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

Självuttorkning i praktiken

Självuttorkningen hos normal betong har föga eller ingen inverkan på betongens egenskaper. S k högpresterande betong innehåller redan från början en brist på vatten i förhållande till den mängd som erfordras för att den kemiska reaktionen med cement skall bli fullständig. Detta innebär att en kraftig självuttorkning äger rum, vilket är gynnsamt vad gäller att bemästra problem med byggfukt. Självuttorkningen ger dock upphov till egenspänningar i betongen vilka bl a resulterar i krympning och ibland sprickbildning. Mekanismen bakom självuttorkning och beräkningsmetodiken för uppkomna spänningar i betongen är relativt okänd.

Nyligen hölls ett forskningsseminarium beträffande självuttorkning hos betong i Lund [1]. Det är syftet med denna artikel att sammanfatta tillgänglig kunskap inom ämnet samt att belysa några praktiska aspekter. Inledningsvis ges praktiska synpunkter beträffande receptval på självuttorkande betong. I artikeln beskrivs vidare inverkan av självuttorkning på frostbeständighet, uttorkning, härdningsförfarande och mikrosprickbildning, ytfukt samt krympning. Målgrupper är såväl byggentreprenören som elementtillverkare av betong samt forskare inom området.



FOTO: ULF JONSSON

*Artikelförfattare är **Bertil Persson**, Avdelningen för byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lund.*

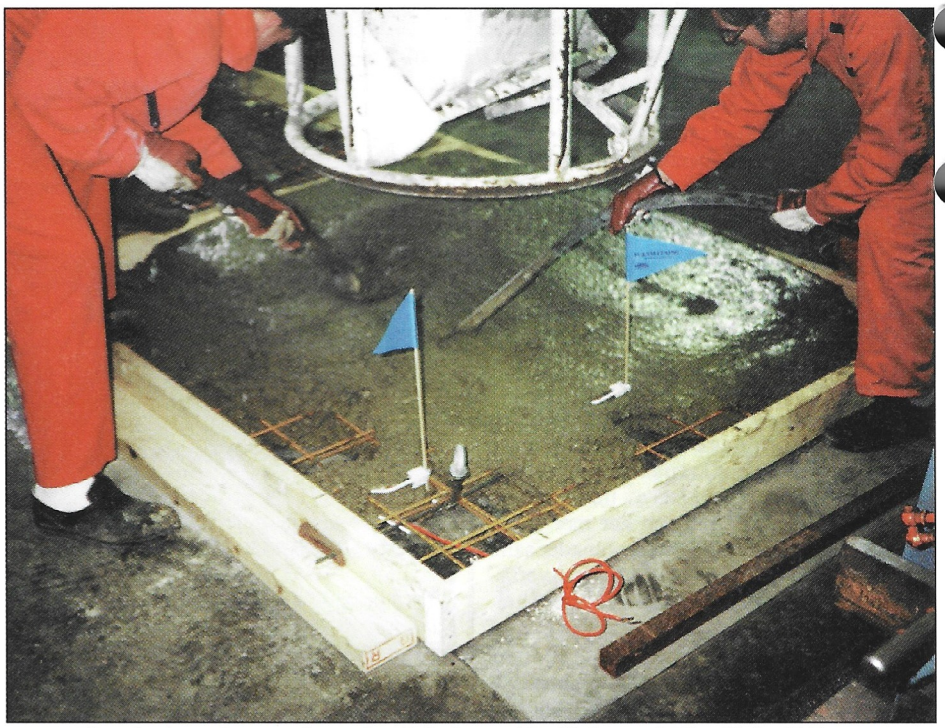
Alltsedan betongens självuttorkning började tillämpas mera praktiskt, omkring år 1991, har en intensiv receptutveckling ägt rum. Byggfuktfri betong blev en av de första stora tillämpningarna på högpresterande betong varför utvecklingen av dess proportionering följdes med stort intresse. Det stod tidigt klart att tillförsel av luftporbildare och silikastoft hade en gynnsam effekt på gjutbarheten [2]. Styrande parameter vid receptvalet är vattencementtalet, vct, som ej bör överstiga 0,38 om man erfordrar en inre relativ fuktighet, RF, som understiger 85 % även under yttre fuktiga förhållande (regn) [3–5]. I de fall då betong med vct > 0,38 tidigt utsätts för regn erhålls nämligen orimligt långa uttorkningstider, vilket nyligen bekräftades i ett pågående fältförsök i Halmstad, *bild samt figur 1* [6]. Som bekant får man i Sverige räkna med regn på betongplattor i nyproducerade hus. I samband med ombyggnad kan det förhålla sig annorlunda. I Finland har man på senare tid studerat högpresterande betonger med extra stor lufthalt, upp till 11 % [7]. Vattencementtalet hade dock större inverkan på självuttorkningen än vad lufthalten hade, *figur 2*. Vid konstant hållfasthet var dock luftinblandning gynnsam från uttorkningssynpunkt eftersom ökad lufthalt leder till lägre vct vid konstant hållfasthet, *figur 3* [7]. Hög lufthalt torde dock ha störst gynnsam effekt vad gäller att förbättra gjutbarhet, varvid betong med lägre vct blir möjlig att gjuta utan större svårigheter. Hög lufthalt ger även andra positiva effekter som lägre densitet, minskad transportvikt, minskad egentyngd samt minskad materialåtgång. Med 10 % i lufthalt blir betongstommen i ett hus 10 % lättare och därmed grundläggningen för huset även den mindre. Självuttorkande betong har oftast högre hållfasthet än vad som krävs varför den minskning som uppstår till följd av luftinblandning ej är problematisk. Ett annat önskemål vid receptvalet är att minska mängden flytmedel, vilket kan ske efter val av en optimal partikelfördelning i betongen samt eventuell komplettering med filler [8,9]. (En betong med luftporbildare och optimal partikelfördelning erhåller dessutom en förbättrad luftporstabilitet än en betong med partikelsprång [10].)

