstoft.

- Den autogena krympningen ökar med minskande vct
- Den autogena krympningen ökar då betongen innehåller mer silikastoft
- Inblandning av luftporbildare påverkar ej storleken av den autogena krympningen.



Fjäderriggar för studium av långtidskrypning

Referenser

[1] Bertil Persson. Selfdesiccating concrete slabs. Bidrag till kongressen High-Strength Concrete, Lillehammer, Sid: 882–889. Utgivare: Ivar Holand, Erik Sellevold. Förlag: Norsk Betongförening, Oslo. 1993

[2] Bertil Persson. Manuskript till symposiet Concreep 5, Barcelona. Konsortiet HÖGPRESTERANDE BETONG. Intern rapport M06:10. 1993

[3] Bertil Persson. Manuskript till Nordiskt Betongforskningsmöte, Göteborg. Konsortiet HÖGPRESTERANDE BETONG. Intern rapport M06:11, 1993

[4] Bertil Persson. Manuskript till kongressen High-Strength Concrete. Konsortiet HÖGPRESTERANDE BETONG. Intern rapport M06:12, 1993

[5] Robert le Roy, Francois de Larrard. Creep and shrinkage of High-Strength Concrete: the LCPC-experience. RILEM Proceedings no 22. Pp 500–508. Editor: Z P Bazant and I Carol. Publisher: E & FN Spon. London. 1993

[6] Robert le Roy. Personlig information. 1993

[7] Vincent Sicard. Origines et proprietes des deformations de retrait et de flauge de betons a Hautes Performances a partir de 28 heures de durcissement. Laboratoire Materiaux et Durabilité des Constructions. INSA-UPS no 201. Toulouse Cedex. 1993

[8] E Tazawa, S Miyazawa. Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology. RILEM Proceedings no 22. Pp 159–168. Editor: Z P Bazant and I Carol. Publisher: E & FN Spon. London. 1993

[9] Bertil Persson. Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet. Rapport TVBM-1009. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992

Beräkningsprogram för torktid hos betong. Bygg teknik. 02_2012, pp. 61-64.

Beräkningsprogram för torktid hos betong

I artikeln görs analys beräkningsprogrammen Bi Dry, Tork 3.0 och TorkaS, för torktid hos betong. För detta ändamål analyseras resultaten av ett vid Högskolan i Halmstad nyligen genomfört examensarbete. Arbetet omfattade såväl experimentella studier av fem betonger med två cementkvalitéer som datorberäkningar av torktid för dessa betonger. Mätningarna utfördes med nya instrument, vilka kalibrerades vid Byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola (LTH) Lund. Resultaten tyder på att datorprogrammen ger en något snabbare uttorkning hos betongen än vad som uppmäts i samma betonger. Examensarbetet utfördes under våren och sommaren 2010 under medverkan av Betongindustri, Cemex, Färdig Betong och Sydsten. Denna analys visar bland annat att inverkan av Portlandcementhalten förbises i beräkningsprogrammen. Syftet med analysen var att jämföra mätresultat av torktid för betong med datorberäkningar även med beaktande av inverkande faktorer.

Det är känt att ett antal parametrar påverkar torktiden för betong exempelvis följande [1]:






*Artikelförfattare är av **Bertil Persson**, Bara, **Bengt Hjort**, **Lukas Blixt** och **Laszlo Harmath**, Högskolan i Halmstad, Halmstad.*

- Betongkvalitet
- Dimension
- Härdningssätt
- Temperatur
- Tid.

Det examensarbete, som ligger till grund för denna analys, utfördes av *Lukas Blixt* och *Laszlo Harmath* med *Bengt Hjort* som handledare och *Bertil Persson* som biträdande handledare [2]. Examensarbetet avgränsades till praktiska betonger inom gängse leveranser från betongfabriker i Halmstad (Sydsten) och Helsingborg (Färdig Betong). Fullskaliga provkroppar i form av bjälklagsplattor tillverkades vid de bägge fabrikerna. De plattorna som göts i Helsingborg transporterades till Halmstad för fuktmätning där. Avgränsningen skedde även till en produktionsplan som följde ett verkligt bygge dock med skillnaden att mätningarna av den inre relativa fuktigheten (RF) avbröts efter tio veckor. Till skillnad från en byggplats genomfördes mätningarna inom arbetes ram på tre mätdjup. Examensarbetet omfattar ett mycket stort antal mätdata, såväl av mätningar i fem försöksbetonger som beräkningar av torktid. Som underlag för denna analys användes samtliga tillgängliga rådata från mätningarna. Syfte med analysen var att söka finna en mer djupgående samhörighet mellan uttorkning hos betong och resultat enligt beräkningsprogrammen.

Experiment och datorberäkningar

Betongsammansättningar med datautskrifter från respektive fabrik och uppmätta standard hållfasthetsresultat vid 28 dygns ålder dokumenteras. *Tabell 1* visar sammansättning av och egenskaper hos provade betonger. Inom arbetet göts bjälklagsplattor om 800 x 1 200 x 120 mm med tre betongsammansättningar, C30/37, C35/45 och C45/55, samt en betong med ett vattencementtal (vct) lika med 0,36, se *bild 1 på nästa sida*. Stenmax var 16 mm och konsistensen halvflyt. Två cementtyper användes, dels Cementa Byggcement CEM II, dels Cemex Std, CEM I. Bjälklagen täcktes direkt med byggplastfolie varefter ytan skurades efter cirka fem timmar, isoleras under cirka tjugo timmar med dubbel byggplastfolie med tejpning runt om. Efter tjugo timmar påbörjades simulering av regn under två veckors tid genom att vatten dagligen tillfördes genom dubbla hål i den dubbla, tejpade plastfolien. Hålet tejpades efter varje ”regn”. Efter vattenbegjutningen härdade plattorna inomhus under två veckor med tejpad plastfolie med före dess noggrant avtorkad betongyta. Därefter påbörjades lufthärdning inomhus med mätning av den relativa fuktigheten i betongen med intervallet två veckor. Uttorkningen skedde ensidigt med dubbel byggplastfolie under betongen och på bjälklaget kanten inom den kvarsittande formen. Provkroppens tjocklek motsvarar dubbelsidig uttorkning från ett 240 mm tjock betongbjälklag. Hål för mätning av relativ fuktighet borrades minst ett dygn före mättillfället. Allt borrkax sögs ut ur hålet med dammsugare. I mäthålet monterades därefter ett mätrör ned till botten av hålet. Mätröret tätades runt om, dels vid botten av borrhålet, dels vid ytan, samt inuti med en isatt gummipropp. Mätinstrument och mätprob var nyinköpta för ändamålet. Mätdonet för relativ fuktighet, av typ Vaisala, kalibrerades omedelbart

Tabell 1: Sammansättning av och egenskaper hos provade betonger.

Betong/material	***C30/37***	***C35/45***	***C35/45***	***C45/55***	***VCT 36***
Betongfabrik	Sydsten	Sydsten	Färdig Betong	Färdig Betong	Sydsten
Cement	Cementa	Cementa	Cemex	Cemex	Cementa
Kross 8-16	812	706	846	735	587
Kross 4-8					140
Grus			462	471	
Sand	1037	1098	462	471	1014
Cement Cementa	355	425	370	470	480
Vatten	176	170	178	180	175
Densitet	2380	2399	2318	2327	2396
Vattencementtal	0,50	0,40	0,48	0,38	0,36
Hållfasthet (28 dygn, MPa)	56	64	49	59	71



FOTO: BERTIL PERSSON

Bild 1: Försöksplattor av betong vid Sydsten i Halmstad. På bilden från vänster Lukas Blixt och Laszlo Harmath.



Bild 2: Fuktmätning i betong med nya och nykalibrerade Vaisalasensorer, Högskolan i Halmstad, Halmstad.

före första mättillfället vid Avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH. Mätprob och mätinstrument kalibrerades tillsammans. Rumsfuktighet och temperatur dokumenteras före och efter varje mättillfälle. Mätningen av den relativa fuktigheten skedde på tre mätdjup, minimum, 48 mm samt 110 mm, under 24 timmar vid varje mättillfälle, *bild 2*. Av resultaten framgick, dels uppmätta relativa fuktighetsvärden, dels datorberäknad relativ fuktighet. Inom examensarbetet modellerades resultat av relativ fuktighet från tre beräkningsprogram, Bi Dry, Tork 3.0 samt TorkaS. Erforderliga indata dokumenterades vid varje mättillfälle. Indata var även sammansättningar hos betongerna, tabell 1. Datorberäkningarna gav relevant substans för analysen.

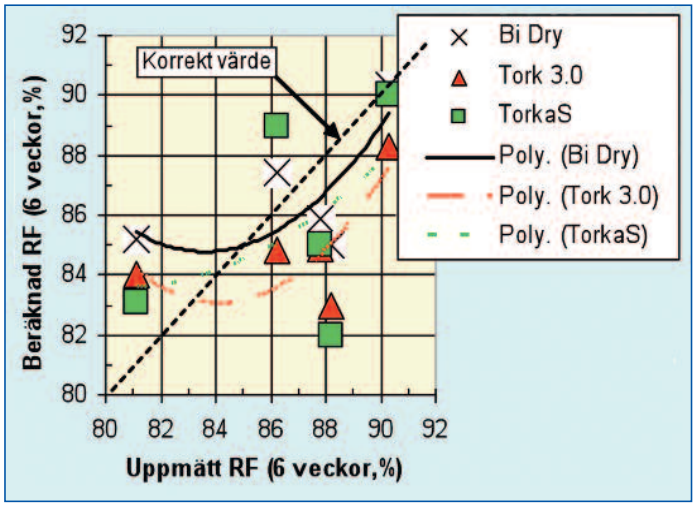
Resultat och analys

Beräknad relativ fuktighet visavi uppmätt. Mest intressant för analysen var en jämförelse mellan uppmätt relativ fuktighet och beräknad, *figur 1*. Figur 1 visar beräknad relativ fuktighet efter sex veckors torktid som funktion av uppmätt relativ fuktighet. *Tabell 2* visar medelvärden av skillnad mellan uppmätt relativ fuktighet och datorberäknad. Som ett medelvärde visar beräkningsprogrammen 0,9 procent för låg relativ fuktighet jämfört med verkligheten, det vill säga på osäkra sidan. Bi Dry visade korrekt värde för relativ fuktighet. Störst felet uppvisar Tork 3.0 med -1,7 procent följt av TorkaS med -0,9 procent på osäkra sidan. TorkaS har störst medelvärde av spridningen av beräkningsresultaten, 1,5 procent. Även beträffande spridning i resultaten är Bi Dry mest korrekt med 1,1 procent. För relativ fuktighet lika med 81 procent beräknas mellan två och fyra procent för hög relativ fuktighet. För relativ fuktighet mellan 86 och 88 procent beräknar programmen dock så mycket som ned till sex procent för låg relativ fuktighet. För relativ fuktighet lika med 90 procent beräknas korrekt eller något för låg relativ fuktighet med programmen.

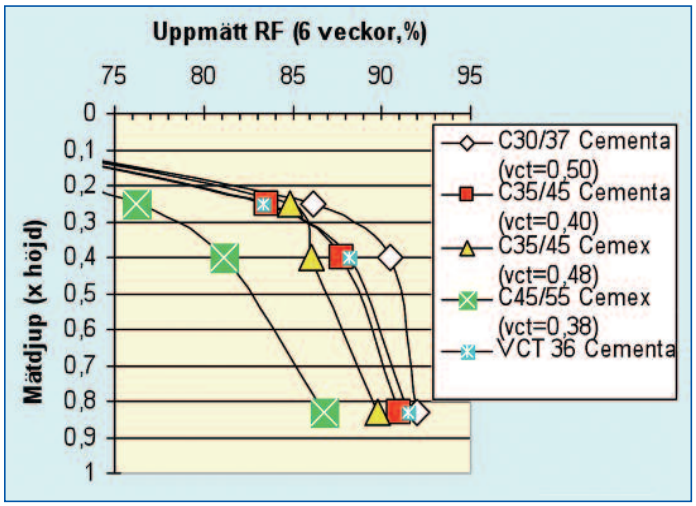
Uppmätta fuktprofiler. Analys av fuktprofiler ger ofta en god uppskattning av noggrannheten i mätningen av den relativa fuktigheten, *figur 2*. Figur 2 visar fuktprofiler för olika betongkvalitéer som funktion av uppmätt relativ fuktighet. Fuktprofilerna visar god parallellitet, vilket tyder på hög professionalitet och korrekta mätningar. Efter sex veckors torktid visar betong med Cemex cement (CEM I) vid samma vattencementtal cirka tre procent lägre relativ fuktighet än vad betong med Cementacement (CEM II) gör, *tabell 3*. Tabell 3 visar skillnad i relativ fuktighet mellan betong med Cemexcement (CEM I) och betong med Cementacement

Tabell 2: Medelvärden av skillnaden mellan uppmätt relativ fuktighet och datorberäknad.

Medelvärden	*Bi Dry*	*Tork 3.0*	*TorkaS*	*Medelvärde*
Fel	0,0	-1,7	-0,9	-0,9
Spridning	1,1	1,4	1,5	1,4



Figur 1: Beräknad relativ fuktighet efter sex veckors torktid som funktion av uppmätt relativ fuktighet.



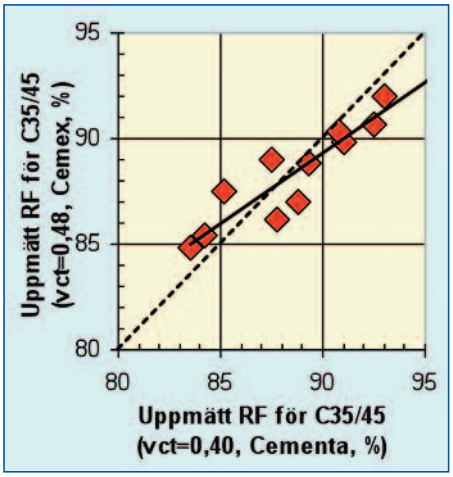
Figur 2: Fuktprofiler för olika betongkvalitéer som funktion av uppmätt relativ fuktighet.

