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

Höghållfast betong — självuttorkning och hållfasthet

Höghållfast betong har på senare år rönt ett allt större intresse. I USA har ett antal höghusstommar uppförts i höghållfast pumpbetong. I Norden har Norge genom sina offshore-projekt tagit täten i utvecklingen med normer framme för hållfastheter upp till C 105. Även i Finland har normförslag framtagits för höghållfast betong upp till K 100. Vid Stora Bält förbindelsen i Danmark användes f n höghållfast betong.

I det svenska forskningsprogrammet ingår Cementa, CBI, Chalmers, Luleå Tekniska Högskola samt Tekniska Högskolan i Lund . Med tanke på en tillämpning i samband med den kommande Öresundsförbindelsen, är den svenska forskningen sent initierad.

Forskningen vid Byggnadsmaterial, LTH, Lund har bedrivits med inriktning på frågeställningar beträffande hydratation och hållfasthet. På köpet har vi därvid erhållit en vidgad kunskap om fuktförhållandena i den höghållfasta betongen. Det mest anmärkningsvärda resultatet är betongens goda hållfasthetsutveckling trots en kraftig självuttorkning. Tryckhållfastheter på drygt 140 MPa har noterats vid självuttorkning till en relativ fuktighet av ca 75%.

Förhoppningsvis skall höghållfast betong så småningom nå en allmän tillämpning även i Sverige. Material- och produktionsmässigt finns inga större betänkligheter. Dock krävs kompletterande forskning betr. konstruktions- och beständighetsfrågor, inkl. brand. Även ekonomiska aspekter talar nu till den höghållfasta betongens fördel.

Material

Sammanlagt har drygt 6 ton konstruktionsbetong tillverkats vid huvudförsöket i Lund. Betongen göts i form av cirkulära simulerade pelare med 1 meters diameter. Provkropparnas plana sidor tätades med 2-3 mm epoxiplast. "Pelarnas" periferi utsattes sedan för endera luft, vatten eller tätades även dessa med epoxi.

Tabell 1 visar typrecept, etc, på betongen vid Lundaförsöken (%, d = dygn).

Blandning nr	2	4	6	8
Kvartsit 8-11	47	47	47	52
Grusig sand 0-8	33	34	30	22
Silikastoft	--	1.2	1.6	1.9
Anläggningscement	12	12	16	19
Tillsatsmedel	--	0.09	0.13	0.35
Vebe (s)	15	12	12	13
Vattencementtal,vct	0.58	0.48	0.36	0.24
f_3, 28d (MPa)	38	65	93	112
f_3, 90d (MPa)	45	76	100	128
f_3, 140d (MPa)	50	79	104	133
f_3, 140d, torr (MPa)	61	92	121	147

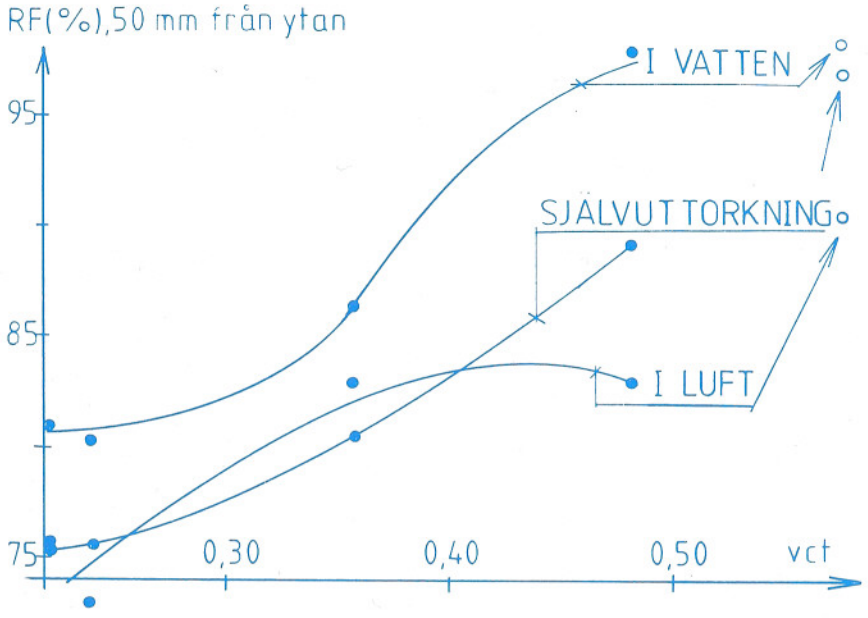
f_3 avser tryckhållfasthet på utborrad cylinder med mellanlägg.

Tabell 1

Forskningsresultat

I betongen ingjutna el-rör har givit möjlighet till mätning av relativa fuktigheten (RF) i betongen. Även om pelarytan förläggs i vatten kontinuerligt uppvisar den höghållfasta betongen RF=80% ca 50 mm från betongytan vid 90 dygns betongålder. Detta borde kunna utnyttjas för att skapa en fuktsäker platta på mark, byggbranschens gissel under många år. Av *figur 1* framgår RF som funktion av vct vid höghållfast betong innehållande 10% silikastoft räknat på cementinnehållet. Som referens visas RF-utvecklingen 50 mm från ytan på en pelare av "vanlig" betong med vct=0.58 och utan silika.

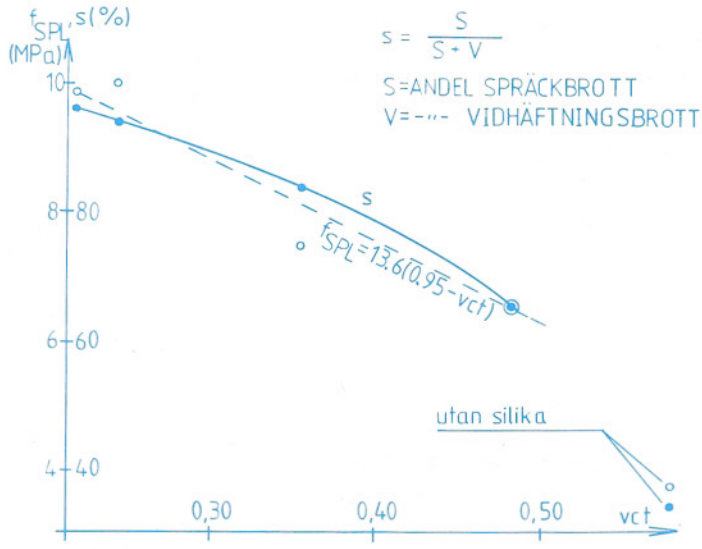
600 st borrprover från pelarna visar en mycket god hållfasthetsutveckling både med tiden och avståndet från pelarens yta. Spräckanalyser av ca 200 st borrprover visar enligt *figur 2 på nästa sida* ett klart samband mellan spräckhållfasthet och spräckbrottandel. Tunnslipsanalys av den vid LTH tillverkade betongen visar en mycket tät och sprickfri struktur. Övergångszon saknas helt mellan ballast och cementpasta. 400 st av de hållfasthetsprövade cylindrarna har sedermera torkats

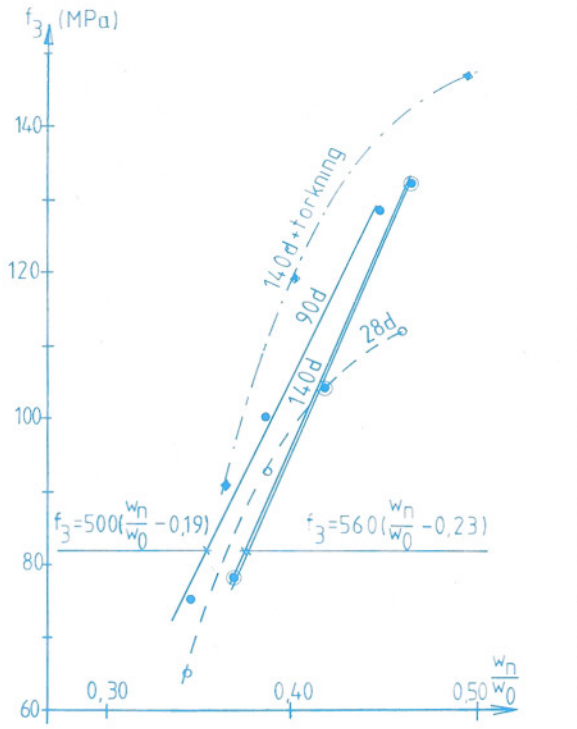


Figur 1. RF (%) som funktion av vct 50 mm från ytan på en betongpelare av 1 meters diameter. 90 dygns betongålder.



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





Figur 2 (ovan). Spräckhållfasthet (MPa) resp. spräck-brottandel (%) som funktion av vct. 90 dygns betongålder.

Figur 3 (t h). ryckhållfasthet f_3 (MPa) som funktion av w_n/w_o • w_n anger kemiskt bundet vatten. w_o anger ursprungligt vatten i betongblandningen. d = dygn (betongålder).

och glödgats. Av *figur 3* framgår tryckhållfasthet f_3 (med mellanlägg) som funktion av w_n/w_o • w_n betecknar kemiskt bundet vatten och w_o ursprunglig vattenmängd i betongblandningen.

Produktion

Höghållfast betong har tillverkats i Sverige sedan drygt 40 år nämligen i form av Sentabrör. Efter gjutning och vibrering pressas under förspänningsprocessen överskottsvattnet ut ur betongen. Ursprungligt vattencementtal, vct, reduceras på så sätt och en höghållfast betong uppstår åtminstone innanför förspänningsarmeringen. Rören har en unik beständighet med mycket få skadefall vid förläggning i normal mark. En annan tillämpning av höghållfast betong är s k vakuum- sugna golv. Efter det att betongen attraherat erforderligt vatten sugs överskottsvattnet ut resulterande i golv med hög hållfasthet och mycket god beständighet.

Erfarenheter från USA visar att det går att pumpa betong till höghusstommar och då med vct=0.24. Den gjutna betongen har erhållit en tryckhållfasthet efter 2 månaders härdning på 124 MPa (100 mm cylinder). Receptur i viktsprocent för olika producerade betongblandningar samt egenskaperna hos dessa framgår av *tabell 2*:

Kvalitetskrav

Höghållfast betong ställer större krav i produktionen än vanlig betong. Sålunda krävs noggrann proportionering, kontinuerlig fuktkontroll, kontroll av all hantering av vatten vid blandning såsom sköljvatten, vatten i transportbilar. Vidare får man räkna med något längre blandningstider. Det är en fördel att vänta någon minut med att tillsätta superplasticeranen.

Producent,etc.	Seattle, USA	Sydsten, Hardeberga	Skanska Prefab, Staffanstorp	
Produkt	Höghus	Platta på mark	Sentabrör	Balkar
Grus 8-16 mm	--	39	--	--
Singel 10	43	--	--	--
Kvartsit 8-11	--	--	--	52
Kvartsit 4-8	--	--	51	--
Sand	25	36	22	22
Cement	22	18	19	19
Flygaska	2.4	--	--	--
Silika	1.8	2.7	--	1.9
Tillsatsmedel	0.50	0.28	--	0.47
Sättmått (cm)	15	20	3	1
Omf.tal (slag)	--	65	--	--
Vct	0.24	0.32	0.39	0.24
f_c (MPa)	124	95	49	55
Betongålder	56 d	9 d	6 tim	16 tim

Tabell 2



Figur 4. Industriell tillverkning av betongbalkar med vct = 0.24 vid Skanska Prefab, Staffanstorp.

Ovan refererade fältförsök vid Skanska Prefab resp. Sydsten utfördes industriellt med ordinarie utrustning och personal. 4 st balkar göts på 16 minuter resp. 5 m^3 betong till platta på mark pumpades ut på 45 minuter. Pågående uppföljning i Byggnadsmaterials regi får utvisa huruvida hög hållfasthet resp. låg RF erhålles. *Figur 4* visar gjutning vid vct = 0.24 medan *figur 5* visar pumpning vid vct = 0.32. *Figur 6* visar slodning respektive träskurning av betongyta (vct = 0,32).

Ekonomi

Materialkostnaden, M för höghållfast betong är något lägre än för vanlig betong förutsatt att den höghållfasta betongens prestanda kan utnyttjas:

vct = 0.58,	M = 100%	per MPa
vct = 0.48,	M = 75%	per MPa
vct = 0.36,	M = 69%	per MPa
vct = 0.24,	M = 85%	per MPa

Kan sedan den höghållfasta betongen tillverkas av ordinarie personal och med

befintlig utrustning kan det hela bli lönsamt.

Preliminära kalkyler på ovannämnda 16 st industriellt tillverkade balkar visar att de kostar ca hälften av vad stålbalkar med motsvarande bärighet skulle ha gjort.

Betr. den i fältförsöket tillverkade plattan på mark så är merkostnaden ca 50 kr per m^2 (inkl.täckningsbidrag). Självuttorkningen ger då ett RF=90% efter ca 20 dygn. En platta på mark utförd i vanlig betong tar ca 80 dygn att torka ut ensidigt. Tidsvinsten ger ca 50 kr per m^2 i intjänade räntor. Beräkningen har därvid förutsatt att 1 mån. av förkortningen i uttorkningstid kan utnyttjas för tidigarelagd inflyttning.

Vid användning av höghållfast betong nås även en rad andra positiva effekter:

a. Större spännvidder och därmed ökad flexibilitet,

b. Större uthyrningsbar yta på grund av mindre pelar- och väggareor,

c.Lägre energikostnad vid uttorkning,

d. Större fuktsäkerhet. ■

Referenslista

1. *L-O Nilsson*, Hygroscopic Moisture in Concrete-drying, Measurements & Related Material Properties, Report TVBM-1003, Lund, Sweden, 1980

2. High-strength Concrete. State of the Art. NTEF, FCB, 1989.

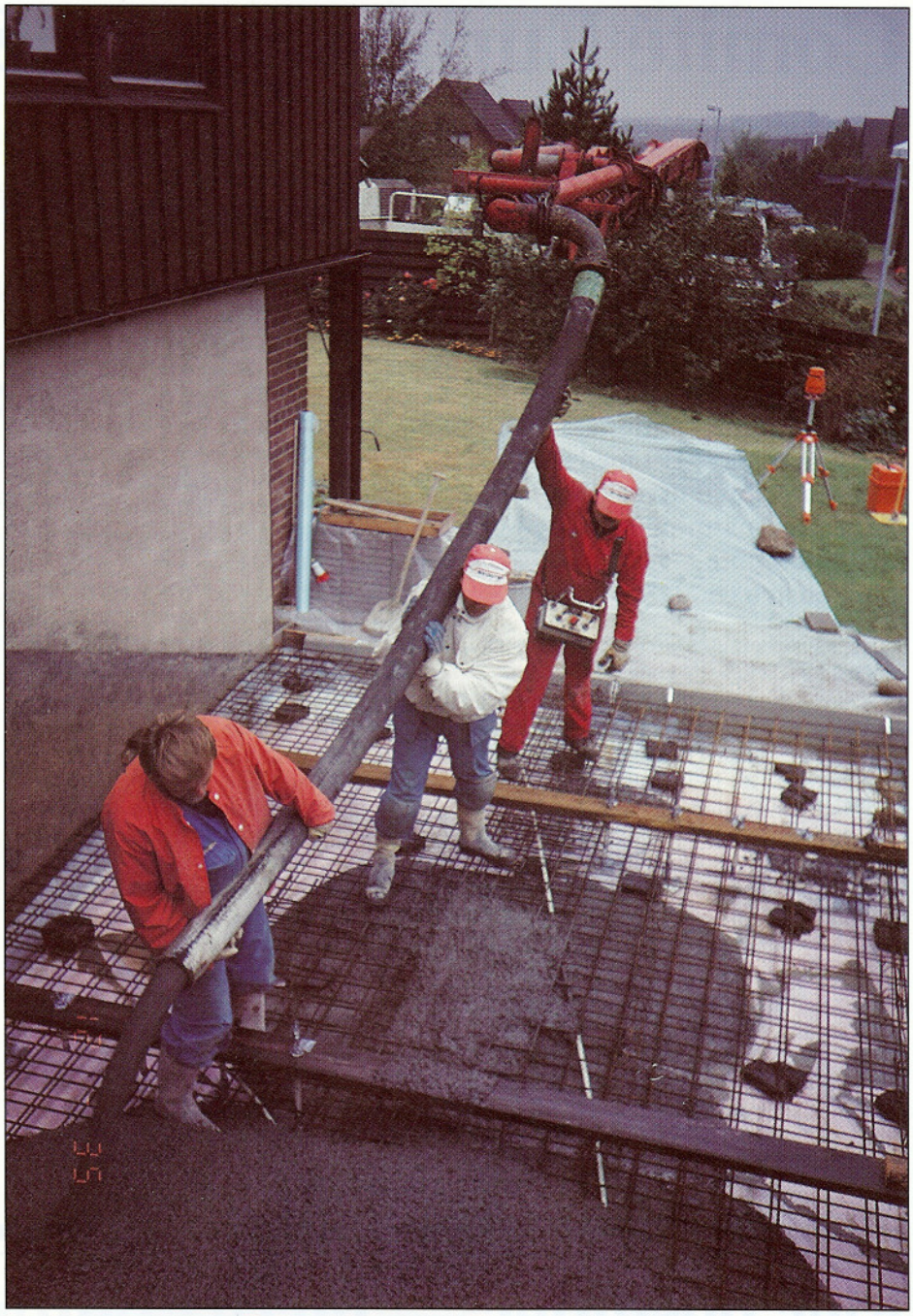
3. Förslag till finsk betongnorm, K 70 - K 100, 1990.

4. *V Randall et al*, High-strength Concrete for Pacific First Center, Concrete International, April, 1989.

5. Tryckhållfasthet Sentab-kuber enligt Tp-5:309, Skanska Prefab, Staffanstorp, 1990.

6. *Ulla-Maija Jumpanen*, Fukt, temperatur och deformation av obelastade och belastade, normenligt brandutsatta pelare av kvalitet K 70 -K 100, VTT, Otnäs, Finland, 1990.

7. *Bertil Persson*, Högpresterande betongs hydratation och hållfasthet, BML, LTH, Prel. 1990.





Figur 5 (ovan). Pumpning av betong till platta på mark (vct = 0.32) utförd av Sydsten, Hardeberga.

Figur 6 (t v). Slodning resp träskurning av betongyta (vct = 0,32).



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

Högpresterande betong en match för management

Envar som följt internationella byggtidskrifter senaste året har slagits av det stora antal artiklar som behandlat ämnet höghållfast betong. I USA har ett antal höghusstommar uppförts i materialet. Sedan några år har våra grannländer tagit fram normförslag. I Sverige däremot avsätter företagsledningarna ej tillräckligt med tid och pengar för att en tillämpning skall bli möjlig hos oss.

Forskning beträffande höghållfast betong bedrivs sedan 1 års tid vid Byggnadsmaterial, LTH, Lund. Försöken utförs under professorn *Göran Fagerlunds* ledning och har blivit möjliga tack vare att STU-medel ställts till förfogande. Preliminära resultat visar att höghållfast betong förutom hög hållfasthet även uppvisar en självuttorkande förmåga samt stor täthet. Ett nytt begrepp har därvid myntats nämligen "högpresterande betong", i realiteten en teknisk innovation för byggbranschen.

Materialfrågor

För att erhålla högpresterande betong skall man tillsätta mindre vatten till betongblandningen än vad som är fallet vid vanlig betong. Kravet på bra ballast är också stort vad gäller högpresterande betong. I Lund har det framkommit att kvartsit som ballast ger de högsta hållfastheterna. Vi har sedan arbetat med ett kraftigt partikelsprång ned till nästa fraktion i betongblandningen, nämligen natursand. Anläggningscementets partiklar har en dimension av ca 10^{-5} m och tillfört silikastoft med partikel-dimensionen 10^{-7} m fyller sedan ut det finaste utrymmet i betongblandningen. På så sätt har vi redan från början erhållit en så hög packningsgrad som möjligt mellan partiklarna. Detta reducerar det teoretiska behovet av vatten till ett minimum.

Tillsatsmedel

Som ytterligare ett steg för att uppnå gjutbar konsistens tillför vi sedan ett ytspänningsnedsättande medel av naftalentyp. Det på så sätt frigjorda vattnet kan fylla ut utrymmet mellan andra partiklar. Totalt sett minskar således vattenbehovet i betongblandningen från ca 170 liter till som minst 100 liter per kubikmeter betong.