Tidig härdning

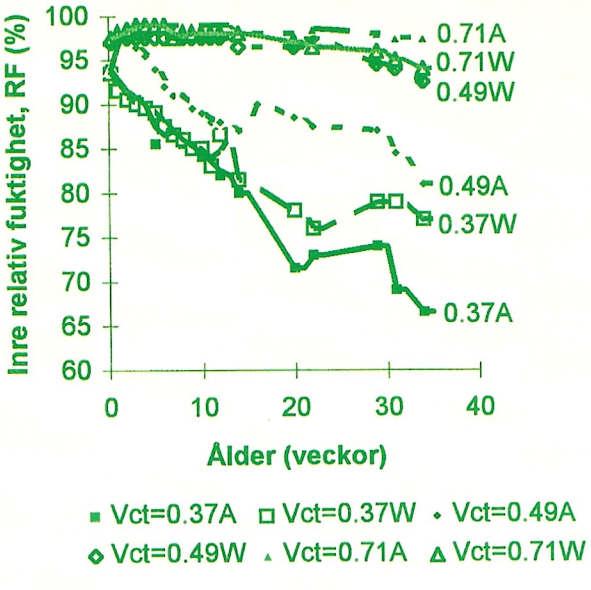
I betonger där självuttorkningen utnyttjas på ett effektivt sätt råder brist på vatten i förhållande till den mängd som erfordras för att den kemiska reaktionen skall bli fullständig (vct < 0,38). Tidig uttorkning av betongytan resulterar i så kallad plastisk krympning [11], vilken bemästras genom försegling eller tillförsel av fukt till betongytan [12]. På senare tid har även en vattenbaserad emulsion kommit till användning för att på ett effektivt och arbetsmiljömässigt acceptabelt sätt begränsa den plastiska ytsprickbildningen [10]. Emulsionen bör dock i bostadshus slipas bort mekaniskt något eller några dygn efter gjutning. Alternativt kan ytan tillföras vatten genom exempelvis plastväv, vilket innehåller små vattenfyllda kanaler [12]. Även formsidor och formbotten kan förses av dylik väv. Studier visar att vattentillförsel genom plastväv minskar betongens ytdiffusiviteten på ett markant sätt.