Tabell 3: Skillnad i relativ fuktighet mellan betong med Cemexcement (CEM I) och betong med Cementacement (CEM II) (%).

	Cemex	Cementa	Skillnad
Vct = 0,36 – 0,40	76,0	80,6	-4,6
Vct = 0,48 – 0,50	80,2	81,5	-1,3
Medelvärde			-2,9

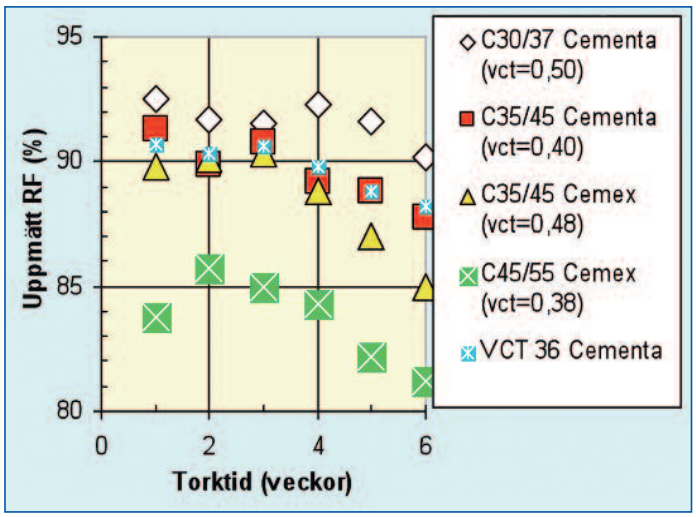
(CEM II) vid konstant vattencementtal. Vid lägre vattencementtal är självuttorkningsgraden hög. Självuttorkningsgraden styrs av innehållet av Portlandscement, vilket är högre i cementklass CEM I än i cementklass CEM II. Betong med mer Portlandcement visar därför lägre relativ fuktighet vid i övrigt konstanta förhållanden, främst konstant vattencementtal.

Inverkan av cementtyp och torktid. Beräkningsprogrammen tar hänsyn till torktiden men inte alls till halten av Portlandscement. *Figur 3* visar uppmätt relativ fuktighet för betong med vattencementtal lika med 0,48 och Cemexcement som funktion av uppmätt relativ fuktighet med betong med vattencementtal lika med 0,50 och Cementacement. Ingen signifikant skillnad föreligger efter sex veckors torktid mellan uttorkningen mellan de bägge betongerna. Detta betyder att högre vattencementtal lika med 0,48 kan nyttjas i betong med Cemexcement än i betong med Cementacement (vct = 0,40) vid samma uttorkningsgrad och i övrigt konstanta förhållanden. *Figur 4 på nästa sida* visar uppmätt relativ fuktighet som funktion av torktid. Betong med Cemexcement har högre uttorkningshastighet än vad betong med Cementacement har. Detta beror endera den högre halten av Portlandcement i Cemexcement eller på att en tätare struktur bildas i betong med kalkstensfiller än i betong utan kalkstensfiller. En tätare struktur ger lägre diffusivitet i betongen med lägre uttorkningshastighet som följd.

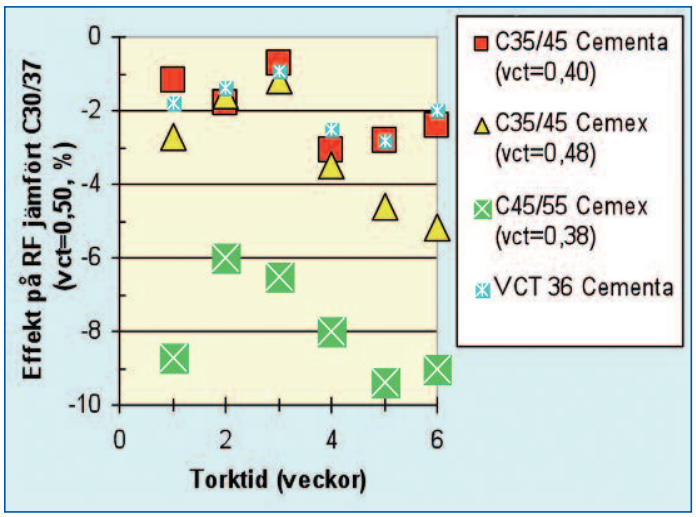


Figur 3: Uppmätt relativ fuktighet för betong C35/45 med Cemexcement som funktion av uppmätt relativ fuktighet med betong C45/55 med Cementacement.

Inverkan av högre betongkvalitet och vattencementtal. Beräkningsprogrammet tar hänsyn till betongkvalitet eller vattencementtal, vilka för betong egentligen är synonyma begrepp. Speciell intressant var att vid varierande torktid analysera effekten av högre betongkvalitet på uppmätt relativ fuktighet i betongen jämfört med betong C30/37, *figur 5*. Figur 5 visar som funktion av torktid effekten av högre betongkvalitet och cementsort på uppmätt relativ fuktighet. Som synes har byte av cementsort från Cementa till Cemex mycket större inverkan på uttorkningen än ökning av betongkvaliteten med Cementacement. *Figur 6* visar ett för självuttorkning fundamentalt samband mellan vattencementtal och uppmätt relativ fuktighet. Figur 6 tydliggör samtliga övriga resultat nämligen effekten av mer Portlandcement på uttorkningen hos betongen speciellt vid lägre vattencementtal där självuttorkningen har betydelse. Det må dock påpekas att mer Portlandscement i



Figur 4: Uppmätt relativ fuktighet vid varierande som funktion av torktid.



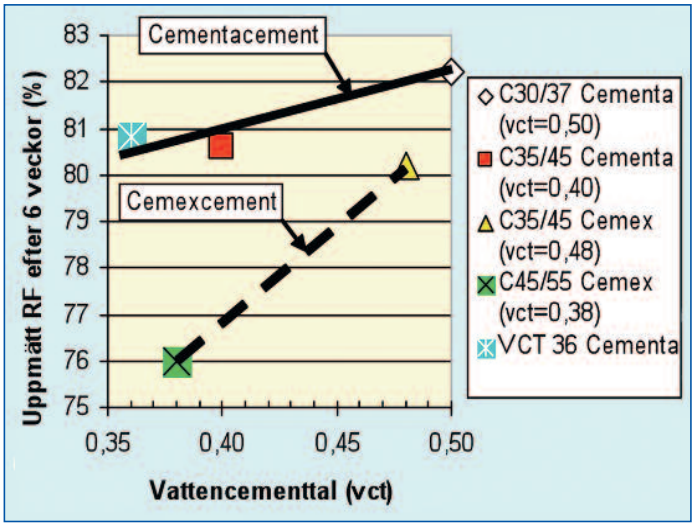
Figur 5: Effekt som funktion av torktid av högre betongkvalitet och cementsort på uppmätt relativ fuktighet.

betong motverkar miljömålen på grund av högre koldioxidutsläpp. Å andra sidan sker uttorkningen av betong snabbare med mer Portlandscement och kräver mindre yttre uttorkningsåtgärder varför miljömålen ändå torde uppfyllas oaktat en högre betongkvalitet.

Slutsatser

Följande slutsatser dras av analysen:

- Examensarbete genomfördes på ett realistiskt sett med tanke på normalt byggande och med mycket god professionalitet.
- Som ett medelvärde visar beräkningsprogrammen 0,9 procent för låg relativ fuktighet jämfört med verkligheten, det vill säga något på osäkra sidan.
- Bi Dry visade korrekt värde för relativ fuktighet.
- Störst fel uppvisar Tork 3.0 med -1,7 procent följt av TorkaS med -0,9 procent.
- TorkaS har störst medelvärde av spridningen av beräkningsresultaten, 1,5 procent.
- Även beträffande spridning i resultaten är Bi Dry mest korrekt med 1,1 procent.
- Beräkningsprogrammen tar hänsyn till torktiden men inte till Portlandscementhalt. ■



Figur 6: Uppmätt relativ fuktighet som funktion av vattencementtal

Referenser

[1] Göran Fagerlund. *Hög betongkvalitet ger kort och säker torktid även under ogynnsamma klimatförhållanden*. Bygg & teknik 2/10. 2010, sid. 72–78.

[2] Lukas Blixt & Laszlo Harmath. *Uttorkning av betong. Mätning samt modellering*. Högskolan i Halmstad. Sektionen för Teknik och Ekonomi. Byggnadsingenjörsprogrammet. Examensarbete. Halmstad. 2010, 51 sid.

Beräkningsprogram TORK för val av vct i byggfuktfri betong. Bygg & Teknik. 95/7. 1995. Stockholm, 22-25.

Beräkningsprogrammet ”TORK”:

Val av vct hos byggfuktfri betong

Alltför hög halt av byggfukt är fortfarande en av de vanligaste orsakerna till byggskador. Många av de problem som finns i s k sjuka hus har sin grund i byggfukt, eftersom avgång av många skadliga ämnen, t ex formaldehyd, från material ökar kraftigt med ökande fuktinnehåll, [1]. Det är sedan länge känt att betongkvaliteten har en utomordentligt stor betydelse för uttorkningsförloppet hos betong, [2]. På senare tid har man även utvecklat en självtorkande betong, [3]. Genom att välja ett tillräckligt lågt vattencementtal, vct (viktförhållande mellan vatten och cement i betongen) kan man i stort sett helt göra sig oberoende av de för normal betong ofta långa uttorkningstiderna. Det är den kemiska krympningen hos hydratvattnet i cementpastan som är en förutsättning för att en självtorkning skall äga rum, [4].

Val av betongkvalitet

Det har uttryckts önskemål om att beräkningsanpassa en dimensioneringsgång, enligt [3], för val av vct vid önskad uttorkningsgrad, RF, hos den högpresterande betongen vid kända härdningsförhållanden. Föreliggande program ”TORK” uppfyller dessa önskemål för RF varierande mellan 75 och 95 %, ålder mellan sju och 450 dygn samt härdning endera i vatten eller luft alternativt membranhärdning. De vanligaste cementtyperna i Sverige, Anläggningscement och Slite Std cement, behandlas i programmet. Valmöjlighet finns för endera tunna plattor (≤ 100 mm vid ensidig uttorkning) eller för tjocka plattor (> 100 mm vid ensidig uttorkning). *Programmet gäller vid vattencementtal, vct < 0,5.*

Förutsättningar och beräkningsgång

Experimentellt underlag

Programmet baseras på ett stort antal mätningar av relativa fuktigheten, RF, utförda på betong med vattencementtal, vct, varierande mellan 0,22 och 0,58, endera utan eller med 10 % silikastoft räknat på cementinnehållet. Endast Anläggningscement studerades. RF-mätningarna utfördes 50 mm, 150 mm samt 350 mm från ytan på stora konstruktionselement (simulerade pelare med diametern 1 m). Geometriskt motsvarade pelaren uttorkningsförhållandena för en 250 mm tjock ensidigt uttorkad platta. Det visade sig att uttorkningen hos en högpresterande betong i stort sett följde självuttorkningen, [3]. Den fukt som togs upp av betongen, ytnära, avgick sedan mycket snabbt, i allmänhet inom ett par veckor, [5].

Mätningarna utfördes vid 28, 90, 140 och 450 dygns ålder på betongen. Mätserien kompletterades med veckovisa provningar under 70 dygn av bruk baserat på endera Anläggningscement, Injekteringscement eller Slite Std cement. Slutligen studerades även självuttorkningen hos ung betong baserad på Anläggningscement (ålder: sju dygn) med vct varierande mellan 0,25 och 0,37 samt med 5 eller 10 % silikastoft, [6].

Mätningarna resulterade i en dimensioneringsgång för val av vct vid önskad uttorkningsgrad, RF, hos betongen vid kända härdningsförhållanden, se [3, 4]. Dimensioneringsgången avsåg uttorkningsgraden 50 mm från betongytan dvs tunna plattor. För plattor tjockare än 100 mm (ensidig uttorkning) valdes i stället, som experimentellt underlag, mätserier på avståndet 150 mm från ytan på de ovannämnda provkropparna, [3]. På avståndet 150 mm från betongytan var självuttorkningen hos betongen lika stor som på avståndet 50 mm från ytan. Inverkan av vattenhärdning respektive luftexponering var emellertid mindre på avståndet 150 mm från betongytan jämfört med 50 mm från ytan.



Den byggfuktfria betongen upplevdes som segare och kletigare än normal betong vid Siab i Helsingborg.



Vibrobryggan underlättade avjämningen av den byggfuktfria betongen.



*Artikelförfattare är **Bertil Persson** vid Byggnadsmaterial, Tekniska högskolan i Lund.*



Endast smärre ytjusteringar (direktslipning) återstod då vibrobryggan gjort sitt.

Indata

För användning av programmet erfordras följande indata:

1) *Betongdimension*, h, i uttorkningsriktningen. (h = plattjockleken vid ensidig uttorkning, 2 x h = bjälklagstjockleken vid dubbelsidig uttorkning).

2) Önskad relativ fuktighet, *RF* (%). Gränser: 75 < RF < 95 %.

3) *Ålder* (dygn) på betongen vid vald RF. Åldern på betongen kan variera mellan sju och 450 dygn.

4) *Lagringssätt*: x % i vatten
y % membran härdning
z % i luft
Summa 100 %

5) *Cementtyp*: Anläggningscement eller Slite Std

Beräkningsgång

1) Programmet beräknar först det effektiva vattenbindemedelstalet, vbt_{eff}, enligt [3, 6], vid valt RF och mest närliggande ålder, dels för vattenlagring, dels för membranhärdning, dels för luftexponering. (Vbt_{eff} = w/(C + 2 x S) där w är total mängd blandningsvatten, C är cementinnehåll och S är mängd silikastoft).

2) För uttorkningstjockleken, h ≤ 100 mm väljes mätresultaten enligt [3, 6], 50 mm från betongytan. För uttorkningstjockleken, h > 100 mm väljes mätresultaten enligt [3, 6], 150 mm från betongytan.