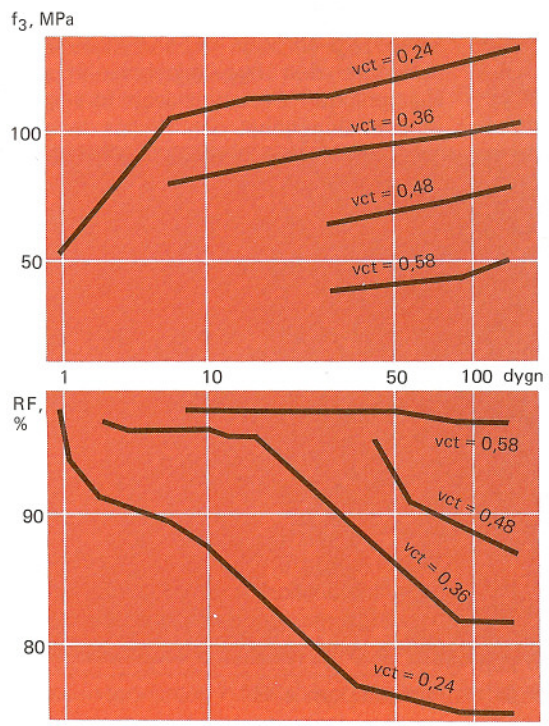
Hållfasthet

Vid de ca 6 ton betong som vi tillverkat vid försöket i Lund har vi arbetat med vattencementtal, vct mellan 0,2 och 0,6. Vct uttrycker mängdförhållandet vatten till cement. Ur de korta simulerade pelare med 1 m diameter, som vi tillverkat, har vi sedan vid olika betongåldrar borrat ca 600 st cylindrar. Cylindrarna uppvisar vid provtryckning en kontinuerligt ökande hållfasthet med både tiden och avståndet från pelarytan. Figur 1, övre delen, visar cylindertryckhållfasthet vid självuttorkning som funktion av tiden hos olika betongkvaliteter. "Pelarnas" plana ytor har tätats mot fuktrörelser på effektivast möjliga sätt, i vårt fall med 2–3 mm epoxi.

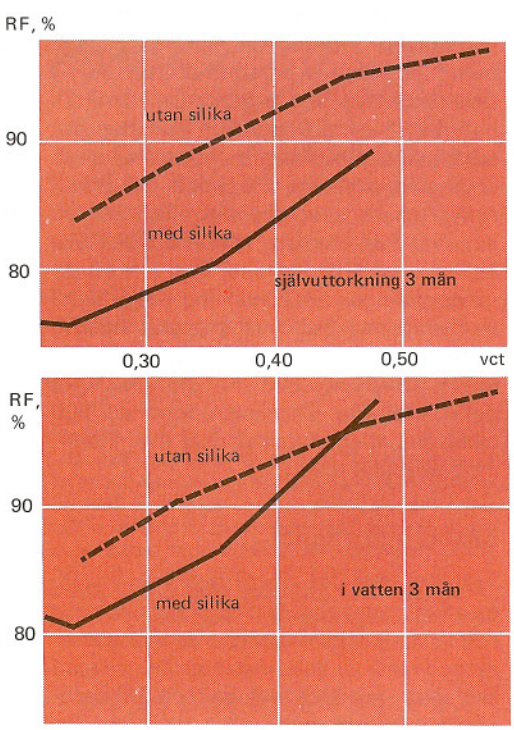
Vi har också kunnat notera ett klart samband mellan vidhäftning ballast-cementpasta å ena sidan och hållfasthet å andra sidan. Ju bättre vidhäftning desto bättre hållfasthet. Moreno (1990) har studerat utvecklingen på längre sikt beträffande höghållfast betong och finner därvidlag inga betänkligheter.

Självuttorkning ger kortare byggtid

Nedre delen av figur 1 visar relativa fuktigheten, RF, som funktion av tiden hos olika betongkvaliteter vid självuttorkning. Som synes håller vanlig betong med vct=0,6 fortfarande ca RF=97% 3 månader efter gjutning medan högpresterande betong självuttorkat till ca 75% efter 3 månader. Självuttorkning innebär att betongen isoleras mot yttre fuktrörelser. I vårt fall har detta skett genom att även betongpelarnas periferi bestrukits med 2–3 mm epoxi. I praktisk byggverksamhet sker inneslutning exempelvis om en betongplatta gjuts på diffusionstätt underlag och sedan beläggs med plastmatta ovanpå. Vid försö-



Figur 1. Cylindertryckhållfasthet (f_3) som funktion av tiden samt (nedre delen) relativa fuktigheten, RF vid självuttorkning som funktion av tiden.



Figur 2. Relativa fuktigheten, RF, som funktion av vct 50 mm från betongytan på pelare ∅ 1 m och olika ytexponering. Övre delen visar RF vid självuttorkning, nedre delen RF vid ytan i vatten.

ket i Lund har vi även låtit en "pelare" ha fri betongyta medan en fått vara nedsänkt i vatten. Resulterande RF framgår av figur 2. Figuren visar RF som funktion av vct hos en pelare ∅ 1 m vid olika ytexponering. Mätningen av RF har därvid skett 50 mm från betongytan. Som synes stiger RF som mest till ca 80% vid högpresterande betong i vatten 3 månader från gjutning. RF=90% anges i många fall som en gräns för när läggning av täta ytmaterial kan ske.

Den självuttorkande effekten hos högpresterande betong borde rimligen kunna utnyttjas hos byggbranschen för att ge kortare byggtider och högre fuktsäkerhet.

Ytterligare forskning om täthet

Mätningar av diffusionstalet hos betong visar att detta vid högpresterande betong uppgår till mindre än hälften av vanlig betongs. Uttorkning har därvid skett under ca 8 månaders tid. Stor täthet är i de flesta fall en fördel för betong utom vad gäller frost- och brandbeständighet. Härvidlag krävs ytterligare forskning. Kukku (1990) har i preliminära resultat påvisat god frostbeständighet om tillsatsen silikastoft begränsas till 8% av cementvikten.

Stöd för produktionsfrågor

Vän av ordning har säkert redan ställt sig frågan vad redogörelsen hittills har för koppling till management. Avsikten har varit att ge en allmän bakgrund rent materialmässigt som stöd för produktionsfrågor. Stöd från företagsledningen i form av tid och pengar samt inte minst tålamod är av nöden om en praktisk tillämpning skall kunna ske av högpresterande betong.

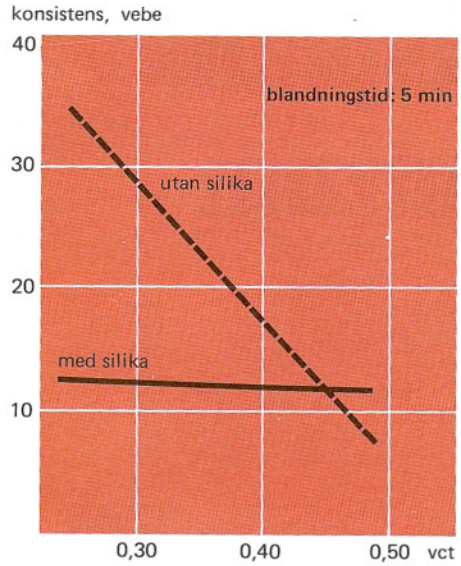
Mätningar på LTH visar att blandningstiden för högpresterande betong är avsevärt längre än för vanlig betong. Figur 3 visar betongblandningens konsistens i vebe som funktion av vct med respektive utan tillsats av silikastoft. Tillsats av silika förefaller som synes förbättra konsistensen vid låga vct. Den högpresterande betongens konsistens kan närmast beskrivas som tixotrop. Större insats av vibrering krävs än vid vanlig betong.

Randall (1989) har i samband med produktion av ett höghus i USA understrukit kravet på noggrannhet i proportionering av högpresterande betong. Hänsyn måste t o m tas till kvarvarande sköljvatten i betongtransportbilar.

Högpresterande betong skulle kunna bli något av ett kvalitetsbegrepp inom byggandet. Eventuellt kan speciell licensiering av personal som tillverkar den nya betongen komma ifråga.

Minskad materialkostnad betalar ökad arbetskostnad

Figur 4 visar materialkostnaden per kubikmeter för olika betongkvaliteter. Av figuren framgår att kostnaden för låg-vct betong



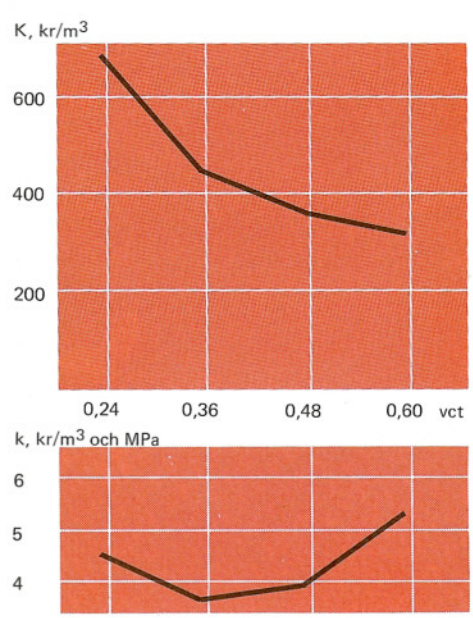
Firgur 3. Konsistens hos betong som funktion av vct, med och utan tillsats av silikastoft.

är nära nog dubbel mot vanlig betongs. Om en enkel division utföres med cylinder-tryckhållfastheten, dvs med vad betongen förmår att prestera, blir bilden en helt annan. Betong med vct=0,36 blir nu mest ekonomisk. Av figurens nedre del framgår materialkostnad per kubikmeter och MPa vid olika betongblandningar.

Minskningen i materialkostnad borde kunna betala de ökade arbetskostnaderna i tillverkningen. Detta studeras f n i fältförsök.

Förväntningar i branschen

Allmänt sett kommer krav att ställas på företagsledare att tid och pengar avsätts för utbildning mm. Eventuellt kan premiering av personal, högre status etc öka intresset att använda den högpresterande betongen. I dagens stressade och pressade



Figur 4. Materialkostnad i kronor per kubikmeter samt i kronor per kubikmeter och MPa vid olika betongkvaliteter (juni 1989).

byggkonjunktur kan ingen ägna sig åt utveckling utan att ha resurser.

Konsulter kräver i sin tur nya normer. Större spännvidder blir möjliga vid alla typer av konstruktioner. Samtidigt erhålles större flexibilitet och smäckrare konstruktioner. Dock krävs ökade kunskaper beträffande brand och möjligen även beträffande frostbeständighet. Eftersom självuttorkningen fortgår lång tid efter gjutningen kan konsulterna räkna med ökad fuktsäkerhet i byggnaden.

Konkurrerar ut stål

Producenter ser möjlighet till kortare byggtider, minskade betongmängder och mindre transportkostnader. Kapaciteten ökar för betongelementfabriker medan mängden transporterad prefab-betong minskar per byggnad räknat och även totalt sett. Denna minskning motverkas dock av att konkurrensförmågan gentemot stål ökar. Kortare byggtider blir möjliga eftersom uttorkningen av byggnaden nu går snabbare. De ökade spännvidderna ger en förskjutning av byggandet från stomme till stomkomplement vilket även detta bör minska byggtiden. Även t ex mellanväggar i trä kan nu utföras tidigare eftersom självuttorkningen i betongen snabbare sänker RF till acceptabla nivåer än vad traditionell uttorkning av vanlig betong gör. Snabbare avformning är också möjlig eftersom korttidshållfastheten för högpresterande betong är högre än för vanlig betong.

Dra nytta av internationella erfarenheter

Vad som återstår är att företagsledare drar nytta av internationellt vunna erfarenheter beträffande högpresterande betong. Managementforskare har här ett gyllene tillfälle att studera hur byggbranschen reagerar inför en teknisk innovation. Bollen är otvetydigt företagsledarnas eftersom teknisk forskning och utveckling i Sverige i allmänhet i byggbranschen i synnerhet till stor del styrs av industrins behov.

Bertil Persson

Bertil Persson är civ ing vid Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, tel 046-10 45 91.

Litteratur:

Heikki Kukko. *Durability of high-strength concrete.* VTT, Finland 1990.

Vaughn Randall et al. *High strength concrete for Pacific First Centre.* Concrete International, April, 1989.

Normförslag för betong. Finland, 1990, K70–100.

High strength concrete. State of the art. FCB, Norge 1989.

Jaime Moreno. *225 W. Wacker Drive, State of the Art.* Concrete International, January, 1990.

Bertil Persson. *Besök vid VTT, Finland.* Reserapport, Byggnadsmaterial, LTH, Lund, 1990.

Bertil Persson: *Högpresterande betongs hydration och hållfasthet.* Preliminär rapport, Byggnadsmaterial, LTH, Lund, 1990.

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

Högpresterande betong, ett aktuellt BML-projekt

Av: *Bertil Persson, avd. för byggnadsmaterial*

Bakgrund
Sedan mitten av ar 1989 har vid BML bedrivits forskning kring höghållfast betong i konstruktionsskala nämligen simulerade pelare om 1 m:s diameter. Eftersom höghallfast betong visat sig ha en rad andra positiva egenskaper såsom självuttorkning, stor vattentäthet mm, har ett nytt begrepp myntats nämligen högpresterande betong. Forskningen har varit möjlig tack vare att STU-medel ställts till förfogande.

Försöksuppläggning
Sammanlagt har vi tillverkat 30 st pelare med 1 m:s diameter, dock endast 0.1 m långa m h t betongstationens kapacitet. För att simulera en lång pelare har ändytorna tätats mot fukttransport med 2-3 mm epoxi. Pelarens yta har sedan utsatts för endera vatten, luft av laboratoriemiljö eller tätats med epoxi (2-3 mm). För jämförelsens skull har vi arbetat med betonger av vct=0.22-0.58. Hälften av blandningarna har tillförts 10 % silikatillsats (räknat på cementvikten), hälften har varit utan silikatillsats.

Silika, som består av kiseldioxid-partiklar i storleken 10^{-7} m, används för att under blandningen fylla ut det finaste hålrummet och därvid minska vattenbehovet i betongen. Packningsmässigt är det lämpligt med partikelsprång vid proportioneringen av betongen.
Näst i skalan har vi då cementen, med partikelstorlek 10^{-5} m, sand med 10^{-3} m samt slutligen makadam med 10^{-2} m.

För att kunna blanda har vi använt 0-2.8 % torrvikt tillsats dispergeringsmedel räknat på cementvikt. Tillsatsmedlet är av superplasticerande typ nämligen natriumsalt från naftalen formaldehydkondenserat (SP 62). Tillsatsen har till uppgift att minska vattnets ytspänning d v s minska kravet på kompaktering. Ett typrecept vid vct=0.24 innehåller då 52 % makadam 8-12, 22 % grusig sand 0-4, 19 % anläggningscement, 10 % silika av cementvikten samt 1.9 % torrvikt SP 62 räknat pa cementvikten.

Vid de ca 7 ton betong som vi gjutit har vi använt oss av en vanlig planblandare av tvångstyp, "vanliga" skyfflar samt ordinarie vibratorbord. Kompaktering har ej skett av blandningarna utan dessa ärendast stålslipade i ytan. Blandning - resp vibreringstid har dock varit något längre än vanligen tillämpat, nämligen 5+5 min. Vid en industriell tillämpning får man således räkna med mer användning av vibratorer samt längre blandningstid än nu. Blandningsmässigt får man också vara ytterst noggrann med vattentillsatsen, t ex torka av blandaren, ta fuktkvot på alla delmateriel kontinuerligt. Blandaren bör vidare vara sluten för att hindra fuktavgang. Silikatillsats ger, vid låg vct, en avsevärt bättre konsistens på blandningen än om silika ej användes.

Resultat
Ur våra pelare har vi borrat ca 500 st cylindrar av diametern 40 mm. Parallellt har vi tryckt 72 st standardkuber. För att undvika inverkan av ojämnheter i ändytorna har vi använt oss av mellanlägg av 3.5 mm hård träfiberskiva (masonite) vid samtliga provtryckningar.
Cylindertryckhållfastheten vid 90 dygns betongålder och självuttorkning varierar vid vct=o.22-0.58 mellan 130-45 MPa medan kubhållfastheten ligger på 135-70 MPa (vid torr kub). Jämförelsevis har vi även låtit prova provkroppar på annat laboratorium utan mellanlägg varvid ändytorna slipats. Värdena ligger då ca 10 % högre. Uttorkning i sin tur ger vid vct=0.22 ca 10 % högre värde och vid vct=0.58 ca 20 % högre värde. Det högsta enskilda värdet vi uppnått vid uttorkad provkropp blir da omräknat ca 170 MPa.

Hållfasthetsmässigt har vi ej sett någon förändring med avståndet från pelarens yta. Vid låga vct blir betongen snarare starkare vid ökande avstånd från ytan. vi har då tagit hänsyn till gjutteknikens inverkan. Slutligen har vi vid spräckning praktiskt taget ej funnit några vidhäftningsbrott makadam-cementpasta vid låga vct medan dessa är legio vid höga. Detta förklaras troligen av den s k "väggeffekten" dvs en vattenhinna på makadamens yta vid höga vct. Spräckhållfastheten har visat sig vara ca 7.4 % av tryckhallfastheten plus 1.2 MPa vid vct=0.22-o.58. Draghållfastheten visar sig således, till skillnad fran vad BBK 79 anger, öka kontinuerligt med tryckhållfastheten.

Omräknat till karaktäristisk hållfasthet blir spräckhållfastheten ca 11 % av tryckhållfastheten (ISO DIS 27 36).

Fuktmekaniskt så torkar en betong av vct = 0.24 ned till ca 74 % RF på 90 dygn om den är helt innesluten från gjuttillfället och 10 % silika av cementvikten används. Utan silika-tillsats blir motsvarande värde ca 84 % RF. 50 mm från ytan på en i vatten nedsänkt pelare erhåller man samtidigt värdena 80 resp 86 % RF. Detta borde, tycker man, kunna tillämpas inom betongbyggandet för att förkorta uttorkningstiderna.

Förväntningar i branchen

Allmänt sett kommer krav att ställas på företagsledare att tid och pengar avsätts för utbildning mm. Eventuellt kan premiering av personal, högre status etc öka intresset att använda den nya betongen.

Konsulter kräver i sin tur nya normer. Större spännvidder blir möjligt vid alla typer av konstruktioner. Samtidigt erhålls större flexibilitet och smäckrare konstruktioner. Dock krävs ökade kunskaper om beständighet avseende brand och frost.

Producenter ser möjlighet till kortare byggtid, mindre betongmängder för leverantörer, mindre transportmängder för åkare, ökad kapacitet i elementfabriker, ökade marknadsandelar visavi stålbyggande samt en förskjutning från stombyggande till stomkomplement, snabbare avformning etc.

Vad som återstar är att betongindustrin tar lärdom av t ex USA-erfarenheter där man pumpat betong med vct = 0.24 till höghus vid Pacific First Center i Seattle, Wash. och åstadkommit 2 månaders hållfastheter på 124 MPa (våt cylinder). Receptet är därvid: 43 % singel av 1 cm diameter, 25 % sand, 22 % cement, 11 % flygaska av cementvikten, 8 % silika av cementvikten samt totalt 2.2 % tillsatsmedel räknat på C, dvs frånsett flygaskan, tämligen snarlikt vart. I Chicago har det uppförts ett 64-vån hus i platsgjuten betong av hög hållfasthet.

ALFA i ledningen



ALFA RÖR AB
Sördalavägen 24
141 46 Huddinge
08-774 02 60

danogips

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

Högpresterande betong ger fuktsäker platta på mark



En platta på mark som tillverkas i högpresterande betong torkar mycket snabbare än en platta gjuten med vanlig betong. Det har Bertil Persson kommit fram till. Han har forskat kring betongens hydratation och hållfasthet vid Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Byggnadsmaterial. Riskerna för fuktskador minimeras med en självtorkande platta på mark samtidigt som golvbeläggningen kan utföras tidigare.

Högpresterande betong är självuttorkande även då betongen läggs i vatten. Det visar ett forskningsprojekt som bedrivits vid Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Bygnadsmaterial. När resultatet av forskningen blev klart under våren förra året tog avdelningen kontakt med Sydsten och redan i september tillverkades den första plattan på mark med högpresterande betong. Samtidigt bidrog Cementa ekonomiskt med gjutpersonal, Fundia Bygg med armering, Rockwool med markisolering och Leif Tjällden AB med kantisolering.