Självuttorkningskrympning

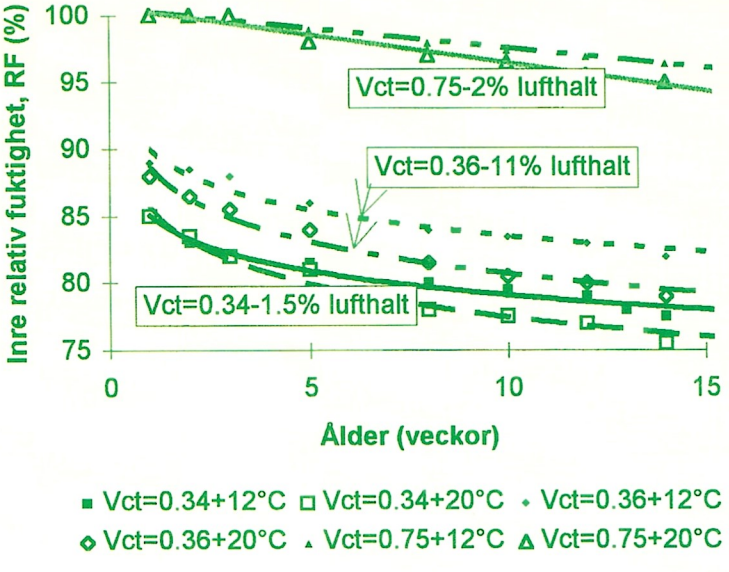
Självuttorkningskrympning inträffar då inre relativa fuktighet i en förseglad be-



Gjutning av plattor på mark vid Sydsten AB, Halmstad. Tjocklek: 125 mm.



Figur 1. Inre relativ fuktighet i plattor på mark som funktion av uttorkningstiden [6]. Tjocklek: 125 mm. A = lufthärdning. W = vattenlagring två månader, därefter lufthärdning [6].

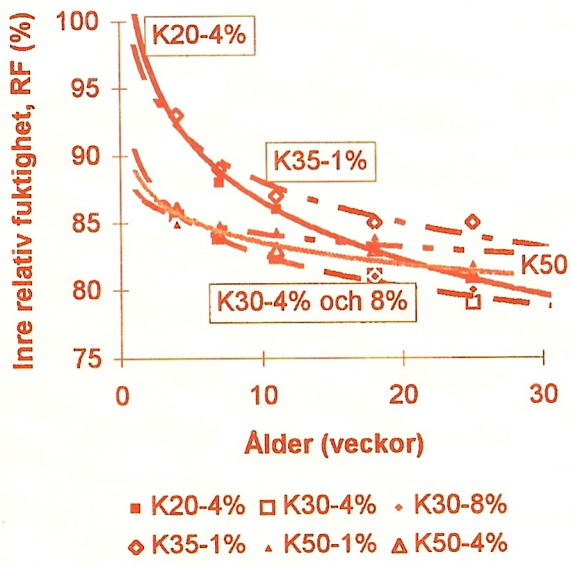


Figur 2. Inre relativa fuktigheten i betongkuber 100 mm vid varierande vattencementtal, vct, och lufthalt [7].