3) Programmet beräknar vbt_{eff} för mest närliggande åldrar på betongen genom linear interpolation mellan de härdningsförhållanden som uppgivits i indatan.

4) Programmet beräknar vbt_{eff} för aktuell ålder genom logaritmisk interpolation mellan värdena enligt pkt 3) ovan.

5) För Slite Std cement görs ett tillägg i vbt_{eff} med 0,04 enligt prover utförda med bruk, [3].



Pumpning av byggfuktfri betong i vinterväder. Sk "Tyst hus", Motala. FOTO: MARI KARLSSON, NCC BALLAST AB

Utdata

Programmet ger effektiva vattenbindemedelstalet, vbt_{eff}, som utdata. Då experimentella rådata saknas vid givna indata, ges detta svar. Programmet gäller vid vattencemental, vct < 0,5.

Verifikationer

"TORK" provades i samband med tio stycken fältförsök. Med ledning av förhållandena på platsen beräknades effektiva vattenbindemedelstalet, vbt_{eff}. Samtliga indata vad gäller RF (utom vid försök nr 10) mättes på sk normenligt djup dvs på 20 % av plattjockleken vid dubbelsidig uttorkning samt 40 % vid ensidig uttorkning. Mätningarna utfördes endera i ingjutna mätrör av plast eller på uthuggna prover i laboratorium, [7]. Mättiden uppgick till 22 timmar i de fall då Vaisala-givare användes samt till åtta timmar då Protimeter daggpunktsgivare användes.

Felkällor och noggrannhet

Härdningsförhållandena bedömdes med hjälp av nederbördsdata från SMHI, intervjuer av platschefer samt med hjälp av besiktningar av betongytan vid platsbesök. Det skall medges att bedömning kan vara behäftad med fel i vissa fall. Troligen har man i vissa fall överskattat tidsrymden för vattenhärdning. Uppgifter beträffande utfört vbt_{eff} lämnades av respektive betongstation i samband med fältförsöken. Även här kan förekomma fel beroende av variationer i ballastfukt. RF-mätarnas noggrannhet var ± 2 % RF.

Resultat och diskussion

I *figur 1* visas det (med program "TORK") beräknade effektiva vattenbindemedelstalet, vbt_{eff}, som funktion av det utförda effektiva vattenbindeme-



Membran respektive termoisolering av den byggfuktfria betongen.

FOTO: MARI KARLSSON, NCC BALLAST AB

Beständighet hos betong med krympningsreducerande åtgärder, Bygg & Teknik 2006/07, 63-66.

Beständighet hos betong efter krympningsreducerande åtgärder

I artikeln beskrivs experiment med åtta högpresterande (HP) betonger utan eller med krympningsreducerande åtgärder, endera ingjuten lättklinker eller kemiskt tillsatsmedel (alkohol). Betongerna hade vattencementtal (vct) varierande mellan 0,30 och 0,40. Kloridinträngning och saltfrostavskalning studerades på tre identiska prover med samma kombination av material. Parallellt uppmättes också elasticitetsmodul, hållfasthet, krympning och relativ fuktighet (RF). Krympningsreducerande åtgärder hade stor effekt på uttorkningskrympningen men ingen på effekt på den autogena krympningen. Med kemisk krympreducerare erhölls dålig saltfrostbeständighet medan kloridinträngningen blev större med lättklinker i betongen än utan. Arbetet utfördes som ett examensarbete, 2005–2006.

En högpresterande betong karakteriseras av ett lågt vattencementtal, vct, innehåll av välgraderade ballastmaterial och tillsatsmaterial som till exempel flygaska, silikastoft eller slagg. Betongen innehåller också tillsatsmedel, till exempel flytmedel och luftporbildare. Ett lågt vct innebär kraftig självuttorkning hos HP-betongen vilket medför att cementpastan krymper med sprickor som följd vilka kan reducera betongens beständighet [1]. Det finns en rad olika utvägar för att upphäva effekten av stor krympning hos betongen. De vanligaste sätten är att sprickindela konstruktionen eller att öka armeringen. Andra exempel på detta är att nyttja vattenlagrad lättklinker för att på så sätt skapa en inre vattenreservoar i betongen vilken återfyller de luftfyllda porerna som bildats vid hydratationen. Ytterligare en annan lösning är att använda krympningsreducerande tillsatsmedel. Då olika krympningsreducerande åtgärder används finns det dock en risk att andra viktiga egenskaper som påverkar betongens beständighet kommer att försämras. Syftet med detta examensarbete var att utreda effekten av krympningsreducerande metoder samt hur dessa påverkade betongens övriga egenskaper såsom elasticitetsmodul, hållfasthet, kloridinträngning, saltfrostbeständighet och RF [2].







*Artikelförfattare är **Bertil Persson**, docent, Bara, **Staffan Nilsson**, civilingenjör, och **Patrik Andersson-Schyllert**, civilingenjör, Bygg & Miljöteknik, LTH.*

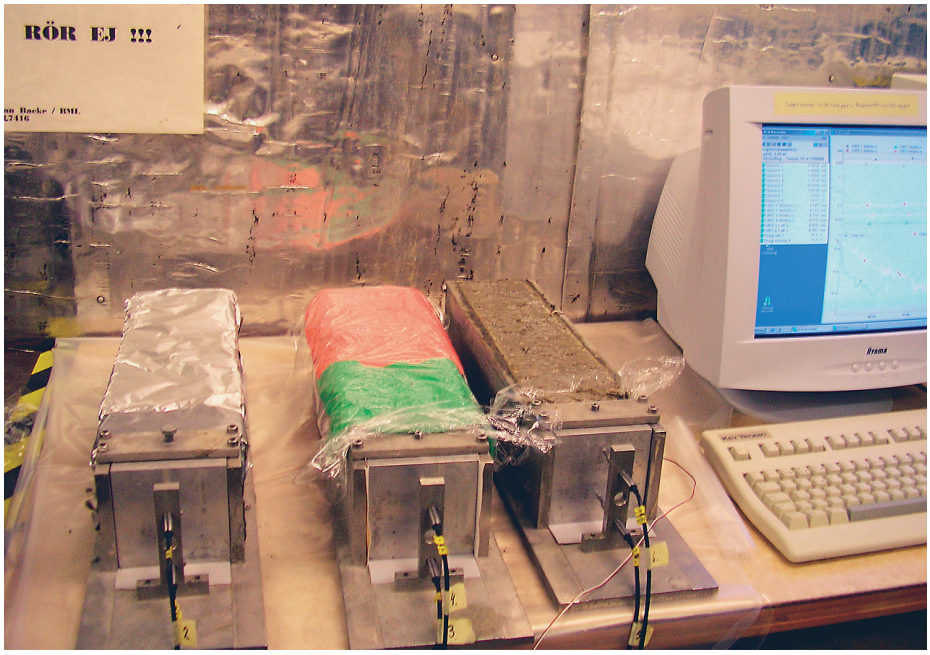
Genomförande

Två typer av vattenlagrad lättklinkerballast och ett krympningsreducerande tillsatsmedel har provats. För att studera betong med vattenlagrad ballast göts tre betongtyper med vct varierande mellan 0,30 och 0,40 och samma typ av lättklinker, Hy, från USA. Lättklinker av svenskt ursprung, Le, har också prövats, vct lika med 0,35. Som referens användes en betong med normalballast och vct lika med 0,35. Även två betongtyper med innehåll av silikastoft (vct lika med 0,35) har provats för att utröna hur hållfastheten och kloridinträngningsmotståndet påverkades, *tabell 1*. Krympningen uppmättes för betongprover lagrade i tre olika omgivningsklimat; i luft, fuktisolerade och i vatten. Provet som luftlagrades visade krympning som orsakats både av självuttorkning och av uttorkning. Detta prov förväntades att ge den största krympningen. I prover som fuktisolerats avgick inget vatten till omgivningen utan det var självuttorkningen som gjorde att porerna tömdes på vatten. Prover som vattenlagrades medförde att betongens yta under härdning var fri att ta upp så mycket vatten som den behövde från omgivningen. Alla proverna lagrades i ett klimatrum med temperaturen 20 °C och RF 55 procent. Den tidiga krympningen uppmättes genom att betongen göts i krympriggar, vilka var kopplade till dator via LVDT-givare, *figur 1 på nästa sida*. Betongens yta i krympriggarna härdades enligt tidigare givna klimatförhållanden. Den tidiga krympningen uppmättes under en vecka. Därefter avformades proverna och mätbrickor limmades på provens sidor för att möjliggöra mekaniska långtidsmätningar. Hela provkroppen lagrades enligt tidigare angivet omgivningsklimat. Kuber (100 mm) och cylindrar (100 gånger 200 mm) göts för provning av hållfasthet, saltfrostbeständighet och kloridinträngningsmotstånd. Bindetider togs fram genom mätning enligt Vicat. Hållfastheten provades vid 1, 7 och 28 dygns ålder. RF-mätningar utfördes på fragment från tryckhållfasthetstesten vid respektive ål-

Tabell 1: Recept och viktiga egenskaper för provade betonger (kg/m³).

Material	L30Hy	L35Hy	L40Hy	L40Le	N35R	N35S	N35Si5	N35Si10
Kvartsit 11-16	594	426	450	432	418	486	409	413
Kvartsit 8-11	425	469	399	474	459	527	452	461
Naturgrus 0-8	450	623	665	300	915	646	849	812
Lättklinker	91	94	94	134	0	0	0	0
Finsand	0	11	33	11	10	8	0	0
Silikastoft	0	0	0	0	0	0	21	44
Anläggningscement	494	445	399	449	436	506	427	448
Flytmedel	3,1	2,3	0,78	2,5	2,4	5,6	2	2,1
Luftporbildare	0,074	0,067	0,060	0,067	0,065	0,430	0,064	0,067
Krympningsreducerande tillsatsmedel (alkohol)	0	0	0	0	0	10.1	0	0
Densitet	2205	2226	2200	1960	2393	2366	2310	2337
Lufthalt (%)	5,7	6,2	5.,6	4,9	4,9	5,5	5	5
Bindetid (h)	5	6	5	5	5	9	4	4
Vatten	124	127	135	128	124	134	164	157
Vct	0,25	0,29	0,34	0,29	0,28	0,26	0,38	0,35
Hållfasthet 28 d (MPa)	64,4	55,1	13,9	44,5	68,2	64,5	69,2	90,7
RF 28 d (%)	87,3	87,8	93,5	91,3	91,8	90,8	86,8	82,4

Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., Si = silikastoft. 5–10 = mängd (%), 30-40 = vct (%).



Figur 1: Försöksuppställning vid korttidsförsök, en vecka.

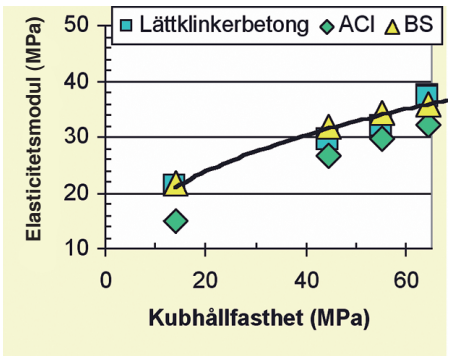
der. För provning av saltfrostbeständighet göts cylindrar vilka lagrades i vatten under 28 dygn före test. Efter vattenlagringen delades cylindern i tre delar och utsattes därefter för två fryscykler per dag. Avskalad mängd vägdes därefter vid 28 och 56 cykler. Proverna för kloridinträngningsmotståndet lagrades som proverna för saltfrostbeständighet. Kloridmigrationstalet bestämdes med metoden NT Build 492 (*Tangs* metod).

Bindetid, elasticitetsmodul, hållfasthet och RF

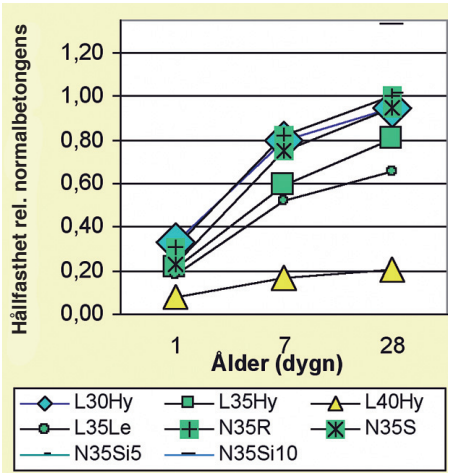
Betongprover med lättklinker uppvisade en tillstyvnadstider som var cirka fem timmar [2]. Betongprovet med krympreducerande tillsatsmedel erhöll cirka nio timmar i bindetid till följd av alkoholens retarderande förmåga (alkohol används ofta för att stoppa cementreaktionen i samband med hydratationsmätningar). *Figur 2* visar elasticitetsmodul som funktion av kubhållfastheten, det vill säga god överensstämmelse med Brittish Standard (BS), men något högre elasticitetsmodul än med American Concrete Institute (ACI). Följande samband konstaterades för lättklinkerbetong mellan elasticitetsmodulen, E, (GPa) och kubhållfastheten, f_c, (MPa):

$$E = 8{,}13 \cdot f_c^{0{,}36} \qquad (1)$$

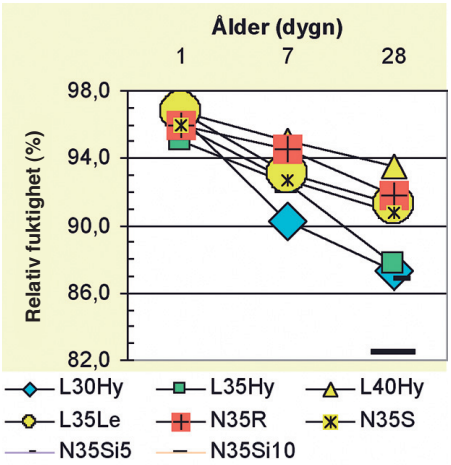
Tabell 1 och *figur 3* visar en stor inverkan av lättklinker på hållfastheten medan motsatt effekt erhölls vid inblandning av silikastoft. Med kemisk krympningsreducerare erhölls i det närmaste ingen minskning av hållfastheten jämfört med normalbetongens. *Figur 4* visar relativ fuktighet, RF, hos torkande kuber, det vill säga förvånande kraftig uttorkning hos prover med ingjuten vattenlagrad ballast. Troligen påskyndades uttorkningen hos lättklinkerbetongerna jämfört med normalbetongerna till följd av en ökad porositet, *figur 5*. Av figur 5 framgår även en kraftig effekt av silikastoft på uttorkningen (självuttorkning). Det var också helt logiskt att RF var förhållandevis högre för betong med kemisk krympningsreducerare eftersom denna retarderade hydratationen, det vill säga mer frysbart vatten



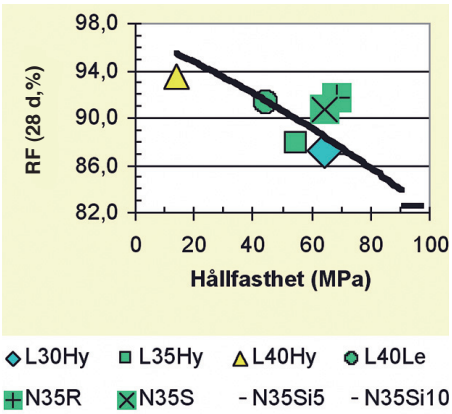
Figur 2: Elasticitetsmodul som funktion av kubhållfastheten. BS = Brittish Standard, ACI = American Concrete Institute.