Resultaten från fältförsöket är intressanta. Den relativa fuktigheten, RF, sjönk till 90 proc redan tio dagar efter gjutningen. Efter 40 dagar låg RF på 83 proc. Många anser att 85 proc är den gräns som kan accepteras, när läggning av ytmaterial kan ske på en betongplatta. En 12 cm tjock platta på mark, gjuten i vanlig betong, behöver uppskattningsvis 80 dagar för att torka ensidigt.

Teori

Mikrostrukturen hos högpresterande betong med vct 0,24-0,35 saknar gränszon mellan cementpasta och ballast. Detta analyserades av H Pyy 1990 och visas i fig 1. Den betong som användes i fig 1 har vct 0,24 och är på fotot förstorat 100 gånger.

Fig 2 visar en betong med vct 0,60, i samma förstoring. Här syns ett tydligt gränsskikt. En kompakt gränszon mellan pasta och ballast ger en tät betong samtidigt som hållfastheten höjs.

Vid byggmateriallaboratoriet har vi studerat utvecklingen av RF på simulerade pelare med diametern 1 m lagrade dels i vatten dels i luft. Mätning har skett 50 mm från betongytan. Resultatet visas i fig 3. Samtidigt har A M Rosenberg visat hur mängden fri kalk minskar i gränszonen mellan ballast och pasta om silika ingår i betongen, fig 4.

Receptur

Följande receptur användes för den högpresterande betongen, som ingick i LTHs försök med platta på mark.

- Grus, delvis krossat, 8-16: 950 kg/m^3
- Grusig sand, 0-8: 900 kg/m^3
- Silika: 66 kg/m^3
- Anläggningscement: 450 kg/m^3
- Naftalensulfonat, 42 proc: 9kg/m^3
- Melaminharts, 35 proc: 9 kg/m^3
- Luftporbildare: 0,3 kg/m^3

Betongen fick ett vct på 0,32 och hade i övrigt följande data:

- Sättmått efter 1 timme: 21 cm
- Sättmått efter 1,5 timme: 20 cm
- Omformningstal efter 1,5 timme: 65 slag
- Kubhållfasthet efter 40 dygn: 126 MPa

Med ledning av mina forskningsresultat från avdelningen för Byggmateriallära vid LTH har vi arbetat med partikelsprång för att uppnå optimal packning och rätt konsistens för att kunna pumpa betongen. Anläggningscement, som använts i betongen, har lämplig korngradering för att fylla ut tomrummet mellan silika och sand. Naftalen har som superplasticerare kombinerats med melamin. Vidare har maximal dosering använts av luftporbildare, allt för att förbättra pumpbarheten.

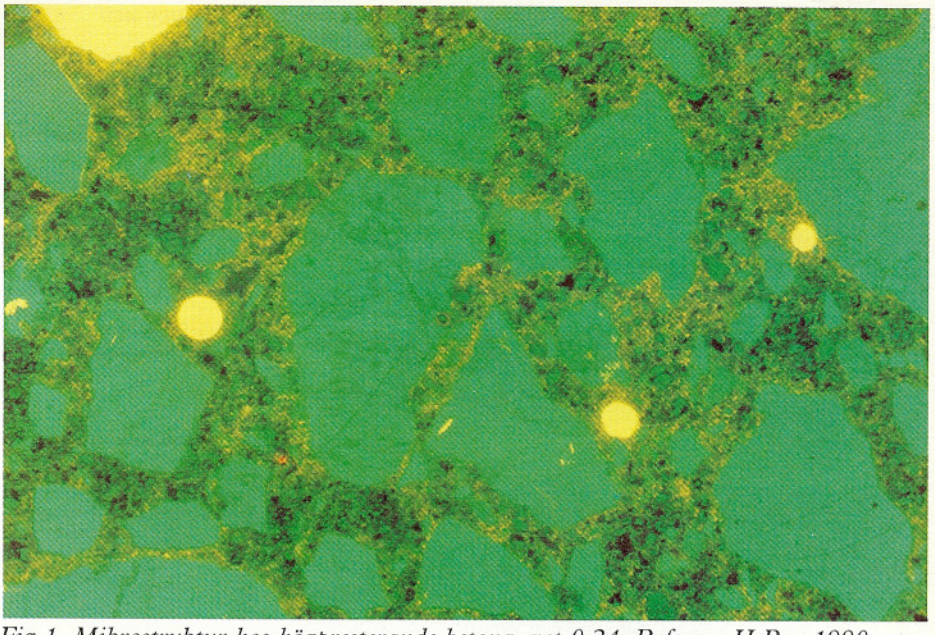


Fig 1. Mikrostruktur hos högpresterande betong, vct 0,24. Referens H Pyy 1990.

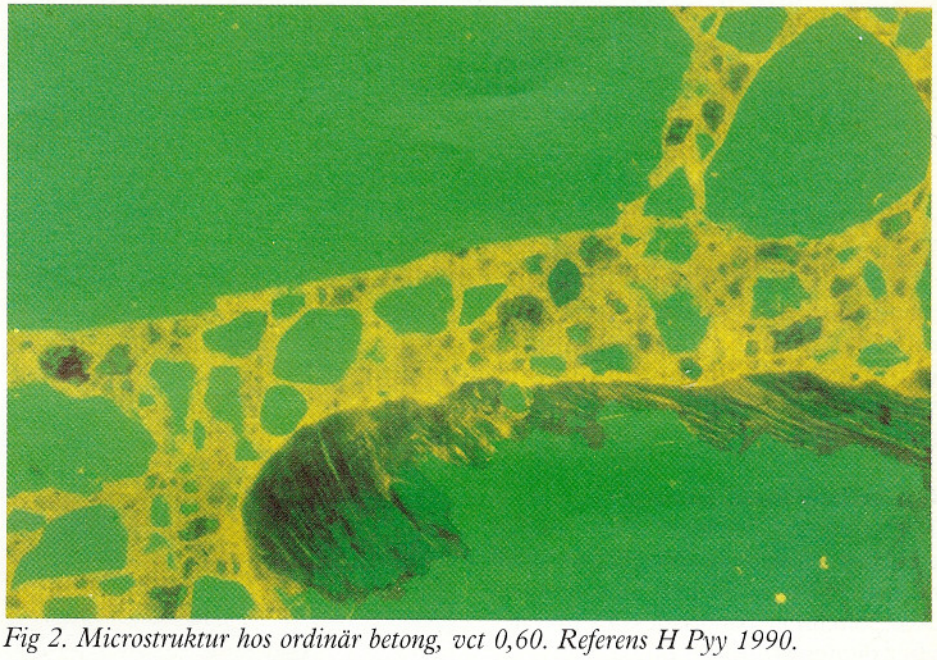
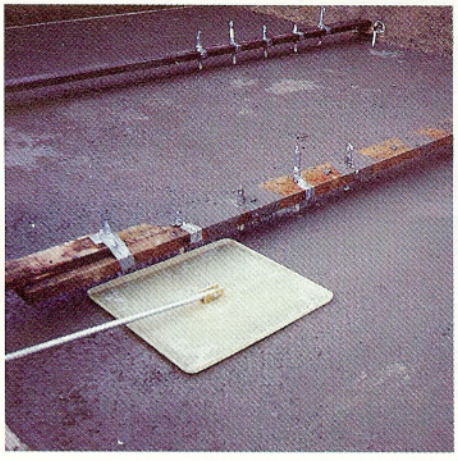


Fig 2. Microstruktur hos ordinär betong, vct 0,60. Referens H Pyy 1990.



Slodning av betong med vct 0,32.

Betongtillverkning i fabrik

Tillverkningen av betongen skedde som en del av ordinarie produktion vid Sydsten i Hardeberga. Blandningen utfördes i frifallsblandare med 2,5 m^3 per omgång. Våtblandningen utfördes i två minuter varefter superplasticeraren blandades i under ca en minut. Fuktkontrollen gjordes kontinuerligt fram

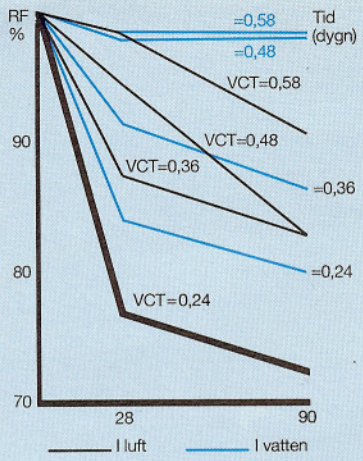


Fig 3. Relativa fuktigheten, RF, som funktion av tiden 50 mm från ytan på en pelare med diametern 1 m i vatten eller luft. RF anges för olika vct. Betong med vct = 0,58 innehåller ej silika. Referens Persson, 1990.

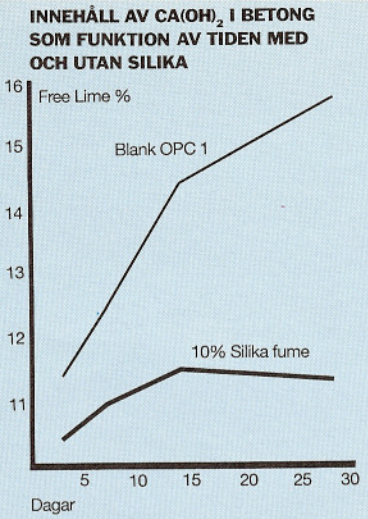


Fig 4. Fri kalk som funktion av tiden med och utan silika. Referens A M Rosenberg, 1990.

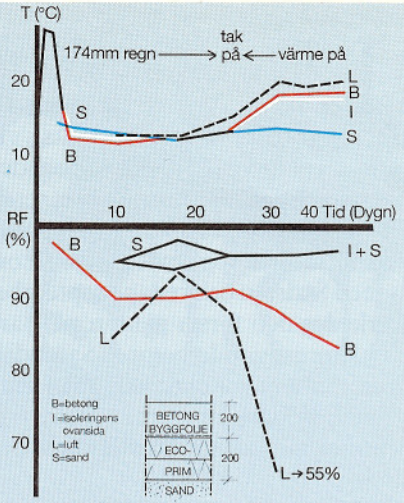


Fig 5. Temperatur (T) och relativ fuktighet (RF) som funktion av tiden i platta på mark med vct 0,32. Plattan har tjocklek 150-200 mm och gjuten på plastfolie. Isoleringen mot mark består av 200 mm extruderad cellplast. Marken utgörs av finsand.

till blandningstillfället på grund av ihållande regn.

Den färdiga betongen hade halvflytande konsistens. Betongen transporterades i roterbil och var på gjutplatsen en timme efter blandningen. Sättmåttet var då 21 cm och något tillskott av superplasticerare var inte nödvändigt.

Gjutning med pump

Pumpning av betongen gick smidigt trots lågt vct på 0,32. Nivellering skedde med hjälp av 50 mm vibrostav och laser. Slodning påbörjades 45 minuter efter pumpstart. Eftersom betongen var mer tungarbetad än vanlig flytbetong krävdes en gungande rörelse på slodan för att få tixotropi i betongen och därmed ytjämnhet. Gjutpersonalen ansåg att en liten vibrator på slodan skulle underlättat avjämningen.

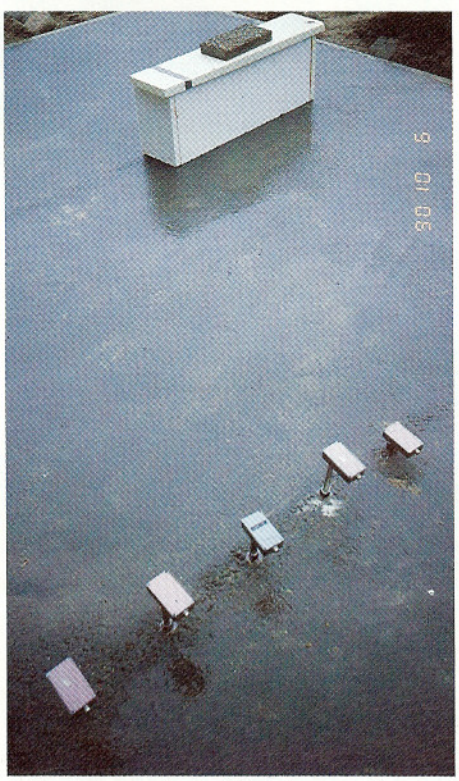
Resultat

Mätning av betongens relativa fuktighet och temperatur skedde på olika ställen: 50 mm under betongytan, mitt i betongplattan, 20 mm från plattans underkant, omedelbart under plastfolien i cellplasten samt i sanden under isoleringen. Samtliga mätpunkter dubblerades. Av fig 5 framgår att självtorkningen i stort sett följer den teoretiska kurvan.

Ekonomi

Merkostnaderna för materialet uppgår till 270 kr/m^3 eller med täckningsbidrag till ca 470 kr/m^3. För en ordinär villagrund innebär den självtorkande betongen en merkostnad på ca 6 000 kr förutsatt att slodningen kan lösas på ett smidigt sätt. Möjligen kan vct höjas någon hundradel varvid betongen bör ha en mycket bra bearbetbarhet. Denna höjning bör kontrolleras genom förförsök. Alternativt skulle silikatillsatserna kunna minskas något för att sänka kostnaderna.

En självtorkande betongplatta på mark ger en ovärderlig fuktsäkerhet. Dessutom kan ytbeläggningen läggas mycket tidigare. Kostnaderna för byggkreditiv minskar och risken för byggfuktskador elimineras. ■



Mätning av relativ fuktighet av platta på mark. Normalt är även givarna i bildens nederkant täckta med isolerhuv.

Referenser

H Pyy, VTT, Otnäs, Finland. Bilder och utlåtande av betong med vct 0,24 och 0,60. 1990.

A M Rosenberg et al. A new Mineral Admixture for High-Strength Concrete. Concrete International. April 1989.

L Berntsson et al. Tillverkningsprinciper ultrahöghållfast betong. Byggforskningsrådet, R8:1989.

A K Christoffersen et al. Selvudtörring og kemisk svind i mörtel. The Technical University of Denmark, department of Civil Engineering, Building Materials Laboratory, 1986.

Bertil Persson. Högpresterande betongs hydratation och hållfasthet. BML-LTH, prel 1990.

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

Högpresterande betong:

Möjligheternas material

Högpresterande betong är starkare, torkar fortare och har större motstånd mot vatteninsugning än vanlig betong. Detta visar omfattande studier vid Lunds tekniska högskola.

VID avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, har vi nu slutfört en omfattande förstudie av högpresterande betong.

Forskningen har bedrivits sedan 1989 och bekostats av Styrelsen för Teknisk Utveckling, STU, inom projektet »Lågtemperaturbundna keramer«. Som mest har åtta forskningsingenjörer/laboratorietekniker deltagit i förstudierna och själv har jag varit engagerad på heltid i två års tid. Studien har således inneburit en omfattande kompetensuppbyggnad inom ämnet, men även givit en mängd intressanta och delvis oväntade resultat.

Genom tvåårsperspektivet har vi, förutom delresultat vid 28 och 90 dygns betongålder, även kunnat inrymma en uppföljning 450 dygn efter gjutning.

Begreppet högpresterande betong myntades ursprungligen grundat på dess stora täthet, självtorkande förmåga samt höga hållfasthet. I denna artikel kommer jag därför att redovisa förstudiens resultat från beständighets- och fuktsynpunkt samt med hänsyn till den s.k. volymeffekten.

Beständighet

En oarmerad betongkonstruktion kan ha en i det närmaste obegränsad livslängd. Exempel på detta är välbevarade akvedukter, skalkonstruktioner och vägar från romartiden. En armerad betongs livslängd styrs av tidpunkten då korrosionen startar i det ingjutna armeringsstålet. Denna tidpunkt avgörs i sin tur av betongtäckskiktets kvalitet och tjocklek. För att erhålla en ökad livslängd för en armerad betongkonstruktion, kan man således öka endera betongkvaliteten eller täckskiktets tjocklek.

Vid högpresterande betong använder man sig av minst 15% bindemedel (cement + silikastoft) samt 0.35 som högsta vattencementtal, vct. Enligt våra resultat erhåller man med högpresterande betong en ångdiffusivitet som är mindre än hälften jämfört med vanlig betong av bästa kvalitet. Vidare ökar motståndstalet för vatteninsugning, m, avsevärt jämfört med vanlig betong. En högpresterande betong med ett lågt vct ger således en betong med ett högt m-värde.

En mycket tät betong har vidare bättre beständighet även med avseende på andra parametrar såsom klorider, koldioxid och syre, se vidare *E. Poulsen* (1990). *L.M. Sheppard* (1991), inför begreppet beständighetsfaktor, »durability factor«, med avseende på frostbeständighet som funktion av relativa fuktigheten i betongen, »internal relative humidity«, (60 mm från den i 14 dygn fukthärdade ytan) vid olika vattenbindetal, W/(C+SF). W anger vatteninnehåll i betongen vid blandning medan C och SF anger innehåll av cement respektive silikastoft i betongen. Således erhålles en hög beständighetsfaktor vid ett vattenbindetal av 0.32, oberoende av om silikastoft tillsätts eller ej. Vid vattenbindetal 0.45 blir beständighetsfaktorn ca. 75% endast om ca. 15% silikastoft tillsättes. Eljest erhålls dålig frostbeständighet för betong som saknar lufttillsats.

F.n. pågår ett examensarbete vid vår avdelning avseende saltfrostbeständighet hos högpresterande betong under ledning av professor *Göran Fagerlund*.

Självtorkning

Med högpresterande betong erhåller man på köpet en robust passiv torkmetod där man, jämfört med vanlig betong, avsevärt minskar erforderliga uttorkningstider. Med minskande uttorkningstider följer minskade kostnader för torkaggregat och byggnadskreditiv. Det är cementreaktionen i den högpresterande betongen som står för uttorkningen. Vatten förekommer i underskott för att en fullständig reaktion skall kunna komma till stånd.

Vid BML har vi funnit att högpresterande betong torkar under vatten helt nära den vattenexponerade betongytan se *Fagerlund* och *Persson* (1990, 1991).

En relativ fuktighet på 90% anses av många som en övre gräns för när plastmattor kan limmas på betongen utan att olägenheter skall uppstå i form av mögelbildning e.dyl. Den självtorkande förmågan hos högpresterande



Pumpning och gjutning av högpresterande betong med vct = 0.33, vid SIABs fullskaleförsök i Finspång.

betong har testats i praktiken, dels vid BMLs fältförsök, dels vid SIABs fullskaleförsök i Finspång.

Bägge försöken omfattar platta på mark om 5 respektive 100 m^3 pumpbetong. Vid bägge försöken täcktes betongytan diffusionstätt i 7 dygn omedelbart efter gjutning, utsattes sedan för väder och vind inklusive regn i 18 dygn samt tilläts självtorka i 3 dygn fram till 28 dygns ålder då relativa fuktigheten bestämdes. Vid SIABs referensplatta utfördes dock ej någon intäckning efter gjutning. Plattjockleken var 175 mm vid BMLs försök (ensidig uttorkning) medan den var 100 mm (delvis tvåsidig uttorkning) vid SIABs försök.

Mätningar av relativ fuktighet i plattan visar att gränsen 90% passeras med god marginal vid användning av högpresterande betong medan man med vanlig betong erhåller för mattlimning oacceptabla 94%.

Större uthyrningsbar yta

Möjligheten att med högpresterande betong erhålla minskade volymer är den, ur ekonomisk synvinkel, mest intressanta. Om en dimensionsminskning kan ske av byggnadsstommen ökar nämligen den uthyrningsbara volymen. Vidare kan transportbehovet för att uppföra byggnaden minskas och även ledes dess grundläggning. Slutligen minskar även tidsåtgången att uppföra stommen och därmed totala byggtiden.

B. Persson (1990) har visat att betongkostnaderna ej behöver öka i de fall där den högpresterande betongens bärförmåga kan utnyttjas. Detta har även analyserats i Finland där man nu, enligt *M. Redlund* (1991), har produktion igång av balkar och pelare i högpresterande betong. Våra laboratorieförsök visar en kontinuerlig ökning av tryckhållfastheten fram till 450 dygns betongålder.

Beträffande spräckhållfastheten hos betong med låga effektiva vattencementtal, vct, finns dock, en svag tendens till minskning efter 90 dygns ålder.

För att verifiera våra laboratorieresultat tillverkade Skanska Prefab, Staffanstorp, industriellt 16 st balkar varav 12 st i högpresterande betong. Betongrecepturen innehöll vct ned till 0.24, vilket gav en tryckhållfasthet på 140 MPa.