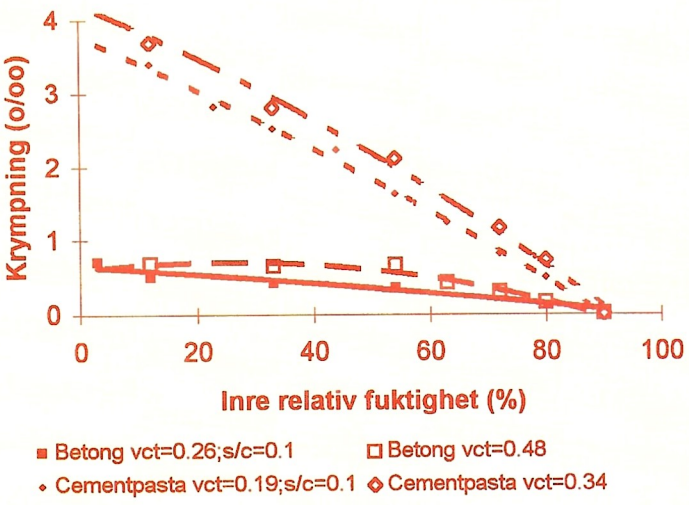
tong minskar till följd avkemisk krympning [13]. Det råder således ett nära nog linjärt samband mellan betongens inre relativa fuktighet, RF, och den autogena krympningen, *figur 4* [14]. Ballasten i betongen gör att den resulterande krympningen blir avsevärt mindre än i cementpasta. För betong med lågt vct är den autogena krympningen av samma storleksordning som uttorkningskrympningen varför risken för sprickbildning får beaktas t ex genom lämplig fogindelning eller tilläggsarmering. Självuttorkningskrympning inträffar tidigt (oftast inom tre månader från gjutning) jämfört med uttorkningskrympning, vilket är en fördel vad gäller byggentreprenörens möjligheter att inom byggtiden utföra åtgärder i samband med sprickbildning och därmed undvika (ofta kostsamma) garantiarbeten. Självuttorkningskrympningens storlek är vidare beroende av cementtypen [15]. Ett lågalkaliskt cement förefaller ge något mindre självuttorkningskrympning än ett normalalkaliskt; ett långsamt härdande cement ger mindre självuttorkningskrympning än ett snabbcement [15].

Egenspänningar

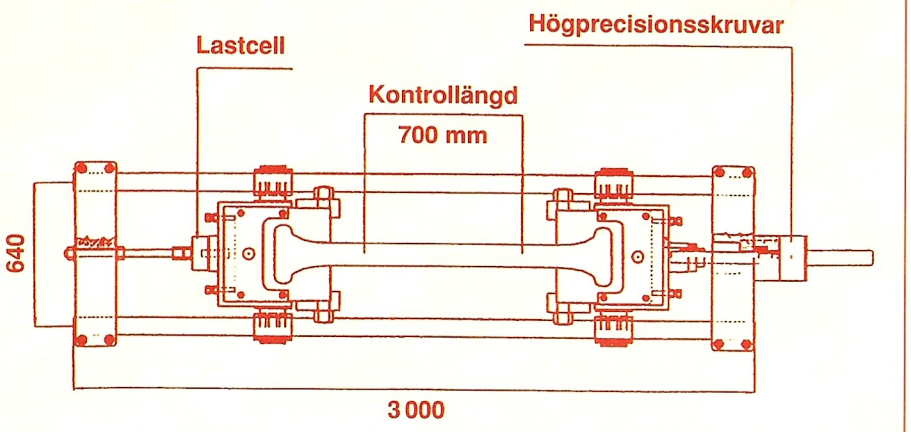
Ett stort antal mätningar har utförts vad gäller inverkan av självuttorkningskrympning på spänningstillståndet i betong [16–18]. Vid mätning av egenspänningar används lämpligen en så kallad spänningsrigg där deformationen hos betongen hålls konstant på hydraulisk väg, *figur 5* [16]. Egenspänningar på upp till 40 MPa har konstaterats i högpresterande betong [17]. En mycket intressant mätteknik för att mäta egenspänningar går ut på att endera en termometer eller en porslinskula omlindad med manganinråd gjuts in i cementpasta, *figur 6* [19]. Omgivande tryck från cementpastan i samband med den autogena krympningen påverkar därvid vätskenivån i termometern respektive deformerar manganintråden. Bägge dessa formförändringar kan mätas på visuell respektive elektrisk väg. Mätanordningarna kalibreras först med vätsketryck. *Figur 7* visar egenspänningar i cementpasta med vattencementtal, vct = 0,30, enligt de bägge metoderna [19]. Som synes har halten silikastoft stor betydelse vad gäller ut-



Figur 3. Inre relativa fuktigheten i betongkuber 100 mm vid varierande tryckhållfasthet, K, och lufthalt [7].



Figur 4. Krympning som funktion av inre relativa fuktigheten i betong respektive cementbruk [14].