Figur 3: Hållfasthet relativt normalbetong. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., Si = silikastoft. 5–10 = mängd (%), 30–40 = vct (%).



Figur 4: Relativ fuktighet, RF, vid uttorkning. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., Si = silikastoft. 5-10 = mängd (%), 30-40 = vct (%).



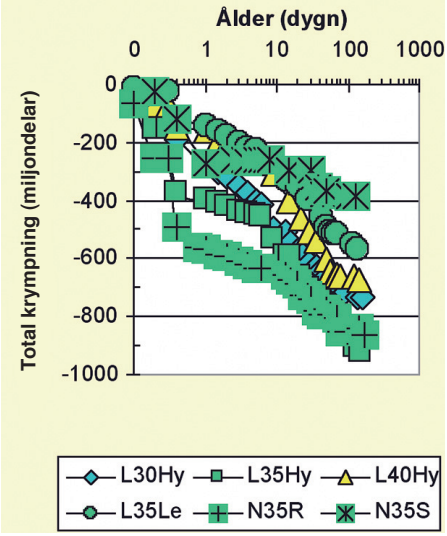
Figur 5: RF som funktion av hållfasthet. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., Si = silikastoft. 5–10 = mängd (%), 30–40 = vct (%).

finns kvar i betongens cementpasta än utan detta tillsatsmedel. Följande samband konstaterades för lättklinkerbetong mellan RF (procent) och kubhållfastheten, f_c (MPa):

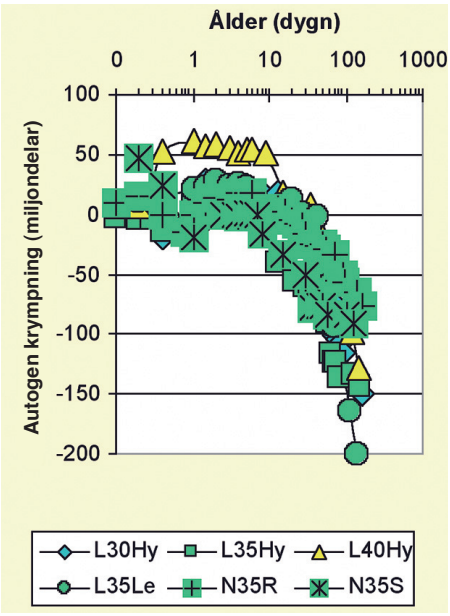
$$RF = -0{,}00045 \cdot f_c^2 - 0{,}1 \cdot f_c + 97 \qquad (2)$$

Krympning

Huvudsyftet med vissa krympningsreducerare metoder uppfylldes väl enligt *figur 6 på nästa sida*, dels med alkoholer, som hämmar hydratationen, dels med tillräcklig mängd vattenlagrad lättklinker i betongen, typ Le [2]. Krympningsmätningarna visade att såväl vattenlagrad lättklinker av typ Le och krympningsreducerande tillsatsmedel reducerade totala krympningen hos högpresterande betong till ungefärligen hälften jämfört med referensbetongens krympning. För betongprov med lättklinker berodde storleken på krympningen på mängden lättklinker som blandades i betongen. Detta blev tydligt då betongproverna luftlagrades. Att betongprov med lättklinker av typ Le uppvisades minst krympning beroende på att mängden lättklinker i detta betongprov



Figur 6: Fri total krympning hos provade betonger. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., 30–40 = vct (%).



Figur 7: Autogen krympning hos provade betonger. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., 30–40 = vct (%).

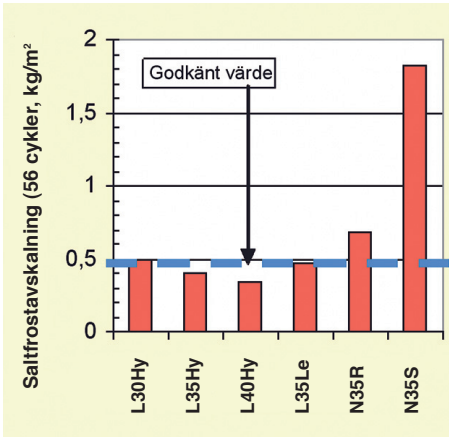
var större än i övriga betongprov med lättklinker. Lättklinker av typ Le hade även högre absorption än lättklinker av märket Hy. Som figur 6 visar var det speciellt den plastiska krympningen som påverkas då det inre härdningsvattnet tillsattes. *Figur 7* visar autogen krympning hos provade betonger. Betongprovet som användes som referens uppvisar minst autogen krympning och betongprov med lättklinker av märket Le erhöll störst autogen krympning, figur 7. Detta tyder på att vattnet i lättklinkern inte har minskat den autogena krympningen. I figur 7 kan man se att betong He040 och betong He030 hade nästan lika stor autogen krympning. Andra faktorer än bara det inre härdningsvattnet verkar alltså ha påverkat den autogena krympningen såsom elasticitetsmodulen. Betong med vattenlagrad lättklinker verkar inte ha påverkat den autogena krympningen avsevärt på längre sikt. Hy035 har högre andel lättklinker än betong Hy030 vilket skulle kunna visa att den större krympning som fås i Hy035 beror på dess lägre elasticitetsmodul. Betong Hy035 kunde alltså inte hålla emot krymprörelserna lika mycket som betong Hy030 gjorde. Detta antagande skulle även kunna förklara varför betong Le035 hade störst krympning trots sin större mängd inre härdningsvatten. För de betongprov med krympningsreducerande åtgärder och vct lika med 0,35 uppvisade betongprov med krympningsreducerande tillsatsmedel högst tryckhållfasthet, det vill säga även högst elasticitetsmodul och lägst autogen krympning vilket var logiskt.

Beständighet

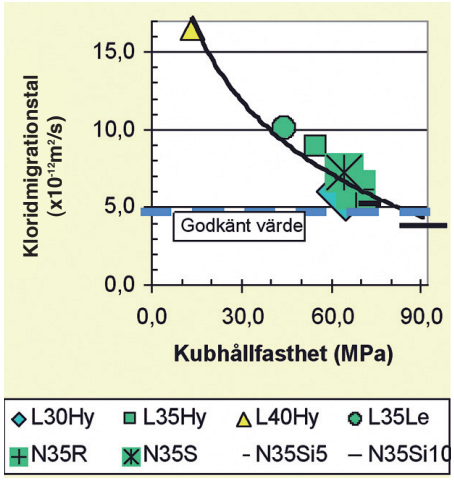
Figur 8 visar saltfrostavskalning för provade betonger [2]. Saltfrostbeständighetstestet visar att betongprov med krympningsreducerande tillsatsmedel får mycket dålig saltfrostbeständighet. Detta torde kunna förklaras av att betongen får en större mängd frysbart vatteninnehåll eftersom det krympningsreducerande tillsatsmedlet har reducerat ytspänningen i vattnet. Betongprover med vattenlagrad lättklinker uppvisade bäst saltfrostbeständighet vilket tydde på att den hade fått härda bättre och därmed skapat en tätare betong. Även det extra expansionsutrymme som skapades då vattnet i lättklinker tömdes på vatten kan ha fungerat som tryckutjämnare då vattnet frös. *Figur 9* visar resultaten från kloridinträngningstesten [2]. Resultat från kloridinträngningstestet visade att betongprov med krympningsreducerande tillsatsmedel inte gav ett högre kloridmigrationstal än referensprovet. För betongprover med vattenlagrad ballast fås däremot vid konstant vct lika med 0,35 ett klart högre kloridmigrationstal i jämförelse med referensprovet. De två betongprover med olika lättklinkermaterial och samma vct som provades uppvisade ingen skillnad i uppmätt kloridmigrationstal. Betongprov med lättklinker och ett lägre vct lika med 0,30 än referensbetongens vct lika med 0,35 hade ett kloridmigrationstal som var ungefär lika med referensbetongens. Betongprov med vattenlagrad lättklinker och högst vct lika med 0,40 uppvisade lägst kloridinträngningsmostånd. Även med referensbetongen var det svårt att nå ett acceptabelt kloridmigrationstal utan för att nå detta krävdes först tillsats av silikastoft i betongen. Silikastoftet ökade tryckhållfastheten hos betongen, det vill säga minskade porositeten vilket resulterade i ett lägre kloridmigrationstal, D, enligt följande samband:

$$D = 6{,}9 \cdot (5{,}1 - \ln(f_c)) \qquad (3)$$

där $\ln(f_c)$ betecknar naturliga logaritmen av kubhållfastheten (MPa) och D kloridmigrationstal (x10^{-12} m^2/s). ■



Figur 8: Saltfrostavskalning för provade betonger. Hy = Hydrocure, L = lättklinker, Le = Leca, N = normal, R = ref., S = krympningsred., 30–40 = vct (%).



Figur 9: Kloridmigrationstalet som funktion av kubhållfastheten.

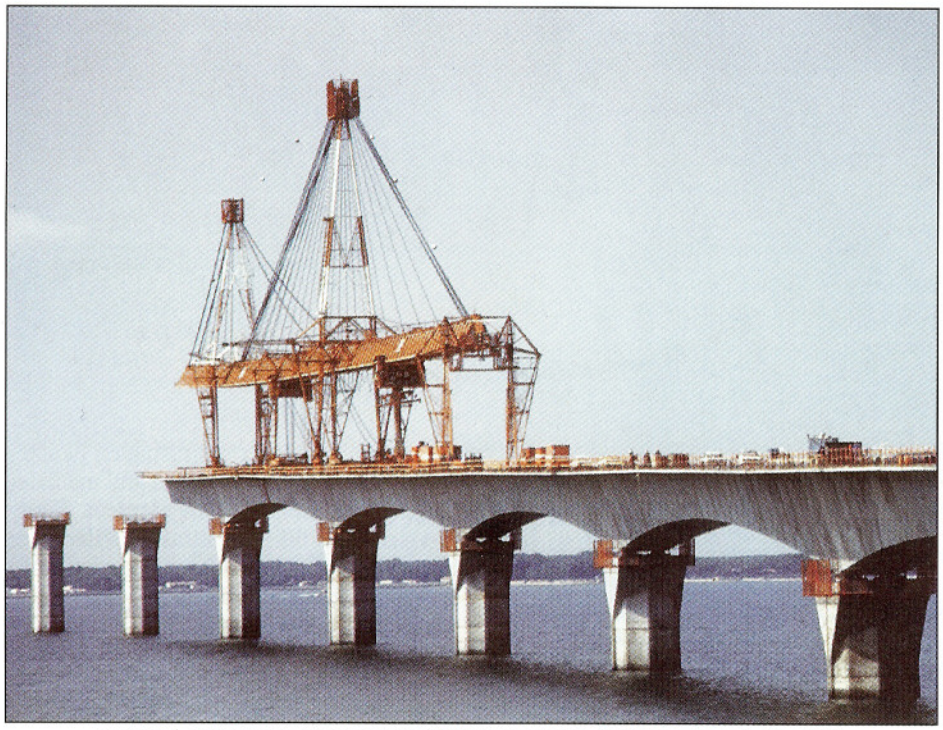
Referenser

[1] Betonghandbok, *Högpresterande betong – Material och utförande*, Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2000.

[2] P. Andersson, S. Nilsson, *Inverkan av krympningsreducerande åtgärder på krympning, hållfasthet och beständighet hos högpresterande betong*, TVBM-5062, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 20065, 76 sid.

Betong anpassad för ett effektivt byggande. Bygg & Teknik 7/96. 1996. Stockholm, 27-31.

Betong anpassad för ett effektivt byggande



Figur 1. Montage av element i HP betong till Rébron, Frankrike [2].

Genom att använda högpresterande (HP) betong kan byggaren undvika de besvärande långa väntetider för härdning och uttorkning som krävs för en normal betong. Eftersom "tid är pengar" inte minst inom bostadsproduktionen, kan merkostnaden i material för HP betong väl kompenseras. Inom anläggningssektorn ges ett exempel där en stor entreprenad togs hem trots ett högre pris tack vare att byggaren kunde förkorta byggtiden genom användning av HP betong.

I artikeln ges ett sammandrag av de fördelar som nås genom användning av HP betong. Exempel ges på praktiska tillämpningar, såväl vad gäller förtillverkade betongelement som platsgjuten betong. Redovisning sker av en åtta år gammal fransk bro, av dubbla gjutningar av balkar i samma spännbädd inom ett skift, av förkortade formrivningstider, av snabb uttorkning samt slutligen av en extremt snabb hållfasthetstillväxt i s k hattbalkar, allt som en följd av praktiska tillämpningar av HP betong inom byggnadsindustrin.