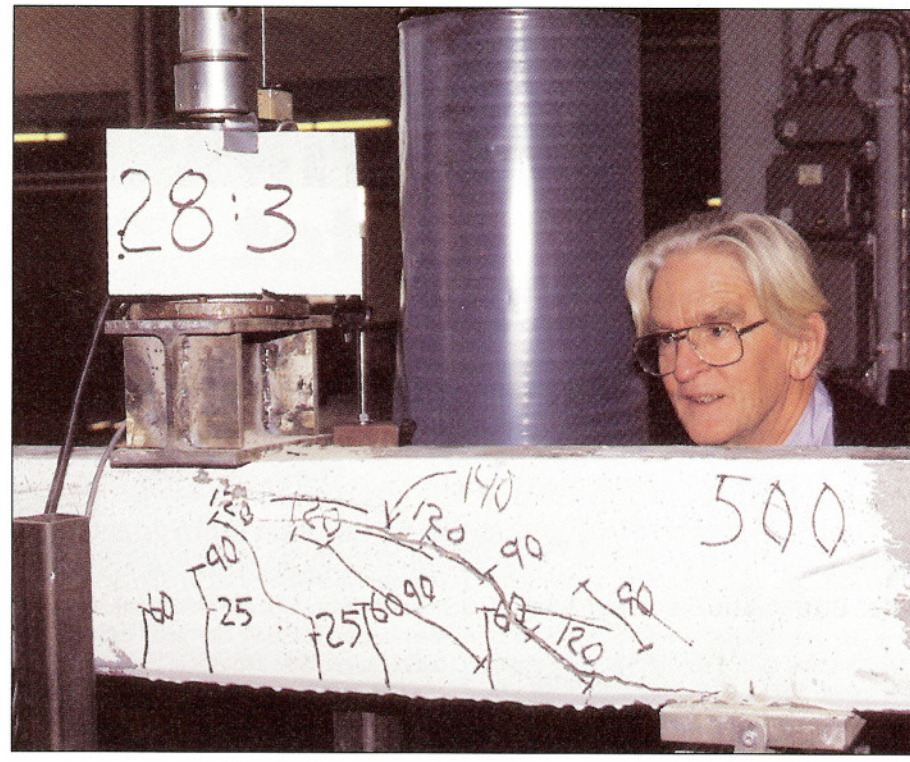
Balkarna göts med ordinarie personal och utrustning vid fabriken samt testades sedan vid LTH med avseende på moment- och tvärkraftskapacitet.

Resultaten av balkförsöken påvisar en god överensstämmelse mellan erhållen momentrespektive tvärkraftskapacitet och, enligt (extrapolerade) Bestämmelser för Betongkonstruktioner av år 1979, BBK 79, beräknade kapaciteter. Resultaten innebär att volymeffekten av högpresterande betong kan utnyttjas inte bara vid tryckta konstruktioner utan även vid böjda. Först bör dock långtidsutvecklingen av den högpresterande betongens draghållfasthet följas upp. Vid BML har vi »arkiverat« 6 ton betong för detta ändamål.

Nationellt program

Ett nationellt samarbetsprojekt mellan industri och högskolor beträffande högpresterande betong har nyligen startats i Sverige. Projektet har högintressanta frågor att studera. Förhoppningsvis skall dess resultat leda fram till normer och bestämmelser, vilka kommer att möjliggöra konstruktion och tillverkning även i Sverige av högpresterande betong – möjlighetemas material. ◆

Bertil Persson



Sprickbildning vid skjuvförsök av balk i högpresterande betong, vct = 0.28, tillverkad av Skanska Prefab, Staffanstorp. Arne Hillerborg är observatör.

Bertil Persson är civilingenjör vid avdelningen Byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola.

Litteratur:

◆ 1990. Fagerlund och Persson. *Högpresterande betong utan byggfukt.* Cementa nr 3.

◆ 1990. E. Poulsen. *Chlorider og 100 års levetid.* Dansk Betondag.

◆ 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.

◆ 1991. G. Hedenblad. *Mätning av RF i platta på mark.* BML, LTH.

◆ 1991. S. Sahlen. *Mätning av RF i betongprover från SIAB.* BML, LTH.

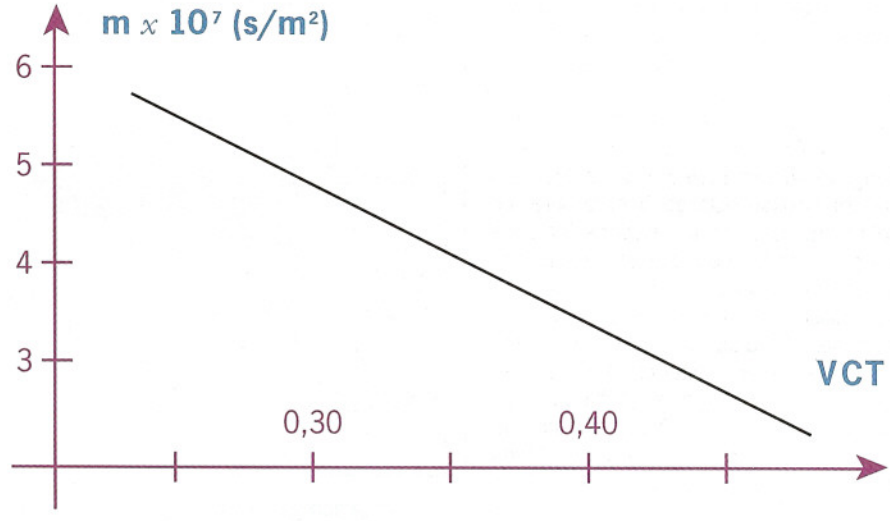
◆ 1991. L.M. Sheppard.*Progress in Cements.* ACC Bulletin, no 3.

◆ 1991. Betong-Blandaren nr 2. *Strå Fabrikbetong.*

◆ 1991. B. Persson. *Högpresterande betong ger fuktsäker platta på mark.* Betong nr 1.

◆ 1991. M. Redlund. *Finland först i världen med brandtester av hög- hållfast betong.* Betong nr 2.

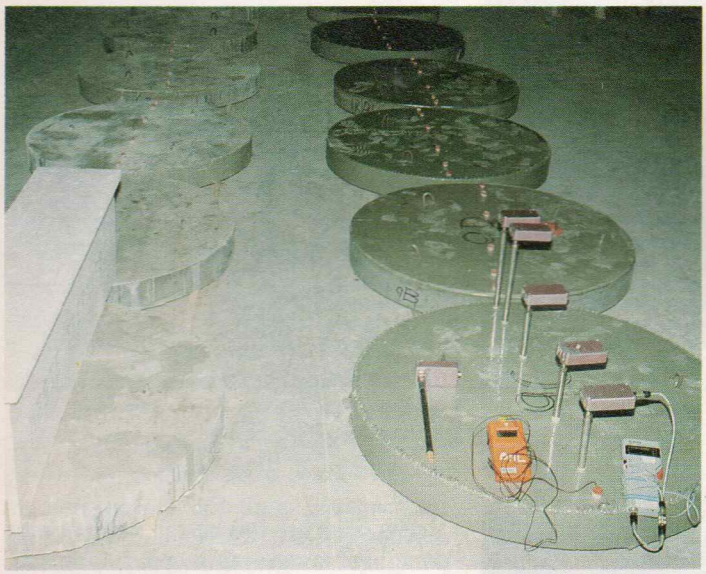
◆ 1991. S.G. Fagerlund and S.B. Persson. *Hydration of Highperformance concrete.* Abstracts of 93rd Annual Meeting & Exposition, Cincinnati. American Ceramic Society.



Motståndstalet för vatteninsugning, m, som funktion av vattencementtalet, vct.

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

Högpresterande betong torkar även i vatten



Studier vid Lunds tekniska högskola visar att en högpresterande betong fortsätter att torka lång tid efter gjutningen även om betongen ligger i vatten. Liknande resultat har forskare i Kanada konstaterat. LTH har även funnit att självuttorkningen i högpresterande betong med anläggningscement, injekteringscement resp Slite Std-cement är olika.

Av civing Bertil Persson
Lunds tekniska högskola, Byggnadsmaterial

Mätning av relativ fuktighet, RF, i ingjutna mätrör vid BMLs laboratorium, LTH. Dessutom har några skivor lagrats i vatten.

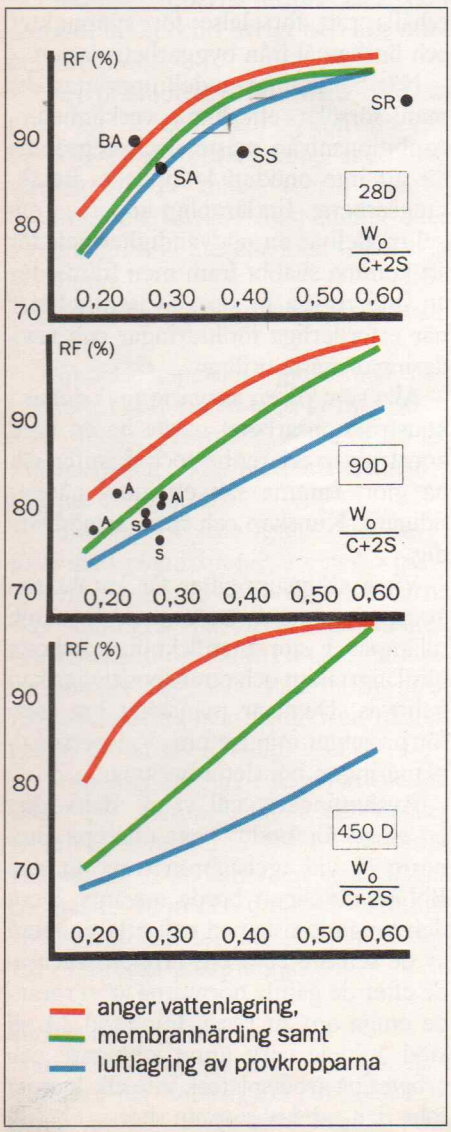


Fig 1. RF som funktion av $vbt_{eff}=w_o/(C+2S)$. Mätningen är utförd 50 mm från betongskivans kant vid varierande tidpunkter. w_o anger vatteninnehåll i betongen vid blandning, C resp S innehåll av cement resp silikastoft samt D ålder i dygn. I figuren har även inlagts resultat från fältförsök enligt Persson (1991), G Hedenblad (1991), S Sahlen (1991) samt Betong-Blandaren nr 2/91.

A = Anläggningscement, PSB 04-91.
AI = Anläggningscement och injekteringscement, PSB 04-91.
BA = BMLs försök, anläggningscement, 15 proc silika.
S = Slite Stdcement, PSB 04-91.
SA = Siabs försök, anläggningscement, 8 proc silika.
SS = Siabs försök, Slite Stdcement, 0 proc silika.
SR = Siabs försök, Slite Stdcement, ref, 0 proc silika.

Betong kan under vissa omständigheter självuttorka, t ex i grova konstruktioner. Självuttorkning innebär att fukthalten minskar i membranisolerad betong till följd av att cementet fortsätter att binda vatten under lång tid. Självuttorkning hos betong innebär vissa fördelar t ex frostbeständighet även då lufttillsats saknas, vattentäthet och fuktsäkerhet.

Studier vid avdelningen för Byggnadsmaterial, BML, Lunds tekniska högskola visar att ett ytnära skikt av högpresterande betong gör betongen i sig själv självuttorkande, även då betongen legat i vatten under så lång tid som 450 dygn. Tidigare har L-O Nilsson (1984) konstaterat en kraftig självuttorkning hos silikabruk.

Åtta betongskivor i vatten

I vårt försök ingick 24 betongskivor varav åtta förvarades i vatten under hela försöket. Skivornas plana sidor var noggrant tätade med minst 2 mm epoxi medan kanterna utsattes för vatten, luft eller tätades även dessa (membranhärdning). Skivornas dimension var 1 m i diameter med 0,1 m skivtjocklek.

Redan från början göt vi in mätrör i skivorna på varierande avstånd från kanten för att på ett enkelt och säkert sätt bestämma relativa fuktigheten, RF, i betongen. Se även Fagerlund och Persson (1990).

Vid 28, 90 och 450 dygns ålder har ca 1 200 cylindrar borrats ut ur skivorna på motsvarande avstånd som RF-rören varit placerade. På borrproven har vi sedan bestämt hållfasthet och hydratation. Vi har studerat åtta betongkvaliteter med vattencementtal, vct, mellan 0,22 och 0,58.

Eftersom vi med högpresterande betong avser betong med vct lägre än 0,35, får en del av proverna betraktas som referensobjekt. Som bindemedel har vi använt mellan 12 och 19 proc anläggningscement. I hälften av prov-



Gjutning av platta på mark i högpresterande betong med vbt_{eff}=0,33 vid fullskaleförsök i Hardeberga (Slite Stdcement). I provplattan erhölls RF=88 proc medan intilliggande referensplatta samtidigt gav värdet RF=96 proc (vct=0,65).

kropparna har dessutom 10 proc silikastoft, räknat på cementinnehållet tillsatts. Beträffande betongreceptur se B Persson (1990).

Relativ fuktighet, RF

Efter 28, 90 och 450 dygn mätte vi skivornas relativa fuktighet i 144 mätrör på avståndet 50, 150 och 350 mm från kanten. Fig 1 visar RF som funktion av $vbt_{eff}=w_o/(C+2S)$.

Figuren visar även att betong med vbt_{eff}= 0,20 fortsätter att torka 50 mm från den vattenexponerande yta, 450 dygn efter gjutning. Vid vbt_{eff} = 0,27 är RF = 90 proc (ansett som en kritisk gräns för limning av plastmattor e dyl) 50 mm från den vattenexponerade ytan, 450 dygn efter gjutning. Fältresultat inlagda i fig 1, antyder en snabbare självuttorkning med cement av typ Slite än med anläggningscement.

Självuttorkning av fukthärdad högpresterande betong har även konstaterats av forskare vid Ontario-universitetet, Kanada. Se L M Sheppard (1991) samt Fagerlund och Persson (1991).

Inverkan av cementtyp på relativ fuktighet

Även vid BML har vi konstaterat en skillnad i självuttorkning mellan cementtyperna anläggning, injektering resp Slite vid bruksprover med vct = 0,24 samt vid utvärdering av provmetod PSB 04-91 vilket framgår av fig 2. I likhet med fältresultaten antyder bruksproven och utvärderingen en snabbare självuttorkning med cement av typ Slite Std jämfört med cementtyperna anläggning resp injektering.

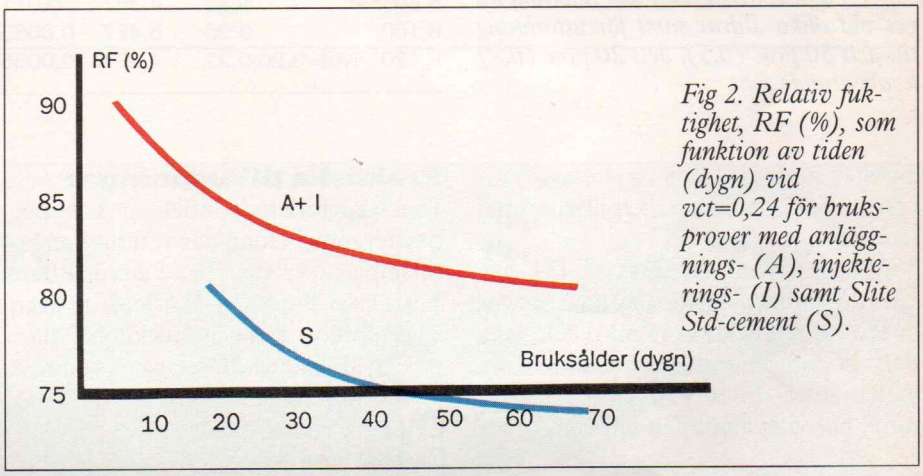


Fig 2. Relativ fuktighet, RF (%), som funktion av tiden (dygn) vid vct=0,24 för bruksprover med anläggnings- (A), injekterings- (I) samt Slite Std-cement (S).

Diffusivitet och kapillaritet

Högpresterande betong har en mindre porositet jämfört med vanlig betong. Dessutom minskar pordiametern då silikastoft tillsättes betongen. I samband med tillverkning av betongskivorna göt vi även cylindrar med diameter 0,1 m. Av dessa cylindrar kapade vi skivor med tjockleken 15 mm. Vissa skivor torkades under 250 dygn, medan andra vattenlagrades under 250 dygn och torkades därefter. Fig 3 visar diffusiviteten, D_w, (fukttransportförmågan) som funktion av vct vid olika åldrar.

Diffusiviteten för högpresterande betong med lågt vct är mindre än hälften av diffusiviteten för vanlig betong. Detta är emellertid inte hela förklaringen till varför högpresterande betong torkar även i vatten. En annan förklaring kan vara dess förmåga att suga vatten. För att undersöka detta, lades de till RF=33 proc torkade skivorna med sin ena sida i vatten. Därefter mättes insugen vattenmängd. Fig 4 visar insugen vattenmängd för sex betongskivor som funktion av tiden.

Den halverade vatteninsugningen för högpresterande betong jämfört med vanlig betong, kan ej heller förklara varför högpresterande betong torkar 50 mm från den i 450 dygn vattenexponerade ytan. Kurvans krökta form i fig 4,

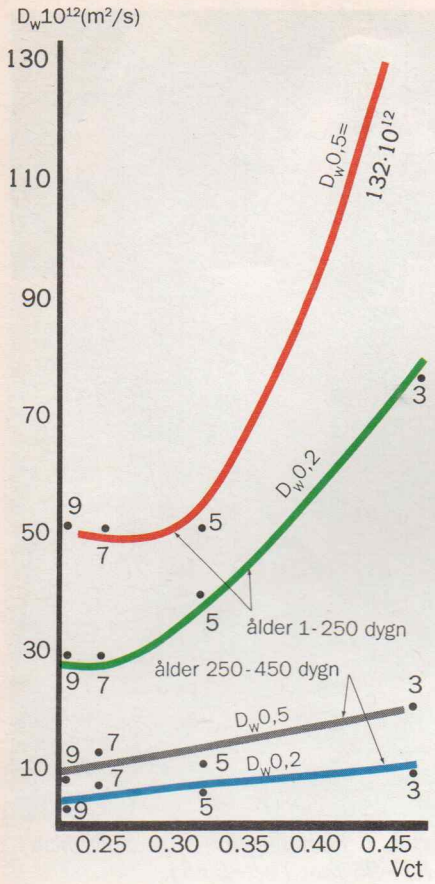


Fig 3. Diffusiviteten, D_w, som funktion av vct vid olika åldrar samt för uttorkning till dels 50 proc (0,5), dels 20 proc (0,2) kvarvarande fukt.

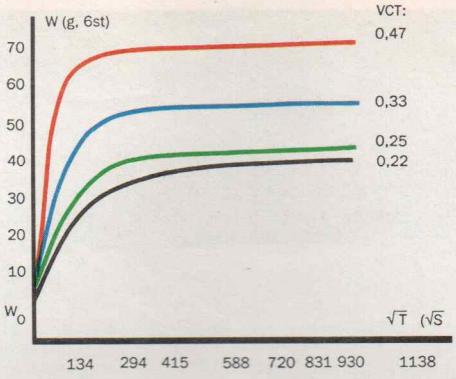


Fig 4. Insugen vattenmängd för sex betongskivor (g) som funktion av $\sqrt{t}$ ($\sqrt{s}$), där t anger tiden. Skivorna hade diameter 100 mm och tjocklek ca 15 mm. Vct anges i figuren.

Ur fig 4 kan motståndstal för vattensugning, m, resp kapillaritet, k, beräknas enligt nedan.