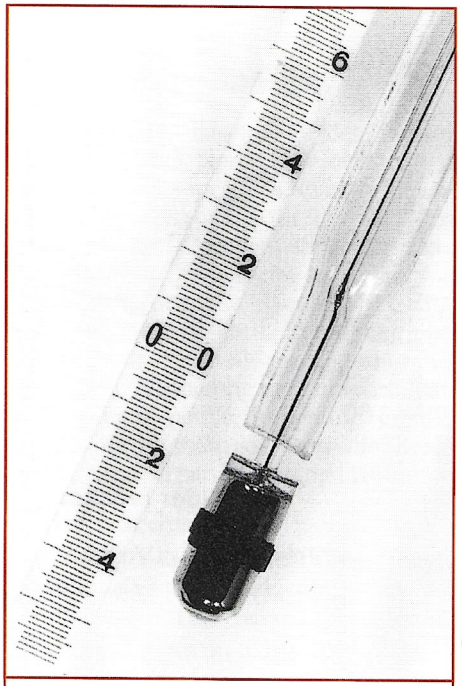
Figur 5. Spänningsrigg där deformationen hos betongen hålls konstant på hydraulisk väg [16].

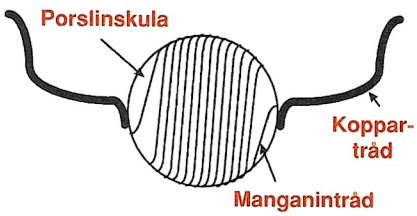
vecklingen av egenspänningar, figur 7. Detta fenomen beror i sin tur på porfördelningen i cementpastan, *figur 8* [13]. Vid samma porfyllnadsgrad, S_0, erhålls enligt figur 8 olika inre relativ fuktighet, RF, i ett cementbruk med och utan silikastoft. Exempelvis vid $S_0 = 0{,}83$ erhålls det enligt figur 8 RF = 80 % vid 10 % silikastoft respektive RF = 90 % i betong utan silikastoft. Eftersom RF är den styrande parametern vad gäller självuttorkningskrympning i betong erhålls större krympningsvärden i betong med silikastoft än i betong utan silikastoft [13,19] vid konstant vct.

Ytfukt

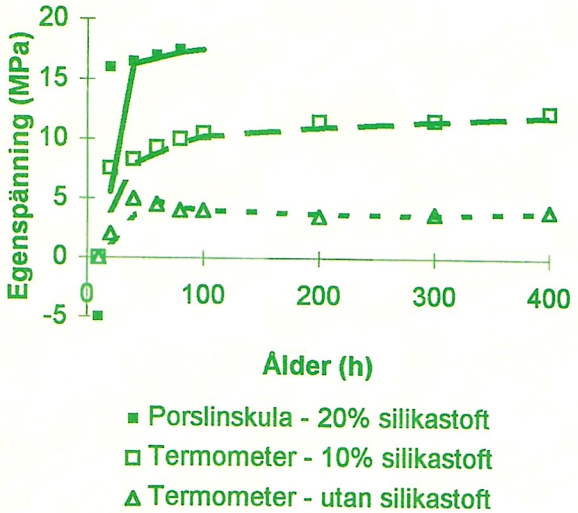
I själva ytan av betongen är effekten av självuttorkning densamma som i det inre av betongen. Vid RF = 90 % i ytan av en självuttorkande betong utan silikastoft erhålls således porfyllnadsgraden, $S_0 = 0{,}83$, figur 8 [13]. Vid samma porfyllnadsgrad, $S_0 = 0{,}83$, erhålls (interpolerat enligt figur 8) RF = 84 % i betong med 6 % silikastoft. Porfyllnadsgraden är avgörande för betongytans möjlighet att ta upp fukt t ex i form av lim. Kravet på porfyllnadsgrad, S_{0KRIT}, torde vara konstant vare sig betongen innehåller silikastoft eller ej, t ex $S_0 = 0{,}83$. Vid $S_0 = 0{,}83$ erhålls således RF = 90 % i betong utan silikastoft men RF = 84 % i betong med 6 % silikastoft. RF-kravet bör således modifieras beroende på om silikastoft ingår i betongen eller ej. Om en betong med 6 % silikastoft påförs lim vid RF = 84 % är detta således jämförbart med att påföra lim till en betong utan silikastoft vid RF = 90 % [13].