FOTO: ULF JONSSON

*Artikelförfattare är **Bertil Persson** vid Byggnadsmaterial, Tekniska Högskolan i Lund.*

Element till Rébron i Frankrike

Till Rébron utanför Rochelle i Frankrike förtillverkades det 798 st betongelement, vardera med en längd av 3,8 m och bredden 15,5 m. Betongsektionen bestod av en lådbalk med konsoler. "Match casting" tillämpades, dvs sektionen göts med föregående gjutetapp som form. Genom denna metod så kunde en i det närmaste perfekt passning erhållas för de skjuvkraftsupptagande förtagningar som erfordrades [1]. Parallellgjutning kunde således ej ske av elementen utan de producerades i den ordningen som de sedan monterades. "Match casting" tekniken styrde tidplanen. Vid upplaget monterades det kortare i det närmaste massiva element, på vilka den väldiga montagekranen vilade, *figur 1*.

Även pelarna tillverkades i HP betong, *figur 2*. Mitt i det 110 m långa spannet göts det ca 0,2 m (oarmerad) HP betong i toleransutjämnande syfte. Avståndet mellan dilatationsfogarna var 440 m, *figur 3*. Dilatationsfogen var 3,8 m excentriskt placerad i förhållande till spannmitt i syfte att undvika växlande tvärkrafter, *figur 4*. Ledande betongexpertis granskade till synes nöjda den nu åtta år gamla elementbyggda bron i HP betong, *figur 5*.

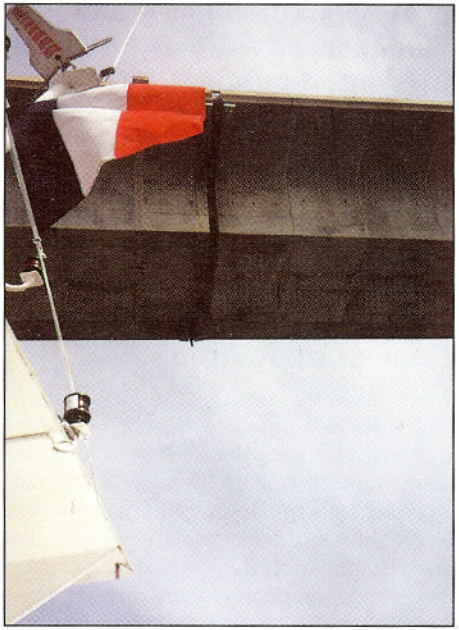
Den franska entreprenadfirman kunde i sitt anbud utlova en minskning av byggti-



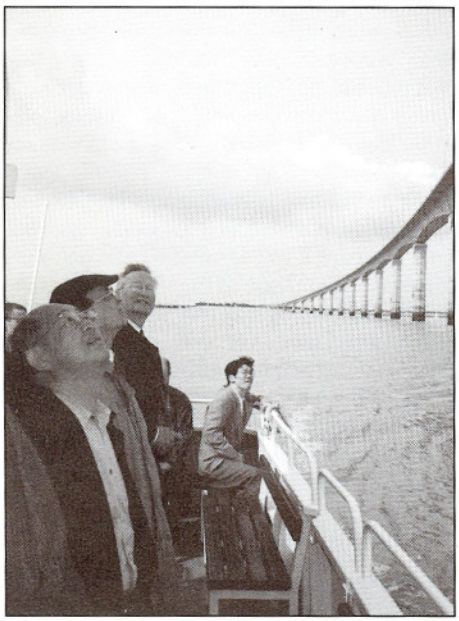
Figur 2. Även pelarna till Rébron utfördes i HP betong.



Figur 3. Dilatationsfogen placerades i vart fjärde spann (spännvidd: 110 m).

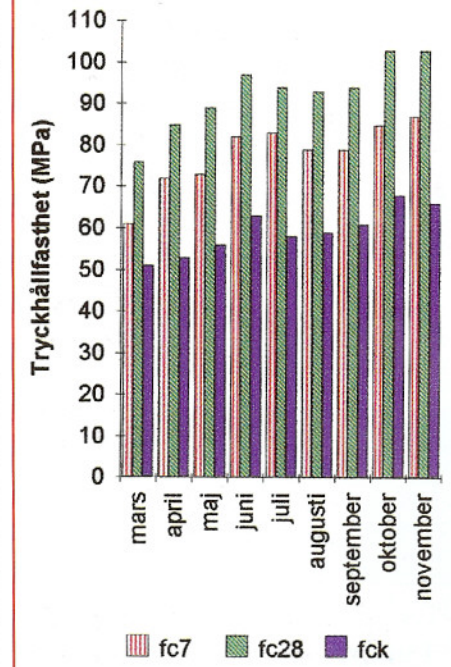


Figur 4. Detalj av dilatationsfog placerad 3,8 m excentriskt i förhållande till spannmitt.



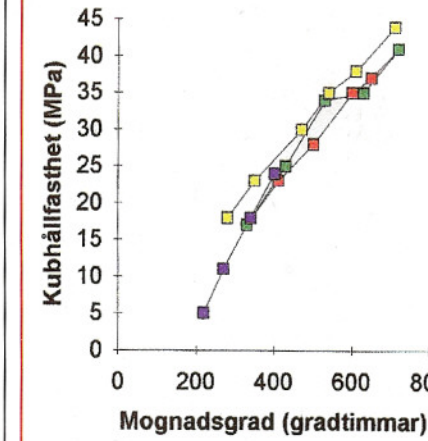
Figur 5. Från vänster professorerna Ei-Ichi Tazawa, Hiroshima, Surendra Shah, Evanston, Sven Kinnunen, Stockholm och Shingo Miyazawa, Ashikaga på plats vid Rébron utanför Rochelle i Frankrike.

den från 28 månader till 20 månader genom användning av HP betong. HP betongen innebar nämligen en minskning av avformningstiden med 33 % från 15 timmar till 10 timmar. Eftersom ön Ré är ett viktigt turistmål samt en ö med säsongsberoende grönsaksodling accepterade beställaren en högre entreprenadsumma och finansierade denna genom ökade intäkter från brotullar.



Figur 6. För HP betongen till Rébron redovisas, månadsvis, för år 1987, dels 7-dygns kubhållfastheten, f_{c7}, dels 28-dygns kubhållfastheten, f_{c28}, dels den karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{ck}. [1].

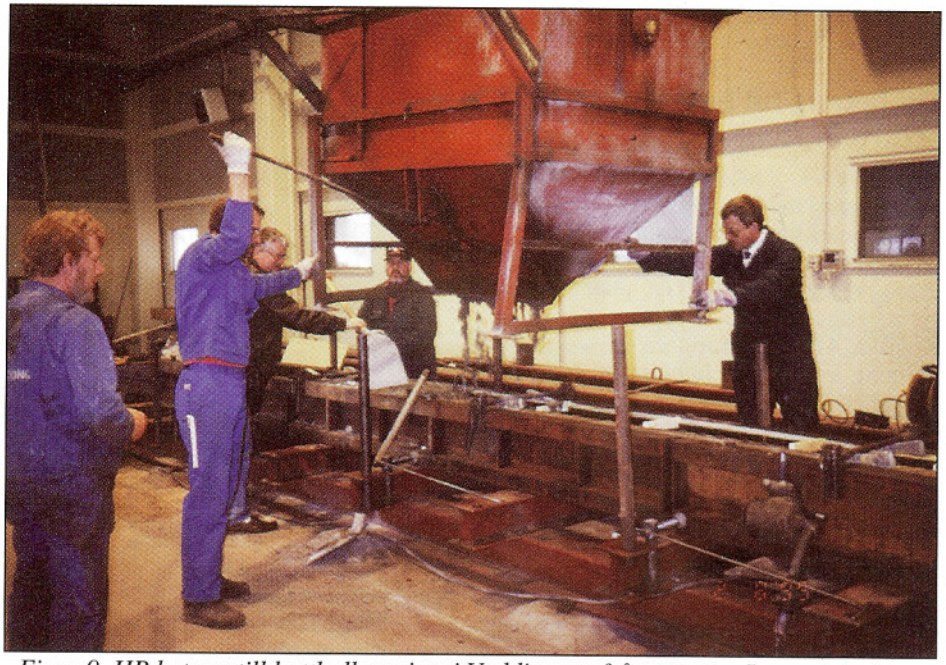
Betongrecept för Rébron ges i *Appendix 1* nedan. I *figur 6* visas, månadsvis, för år 1987, dels 7-dygns kubhållfastheten, f_{c7}, dels 28-dygns kubhållfastheten, f_{c28}, dels den karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{ck}. Ett målmedvetet kvalitetsarbete innebar att den karaktäristiska hållfastheten, f_{ck}, kunde ökas 16 Mpa under produktionstiden med bibehållet betongrecept



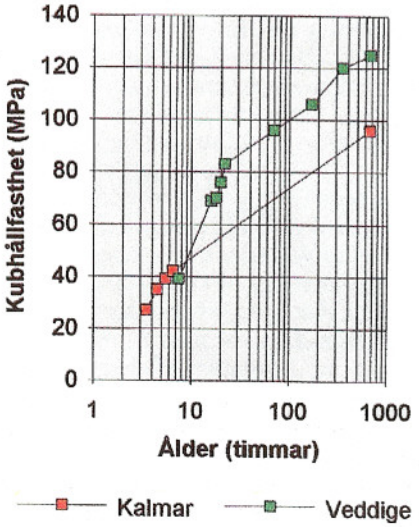
Figur 7, Tidig hållfasthetstillväxt hos betong från 4 st olika satser som funktion av mognadsgraden [1].

[2]. Även den tidiga hållfastheten ökade i motsvarande grad under den åtta månader långa produktionstiden av element. *Figur 7* visar den tidiga hållfasthetstillväxten hos betong från 4 st olika satser som funktion av mognadsgraden. *Figurerna 7-8* visar att man kunde producera betong av jämn, god kvalitet (totalt 35 000 m³). (Kubhållfastheterna i figur 6 och 7 har omräknats från cylinderhållfasthet genom division med faktorn 0,71 [3].)

Det krävdes lika lång tid att tillverka den 285 m långa montagekranen som de ca 800 st betongelementen dvs åtta månader. Kranen var självlanserande dvs då väl de massiva stödelementen hade monterats så kunde broelementen monteras parvis från stödet räknat, figur 1. Fogarna mellan elementen beströs med epoxi före det att montaget skedde. Kanterna på fogförtagningarna hade lutningen 45 ° inåt mot lådbalken där fogen var öppen. På så sätt kunde utpressning ske av eventuellt överskott av epoxi. Brons egentyngd (konsolmomentet) togs med 12 st horisontella linor vilka placerades inuti betongelementen. Trafiklasten upptogs med 19 st delvis lutande spännlinor placerade i rör i lådbalken. Möjlighet fanns att komplettera med ytterligare lutande linor efter behov. Så



Figur 9. HP betong till hattbalkar gjuts i Veddige av, från vänster, Lennart Andersson, Thomas Österberg, Bo Wiberg och Gunnar Rise.



Figur 8. Den snabba hållfasthetstillväxten möjliggjorde avspänning vid 50 Mpa redan fem timmar efter gjutning i Kalmar [4] alternativt 20 timmar efter gjutning i Veddige (80 Mpa) [3].

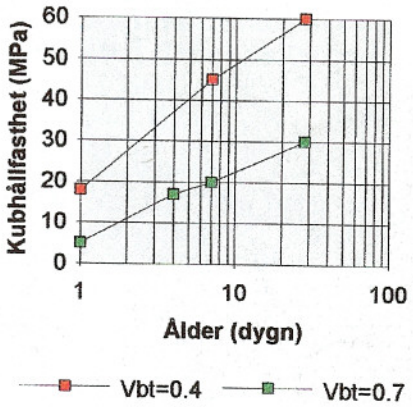
hade dock hitintills ej skett. Krypningen hos brobetongen var osedvanligt liten [2]. Samtliga linor hade diametern 15 mm. Injektering skedde runt linorna efter uppspänning varför s k efterspänning ej var möjlig.

Två gjutningar av HP betong per skift i samma spännbädd

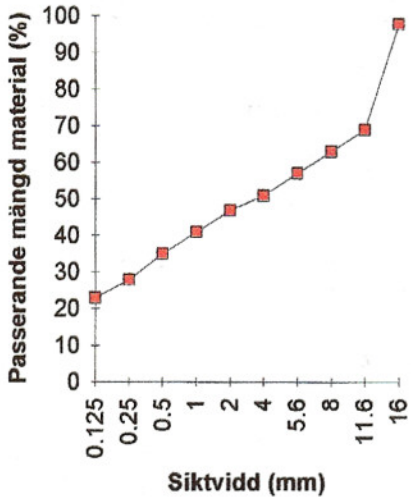
Det var av stort intresse att åstadkomma omgjutning av betongelement i samma spännbädd inom samma skift samt att spänna av ett av de bägge elementen dessemellan. Av denna anledning tog LTH Byggnadsmaterial fram ett recept för HP betong baserat på snabbcement, silikastoft samt flyttillsats, Appendix 1 [4]. Produktionen av balkarna skedde som en del av ordinarie tillverkning vid Skanska Prefab AB, Kalmar. Den snabba hållfasthetstillväxten, Figur 8, möjliggjorde avspänning redan fem timmar efter gjutning. Denna möjlighet utnyttjades dock ej eftersom balkarna i HP betong göts i serie med balkar utförda i normal betong. En minskad formtid hade inneburit en i stort sett fördubblad produktion i spännbädden vilket i sin tur hade inneburit en väsentlig produktivitetsökning. Högt formutnyttjande är A och O i en elementfabrik, där formparken utgör det största investerade kapitalet.