Hållfasthetsklass	Vct	m (s/m²)	k (kg/m² $\sqrt{s}$)
K 60	0,47	2,4E7	0,019
K 80	0,33	4,3E7	0,011
K 100	0,25	6,4E7	0,0065
K 120	(vbt=0,20)0,22	4,9E7	0,0065

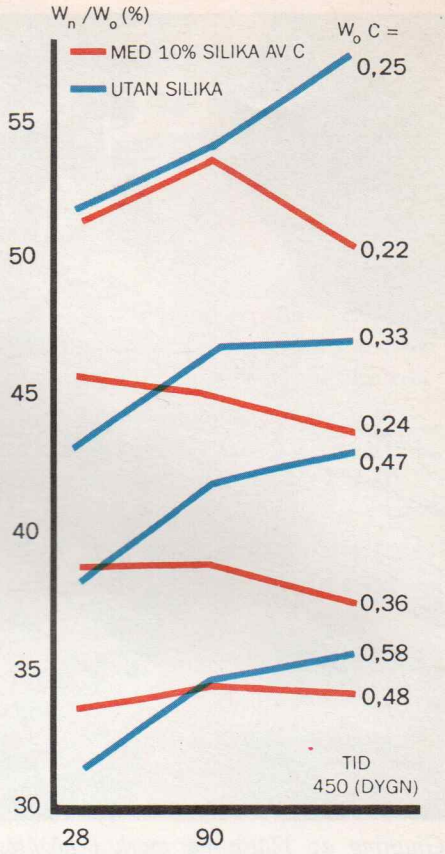


Fig 5. Hydratationsutvecklingen i betong. w_n är kemiskt bundet vatten och w_o är blandningsvatten. Vct anges i figuren.

antyder att det vid låga vct, tar avsevärd tid att fylla upp de sista kapillärporerna med vatten.

Möjligen kan vid BML, LTH, pågående uttorkningsförsök med skivor av lite större tjocklek (45 mm) klarläggas den högpresterande betongens stora vattentäthet. Efter 450 dygns uttorkning, har vi ej ännu nått jämvikt.

Dehydratation

Ca 450 utborrade cylindrar har efter bestämning av tryckhållfasthet torkat i 105° C under minst 30 dygn. Därefter har mängden kemiskt bundet vatten i betongen fastställts genom glödgning i 1 050° C under minst 16 timmar. Totalt har vi således glödgat ca 120 kg betong till grund för resultaten i fig 5.

Fig 5 visar att en dehydratation sker av betong med silikastoft efter ca 90 dygns betongålder. Även Zhang och Gjörv (1991) har funnit en minskning i hydratvatten efter ca 100 dygns härdning, i deras fall på bruk med silika. Vid polymerisation av kalciumsilikathydrater avges, enligt H Kühl (1967), en vattenmolekyl för varje steg, som kedjan av syre och kisel förlängs. Möjligen kan detta vara en förklaring till minskningen av w_n/w_o.

Praktiska tillämpningar

Den självtorkande effekten hos högpresterande betong har veterligt endast tillämpats i Sverige, bl a i Arvika, Bara, Billeberga, Finspång, Hardeberga, Karlstad, Svalöv samt i Stockholm (flera objekt). Följande fördelar har vunnits:

- ☐ Kortare byggtid
- ☐ Lägre torkkostnader
- ☐ Fuktsäkerhet

Eftersom fuktgivare i allmänhet saknas i ballastskivor på betongfabrikerna är det svårt att hålla mängden blandningsvatten konstant. Detta har i en del fall försämrat betongens gjutbarhet.

I övrigt kan man med högpresterande betong nå en volymeffekt i byggandet d v s ökad uthyrningsbar volym eftersom byggnadsstommen minskar. Indirekt kan även detta minska byggtiderna samt erforderliga transporter i byggandet. ■

Referenser

1967. *H Kühl*. Zement. Verlag für Bauwesen. Berlin.

1984. *L-O Nilsson*. Desorption isotherms for silica-fume/cement mortars. Opublicerad.

1990. *Fagerlund* och *Persson*. Högpresterande betong utan byggfukt. Cementa nr 3.

1990. *B Persson*. Höghållfast betong- självuttorkning och hållfasthet. Bygg & Teknik nr 7.

1991. *G Hedenblad*. Mätning av RF i platta på mark. BML, LTH.

1991. *S Sahlen*. Mätning av RF i betongprover från Siab. BML, LTH.

1991. *L M Sheppard*. Progress in Cements. ACS Bulletin, no 3.

1991. Betong-Blandaren nr 2. Strå Fabriksbetong.

1991. *B Persson*. Högpresterande betong ger fuktsäker platta på mark. Betong nr 1.

1991. *S G Fagerlund* and *S B Persson*. Hydration of Highperformance concrete. Abstracts of 93rd Annual Meeting. ACS.

1991. *B Persson*. Utvärdering av provningsmetod för vattenutsatt självtorkande betong, PSB 04-91. Rapport TVBM-7009. Avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

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

HÖGPRESTERANDE BETONG UTAN BYGGFUKT

Byggfukt kan medverka till att röta och mögel angriper material i en byggnad och till att skadliga ämnen avges. Genom att använda betong av mycket hög kvalitet som torkar ut på kort tid skulle många av dessa problem kunna lösas.

Av GÖRAN FAGERLUND
och
BERTIL PERSSON
Lunds tekniska högskola

Vanlig betong innehåller en stor mängd "farlig byggfukt" och torkar dessutom mycket långsamt. Av produktionstekniska skäl frestas man därför ofta att bygga in alldeles för höga fukthalter, med åtföljande risk för skador på ytbehandlingar och risk för försämrad inomhusmiljö. Röta, mögel och avgivning av olika skadliga ämnen från byggnadsmaterial stimuleras nämligen av höga fuktnivåer. Skall betong i framtiden kunna klassas som ett fullständigt hälsosamt material – vilket det i grunden är – måste byggfuktsproblemet kunna lösas bättre än vad som sker i dag. I denna artikel skall vi visa att betong av mycket hög kvalitet på ganska kort tid torkar sig själv genom cementreaktionen. Betongmassan blir dyrare men den totala produktionskostnaden kan mycket väl bli lägre. Torkkostnader kan tex helt undvikas.

VAD ÄR BYGGFUKT?

Luft innehåller alltid en viss mängd fukt i form av vattenånga. Ju högre luftens relativa fuktighet (r.f.) är desto mera fukt innehåller den. Betong är ett hygroskopiskt material, dvs den tar upp fukt när omgivande luft blir fuktigare och den avger fukt när luften blir torrare. Sambandet mellan luftens r.f. och betongens fukthalt uttrycks med den sk *jämviktsfuktkurvan*. Denna är olika för olika betonger. För vanliga betonger har jämviktsfuktkurvor uppmätts av prof. Lars-Olof Nilsson vid Chalmers. De återfinns i Betonghandboken del "Material".

I Fig 1 visas exempel på två jämviktsfuktkurvor som gäller för fukthärdad betong som torkar första gången. Den *totala byggfukten* är kall fukt som skall torkas ur innan betongen kommit i jämvikt med den omgivande lokalens relativa fuktighet. Om denna är 50 % visar Fig 1 att stora fuktmängder måste torkas ur – ca 75 à 110 kg/m^3 för de båda betongerna i Fig 1.

Den "farliga" byggfukten är den byggfukt som måste torka ur innan fuktnivån i betongen blivit så låg att inga byggfuktskador kan uppstå på material som står i kontakt med betongen. Den farliga byggfukten är olika för olika material, beroende på hur hög relativ fuktighet de tål. Denna sk "kritiska r.f." är ofta 85 % à 90 %. Dessa värden gäller tex för vanliga golvlim och golvmattor /2/. För material som kan ruttna eller mögla anses r.f. överstigande 70 à 75 % vara farlig.

I Fig 1 har den farliga byggfukten för en kritisk r.f. av 85 % utritats. Den är 35 resp 65 kg/m^3 för de båda betongerna.

BYGGFUKT HOS VANLIG BETONG

Fig 1 visar att byggfukthalten sänks kraftigt om betongkvaliteten höjs. Om man helt kan undvika vattentillförsel till betongen efter gjutningen skulle ändå större skillnader i byggfukthalt uppstå mellan de båda betongerna än vad som framgår av Fig 1.

I Fig 2 visas den farliga byggfukten vid r.f. 85 % för betong med olika vct och med olika vattentillgång vid gjutningen – god resp ingen. Figuren visar att den farliga byggfukten i stort sett helt skulle försvinna vid låga vct om betongen skyddas mot nedfuktning. I praktiken är det emellertid nästan omöjligt att utnyttja hela efekten av att sänka vct eftersom betongen nästan alltid blir nedfuktad någon gång under byggtiden.

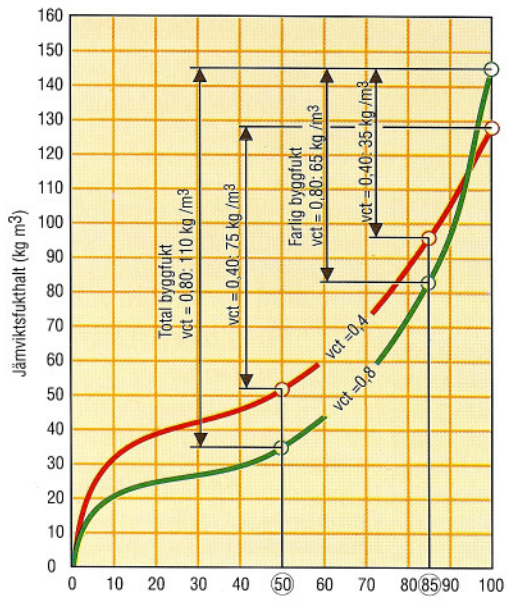


Fig 1.
Exempel på jämviktsfuktkurvor för två väl fukthärdade betonger som torkar första gången /1/. Begreppen "total byggfukt" och "farlig byggfukt" definieras i figuren.

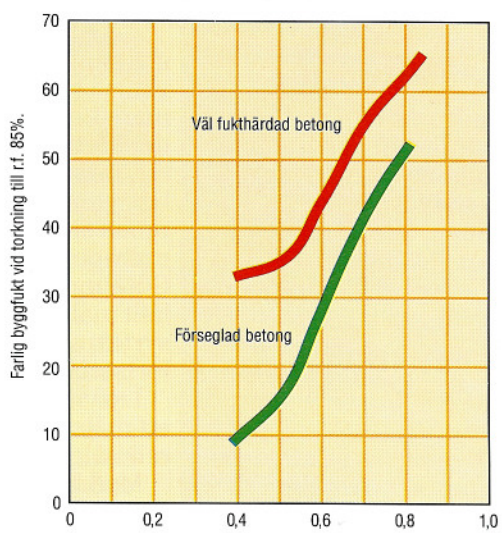


Fig 2.
Den farliga byggfukten vid torkning ner till en kritisk r.f. av 85 %.

BYGGFUKT HOS HÖG-PRESTERANDE BETONG

Begreppet "högpresterande betong" används här för betong med vct av storleksordningen 0,22–0,36. Av praktiska skäl måste alltid flyttillsats användas i sådan betong. Det är ofta intressant att använda kiselstoft – inte minst för att få en god gjutbarhet.

Sådan betong får mycket hög hållfasthet och beständighet men det visar sig också att den får mycket låg byggfukthalt. Detta har kommit fram som ett biresultat av forskning om högpresterande betong, vilken bedrivs vid vår avdelning vid LTH.

Vi har av 8 olika betongtyper gjutit 10 cm tjocka cirkulära "kvarnhjul" med 1 m diameter. Dessa har dagen efter gjutning förseglats med ett tjockt lager av epoxi på de bägge flata sidorna. På så sätt har fuktvandring endast kunnat ske i radiell riktning.

Av varje betongtyp tillverkades tre skivor. På en av dessa skivor förseglades även kanten så att den vid gjutningen tillförda vattenmängden behölls under lång tid. Skivorna visas i Fig 3.

När epoxin hårdnat placerades skivorna i tre olika klimat:

1: Oförseglad kant. Helt nedsänkt i vatten.
2: Förseglad kant. Lagrad i inomhusluft.
3: Oförseglad kant. Lagrad i inomhusluft.

Alt 1 är således *sämsta tänkbara* fall ur byggfuktsynpunkt eftersom ingen torkning utåt är möjlig. Tvärtom kan vatten sugas in. Alt 3 är *bästa tänkbara fall.*

Fukttillståndet inne i skivorna mättes i sex punkter med r.f.-mätare. Mätningarna skedde i ingjutna rör 50, 150 och 350 mm från skivans kant. I Fig 4 visas hur r.f. 50 mm från kanten förändras i skivor som *ligger i vatten hela tiden* (Alt 1). Av figuren framgår att:

1: Vid höga vbt (>0,44) blir r.f. hög under lång tid. Insugningen av vatten från kanten är uppenbarligen större än den fukt som förs bort av cementet vid dess reaktion.
2: Vid mycket lågt vct men inget kiselstoft sker en kraftig minskning av r.f. Vid vct = 0,33 (Prov D) sjunker r.f. till 90 % efter ca 3 månader. Redan efter 1 månad har betongen torkat till r.f. 93 % vilket räcker i många fall eftersom betongen sedan fortsätter att torka genom cementreaktionen.
3: När vatten-bindemedelstalet är mycket lågt och 10 % av bindemedelsmängden utgörs av kiselstoft uppnås en mycket snabb självuttorkning. Vid vbt = 0,33 (Prov E) räcker 1,5 månad för att r.f. skall nå 90 %. Vid vbt = 0,22 nås r.f. 90 % redan efter 2 veckor.

Försöken visar alltså att om betongen görs av tillräckligt hög kvalitet kommer den självuttorkning som skapas av cementreaktionen att räcka för att erforderlig uttorkning skall nås efter kort tid utan att några tork- eller skyddsåtgärder behöver vidtas på bygget.

EKONOMI

En självuttorkande, högpresterande betong blir naturligtvis dyrare i tillverkning än en vanlig betong. Materialkostnaden för en betong av typ E bedöms bli ca 150 à 200 kr/m^3 högre än för en betong av typ A beroende på vilken cementsort och tillsatsmedelssort man tvingas använda för att få hög gjutbarhet. Det innebär en merkostnad av ca 25 à 32 kr/m^2 för ett 16 cm bjälklag.

Betongkostnaden måste emellertid vägas mot de besparingar som kan göras:

- Inga torkningskostnader
- Inga förseningskostnader
- Inga kostnader för reparation av byggfuktskador
- Högre hållfasthet kan utnyttjas. En betong av typ E har en hållfasthet av ca 80 MPa vilket får utnyttjas enligt BBK. Betongtyper F, G och H har tryckhållfastheter av storleksordningen 110 à 130 MPa. Norska regler tillåter K105 och borde kunna tillämpas även i Sverige. Genom att använda högpresterande betong kan man därför öka spännvidden och därmed minska antalet betongmellanväggar. Detta medför också en minskning av den totala byggfuktbelastningen i byggnaden.

SLUTORD

Vi tycker att resultaten är så pass intressanta att de borde testas i större skala i fält. Vi bistår gärna de betongtillverkare och entreprenörer som vill genomföra sådana fältundersökningar. ■

REFERENSER

1. L-O Nilsson: Hygroscopic moisture in concrete. Avd Byggnadsmateriallära, LTH, Report TVBM – 1003, 1980.
2. G Hedenblad; L-O Nilsson: Kritiska fukttillstånd för några byggnadsmaterial. Avd Byggnadsmateriallära, LTH, Rapport TVBM – 3028, 1987.

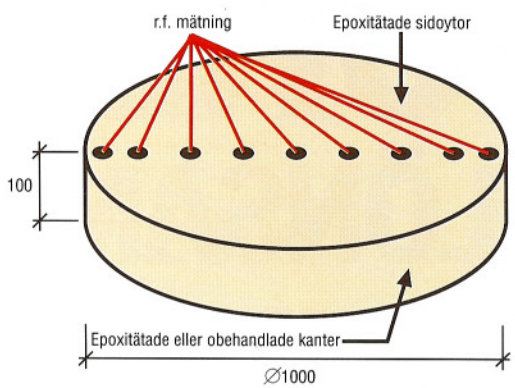


Fig 3.
Provskivor av betong.

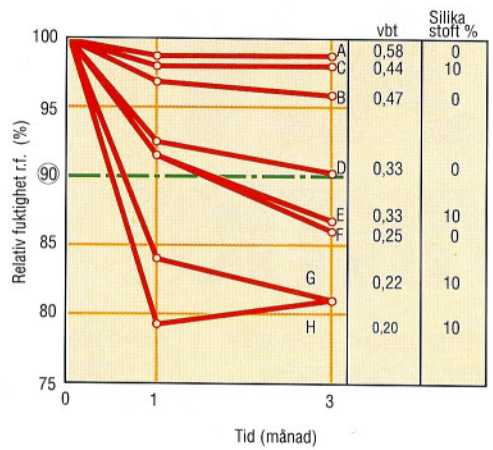


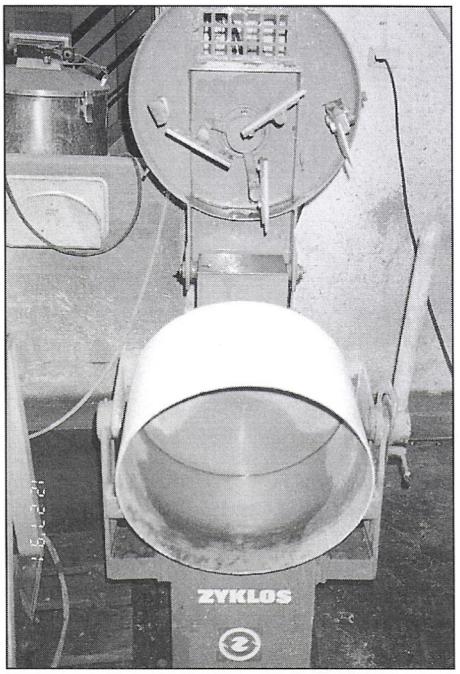
Fig 4.
Mätning av r.f. inne i betongskivor på 50 mm avstånd från kanten. Skivorna har oförseglad kant och har lagrats i vatten.

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

Högpresterande betong utan formaldehyd

Främst från arbetsmiljösynpunkt är det önskvärt att begränsa mängden formaldehyd i flytmedel till högpresterande (HP) betong speciellt i den fasta industrin, vid tillverkning av grova konstruktioner där gjutpersonalen vistas inne i formen, etc. Flytmedel ingår som tillsatsmedel vid all tillverkning av HP-betong. Flytmedlet har en plasticerande effekt på betongen vilket tillsammans med silikastoft resulterar i låga vattencementtal, vct, vid bibehållen gjutbarhet. *Doseringen av flytmedel är ofta hög*. I artikeln ges en sammanfattning av laboratorieförsök och fältförsök med HP-betong utan formaldehyd vad gäller gjutbarhet och hållfasthetstillväxt samt hydratation och självtorkning. I samband med fältförsöket tillverkades och provades betongplattor av HP-betong.

I huvudsak används tre typer av flytmedel vid tillverkning av HP-betong nämligen naftalensulfonat (naftalen), melaminformaldehyd (melamin) samt vinylcopolymer. Från betong med formaldehyd som flytmedel, avgår formaldehyd under ett par dagar från gjuttillfället räknat, [1]. Betong med naftalen avger elak lukt även lång tid efter gjutning, [2]. Naftalen används därför veterligt ej som flytmedel i den svenska betongindustrin. Betong med vinylcopolymer som flytmedel, avger en svagt parfymerad doft. Från härdad betong med vinylcopolymer, kan dock ingen sådan parfymerad doft förnimmas. Målet med denna mycket begränsade undersökning var att jämföra gjutbarheten och hållfasthetsutvecklingen etc hos HP-betonger utan formaldehyd med motsvarande egenskaper hos HP-betonger med formaldehyd. Doseringen av flytmedel var, jämfört med normal betong, mycket hög för bägge typerna av betong. Fältförsöket syftade till att jämföra brottlasten hos traditionellt tillverkade trädgårdsplattor med brottlasten hos plattor tillverkade av HP-betong utan formaldehyd. Försöket finansierades av AB Svenska Sika.



Zyklos tvångsblandare.

Provade betonger

I *tabell 1* ges recept, etc, på de betonger som provades, [3], [4], (kg/m³ torrvikt, etc).