Detta torde vara en av förklaringarna till de anmärkningsvärt stora avgasningar som uppmätts från golvsystem limmade på betong med vct = 0,44 och innehållande 6 % silikastoft vid RF = 84 % i betong-

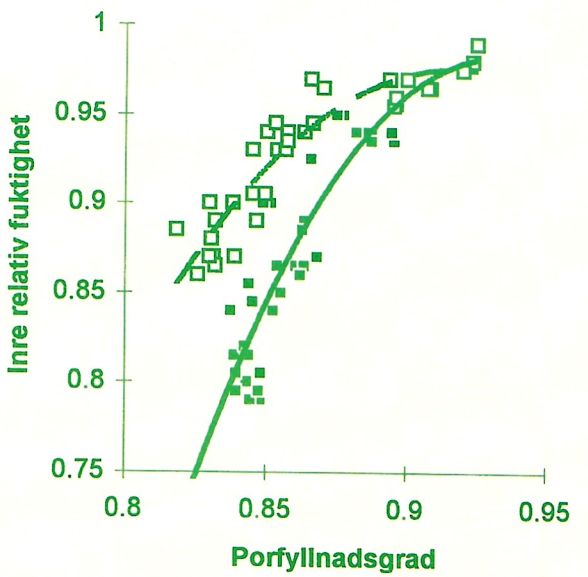




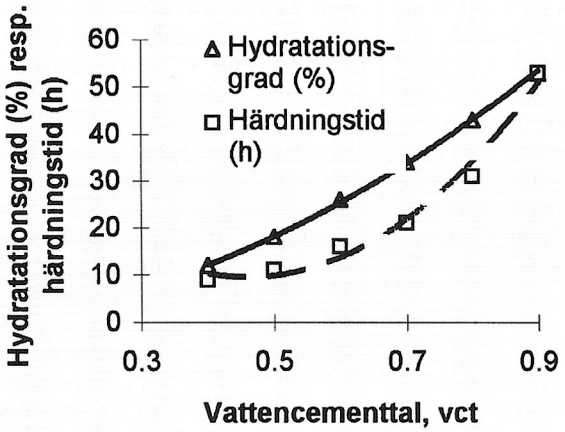
Figur 6. Mätteknik för att mäta egenspänningar; endera en termometer eller en porslinskula omlindad med manganintråd vilka gjuts in i cementpasta [19].



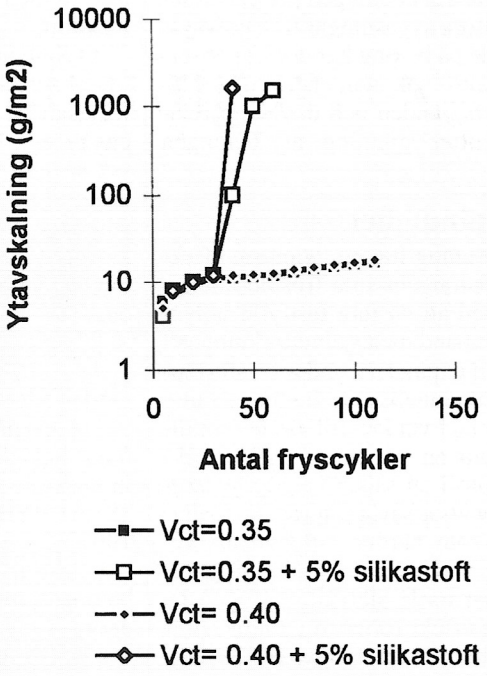
Figur 7. Egenspänning i cementpasta med vct = 0,30 och varierande innehåll av silikastoft [19].



Figur 8. Inre relativ fuktighet, RF, som funktion av porfyllnadsgraden, S_0, i betong med och utan silikastoft [13].

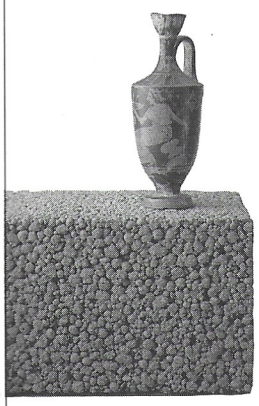


Figur 9. Erforderlig hydratationsgrad, α, och härdningstid, t, vid 20 °C för att undvika inre frostskador i betong [27].