Fördubblad sluthållfasthet med nuvarande produktionsteknik

Det var även av ett stort intresse att studera huruvida betongens maximala sluthållfasthet kunde fördubblas med användning av nuvarande produktionsteknik. För detta ändamål tillverkades ett stort antal förspända betongbalkar med hattformat tvärsnitt vid Strängbetong AB, Veddige. Objektets tvärsnitt var endast 300 x 350 mm^2. Förspänningskraften erhölls medelst 20 st linor (12 mm) vilka spändes till 135 kN vardera. Avspänningshållfastheten var 80 MPa, vilken erhölls ca 20 timmar efter gjutning vid användning av HP betong, figur 8. Betongen optimerades vid LTH Byggnadsmaterial, Appendix 1; bl a kompletterades receptet med filler [3]. HP betong innehåller ofta en större stenandel än vad normala betonger gör varför fillerfraktionen minskar i HP betonger. Det är således ofta fördelaktigt att använda sig av en smärre tillsats av filler vid proportionering av en HP betong. Den sålunda



Figur 10. Jämfört med normal betong kunde byggentreprenören dra nytta av HP betongens snabba hållfasthetstillväxt [5].



Figur 11. Partikelfördelningen i betong till Potatisåkern optimerades vid LTH Byggnadsmaterial [7].

optimerade betongen blev synnerligen lättgjuten, *figur 9*. Betongen hade tendenser till separation, men någon sådan kunde ej konstateras i samband med den efterföljande brottprovningen.

Snabb avformning spin off-effekt vid fullskaleförsök (snabbtorkande HP betong)

Det var av ett stort intresse att i fält kontrollera i laboratorium framtagna uttorkningsförhållanden för HP betong. Av denna anledning uppförde BPA AB under åren 1992 och 1993 två identiskt lika 5-vånings bostadshus i Uppsala [5]. Bjälklagen i ett av husen tillverkades i normal betong med ett vattenbindemedelstal, vbt = 0,7. (Vbt = vattenbindemedelstal = vattenmängd/bindemedelsmängd). Det andra husets bjälklag göts i HP betong, Appendix 1. Efter en viss inkörningsperiod upplevdes HP betongen som lika lättgjuten som den normala betongen. Inga ergonomiska problem noterades [5].

Förutom avsevärt förkortade uttorkningstider för HP betongen jämfört med en normal betong kunde byggentreprenören även dra nytta av HP betongens snabba hållfasthetstillväxt, *figur 10* [5]. Bjälklagsformar kunde rivas inom ett dygn jämfört med fyra till fem dygns formrivningstid för normal betong. I och med den tidiga formrivningen så kunde formparken utnyttjas på ett effektivare sätt; jämför Kalmarförsöket ovan. En kalkyl utförd av betongleverantören, Betongindustri AB, gav vid handen att optimalt utnyttjad HP betong vid de bägge husen skulle ha inneburit en nettobesparing om ca 35 kr/m² bjälklag [5] eller ca en halv miljon kronor räknat på hela projektet. (Merkostnaden för HP betongen hade då avräknats.) Till denna besparing kom en ökning av fuktsäkerheten i bjälklagen och därmed i byggnaden som helhet.

HP betong till bostadsprojektet Potatisåkern, Limhamn

I ett av de mest omskrivna samt TV/radio-uppmärksammade bostadsprojekten i landet användes det snabbtorkande HP betong inte endast i bjälklag utan även till vissa väggar [6]. Byggentreprenören, Skanska AB, fann förutom en snabb uttorkning av fukten i bjälklagen, (relativa fuktighet, RF < 80 %), även fördelar med en god uttorkning av betongväggar runt t ex duschplatser före kakelsättning i och med att man på så sätt undvek besvärande krympsprickor. Partikelfördelningen i den färska betongen till Potatisåkern, Appendix 1, optimerades vid LTH Byggnadsmaterial, *figur 11* [7]. Förutom en minskning av cementmängden med ca 50 kg/m³ så noterade betongleverantören Sydsten AB ett minskat antalet plastiska krympsprickor efter det att betongoptimeringen hade utförts [8].

Byggentreprenören kunde genom att använda sig av HP betong helt bortse från annars oftast besvärande långa uttorkningstider för normal betong samt öka formutnyttjandet. I likhet med Uppsalaerfarenheterna så tillväxte hållfastheten mycket snabbt. Även vid en låg omgivningstemperatur, ca 2 °C, kunde formrivningen ske vid två dygns ålder [8], *figur 12*. Den stora flytmedelsdoseringen innebar dock i kombination med låg omgivningstemperatur en viss retardation av härdningen [8].

Tidig hållfasthet; inverkande parametrar

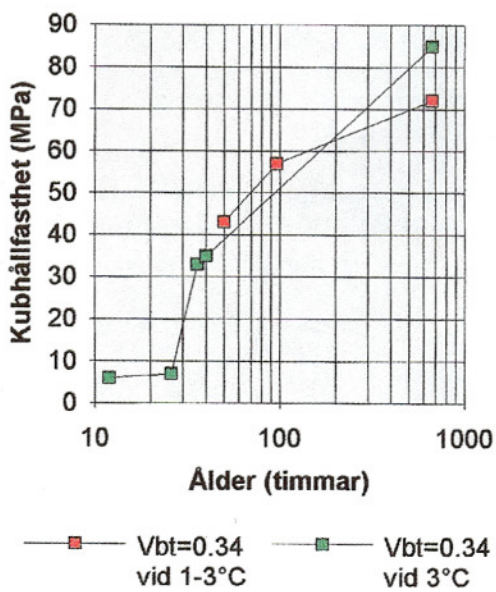
Självfallet är temperaturen den mest avgörande parametern vad gäller att åstadkomma en snabb hållfasthetstillväxt hos betong. Det var emellertid även intressant att klargöra betongreceptets inverkan på hållfasthetstillväxten. Åtta betonger studerades vid LTH Byggnadsmaterial. Sex av recepten innehöll ett stenmaterial bestående av kvartsitisk sandsten medan 1 st recept innehöll grovkornig granit och ett natursingel. Inverkande parametrar på betongens tidiga hållfasthet, såsom vattencementtalet, vct, inblandning av silikastoft, ballasttyp och luftinblandning, studerades. Betongen proportionerades med en optimal partikelfördelning samt tillverkades under laboratorieförhållanden. Ca 400 st 100 mm:s betongkuber göts. Efter avformning förseglades kuberna med 2 mm butylduk runt om. Härdningstemperatur var 20 °C med en högsta inre temperatur av 24 °C under det första dygnet. I *figur 13* visas hållfasthetsutvecklingen fram till 28 dygns ålder för de olika betongblandningarna.

Följande teoretiska samband erhölls för kubhållfastheten de 28 första dygnen efter gjutning:

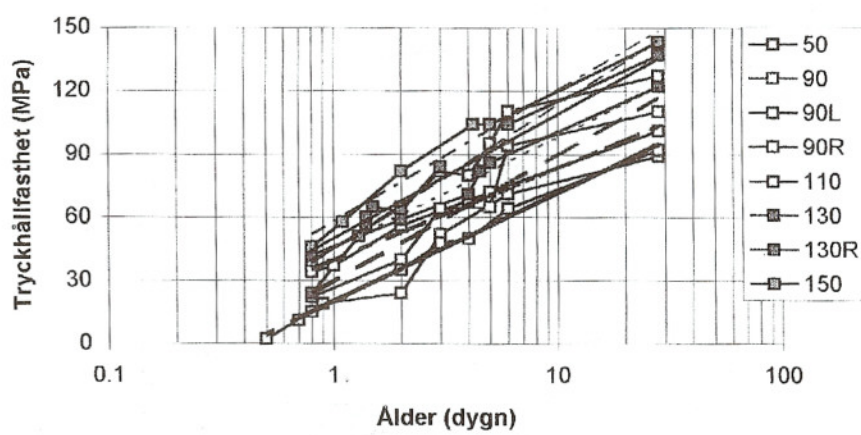
$$f_c = k_B \cdot k_L \cdot k_S \cdot 12 \cdot [(2{,}5\text{-}w/c) \cdot lnt - 20 \cdot w/c + 10)] \quad (1)$$

där:

f_c betecknar kubhållfastheten (Mpa)



Figur 12. Även vid en låg omgivningstemperatur, ca 2 °C, kunde en formrivning ske vid två dygns ålder [8].



Figur 13. Hållfasthetsutvecklingen hos de olika betongblandningarna [9].

k_B = 1 för kvartsitisk sandsten;
k_B = 0,9 i övrigt
k_L = 0,8 för luftinblandad betong (5 %);
k_L = 1 i övrigt
k_S = 0,9 för 5 % silikastoft;
k_S = 1 för 10 % silikastoft
lnt betecknar den naturliga logaritmen av betongens ålder {0,6 < t < 28 dygn}
t betecknar betongens ålder (dygn)
w/c betecknar vattencementtalet, vct {0,25 < w/c < 0,37}

Slutsatser

I artikeln redovisas produktionstekniska fördelar vid användning av högpresterande (HP) betong vid 5 st fältprojekt. Betongen var väl anpassad till ett effektivt byggande. Vidare ges en sammanfattning av de mest avgörande faktorerna för snabb hållfasthetstillväxt. Följande slutsatser drogs:

1) En stor broentreprenad togs hem tack vare att entreprenören med användning av HP betong kunde förkorta byggtiden med 30 % jämfört med byggtiden vid användning av normal betong.

2) Genom användning av HP betong möjliggjordes tidig avspänning fem timmar efter gjutning dvs samma form skulle ha kunnat nyttjas två gånger per skift.

3) Betongen till 2 st hattbalkar nådde 80 MPa redan efter 20 timmar (28-dygnshållfasthet: 122 MPa).

4) En nettobesparing om en halv miljon kronor blev möjlig i samband med att 2 st bostadshus i fem våningar uppfördes i och med att HP betong användes (formrivningstiden minskade med 80 %).

5) I ett bostadsprojekt om en kvarts miljard kronor användes det snabbtorkande HP betong inte endast i bjälklag utan även till vissa väggar. Byggentreprenören fann, förutom en snabb uttorkning av fukten i bjälklagen (RF < 80 %) även fördelar med en god uttorkning av betongväggar.

6) Frånsett värmehärdning och ett lågt vattencementtal, vct, var god ballast och tillsats av silikastoft de viktigaste förutsättningarna för att erhålla en snabb hållfasthetstillväxt. ■

Appendix 1. Betongrecept etc för fältprojekt (kg/m³ torra material).

Projekt/Material	Ré	Kalmar	Veddige	Uppsala	Limhamn
Ballast:					
Makadam 16–27 mm				375	
Makadam 8–16 mm			1 040	295	790
Makadam 8–12 mm		1 260			
Makadam 6–20 mm	1 200				
Makadam 4–8 mm					320
Grus 0–8 mm		550	620	1 005	380
Sand 0–3 mm	800				
Filler			120		210
Bindemedel:					
Anläggningscement			510		
Snabbcement	400	450			
Standardcement				450	465
Silikastoft, granulat	30	45	51	15	
Tillsatsmedel, etc:					
Flytmedel (melamin formaldehyd)	5	5	9	3	4,5
Luftporbildare (vinsol harts)					0,07
Vbt	0,37	0,35	0,25	0,38	0,34
Vct	0,40	0,39	0,28	0,39	0,35
Kubhållfasthet, 28 d (Mpa)	95	96	122	60	78

Appendix 2. Betongrecept etc för laboratorieförsök (kg/m³ torra material)

Material /Littera	50	90	90L	90R	110	130	130R	150
Granit 12–16 mm						1065		
Kvartsitisk sandsten 12–16	460	965	930		1020	1005		1060
Singel 8–16 mm				1075				
Kvartsitisk sandsten 8–12 mm	460							
Grus, Bålsta 0–8 mm				780			770	
Grus, Åstorp 0–8 mm	810	850	790		765	765		750
Anläggningscement, Degerhamn Std	430	445	450	450	500	525	480	540
Silikastoft, granulerat	22	45	45		50	53		54
Silikastoft, slurry (torrhalt)				23			48	
Luftporbildare (vinsolharts, torrhalt)	0,02		0,04					
Flytmedel (melaminformaldehyd, torrhalt)	2,8	5,5	4,3	5,3	4,8	6,4	7,8	9,6
Vbt	0,36	0,33	0,33	0,31	0,28	0,27	0,27	0,22
Vct	0,38	0,37	0,37	0,33	0,31	0,30	0,30	0,25
Lufthalt (%)	4,0	0,9	4,5	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
Densitet (kg/m³)	2330	2475	2380	2480	2500	2510	2520	2540
Sättmått (mm)	140	160	170	145	200	230	45	45
Kubhållfasthet 28 dygn (MPa)	89	110	92	101	127	137	122	143
Kubhållfasthet 1 år (MPa)	101	124	108	115	139	144	135	162
Kubhållfasthet 2 år (MPa)	112	127	121	115	145	149	131	162

Referenser

[1]. *G. Cadoret; P Richard.* The Ré Island Bridge. Full scale use of High Performance Concrete in Public Works. From Material to Structure. E & Spon. Chapman and Hall. London. 1993.

[2]. *Olivier Martin.* Personlig information. Bouygues. 1996.

[3]. *Bertil Persson.* Creep of High-Performance Concrete. Konsortiet Högpresterande betong (Cementa, Elkem, Euroc Beton, NCC Bygg, Skanska, Strängbetong). Rapport M6:28. LTH Byggnadsmaterial. Lund. Preliminär 1996.

[4]. *Fredrik Holst; Per-Henrik Myrenfelt.* Högpresterande betong för rationell elementproduktion. Rapport TVBM-5022. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[5]. *Jan Byfors.* Snabbtorkande betong i bostadshus – lyckat projekt i Uppsala. BETONG 1/1994.

[6]. *Ulla Bengtsson.* Potatisåkern Malmös nya landmärke: Lyxig standard och vackra detaljer. Tidskriften Byggindustrin 15.96. 1996.

[7]. *Bertil Persson.* Partikelfördelning i färsk betong. Rapport U95.08. LTH Byggnadsmaterial. 1995

[8]. *Jan Persson.* Personlig information. Sydsten AB. Malmö. 1996.

[9]. *Bertil Persson.* Basic Creep of High-Performance Concrete. Konsortiet Högpresterande betong (Cementa, Elkem, Euroc Beton, NCC Bygg, Skanska, Strängbetong). Rapport M6:14. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1995.