All ballast respektive cement togs ur samma leverans varför eventuella variationer hos ballasten respektive cementen ej torde ha påverkat egenskaperna hos de provade betongerna. Först blandades allt material torrt under ca en halv minut. Därefter tillsattes blandningsvattnet inklusive eventuell luftporbildare. Blandningen fortsatte under ca en halv minut varefter flytmedlet tillsattes. Flytmedlet inblandades under ca tre minuter. All betong blandades med en Zyklos tvångsblandare

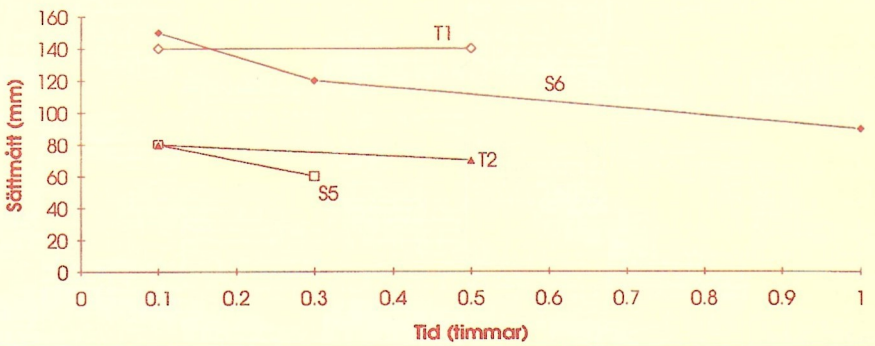
Gjutbarhet

Som relevanta mått på gjutbarheten användes sättmått samt omformningstal.



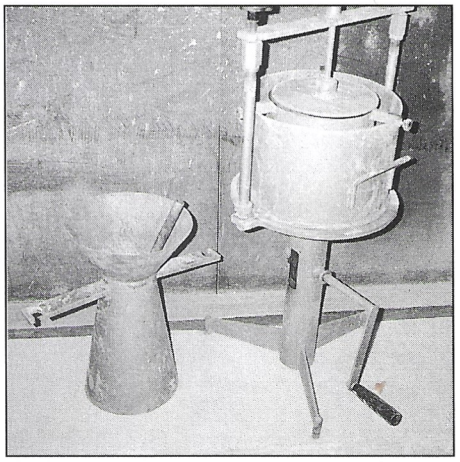
Artikelförfattare är Bertil Persson vid Lunds Tekniska Högskola, Byggnadsmaterial.

Figur 1. Utveckling av sättmått som funktion av tiden efter (första) blandning. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melaminformaldehyd.



Tabell 1 Recept, etc, på provade betonger (kg/m3 torrvikt, etc)

Material/Littera	S5	S6	T1	T2
Kvartsit, Hardeberga, 12–16 mm	1145	1055	1068	1058
Grus, Åstorp, 0–8 mm	580	660	774	754
Anläggningscement, Cementa Degerhamn Std	490	480	486	506
Silikastoft, Micropoz	49	48	49	51
Flytmedel (vinylcopolymer), Sika Sikament 10	4,8 (1 %)	6,3 (1,3 %)		
Flytmedel (melamin), Cementa V33			7,6 (1,6 %)	9,4 (1,9 %)
Luftporbildare, Cementa 88L	0,06	0.08	-	-
Lufthalt (%)	2,5	3	-	-
Vct	0,31	0,31	0,30	0,30



Apparater för mätning av sättmått (till vänster) samt omformingstal (till höger).

Dessa parametrar på gjutbarheten bestämdes dels direkt efter gjutning, dels vid varierande tidsrymder efter gjutning. Betongen rördes om i blandaren var femte minut fram tills dess gjutbarheten bestämdes. I *figur 1 på föregående sida* ges utvecklingen av sättmåttet som funktion av tiden efter (första) blandning, [3], [4].

Sättmåttsförlusten, dvs minskningen av sättmått med tiden, föreföll att vara något mindre för betong med melamin än för betong med vinylcopolymer. I *figur 2* ges utvecklingen av omformningstalet som funktion av tiden efter (första) blandning, [3], [4].

Omformningstalet ökade (gjutbarheten försämrades) något snabbare för betong med vinylcopolymer än för betong med melamin. Såväl undersökningarna beträffande sättmått som beträffande omformningstal tydde således på att melamin hade en bättre långtidsverkan på gjutbarheten än vinylcopolymer.

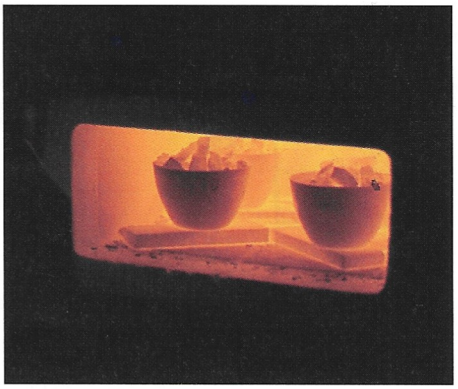
Hållfasthet

Av de provade betongerna tillverkades kuber (100 mm). Kuberna membranhärdades. Första dygnet placerades formarna med kuber i täta plastbehållare. Efter avformningen inneslöts betongkuberna i 2 mm vulkaniserad butylduk. Härdningen skedde vid 20 °C. Provningen av tryckhållfastheten skedde med en pålastningshastighet av 1 MPa/s. I *figur 3* visas tryckhållfastheten som funktion av betongens ålder.

För betong med vinylcopolymer erhölls en påtaglig retardation av hållfasthetstillväxten vid ung ålder jämfört med betong med melamin. Vid 0,7 dygns ålder erhölls ca 30 MPa högre tryckhållfasthet i betong med melamin än i betong med vinylcopolymer. Å andra sidan blev slutthållfastheten för betong med vinylcopolymer något högre (ca 15 MPa) än för betong med melamin. (Vid värmehärdning (45 °C) erhölls, efter 0,7 dygn, 42 Mpa för betong med vinylcopolymer samt 60 MPa för betong med melamin).

Hydratation

Fragment från hållfasthetsbestämningarna användes för att studera hydratationen. Två prov om vardera 150 g placerades i ett värmeskåp (105 °C) under en vecka. Proven glödgades under 16 timmar.



Glödgning av betong.

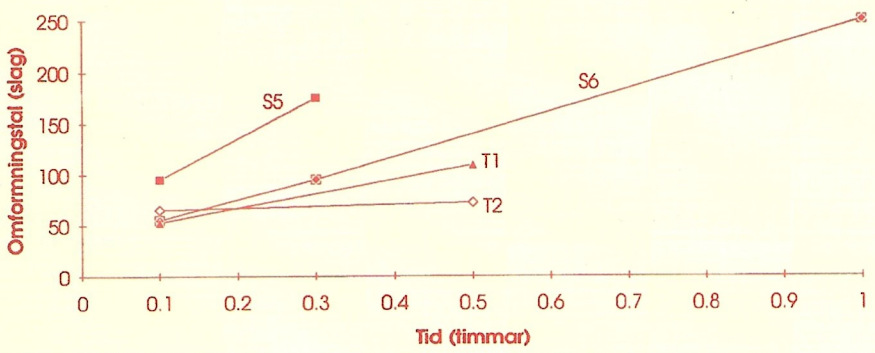
Vägning utfördes före och efter varje uppvärmning. Hydratationsgraden beräknades med hänsyn tagen till materialens egenförluster, [5], [6]. I *figur 4* visas hydratationsgraden som funktion av betongens ålder.

Frånsett *ett* dubiöst värde var hydratationsutvecklingen likartad för betong med och utan formaldehyd.

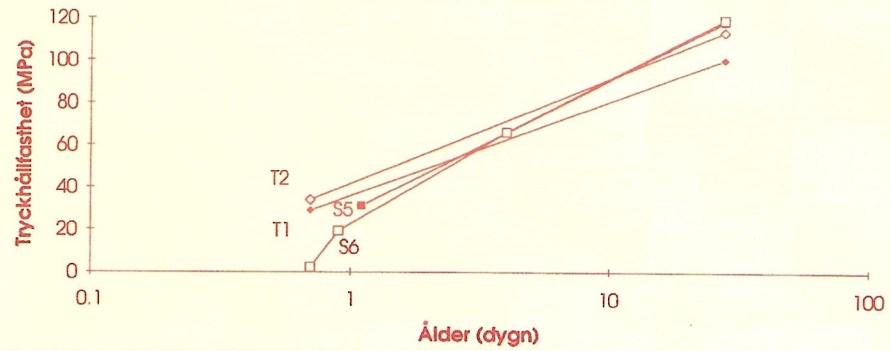
Hydratation och hållfasthet

Det var även intressant att studera hållfastheten som funktion av relativa hydratationen dvs kvoten mellan kemiskt bundet vatten och blandningsvatten (w_n/w_0). Högsta värdet för relativa hydratationen, w_n/w_0,uppgår till ca 0,65, [7]. För en högpresterande betong ökar w_n/w_0 med minskade vattencementtal och konstant ålder

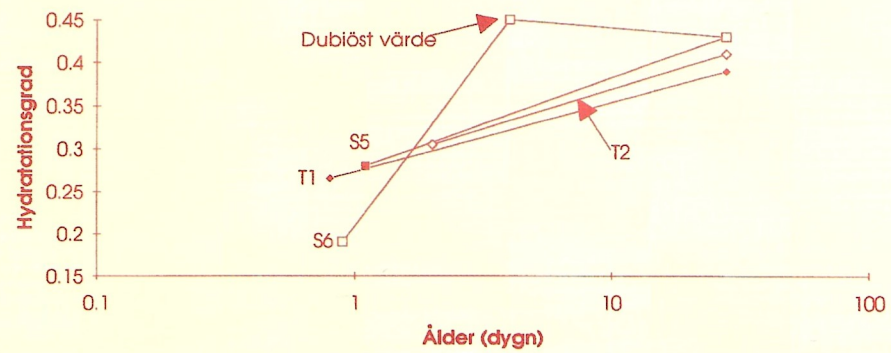
Figur 2. Utveckling av omformningstal som funktion av tiden efter (första) blandning. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melamin.



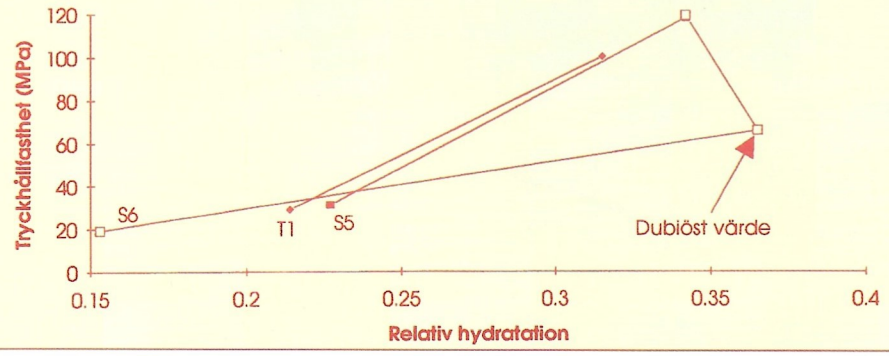
Figur 3. Tryckhållfasthet som funktion av betongens ålder. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melaminformaldehyd. (Avser 20 °C. Vid 0,7 dygns ålder och härdning vid 45 °C erhölls 42 MPa (betong S) resp 60 MPa (T))



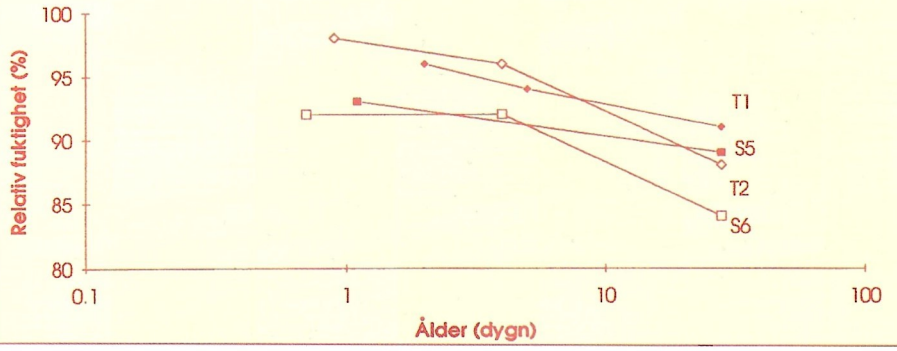
Figur 4. Hydratationsgrad som funktion av betongens ålder. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melaminformaldehyd.



Figur 5. Tryckhållfastheten som funktion av relativa hydratationen, w_n/w_0. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melaminformalde hyd.



Figur 6. Självtorkning i betong, relativ fuktighet, RF, som funktion av tiden. Beteckningar: S = betong med vinylcopolymer; T = betong med melaminformaldehyd.



(mognadsgrad). I *figur 5* ges tryckhållfastheten som funktion av relativa hydratationen, w_n/w_0.

Bortsett från *ett* dubiöst värde i figur 5 är sambandet tämligen liktydigt: utvecklingen av hydratation och hållfasthet sker oberoende av typ av flytmedelstyp (vinylcopolymer eller melamin).

Självtorkning

Så kallad snabbtorkande alternativt självtorkande betong har blivit ett stort tillämpningsområde för högpresterande betong. Det var därför intressant att studera flytmedlets eventuella inverkan på självtorkningen hos betongerna. Fragment från hållfasthetsbestämningarna placerades i rör av glas. I röret stacks det ned en kalibrerad Protimeter daggpunktgivare. Tätning skedde runt om mot glaset i röret. Mätningen utfördes under minst 16 timmar. Mätnoggrannheten anges till ±2 % relativ fuktighet, RF. I *figur 6* ges självtorkningen i betongen, relativ fuktighet, RF, som funktion av tiden.

Skillnaden i RF-utveckling mellan betong med vinylcopolymer och betong med melamin var liten. Totalt rörde det sig om ca 2 % lägre RF för betong med vinylcopolymer som tillsatsmedel dvs inom mätnoggrannheten. Skillnaden i RF mellan betongtyperna kan även bero på att luftporbildare tillsattes betongen med vinylcopolymer. Skillnaderna i RF mellan å ena sidan betong med melamin och å andra sidan betong med vinylcopolymer och luftporbildare förefaller nämligen att vara störst vid ung ålder.

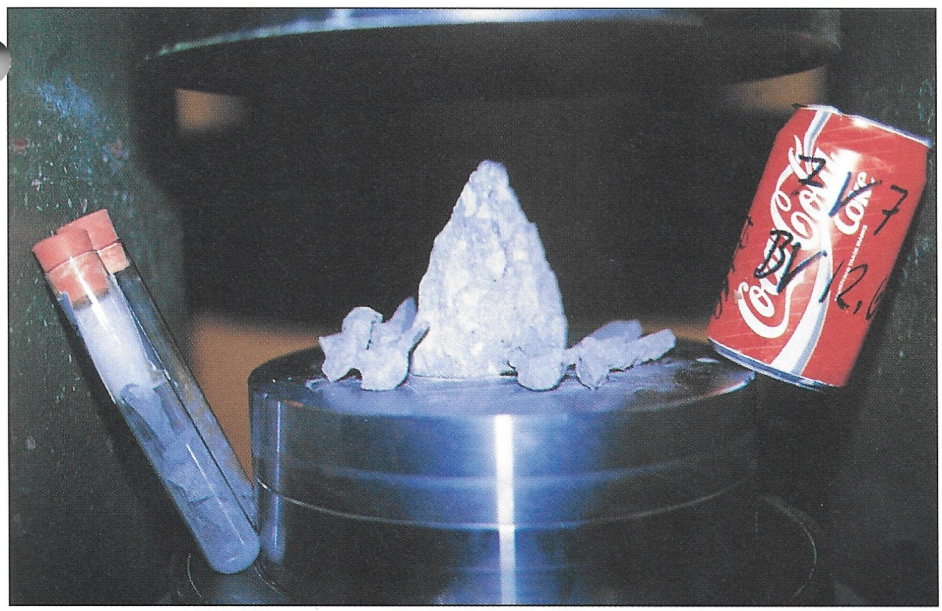
Fältförsök

Av HP-betong S6 (med vinylcopolymer som flytmedel och med luftporbildare) tillverkades det ett antal trädgårdsplattor (storlek 350 x 350 mm). Vid tillverkningen komprimerades Plattorna enbart genom vibrering. Efter 28 dygn bestämdes brottlasten hos plattorna (trepunktsupplägg-ning). Brottlasten hos plattorna jämfördes med brottlasten hos traditionellt tillverkade plattor av normal betong. I *figur 7 på nästa sida* visas brottlasten hos de provade plattorna som funktion av plattjockleken. Beteckningar ges i figuren.

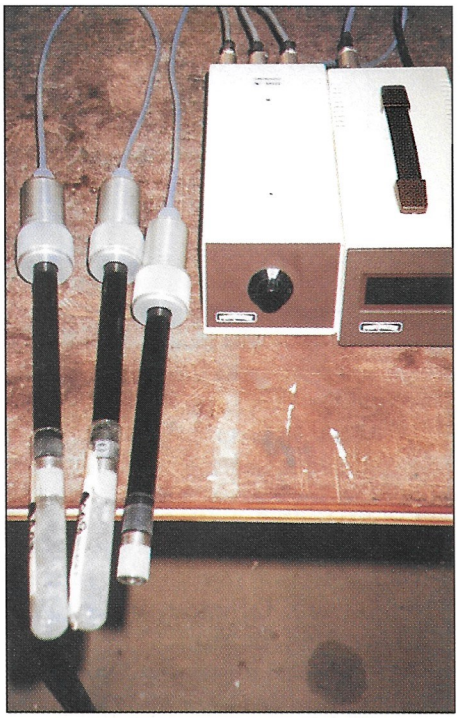
Ur figur 7 beräknades betongens böjdraghållfasthet, f_{cb}. Följande medelvärden erhölls för de provade betongerna:

HP-betong: $f_{cb} = 9{,}8$ MPa
TP-betong: $f_{cb} = 7{,}4$ MPa
VP-betong: $f_{cb} = 9{,}8$ MPa

Användning av HP-betong till trädgårdsplattor innebar således att plattjockleken kunde minskas med ca 13 % vid konstant brottlast jämfört med normal torrpressad betong. Detta innebar dels en minskad materialmängd i tillverkningen, dels minskade transportkostnader och läggningskostnader. Alternativt kunde brottlasten ökas med 31 % för trädgårdsplattorna vid bibehållen plattjocklek om HP-betong användes i stället för normal torrpressad betong. Jämfört med våtpressad betong innebar det dock inga dimen-



Betongfragment för mätning av självtorkning och hydratation.



Mätning av relativa fuktigheten med daggpunktgivare.



Betongplattor tillverkade av högpresterande betong (hitre delen) respektive torrpressad betong (bortre delen).

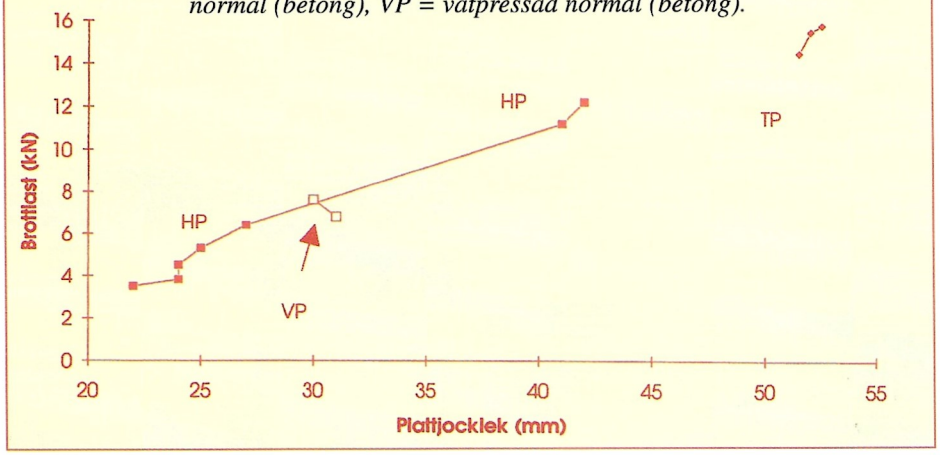
sionsmässiga fördelar att använda högpresterande betong. Vid våtpressning erhålls en så kraftig minskning av vattencementtalet i betongen att produkten i realiteten blir högpresterande

Sammanfattning

Det gick mycket väl att tillverka en högpresterande betong utan formaldehyd. Som flytmedel användes i stället en vinylcopolymer. För att nå god gjutbarhet hos betong med detta flytmedel erfordrades dock samtidig tillsats av luftporbildare.

Totalt tillverkades det fyra betonger, två stycken med vinylcopolymer som flytmedel samt två stycken med melaminformaldehyd som flytmedel. Provkropparna utgjordes av kuber med 100 mm sida, vilka membranhärdades vid 20 °C. Studium skedde av gjutbarhet (sättmått och omformningstal), hållfasthet, hydratation samt självtorkning.