Figur 10. Avskalning hos betong – med och utan silikastoft [28,27].

en [20–23]. Den s k kritiska porfyllnadsgraden, S_{0KRIT}, torde således ha överskridits i betongen då limfukt påfördes betongytan [13]. Limfukten rymdes ej i de fina porer som erhålls då silikastoft användes. En annan förklaring till de anmärkningsvärt stora avgasningarna torde vara det faktum att betongytan ej fått torka ut alls före det att limmet anbringades [24]. (En tredje förklaring torde vara att betongytan ej heller karbonatiserats före det att golvlimmet påfördes. Karbonatiseringen sänker som bekant pH i betongytan från ca 13 till ca 9 [25]. Även i en betong med lågt vct sker det en betydande karbo-



BETONG o BALAST CERTIFIERING (BBC) AB

Kvalitet håller
– det första produktcertifierade blocket

Vi är den första blockproducenten som klarat produktcertifiering enligt BBC:s ackrediterade system.

Certifieringen är i stort uppbyggd med ISO 9002 som förebild, men med direkt inriktning på produktkvalitet.

Med certifierade produkter får du enklare rutiner. Du slipper grundkontrollen som du annars måste göra enligt Boverkets konstruktionsregler.

Dessutom medges högre påkänningar för murverk där certifierade produkter används.

Det lönar sig alltså i dubbel bemärkelse att använda certifierade produkter i bygget.

Leca®
AB SVENSK LECA
–Ett företag i ExClay International–

natisering, åtminstone om mängden silikastoft begränsas i betongen [26].) Nämnda mycket stora avgasningar från golvsystem limmade på betong har dock ej observerats vid fältförsök utan endast under laborativa förhållanden och dessutom relativt tidigt efter gjutning av betongen [20–23].

Frostbeständighet

Självuttorkning har en gynnsam effekt vad gäller betongens inre frostbeständighet i och med att en inre luftfylld volym uppstår i samband med självuttorkningen i vilken is kan expandera under frysförloppet [27]. Detta innebär exempelvis att ung betong med lågt vct kan tillåtas frysa tidigare eftersom en betydande självuttorkning äger rum i en sådan betong, *figur 9* [27]. Figur 9 visar såväl erforderlig hydratationsgrad som härdningstid versus vct [27]. Även vad gäller ytavskalning till följd av frost torde självuttorkningen ha en gynnsam effekt förutsatt att silikastoft ej ingår i betongreceptet, *figur 10* [28, 27]. Då silikastoft används förtätas troligen porstrukturen varvid stor ytavskalning sker, även vid vct = 0,35. Även i detta fall torde porfyllnadsgraden ha stor betydelse, jämför figur 8 [13].

Sammanfattning och slutsatser

I artikeln redogörs för praktiska synpunkter från ett seminarium beträffande betong självuttorkning, vilket nyligen hölls i Lund. Vidare ges resultat beträffande receptval, frostbeständighet, uttorkning, härdningsförfarande och mikrosprickbildning, ytfukt samt krympning i anslutning till betongens självuttorkning. Följande slutsatser drogs:

1) Optimal partikelfördelning tillsammans med hög lufthalt ökade gjutbarheten och luftporstabiliteten samt förbättrade ekonomin för en självuttorkande betong.

2) Effektiv tidig härdning kunde endera åstadkommas med beläggning med en vattenbaserad plastemulsion (vilken slipas bort på mekanisk väg efter något dygn) eller med en plastväv med vilken betongytan hölls fuktig via vattenfyllda kanaler.

3) Den autogena krympningen var direkt beroende av betongens RF samt av ballastmängden. Lågalkaliska cement eller långsamt härdande cement gav en minskad självuttorkningskrympning.

4) Den autogena krympningen kunde ge upphov till egenspänningar på upp till 40 MPa i betongen vid lågt vct och synnerhet vid hög halt av silikastoft. Enligt en nyutvecklad dansk metod kunde egenspänningar mätas inuti betongen, vilket var av stort intresse från sprickrisksynpunkt.