Betong kan brandsäkras med plastfibrer, Husbyggaren 2/2008, 24-28

BRAND/BETONG Betongens akilleshäl har visat sig vara spjälkning även vid standardbrand. Så mycket som 1 cm per minut kan försvinna genom en så kallad ”pop-corn”-effekt. Beständig betong fås genom att blanda in plastfibrer av polypropylen.

Betong kan brandsäkras med plastfibrer

Av BERTIL PERSSON, Tekn Dr, *Bara*

Mont Blanc-tunneln och St Gotthardtunneln är exempel där betongen skadades mycket svårt efter brand i ett stort antal fordon. Eurotunneln skadades år 1996 efter brand i cellplastlastade lastbilar och fick stängas under ett år. Av Stora Bälttunnelns vägg återstod endast någon cm efter en så kallad hydrokarbonbrand.

Ett sätt att lösa problemet med brandspjälkning är keramik isolering av tunnelväggen. Denna metod kan dels vara oekonomisk, dels medföra att isolerplattor faller ned på passerade fordon. För tretton tio år sedan, i samband med uppförandet av skyskrapor i Frankfurt, presenterades en ny metod som gjorde betongen i sig själv beständig mot brandspjälkning, nämligen inblandning av plastfibrer av polypropylen, *ppf*, (Diedrich m.fl., 1995). Se bilderna 1–2.



FÖRFATTAREN

Bertil Persson, docent i byggnadsmaterial. Har tidigare arbetat på LTH i 17 år, samt på Skanska i 19 år.



Bild 1. Brandtest inför skyskrapor i Frankfurt. Foto: VTT Brandteknologi, Espo.



Bild 2. Pelare efter brandtest.
Foto: VTT Brandteknologi, Espo.

Miljarder fibrer

I och med Citytunneln i Malmö, och Hallandsåstunneln har *ppf*-metoden kommit till Sverige för att stanna. Vid enbart persontågtrafik kan så lite som 1 kg *ppf* per kubikmeter betong vara tillräckligt av små *ppf*, 18 mikrometer med längd av 0.6 cm, vilka dock till följd av sin litenhet ger ett antal av en (1) miljard fibrer, tabell 1 (Jönsson U., 2007).

Genom en smärre justering av receptet blev det möjligt att bibehålla betongens gjutbarhet. Det krävdes dock avsevärd optimering för att få stabila lufthalter och därmed göra betongen frostbeständig, vilket var ett krav som, förutom brandbeständigheten, ställdes för Citytunneln (Jönsson U.; Munch Petersen C., 2007).

Betongen till Citytunneln hade en saltfrostavskalning om cirka 0.1 kg per kvadratmeter mot stipulerade 0.5 kg per kvadratmeter, tabell 1. Kloriddiffusionskoefficienten för betongen till Citytunneln varierade mellan 2 och $7x10^{-12}$ kvadratmeter per sekund. Normalt krävs $5x10^{-12}$ kvadratmeter per sekund för utsatta konstruktioner. (Jönsson U.; Munch Petersen C., 2007).

Även andra försök bekräftar god frostbeständighet även för betong utan luftporbildare och med vattencementtal, vct = 0.40. Luftporbildare krävs normalt för att erhålla god frostbeständighet. (Kalinowski M.; Trägårdh, J., 2007).

Alla betonger med minst 1.5 kg *ppf* per kubikmeter betong klarade kraven i saltfrostprovningarna. I betongerna med *ppf* uppmättes även lägre kloridtransport än hos motsvarande betong utan *ppf* (Kalinowski M.; Trägårdh, J., 2007).

Prov bekräftade brandsäkerhet

Brandtester vid MFPA i Leipzig visade att brandspjälkningen med 1 kg *ppf* per kubikmeter betong höll sig inom stipulera-

Tabell 1. Sammansättning av betong C40/50 till Citytunneln, Malmö (Jönsson U., 2007).

Material	Fabrikat/Ursprung	Mängd (kg per kubikmeter)
Cement	Degerhamn Anläggning	370
Silika	Elkem Silicaslurry	25
Sand	Fakse Bugt 0/4	658
Makadam	Dalby 4/8	220
	Dalby 8/16	343
	Dalby 16/25	594
Flyttillsats	Grace Peramin F	5,18
	Grace Peramin HPA	0,18
Vatten	Malmö/Landskrona	140
ppf-fiber	Ignis	1

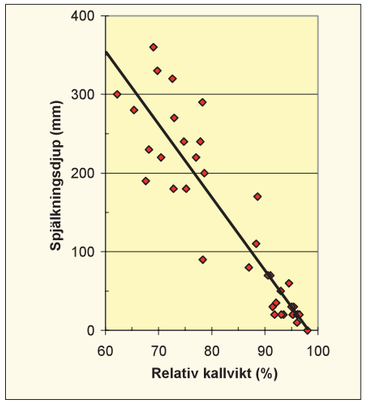
Tabell 3. Villkor för åtgärder beträffande spjälkning hos betong (Silfwerbrand J., 2005).

	Betong med kalkstensfiller > 25 viktsprocent av cementmängden (som definierat under punkt 1)	Betong med kalkstensfiller < 25 viktsprocent av cementmängden (som definierat under punkt 1)
Max. fuktkvot	2.5 procent	2.5 procent
Max. tryckhållfasthetsklass*	C50/60	C80/95
Max. tryckpåkänning vid brandlastfallet	15 MPa	25 MPa

*Högre tryckhållfasthet medför större risk för spjälkning.

Tabell 2. Fuktkvot i parallellprov, i procent. (Kusterle m. fl., 2004).

Härdningssätt	Mitt i prov	Mot ugn
Uttorkning, luft	5.1, 5.5, 5.8	2, 3.2, 3.3
Uttorkning 50°C	4.9, 5.4, 7	4.3, 4.7, 4.7
Vattenlagring	5.3	5.2



Figur 1. Spjälkningsdjupet versus relativ kallvikt efter spjälkning (Kusterle m. fl. , 2004).

de krav vid en brandbelastning motsvarande den som erhålls vid persontågstrafik (Jönsson U.; Munch Petersen C., 2007). Större betongplattor med dimensionerna 3.6 x 1.8 x 0.35 meter eller 1.8 x 1.2 x 0.40 meter provades med som mest fyra cm spjälkning under den första halvtimmen efter branden (Jönsson U.; Munch Petersen C., 2007).

En viktig faktor för att nå frostbeständighet var tillräcklig blandningstid vilket gjorde att kapaciteten i betongstationen minskade avsevärt. Det krävs också ny doseringsutrustning för plastfibrerna vilket tillsammans med fler blandare ökar kostnaderna för betongen något jämfört med betong utan *ppf*.

Vid transport av brandfarligt gods är dock 1 kg *ppf* per kubikmeter betong inte tillräckligt utan troligen krävs 1.5 eller i vissa fall 2 kg *ppf* per kubikmeter betong. Till exempel i Monc Blanc-tunnel brann en lastbil med tolv ton mjöl och åtta ton margarin vilket ledde till att 23 lastbilar och 23 personbilar blev totalt utbrända och till att 1 500 m av tunneln skadades svårt.

Frontalsammanstötningen i St Gotthardtunneln ledde till att 13 lastbilar, fyra skåpbilar och sex personbilar brändes ut samt till ett 170 meter långt mellanbjälklag att störtade samman. Cirka 300 meter av tunneln skadades. Eurotunneln skadades på en sträcka av 500 meter med ett spjälkningsdjup av 27 cm.

Jämfört med kostnaderna för dessa skador är kostnaden för 1–2 kg *ppf* per kubikmeter av all tunnelbetong givetvis ringa, förutsatt att betongleverantörer först anskaffar relevant utrustning för att tillverkning av fiberbetongen ska kunna ske.

Har testat tunnelbetong

Österrikiska försöksresultat anger 2 kg *ppf* per kubikmeter betong C25–30 för att helt förhindra explosiv spjälkning fram till armering hos tunnelbetong, oberoende av fuktinnehållet (Kusterle m.fl., 2004). För högpresterande betong ska doseringen av *ppf* ökas om så erfordras.

Anledningen till generaliteten i rekommendationerna av *ppf*-inblandning är omfattande spjälkning hos betong utan *ppf*, oberoende av armeringsmängd, ballasttyp, fuktkvot, påkänning, upphettningskurva, etcetera, se figur 1.

Stort spjälkningsdjup

I figur 1 har spjälkat betongskikt jämförts med brandbelastad betongmängd. Spjälkningsdjupet var stort trots kraftig ytarmering, upp till 36 cm – i allmänhet cirka 20 cm då *ppf* inte fanns i betongen. Betongformen med armering visas i bild 3.

Använda temperatur/tidsutvecklingskurvor för brand ISO 834 (standardbrandkurva), LTI eller RWS. Upphettning skedde med en brännare placerad i ena långsidan av en underliggande ugn med rökutgång på motstående sida. Betongplattor med storleken 1.8 x 1.4 meter och tjockleken 30 cm eller 50 cm användes, se bild 4. I längdriktningen spändes med 0.5 MPa samt transversellt med tryckpåkänningar varierande mellan –1.16 och 9 MPa. Spänning skedde endera symmetriskt eller osymmetriskt med spännstag i stål som förankrades mot stålplattor på utsidan av provet. Sidorna av provet samt den brandoexponerade undersidan (1.2 x 0.8 meter) kläddes med plåt i syfte att simulera ensidig brandbelastning.

Vägning skedde före och efter provning, efteråt i såväl varmt som kallt tillstånd, se bild 5. Mätningar skedde även av spjälkningsdjup, se bild 6.

I provet mättes temperaturutvecklingen på flera djup från ytan. Hållfasthet mättes på utborrade prover, med diameter 10 cm. Enligt undersökningen förefaller dock mellan 1.0 (prov 51, ytfuktkvot = 2 procent) och 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* (ytfuktkvot 5.2 procent) ha varit en tillräcklig mängd *ppf* även om 2 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* rekommenderas.

Ökningen av armeringsmängden i en riktning från diameter 1.4 cm till diameter 2 cm förhindrade inte spjälkning (prover 19-22), endast inblandning av 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* (pro-

Fortsättning s. XX ▶



Bild 3. Form för tunnelbetong med armering: Foto: Wolfgang Kusterle.



Bild 4. Tunneldel i betong ovanpå brandugn med 6.5 ton i förspänningskraft .
Foto: Wolfgang Kusterle.

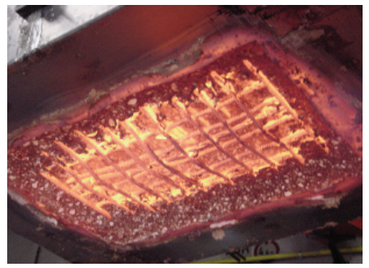


Bild 5. Vägning skedde före och efter provning, då även i varmt tillstånd.
Foto: Wolfgang Kusterle.

ver 23–26) kunde förhindra spjälkning. I prover 54–55 där armeringen ökades enormt kunde spjälkningen begränsas till 6 cm även utan inblandning av *ppf*. Då sprutbetong med *ppf* användes spjälkades denna plus betong till 15 cm:s djup (vattenlagring). Ingen spjälkning uppstod för luftlagrad betong belagd med sprutbetong med 2.0 kg per kubikmeter *ppf*.

Fuktkvoten bestämdes vid 28 dygns ålder genom att en parallellgjuten provkropp delades mitt itu med uttagning av prover tvärs genom provet. Fuktproverna samlades i plastpåsar som sedan transporterades till Innsbruck, till Institutet för betongbyggnad, byggnadsmaterial och byggnadsfysik, för vägning av prover före och efter upphettning till 105 grader Celcius.

Tabell 2 visar uppmätt fuktkvot vid 28 dygns ålder i proverna medan brandprovningarna företogs upp till 360 dygns ålder. Fuktkvoten var hög trots varierande torkningssätt vilket i sin tur beror av ett högt vct. Emellertid återspeglar uppmätt fuktkvot gängse förhållanden i österrikisk tunnelbyggnadsteknik, vattentät betong med hög fillerhalt och ett högt vct.

Explosiv spjälkning utan fibrer

I tabell 2 visas fuktkvoten såväl i ytan av provet som mitt inuti. Ytfukten är avgörande eftersom explosiv spjälkning först sker allra närmast ytan av betongen.

Om ytan av betongen förblir intakt motstår även betongens inre delar explosiv spjälkning vid brand. Explosiv spjälkningsrisk förelåg inte inom 50 mm från ytan i *ppf*-betong inom 80 minuter om ytan behölls intakt – inte inom 50 minuter för betong utan *ppf* där dock ytan spjälkades av varför riskzonen då successivt flyttades inåt.

För betong utan *ppf* påbörjades den explosiva spjälkningen med RWS-kurvan redan efter 2–4 minuter till följd av den stora temperaturökningshastigheten, efter 3–5 minuter med LTI-kurvan samt efter 6–12 minuter med ISO 384-kurvan.

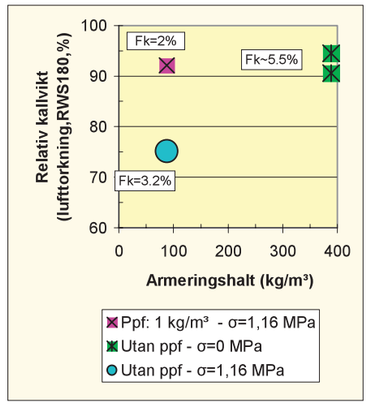
Störst explosiva spjälkningshastighet uppmättes för LTI-kurvan efter vattenlagring av betong med yttre påkänning 1.16 MPa: cirka 30 cm per timme. Den explosiva spjälkningen fortsatte oförhindrad av den normalt förekommande armeringen, cirka 100 eller cirka 200 kg per kubikmeter. Kraftigt ökad armering kunde bemästra den explosiva spjälkningen, cirka 400 kg per kubikmeter (Kusterle m.fl. , 2004). Se figur 2.