Figur 7. Brottlast hos trädgårdsplattor (350 x 350 mm) som funktion av plattjockleken. Beteckningar: HP = högpresterande (betong), TP = torrpressad normal (betong), VP = våtpressad normal (betong).



- Direkt efter blandning var gjutbarheten rätt lika för de bägge betongerna. Gjutbarheten försämrades dock snabbare för en betong med vinylcopolymer än för en betong med melamin.
- Den tidiga hållfasthetsutvecklingen var mycket olika för de bägge betongtyperna. Betong med melamin erhöll ca 30 MPa högre tryckhållfasthet vid 0,7 dygn än betong med en vinylcopolymer som tillsatsmedel (retardation). Å andra sidan blev sluthållfastheten (28 dygn) ca 15 MPa högre i betongen med vinylcopolymer jämfört med betongen med melamin.
- Hydratation och självtorkning skedde tämligen oberoende av betongtyp. En tendens till lägre relativ fuktighet, RF, i betong med vinylcopolymer som flytmedel jämfört med RF i betong med melamin, torde förklaras av mätnoggrannheten, ± 2 %.
- HP-betong utan formaldehyd provades för ett antal trädgårdsplattor. Plattjockleken kunde minskas med ca 13 % vid konstant brottlast jämfört med normal torrpressad betong.

Referenser

[1] *Sven-Erik Johansson.* Emissionsmätningar på betong. Personlig information. Euroc Research 1994.

[2] *Kristina Norling-Mjörnell.* Selfdesiccation in concrete. Publikation P 94:2. CTH Byggnadsmaterial. Göteborg. 1994.

[3] *Bertil Persson.* Högpresterande Betong utan formaldehyd. Rapport U94.05. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1994.

[4] *Bertil Persson.* Långtidsdeformationer. Förstudie beträffande proportionering. Konsortiet Högpresterande betong. Rapport M6:02. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

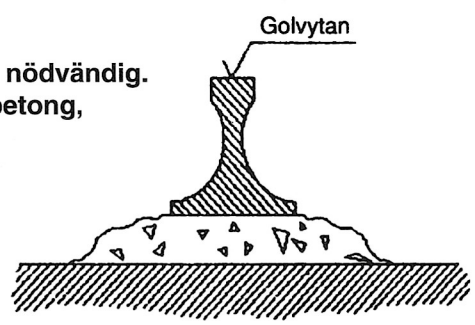
[5] *Jan Byfors.* Plain Concrete at Early Ages. FO 3:80. Cement- och betonginstitutet. Stockholm. 1980.

[6] *Bertil Persson.* Långtidsdeformationer. Databank – baserad på försök med grundkrypning. Konsortiet Högpresterande betong. Rapport M6:14. LTH Byggnadsmaterial. Lund. Preliminär 1993-12-09.

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

En fast punkt i tillvaron

För en golvläggare är en fast punkt nödvändig. Med PERMABAN, avdragsbanan i betong, får Du en punkt som lägges snabbt och enkelt. Och som är stabil utan att bli för stor. PERMABAN suger sig fast på en låg punkt. Höga punkter skapar brottanvisningar.



PERMABAN®

Förrådsgatan 43, 542 35 Mariestad
Tel/fax 0501-150 20

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

Högpresterande självkompakterande varmbetong

Alltsedan *Joseph Aspdin* återuppfann sättet att producera romancement och 1824 patenterade detta som Portlandcement, har en enveten strävan funnits mot högpresterande betong. Var tid har haft sin högpresterande betong, även romartiden i form av till exempel teatern Panteon, Rom. Högkvalitetsbetong är i tiden eftersom volymen cement minskar med denna och därmed den total mängden koldioxidutsläpp i samband med tillverkning av betong. Sekundärt, med högre kvalitet hos betongen, följer även lägre transportkostnader, mindre kranar, mindre egentyngd, enklare grundläggning, lägre totalkostnader etcetera. Konservatism inom betongbranschen har dock fått till följd att högkvalitativ betong har missgynnats till fördel för större kvantiteter av lågvärdig sådan. Detta är strategiskt till förfång för hela betongbranschen och innebär kortsiktigt väsentligen högre byggkostnaderna, totalt sett, än om modern betongteknik hade vunnit intåg även i Sverige.



FOTO: CEMENTA AB

Panteon, Rom, 118 till 126, sin och vår tids högpresterande betong.

Arbetet utfördes som en direkt följd av ett banbrytande examensarbeten om högpresterande betong ett tiotal år tidigare, [1–5]. Optimering skedde nu av en högpresterande självkompakterande varmbetong (HSV) avsedd för tillverkning betongelement. Betongen skulle användas vid en temperatur av 35 ºC vid gjuttillfället och sedan härdas vid 35 ºC under fem timmar från gjutning. Vid optimeringen uppmättes betongens tryckhållfasthet vid åldrar varierande mellan fyra och sex timmar (härdning vid 35 °C), då 15 MPa ska överskridas, respektive vid 28 dygns ålder (härdning vid 20 °C i vatten) då 100 MPa ska överstigas. Underlag för optimeringen erhölls i form av delmaterial såsom cement Cemex och Skövde SH, flytmedel Glenium 51 och Glenium ACE 30, krossat berg från Skanska 2 till 5 mm och från Swerock 4 till 8 mm, sand från Baskarp B15, B20, B25, B55, B75 och B95 samt silikastoft Eka Cembinder och Elkem. Även fyra betongblandningar med stenkross 0 till 4 mm från Swerock studerades. Optimeringen utfördes vid Teknocenter, Halmstad högskola, Halmstad. Här sker en redovisning av betongsammansättning, gjutbarhet och hållfasthet



Artikelförfattare är ***Bertil Persson****, docent, Bara.*

Tabell 1: Material etcetera (kg/m³ etcetera).

Betong	*HSV1*	*HSV2*	*HSV3*	*HSV4*	*HSV5*	*HSV6*	*HSV7*	*HSV8*	*HSV9*	*HSV10*	*HSV11*	*HSV12*	*HSV13*
Silikastoft	12,6	12,7	15,8	14,4	14,8	14,8	14,5	14,5	14,4	14,5	38,7		
Cemex	548	425	306	306	411	370							
Skövde SH		113	102	102	103	93	484	484	484	484	464	484	484
Limus 40									67	67			0
Kross 0–4			803	321			636		619				0
B15	135	23				319	198	345	160	302	319	302	345
B25	212	274	174	384	322	47					47	0	0
B55	156	95	91	202		201	190	284	192	288	201	288	284
B70	91	44			168	225					225	0	0
B95	198	295	134	296	137	101	215	360	218	358	101	358	360
Kross 2–4	492	419			511	448		234		231	448	231	234
Kross 4–8	447	574	643	643	557	433	491	505	497	505	433	505	505
Glenium 51	12,0	9,00	8,61	8,60	14,9	11,9							0
Gl, ACE 30							9,48	7,48	10,5	7,48	7,18	7,48	7,92
Vatten	154	157	172	172	197	163	171	176	173	173	169	169	172
Vct	0,280	0,290	0,397	0,397	0,361	0,331	0,333	0,343	0,337	0,337	0,343	0,329	0,306

Tabell 2: Arbetbarheten, densitet och temperatur (°C, etcetera)

	HSV1	HSV2	HSV3	HSV4	HSV5	HSV6	HS7	HSV8	HSV9	HSV10	HSV11	HSV12	HSV13
Temp torrt (°C)			47,3	45,3	54,8	47,3	51,2	49,2	50	37,9	49,6	50,7	49,6
Densitet prel	2 415	2 475	2 446	2 447	2 532	2 417	2 409	2 412	2 412	2 412	2 412	2 408	2 431
Uppmätt	2 460	2 420			2 430	2 433	2 413	2 408	2 418	2 428	2 420	2 435	2 410
Kontroll	2 444	2 428			2 437	2 427	2 409	2 410	2 435	2 430	2 429	2 359	2 431
Cembinder			32	32	40								
Temp (°C)			33,7	35,8	40,3	37	37,1	36,9	36,4	30,4	37,0	36,4	37,6
Sättmått (mm)	280	300	190	65									
Flytsättmått (mm)	580	620			620	720	620	625	685	760	620	735	725
L-box (h^2/h^1)					0	0,91	0,71	0,74	0,94	1,00	0,74	0,929	0,97
Temp kuber (°C)					26,7	26,6	33,5	35,0	34,5	35	35,2	35,0	37,0
Flytbarhet	FF	FF	HF	TF	FF	SKB	SKB-sträv	SKB	SKB-sträv	SKB-sep	SKB	SKB	SKB

sep är lika med smärre separationstendens (smärre minskning av flytmedel krävs), sträv är lika med stor inre friktion med hänsyn till olämplig mineralogi, FF är lika med fullflyt, HF är lika med halvflyt, TF är lika med trögflyt, SKB är lika med självkompakterande betong.

Tabell 3: Hållfasthetsutveckling (våt kub MPa).

Ålder (h)	HSV1	HSV2	HSV5	HSV6	Ålder (h)	HSV7	HSV8	HSV9	HSV10	HSV11	HSV12	HSV13
7	0,0	0,0	0,0	0,0	4	2,0	7,9	2,8	9,3	2,2	2,0	4,4
16	58,0	37,5	52,2		5	6,2	24,9	8,6	27,4	7,5	6,2	8,1
48	65,1	61,4	63,0		6	27,1	37,7	21,9	37,8	15,7	27,1	19,3
72				80,8								
672	97,9	83,3			672	101,5	88,2	88,9	93,2	96,7	102,7	110,0
Std.av					Std.av	1,1	5,3	4,2	3,0	0,9	1,5	3,8
K					K	97,3	79,9	81,6	87,2	92,7	98,2	103,2
-"-, torrt					-"-, torrt	111,9	91,9	93,9	100,3	106,6	112,9	118,7

vid åldrar varierande mellan fyra och sex timmar samt vid 28 dygns ålder efter ovannämnda härdning. Arbetet utfördes under januari till mars 2007. Syftet med arbetet var att utföra en optimering av en HSV som skulle kunna gjutas med pump i trånga utrymmen, vid 35 °C, avformas fem timmar efter gjutning, då med cirka 15 MPa i tryckhållfasthet samt därefter, vid 20 °C kunna nå minst 100 MPa i tryckhållfasthet 28 dygn efter gjutning.

Material

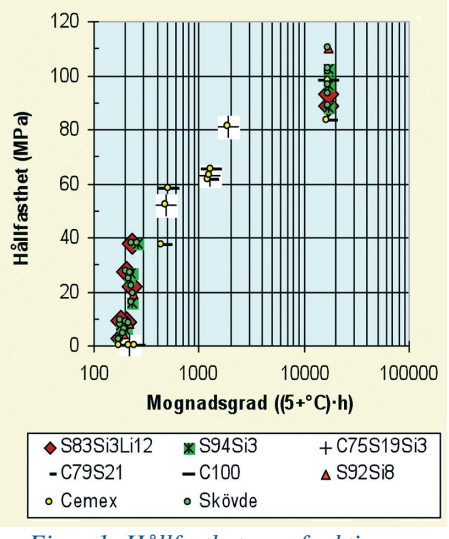
Följande material och hantering av material tillämpades vid slutoptimeringen, *tabell 1*:

1. Alla material förutom vatten, Cembinder och flytmedel torkades vid 20 °C.
2. Torra material uppvägdes, vikten dubbelkontrollerades och lagrades fuktätt vid 50 °C.
3. Vattenmängden minskades med vatten i flytmedel, kross och silikastoft Cembinder.
4. Mängden silikastoft Cembinder anpassades så att korrekt mängd silikastoft erhölls.
5. Silikastoft Cembinder tillsattes med blandningsvattnet – silikastoft Elkem torrt.

Metoder

Följande metoder användes:

1. Temperaturen kontrollerades med instickstermometer före det att blandning skedde.
2. Blandning med vatten och halva mängden flytmedel skedde under en minut.
3. Därefter skedde omedelbart blandning med allt flytmedel under två minuter.
4. Temperaturen kontrollerades med instickstermometer och noteras efter blandning.
5. Om flytsättmått större än 620 mm erhölls skedde mätning i L-box (h^2/h^1).
6. Densitet mättes då flytsättmått större än 620 mm samt L-box h^2/h^1 större än 0,7 hade erhållits.



Figur 1: Hållfasthet som funktion av ålder.

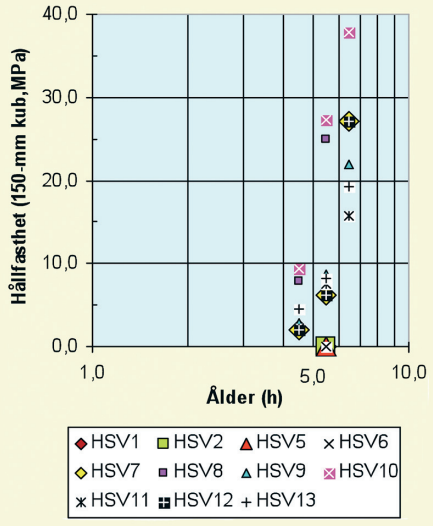
7. Då flytsättmått större än 620 mm plus L-box h^2/h^1 större än 0,7 erhållits göts tre plus tre stycken 150 mm:s kuber.
8. Härdningstemperatur 35 °C under fem timmar kontrollerades med yttermometer.
9. Kuberna avformades fyra, fem eller sex timmar efter gjutning.
10. Hållfastheten provades på tre kuber med åldrarna fyra, fem och sex timmar.
11. Pålastningshastighet vid provning av hållfasthet var cirka 0,8 MPa/s.
12. Tre kuber härdades i vatten vid 20 °C fram till provningen vid 28 dygns ålder.
13. Temperatur kontrollerades med yttermometer under härdning.

Resultat, analys och diskussion

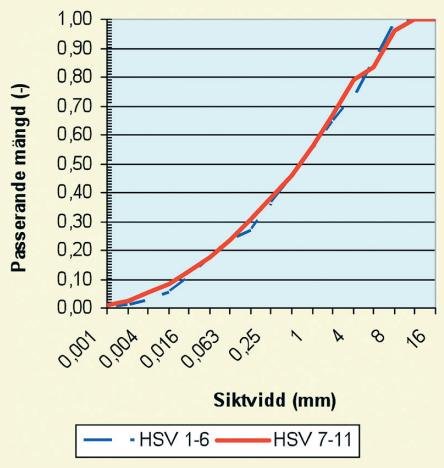
Arbetbarhet. Arbetbarhet, densitet och temperatur ges i *tabell 2*. Hållfasthet ges i *tabell 3* och *figurerna 1 och 2*. Arbetbarheten uppfylldes för samtliga HSV6 till 13. En analys gjordes av partikelfördelning, *tabell 4*, *figur 3* [6]. För HSV1 till 6 användes datorprogrammet Optiproph med en liten svacka i partikelfördelningen omkring 0,125 mm vilken svacka kan ha påverkat optimeringen ogynnsamt [7]. Å andra sidan erhölls god gjutbarhet med HSV6, men denna betong var ändock oanvändbar till följd av långsam hållfasthetstillväxt. För HSV7 till 13 användes datorprogrammet också Optiproph, men

Tabell 4: Partikelfördelning hos provade betonger.

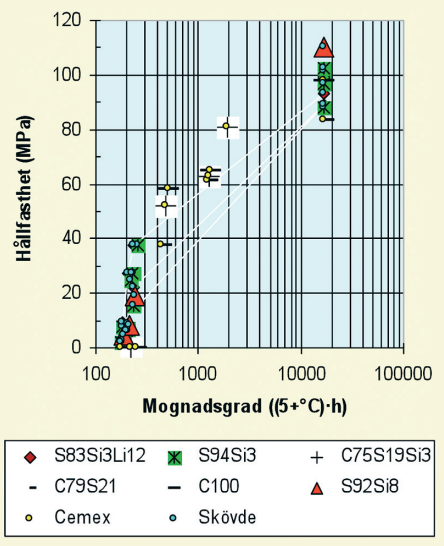
Siktvidd (mm)	8	6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0,031	0,016	0,008	0,004	0,002	0,001
HSV1–6	1,00	0,86	0,74	0,65	0,55	0,46	0,37	0,27	0,24	0,18	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01
HSV7–11	0,96	0,84	0,79	0,67	0,56	0,46	0,38	0,31	0,24	0,18	0,13	0,09	0,05	0,03	0,01



Figur 2: Tidig hållfasthet som funktion av ålder.



Figur 3: Partikelfördelning hos provade betonger.



Figur 4: Hållfasthet som funktion av mognadsgrad.

Tabell 5: Klassificering av betongtyper och materialinnehåll (%).

Typ	1	2	3	4	5	6
Beteckning	S83Si3Li12	S94Si3	C75S19Si3	C79S21	C100	S92Si8
Betong	HSV9-10	HSV7-8, 11	HSV5-6	HSV2	HSV1	HSV13
Silikastoft	3	3	3	0	0	8
Cemex	0	0	75	79	100	0
Skövde SH	83	94	19	21	0	92
Limus 40	12	0	0	0	0	0

Tabell 6: Hållfasthet (MPa) som funktion av mognadsgrad ((5+°C)•h).

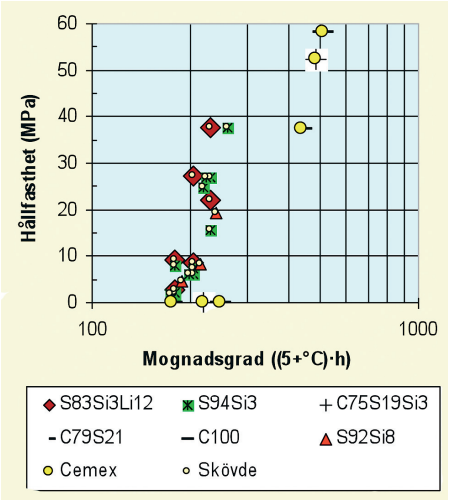
Betongtyp (5+°C)•h	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***
Mognadsgrad	S83Si3Li12	S94Si3	C75S19Si3	C79S21	C100	S92Si8
248					0.0	
510					58.0	
1310					65.1	
16910					97.9	
176				0		
439				37		
1239				61		
16839				83		
220			0.0			
483			52.2			
1283			63.0			
1906			80.8			
180		2.0				
205		6.2				
230		27.1				
16868		101.5				
180		7.9				
220		24.9				
260		37.7				
16898		88.2				
180		2.2				
205		7.5				
230		15.7				
16868		96.75				
180	2.8					
205	8.6					
230	21.9					
16868	88.9					
180	9.3					
205	27.4					
230	37.8					
16868	93.2					
173		2.0				
198		6.2				
223		27.1				
16861		102.7				
189						4.4
214						8.1
239						19.3
16877						110



Högpresterande betong i pyloner och ankare till Stora Bältbron, 1990 till 1991.

med en ideal partikelfördelning identiskt med en partikelfördelning i ett schweiziskt projekt likt föreliggande optimering, det vill säga tjugoåttadygnshållfasthet, 120 MPa, silikastoft, flytmedel Glenium ACE 30, vattencementtal är lika med 0,33 etcetera [8]. För HSV6 till 13 skedde ett byte av Cembinder (60 procent vatten) till torrt silikastoft i syfte att förbättra gjutbarheten.

Tidig hållfasthet. Tidig hållfasthet 15 MPa efter fem timmar uppfylldes för HSV8 och HSV10 – efter sex timmar uppfyllde samtliga HSV7 till 13 15 MPa. En bedömning gjordes av mognadsgrad, *tabellerna 5* och *6* och *figurerna 4* och *5* [9]. En bedömning gjordes också av inverkan av cementtyp [10, 11]. Av figurerna 4 och 5 ges att 15 MPa ej kunde nås med cement Cemex med mognadsgrad cirka 200 (5+°C)•h utan att cement Skövde SH krävdes. Detta beror på att cement Skövde SH är mycket mer finmalt än cement Cemex, Appendix. Med tillgänglig mognadsgrad 200 (5+°C)•h erhölls ingen hållfasthet alls med cement Cemex efter sju timmar. Först vid ålder större än sju timmar erhölls 15 MPa med cement Cemex. Givetvis kunde temperaturen ha ökats men då kunde betongens beständighet ha äventyrats eftersom en maximal temperatur över 55 °C under härdningen leder till risk för ettringitbildning med den höga C3A-halt som cementen har (större än fem procent). Vid alltför hög härdningstemperatur ökar givetvis även risken för sprickbildning efter avformning, det vill säga betong bör kylas långsamt för att stora temperaturskillnader



Figur 5: Tidig hållfasthet som funktion av mognadsgrad.

ska undvikas mellan betongens yta och dess inre. HSV3 och 4 med stenmjöl hade alltför ogynnsam arbetbarhet för att göra hållfasthetsprovning relevant.