Figur 2 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 180-kurvan som funktion av armeringshalten vid varierande påkänning. Det är mer ekonomiskt att använda 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* än att öka armeringshalten med cirka 300 kg per kubikmeter för att bemästra explosiv spjälkning intill armeringen. Figur 3 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120-kurvan som funktion av påkänning vid varierande mängd *ppf*.

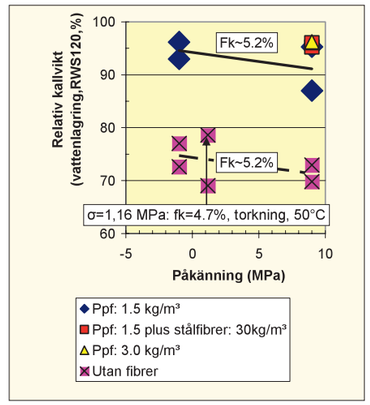
Figur 3 visar att stålfibrer inte inverkade på explosiv spjälkning. Påkänningen hade liten inverkan på mängden spjälkad betong åtminstone upp till 9 MPa – en för tunnelbetong rimlig påkänning. Inblandning av 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* bemästrade den explosiva spjälkningen. Utan *ppf* fortsatte spjälkning förbi armeringsskiktet på mindre än 10 minuter och sedan till mer än 30 cm:s djup. Med *ppf* uppstod endast sprickbildning i ytan samt spjälkning på cirka 2 cm, i vissa fall lokalt upp till 5 cm efter två timmar men inte förbi armeringsskiktet i något fall (Kusterle m.fl. , 2004).

Det står klart att påkänningen hade mycket mindre inverkan på mängden explosivt spjälkad betong än vad inblandning av *ppf* hade.

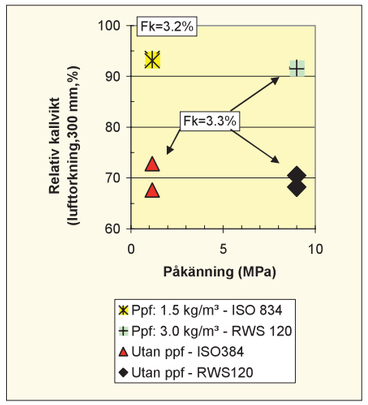
Figur 4 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120- och ISO384 kurvorna versus påkänning. Varierande mängd 18 mikrometer *ppf* visas med 30 cm betong. Det förefaller som om 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* var tillräckligt även i detta fall för att bemästra spjälkningen. Såväl temperaturer enligt



Figur 2. Relativ kallvikt efter provning med RWS 180-kurvan versus armeringshalten. Varierande påkänning. *Ppf* 18 mikrometer. 500 mm btg. Fk = ytfuktkvot, 28 dygns ålder, i procent. (Kusterle m.fl. , 2004).



Figur 3. Relativ kallvikt efter provning med RWS 120-kurvan som funktion av påkänning. Varierande mängd *ppf* 18 mikrometer. 500 mm btg. Fk = ytfuktkvot, i procent. (Kusterle m.fl. , 2004).



Figur 4. Relativ kallvikt vid provning med RWS 120- och ISO384 kurvorna versus påkänning. Varierande mängd *ppf* 18 mikrometer. 300 mm btg. Lufttorkning. Fk = ytfuktkvot, i procent. (Kusterle m.fl. , 2004).

ISO 384-kurvan som enligt RWS 120-kurvan var tillräckliga för att ge spjälkning. På samma sätt jämfördes LTI 180-kurvan med RWS 120-kurvan. Se figur 5.

Figur 5 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120- och LTI 180-kurvorna versus påkänning vid 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* och 50 cm betong. Prover visade i figur 6 med LTI 180 innehöll kvartsit som inte föreföll att ge upphov till större explosiv spjälkning än kalksten.

Figur 6 visar relativ kallvikt versus ytfuktkvot. Den visar dock inverkan av ytfuktkvoten var motsatt den förväntade, såväl med fibrer som utan fibrer i betongen (Kusterle m.fl., 2004).

Fiber bör blandas in

Rekommendationer för husbyggnadsbetong visar att fibrer krävs då brand kan äventyra byggnadens goda bestånd då påkänningen är stor och betongen fuktig, till exempel parkeringsdäck etcetera.

Försiktighetsprincipen bör gälla, det vill säga då man är osäker beträffande en långt fram i tiden tänkt brandpåverkan så bör *ppf* under alla omständigheter blandas in även i husbyggnadsbetong. Kostnaden för fibrer är försumbar i förhållande till de skador som kan uppstå vid brandspjälkning givet att betongleverantörer allra först anskaffar relevant utrustning för att tillverkning av fiberbetongen ska kunna ske.

Följande rekommendationer kan ges (Silfwerbrand J., 2005):

1. Betong med vct_{ekv} > 0,55 och kalkstensfillermängd mindre än 25 viktsprocent av cementmängden.

Vid användning av cement med inneh[illegible] av kalkstensfiller ska den närvarande delen av kalkstensfiller i cementen räknas som kalkstensfiller och endast klinkerandelen som cement. Detta innebär att cement CEM II /A-L är tillåtet. Den får innehålla 20 procent kalkstensfiller av totalmassan. Inga speciella rekommendationer behövs eftersom risken för spjälkning är försumbar.

2. Övrig betong

2a. Byggnader med luftfuktighetens årsmedelvärde < 60 procent, brand ISO 834.

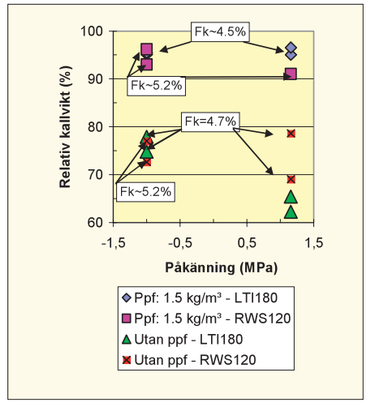
Vid dessa byggnader kommer betongen efter en tid att ha ett fuktinnehåll på < 2.5 viktsprocent. Om följande villkor i tabell 3 uppfylls behöver inga extra åtgärder vidtagas för att reducera risken för explosiv spjälkning i betong.

2b. Byggnader och anläggningar med RH > 60 procent.

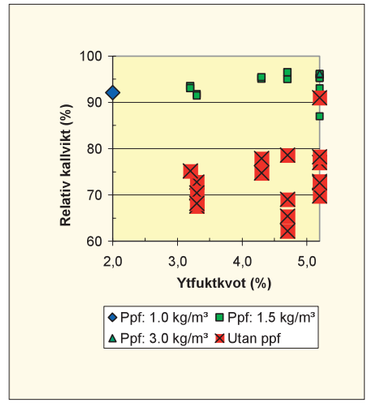
Om betongen inte brandprovats bör *ppf* tillsättas eller betongen skyddas av ett obrännbart värmeisolerande skikt (Silfwerbrand J., 2005). Några rekommendationer om mängd respektive typ av fibrer har inte kunnat ges beroende på bristande kunskapsnivå när det gäller betongsammansättning, beständighet och utförande.

Ppf har dock visat sig vara effektiva för att reducera spjälkningsmängden. Om man i ett aktuellt fall har tillräcklig kunskap för att bestämma erforderlig fibermängd kan brandprovning utelämnas. Föreliggande rekommendationer är under uppgradering för att mer precisa krav ska kunna ges. Försiktighetsprincipen bör dock gälla, i synnerhet för brand. Kostnaden för *ppf* i betongen är ringa i

Fortsättning s. XX ▶



Figur 5. Relativ kallvikt – provning med RWS 120- och LTI 180-kurvorna versus påkänning. Fk = ytfuktkvot, i procent. (Kusterle m.fl. , 2004).



Figur 6. Relativ kallvikt versus ytfuktkvot (Kusterle m.fl. , 2004).

förhållande till de kostnader som kan förorsakas av brandspjälkning.

Påverkar fukttransport

Efter hundratals försök med betong med temperaturer upp till 1 000 grader Celsius kan stora skillnader konstateras beroende på fiberinnehåll (Persson, 2003).

Med fibrer kokar fukten successivt ur betongen utan att explosion sker. Vattenånga lämnar provkroppen från första stund under försöket. Fibrerna förångas i ytan av betongen och brinner upp för att bilda en mängd kanaler där fukten kan transporteras ut ur betongen. Längre in i betongen smälter fibrerna och bidrar på så sätt till att impregnera betongen mot fukttransport inåt i betongen. Ännu längre in i betongen sväller fibrerna mer än betongen vilket också har en mot fukttransport impregnerande effekt.

Utan fibrer i betongen rör sig fukten i stället i temperaturgradientens riktning nämligen inåt i betongen. Ingen vattenånga alls syns lämna provkroppen under försökets gång. Kondensation och tryckökning sker inåt i betongen.

En spricka utbildas ungefär på samma avstånd från den brandutsatta ytan lika med maximal stenstorlek. En vattenficka uppstår i sprickan. Då temperaturen har höjts till en kritisk nivå i vattnet övergår en del av detta explosionsartat till vattenånga varvid betongen spjälkas. Efter spjälkningen bildas en ny spricka längre in i betongen med vattenansamling och successiv spjälkning som följd.

Efter en explosion kan man ofta se vatten skvala ned för den spjälkade betongytan även om lufttemperaturen i ugnen är mycket hög, eller så kan man se vatten i botten av eller under ugnen.

Slutsatser kan dras

Följande slutsatser kan dras efter analys av nationella och internationella försöksresultat:

1. Polypropylenfibrer, *ppf,* hade en avgörande betydelse i syfte att bemästra brandspjälkning. Två kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* rekommenderades för tunnelbetong för att bemästra brandspjälkning intill armeringen. Försöken visade dock att 1.5 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* var tillräckligt. Vid brandbelastning från enbart persontågstrafik var 1 kg per kubikmeter 18 mikrometer *ppf* tillräckligt för att bemästra brandspjälkningen.
2. Porstrukturen påverkades mycket kraftigt av inblandning av *ppf*, vilka impregnerade betongen och hindrade fukttransport inåt med påföljande tryckökning och explosion.
3. Betong med *ppf* föreföll att ha bättre saltfrostbeständighet och lägre kloridinträngning än motsvarande betong utan *ppf*.
4. Betonghållfastheten 33 MPa var tillräcklig för att förorsaka omfattande och fortgående brandspjälkning hos betongen utan *ppf* även då ytan på denna hade torkats ut under lång tid.
5. Belastning (drag- eller tryckpåkänningar) hade liten inverkan på spjälkningens storlek hos betong utan *ppf,* det vill säga om påkänningen ökade från en dragpåkänning av 1 MPa till en tryckpåkänning av 9 MPa så minskade kvarvarande kallvikt efter brand endast med fem procent.
6. Armeringsinnehåll hade betydelse först vid en ökning från normal armering på cirka 100 kg per kubikmeter till cirka 400 kg per kubikmeter i syfte att bemästra brandspjälkning.
7. Fuktinnehållet visade sig förvånansvärt nog ha motsatt inverkan mot den förväntade, det vill säga att betongens kallvikt efter brandförsöken var högre vid högre fuktkvot i betongen före försöket än vid lägre fuktkvot, såväl med *ppf* som utan *ppf* i betongen. □

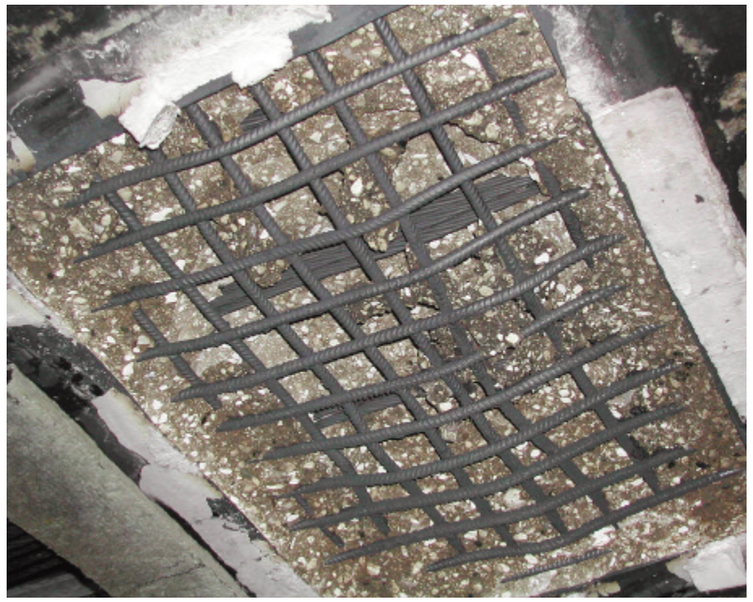


Bild 6. Mätningar skedde även av spjälkningsdjup. Foto: Wolfgang Kusterle.

Referenser:

Diedrichs U., Jumppanen U.-M., Schneider U., High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High Strength Concrete. Weimar. Red.: Wittmann och Schwesinger. Freiburg and Unterengstringen. 1995, s 129–143.

Jönsson U. Personlig information. Föredrag vid SBF Tunneldagar, Malmö. 2007.

Jönsson U.; Munch Petersen C. Citytunneln – Hur gör man betong både frostbeständig och brandbeständig? SVR V-byggaren, 2007, no 4, s 16-20.

Kalinowski M.; Trägårdh, J. Bättre beständighet med PP-fibrer, CBI-nytt 2:07, 2007, s 2–3.

Kusterle W. et al. Brandbeständikeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie in Zusammenarbeit mit der Eisenbahn - Hochleistungsstrecken AG. Strassenforschung. 2004. Heft 544. ISSN 0379-1491. Bundesstrassensverwaltung. Stubenring 1, A-1010 Wien., 221 s.

Persson B. Fire Resistance of Self-Compacting Concrete, RILEM Materials and Structures, Vol. 37, No 273, 2003, s 575–584.

Silfwerbrand J. Guidelines for Preventing Eplosive Spalling in Concrete Structures Exposed to Fire, fib symposium “Keep Concrete Attractive”, Budapest, 2005, 6 s.

Annonssida