Hållfasthet 28 dygn. Hållfasthetskravet vid 28 dygn, 100 MPa efter omräkning till torr hållfasthet (ökning av våt hållfasthet med 15 procent) uppfylldes för HSV7 samt samtliga HSV10 till13 [12]. Från provningarna modellerades följande samband för hållfasthetsutvecklingen (MPa):

$$f_{cc} = 11 \cdot \ln(((T - 5) \cdot t) - 133{,}3) + (-0{,}197 \cdot \ln(t) + 0{,}317) \cdot T + 6{,}61 \cdot \ln(t) - 28{,}6 \quad (15 < T < 40\ °C;\ 5 < t < 2\,200\ \text{timmar}) \qquad (1)$$

f_{cc} är hållfasthet för 150 mm torr kub (MPa), T är temperatur dygn 1 (°C) och t ålder (timmar).

Slutsatser

Efter omfattande optimering av en ny typ av högpresterande självkompakterande varmbetong (HSV) avsedd för betongelement, kunde följande slutsatser dras:

1. Betongsammansättning HSV10 uppfyllde ställda krav inbegripet, god gjutbarhet, god hållfasthet efter fem timmar samt efter 28 dygns härdning.
2. Om kravnivån minskas något i fråga om tidig hållfasthet uppfylldes kravnivån för HSV7 samt samtliga HSV10 till13.
3. Om kravnivån minskades även i fråga om hållfasthet efter 28 dygnuppfyllde samtliga HSV7 till 13 ställda krav.

Före fullskaleproduktion av betongelement borde ett antal upprepade provgjutningar i full skala göras i betongfabrik med kontroll av gjutbarhet, temperatur, tidig hållfasthet och tjugoåttadygnshållfasthet. Erfarenhetsmässigt kan mängden flytmedel därvid minskas till cirka 80 procent av de mängder som erhålles vid laboratorieblandning. Maximal betongtemperatur 55 °C i samband med produktion bör också kontrolleras (eljest risk för ettringitbildning) samt risk för sprickbildning vid avformning och härdning. Efterhärdning av betongelementen i fuktmättad klimatkammare bör ske. ■

Referenser

[1] Fredrik Holst & Fredrik Myrefelt: *Högpresterande betong för rationell elementproduktion*. Rapport TVBM-5022. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992, 55 pp.

[2] Anders Johansson & Peter Johansson: *Högpresterande betong för elementtillverkning – tekniska möjligheter och ekonomiska konsekvenser*. Rapport TVBM-5035. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, 128 sid.

[3] Bertil Persson, Anders Johansson & Peter Johansson. *The Benefit of Using HPC for Prefabrication*. Co-author. Concrete International. 1999, 58–62.

[4] Bertil Persson. *The Benefit of Using HPC for Prefabrication*. Co-author. Fourth CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advanced in Concrete Technology. Tokushima. 1998, 433–446.

[5] Bertil Persson. *High Performance SCC*. Co-author. Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. University of Leipzig. Leipzig. 2002, 1273-1290.

[6] Bertil Persson. *Mix Proportions and Strength of Self-compacting Concrete for Production of High Strength Poles, Piles and Pillars*. Contribution to 1. Münchener Baustoffseminar Selbstverdichtender Beton 9 oktober 2001. Ed.: Peter Schiessl. 2001, 31–39.

[7] Rickard Andersson & Lars-Göran Sjökvist: *Självkompakterande betong i prefabriceringsindustrin – en teknisk och ekonomisk analys*. Rapport TVBM-5039. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 48 sid.

[8] Bertil Persson. *Mix Proportions and Strength of SCC for Production of High-Strength Poles, Piles and Pillars*. Rapport U01.05 (uppdrag åt Sacac Ltd, Lenzburg). LTH Byggandsmaterial. Lund. 2001, 11 sid.

[9] Adam M. Neville & J. J. Brooks. *Conrete Technology*. Singapore. 1987.

[10] Embra Tekniska data produktblad Rudersdorf cemex.doc. Malmö.

[11] Heidelberg Cement. Cementa produktpärm. Heidelberg Cement. Danderyd.

[12] Bertil Persson. *Högpresterande betong struktur och hållfasthet*. Rapport TVBM-1009. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

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

Ideal partikelfördelning i färsk betong

Under senare år har byggkostnaderna i landet utsatts för en ökande press. Orsaken är dels marknadskraven på lägre bokostnader till följd av den allmänna konjunkturnedgången, dels de minskande räntesubventionerna. För att uppnå ett effektivare byggande och därmed lägre egna kostnader penetrerar byggnadsentreprenörerna ekonomin i varje del av sin verksamhet, även betongkostnaderna.
I Sverige pågår f n experiment med flervånings trähus i syfte att minska byggkostnaderna, [1]. Senare års krav på kortare byggtider, t ex genom Skanskas 3T-projekt, har även lett till att betongen blivit förhållandevis dyrare, dvs försvagats i konkurrensen på grund av att en högre betongkvalitet krävs för att uppnå kortare uttorkningstider. Genom att styra partikelfördelningen mot en ideal form kan fördyringen motverkas.

Bertil Persson
Avd för byggnadsmaterial
Lunds Tekn Högskola

Flyttillsatser

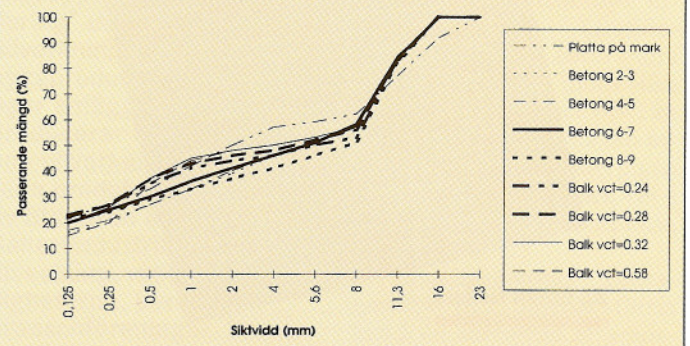
Sedan ett femtontal år tillbaka används flyttillsatser i så gott som all betong av högre kvalitet i landet. Tillsats av flytmedel har blivit ett sätt att uppnå gjutbarhet hos betongen vid de allt lägre vattenhalter, som blivit regel för att uppnå hållfasthet och beständighet.

Debatten på senare år omkring sjuka hus har fört fram till en strävan att bygga med enbart s k naturliga material såsom trä, tegel och även betong utan tillsatsmedel. Målning utförs med naturfärger. Exempel på sunda hus-projekt är Risebergaskolan i Malmö, [2]. Vissa tongivande arkitekter genomför numera, i samband med projekteringen, en systematisk genomgång av alla förekommande material i byggnaden med avseende på nedbrytning och emissioner till andningsluften, [3].

Ett sätt att höja betongens acceptans är då att minska den erforderliga flytmedelsdoseringen. Detta kan ske genom att optimera partikelfördelningen i betongen. Därmed uppnås samma konsistens hos betongen med mindre flyttillsats och därmed också till en lägre kostnad.

Pilotprojektet avseende högpresterande betong

Åren 1989 t o m 1992 genomfördes vid vår avdelning projektet "Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet", [4], [5]. Såväl referensbetong av normal kvalitet som betong av högre kvalitet ingick i studien. Fältförsök genomfördes, dels med en betongplatta på mark, dels med balkar som tillverkades i en elementfabrik. Resultaten blev intressanta; bl a visade det sig vara möjligt att tillverka en så gott som byggfuktfri betong, som dessutom var regntålig omedelbart efter gjutningen. För balkarna i projektet uppnåddes den, så vitt känt, hittills högsta tryckhållfastheten hos fabrikstillverkad betong, 143 MPa, [6]. I samtliga försök erhölls den bästa gjutbarheten för betongerna vid logaritmisk partikelfördelning i den färska betongmassan, se Fig 1. Partikelfördelningen var då lineärlogaritmisk upp till siktvidden 4 mm samt därutöver halvt lineärlogaritmisk (semilogaritmisk). Vid eventuella svackor eller pucklar i den semilogaritmiska fördelningen erhölls en sämre gjutbarhet. Över siktvidden $0{,}5 \cdot d_{max}$ var fördelningen lineär.



Figur 1 Partikelfördelning i färsk betong inom projektet "Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet", [4]. Recepttyper anges i figuren.

Den funna partikelfördelningen, som är optimal från gjutbarhetssynpunkt, kunde bekräftas genom en kontakt med LCPC (Bro- och vägforskningsinstitutet) i Paris, [7], [8]. Den semilogaritmiska partikelfördelningen i färsk betong är emellertid ännu föga känd eller använd utanför Frankrike.

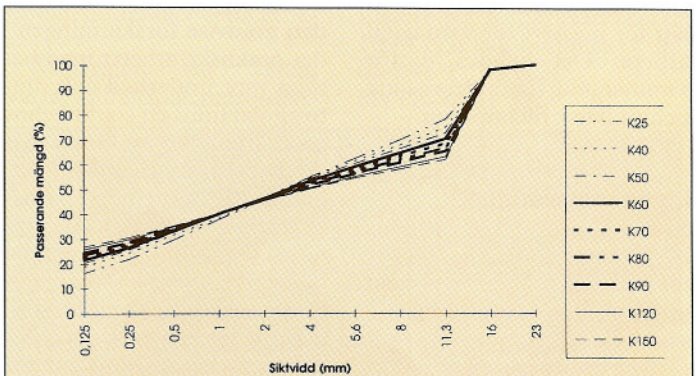
Idealkurvor

I Fig 2 anges ett förslag avseende idealkurvor baserade på omnämnda erfarenheter från ca 400 satser blandad betong. Den semilogaritmiska fördelningen upp till $\sim 0{,}7 \cdot d_{max}$ kan sammanfattas med ekvationen:

$$s = a \cdot d^{b};\ \{0{,}125 < d < 0{,}7 \cdot d_{max}\} \quad (1)$$

där

s (%) är passerande mängd material i en sammansatt partikelfördelning
a är omkr 38 %
d är siktvidd för passerande material (mm)



Figur 2 Förslag avseende ideal partikelfördelning i färsk betong. K-värden (betongkvaliteter) anges i figuren

Betongkvalitet	K25	K60	K90	K120	K150
b=	0,32	0,24	0,20	0,18	0,16

Tabell 1 Exponenten b som funktion av betongkvaliteten

b varierar enligt Tabell 1

Idealkurvan för K25 är något osäker, varför en modifierad kurva m h t betongens användningsområde rekommenderas. Vid högre betongkvalitet kan en mindre variation från idealkurvan tillåtas, ca +/-2 % för K120. Fillerandelen, dvs den del av materialet som är mindre än 0,125 mm och som ej utgörs av bindemedel, bör uppgå till ca 3 % av totala mängden material. För en större siktvidd än ~$0{,}7 \cdot d_{max}$ föreslås en lineär fördelning upp till 100 %.

Nuvarande förhållanden

I Fig 3 anges partikelfördelningen för en brobetong 511, använd på Stora Bält, Danmark, [9]. Som tydligt framgår finns en stor puckel i partikelfördelningen samt två svackor jämfört med den ideala fördelningen. I Fig 3 visas även partikelfördelningen för "optimal betong" enligt [10]. Denna fördelning har ett betydande överskott av fina partiklar mellan siktvidderna 0,125 och 4 mm, medan ett partikelsprång föreligger mellan siktvidderna 2 och 8 mm. Den ogynnsamt sammansatta kurvan leder till en relativt stor cementförbrukning för den aktuella betongtypen.

Under åren 1992-1995 studerades aktuell partikelfördelning hos ett 80-tal färska betonger från industrin, [11] - [23]. I Fig 4 markeras andelen recept där partikelfördelningen i den färska betongen avvek mer än 3 % från idealkurvan. Det är kanske förvånansvärt att ett så stort antal recept gav en sammansatt kurva som låg över idealkurvan. Detta kan delvis ha en geografisk förklaring. Söder-och västerut i landet accepteras normalt en större stenhalt än i landets östra och norra delar, [24].

För ett speciellt recept kan tendensen ligga över idealkurvan men delar av fördelningen ändå under idealet. Detta indikerar en svacka i partikelfördelningen även jämfört med kurvan enligt Fig 2. Varje svacka i en sammansatt partikelfördelning måste fyllas ut med partiklar av finare gradering. För att uppnå samma gjutbarhet som vid en ideal partikelfördelning fordras dessutom en ökad dosering av flytmedel.

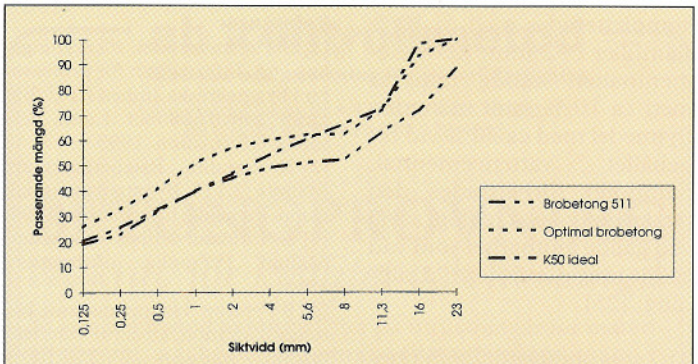
Beräkningsprogram PROPH

Indata: Antal delmaterial, aktuella partikelfördelningar för delmaterialen samt önskad betongkvalitet.

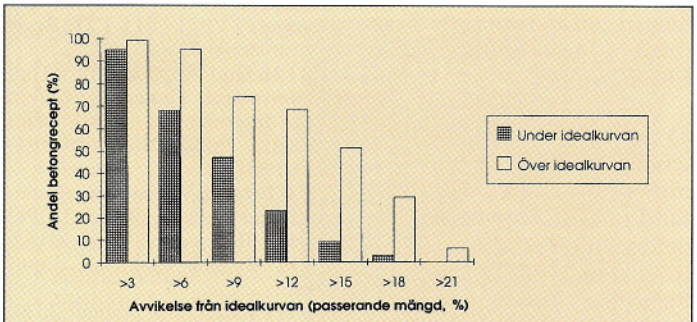
Utdata: Sammansatt partikelfördelning samt grafik enligt önskemål

Beräkningsmetod: Minsta kvadratmetoden, vilket bl a innebär att det kan finnas mer än en ideal sammansättning av de aktuella materialen vid en given betongkvalitet. Lämplighetsvillkor avgör det slutliga valet.

Exempel på utdata ges i Tabell 2.



Figur 3 Partikelfördelning i färsk brobetong 511, Stora Bält, Danmark, [9], samt i färsk s k optimal brobetong, [10].



Figur 4 Andelen recept där passerande mängd material av den sammansatta partikelfördelningen i den färska betongen avviker med mer än 3 % från idealkurvan.

Erfarenheter från användning av beräkningsprogrammet PROPH

1) En K30 väggbetong kompletterades med ca 10 % slamfiller 0–2 mm (restmaterial vid tvättning av betongbilar etc). Samtidigt minskades cementhalten med ca 10 kg/m³. Omproportioneringen innebar att den synliga porositeten minskade i väggytan, [25]

2) En K40 brobetong omproportionerades med PROPH vilket innebar en komplettering med ca 10 % slamfiller enligt 1), [23]. Cementhalten kunde därvid minskas med ca 10 kg/m³. Samtidigt ökade lufthalten från 4,5 % till 6,5 % vid bibehållen dosering av luftporbildare, [25]. Även inblandningen av luftporbildare torde således kunna minskas som ett resultat av optimal partikelfördelning med PROPH.

3) En K60 byggfuktfri betong

Idealkurva:	21.0	28.0	35.0	42.0	48.0	54.0	59.0	63.0	67.0	71.0	93.0
Mix:	19.6	28.9	37.3	42.3	44.1	53.4	57.9	61.5	65.8	71.2	92.1
Massa 1:	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Massa 2:	16.0	48.0	77.0	94.0	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Massa 3:	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	55.0	81.0	98.0	100.0	100.0	100.0
Massa 4:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	11.0	60.0	98.0	100.0
Massa 5:	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	77.0

De olika massornas procentuella andel i mixen:

Massa 1:	15 .0 %
Massa 2:	29.0 %
Massa 3:	17.0 %
Massa 4:	8.0 %
Massa 5:	30.0 %

Tabell 2 Exempel på datautskrift med PROPH

kompletterades med ca 10 % slamfiller 0–2 mm, [23]. Cementhalten kunde minskas med ca 10 % samt mängden flytmedel med ca 30 % vid bibehållet vattencementtal. Samtidigt förbättrades den färska betongens reologi såväl vad gällde gjutbarhet som vad gällde tidig plastisk sprickbildning, [25].

4) 7 st brobetonger inom Öresundsprojektet studerades med hjälp av PROPH, [26]. Recepten var redan fillerkompletterade före partikelfördelningen varför denna i stort sett följde idealkurvan enligt PROPH.

5) En K120 betong kompletterades med ca 6 % filler 0–2 mm bestående av Baskarps sand no 7. Konsistensen hos betongen förändrades från trögflytande till fullflyt, [27]. Samtidigt kunde mängden flyttillsats minskas med ca 10 %.

Referenser

[1] S Thelandersson. Flervåningshus i trä. Information för professorer i byggtekniska ämnen LTH. Bärande konstruktioner. Lund. Personlig information. 1993.

[2] K Sandin. Risebergaskolan, Malmö. LTH Byggnadsmaterial. Lund. Personlig information. 1994.

[3] L Lindahl. FFNS Arkitekter. Malmö. Personlig information. 1995.

[4] B Persson. Högpresterande betongs hydration, struktur och hållfasthet. Rapport TVBM-1009. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[5] B Persson. Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet. Rådata och beräkningar. Rapport TVBM-7011. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[6] I Holand. Applications of High Performance Concrete. Comité Euro-International du Béton (CEB). Bulletin d'information 222.1994.

[7] B Persson. Vunna erfarenheter i samband med besök vid LCPC, Paris. Rapport TVBM-9018A. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1995.

[8] G Dreux. Guide pratique du béton. Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Public (TTBTP). Paris. 1970.

[9] B Persson. Bakgrund till val av betong vid Stora Bältförbindelsen. Rapport U91.02.LTH Byggnadsmatèrial. Lund. 1991.

[10] Ö Petersson, A Johansson, B Granhed. Optimal konsistens för brobetong. CBI rapport 3:92. Stockholm. 1992.

[11] B Perssson. Fuktmätning vid fyra fältförsök med snabbtorkande betong. Rapport TVBM-7014. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[12] B Persson. Ytnära fukt i byggfuktfri betong. Rapport TVBM-7049. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1993.

[13] B Persson. Beräkningsprogram TORK för val av vct i byggfuktfri betong. Rapport TVBM-7050. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1993.

[14] B Persson. Högpresterande betong vid två arbetsplatser. Rapport TVBM-9001. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1993.

[15] B Persson. Fuktmätningar i betong vid SIAB:s FoU-projekt i Finspång. Rapport U91.05. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[16] B Persson. Högpresterande betong på lättklinkerfyllning. Rapport U92.01. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[17] B Persson. Uttorkningsgrad hos snabbtorkande betong i Billeberga och Svalöv. Rapport U92-05. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[18] B Persson. Provtagning och mätning av fukt i betong från Larödskolan, Helsingborg. Rapport U92.04. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[19] B Persson. Startmöte vid SBUF-projektet "Snabbtorkande betong i bostadshus". Uppsala. Rapport U92-07. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[20] B Persson. Sprickmätning i skyddsrumsvalv. Rapport U93.05. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1993.

[21] B Persson. Långtidsuttorkning av filigranbjälklag. Rapport U94.03 LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1994.

[22] B Persson. Högpresterande betong på samverkansplåt – uttorkningsförhållanden. Rapport U94.08. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1994.

[23] B Persson. Partikelfördelning i färsk betong. Rapport U95.08. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1995.

[24] U Jönsson. Mångårig erfarenhet av betongproportionering. Skanska AB. Malmö. 1995.

[25] J Persson. Omproportionering av betong med hjälp av PROPH. Personlig information betr första anläggningen. Sydsten AB. 1995.

[26] B Persson. Optimal partikelfördelning i betong. Rapport U95.10. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1995.

[27] B Wiberg. Gjuterfarenheter med högpresterande betong. Personlig information. Strängbetong AB. Veddige. 1995.