5) Vid konstant porfyllnadsgrad erhölls ca 10 % lägre relativ fuktighet, RF, i betong med 10 % silikastoft jämfört med en betong utan silikastoft. Kritisk porfyllnadsgrad, S_{0KRIT}, för undvika stora avgasningar från golvsystem limmade på betong, torde vara konstant oberoende av om betongen innehåller silikastoft eller ej. Detta ledde i sin tur till lägre RF_{KRIT} i betongen med silikastoft än i betong utan silikastoft.

6) Självuttorkningen hade en gynnsam inverkan på betongens frostbeständighet förutsatt att silikastoft ej ingick i betongens recept. Vid konstant vattencementtal, vct = 0,35 respektive 0,40, ökade ytavskalningen avsevärt i en betong med 5 % silikastoft jämfört med en betong utan silikastoft. Detta sammanhängde troligen med en förändrad porfördelning i betongen.

Referenser

[1] *Bertil Persson och Göran Fagerlund.* Self-desiccation and its importance in concrete technology. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997.

[2] *Mari Karlsson.* Snabbuttorkande betong. Cementa 2.92. Cementa AB. Danderyd. 1992.

[3] *Göran Hedenblad.* Uttorkning av byggfukt i betong – torktider och fuktmätning. Rapport T12:1995. Byggforskningsrådet. Stockholm. 1995.

[4] *Bertil Persson.* Tork för val av vattenbindemedelstal i byggfuktfri betong. Rapport TVBM-7050. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1993.

[5] *Mats Gerlam.* Lathund för Betongtorkning. Källa: SBUF:s lathund. Sabema AB. Kållered. 1996.

[6] *Bertil Persson.* Effekt av mekanisk slipning på ytalkaliteten hos betong. Rapport U97.07 LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997.

[7] *Vesa Penttala och Leif Wirtanen.* Uttorkning av betong med lågt vattencementtal och hög lufthalt. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 209–226.

[8] *Bertil Persson.* Ideal partikelfördelning i färsk betong. Betong 3/95. Stockholm. 1995.

[9] *Bertil Persson.* Betong anpassad för ett effektivt byggande. Bygg & teknik 7/96. Stockholm. 1996.

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

[11] *Adrian Radocea.* Autogen volym ändring hos ung betong – modell och experimentella data. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 56–71.

[12] *Ulf Guse och H K Hilsdorf.* Ytsprickbildning hos höghållfast betong – reduktion genom optimering av härdningssätt. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 239–249.

[13] *Bertil Persson.* Effekt av silikastoft på kemisk krympning och självuttorkning hos Portlandcementbruk. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 116–131.

[14] *Véronique Baroghel-Bouny.* Experimentell undersökning av självuttorkning hos högpresterande material – jämförelse med uttorkning. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 72–87.

[15] *Ei-ichi Tazawa och Shingo Miyazawa.* Inverkan av cementsammansättning på självuttorkningskrympning hos betong. Föredrag 2ii071. Tionde internationella kongressen beträffande cementkemi. Göteborg. 1997.

[16] *Øijvind Bjøntegaard, Erik Sellevold och Tor Arne Hammer.* Högpresterande betong vid ung ålder: egenspänningar till följd av självuttorkningskrympning och temperatur. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 1–7.

[17] *Fuminori Tomozawa, Takafumi Noguchi och K B Park.* Experimentell bestämning och analys av spännings- och töjningstillstånd till följd av självuttorkningskrympning och hydratationsvärme i armerade pelare av högpresterande betong. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 99–115.

[18] *Hans Hedlund och Gustaf Westman.* Mätning och modellering av volymändringar och reaktioner i hårdnande betong. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 174–192.

[19] *Birgitte Dela och Henrik Stang.* Egenspänningar i betong till följd av självuttorkningskrympning. Rapport TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 46–55.

[20] *Helene Wengholt Johnsson.* Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning. Publikation P95:4. CTH Byggnadsmaterial. Göteborg. 1995.

[21] *Marina Fritsche, Anders Sjöberg och Helene Wengholt Johnsson.* Kemisk emission från golvsystem av limmad PVC-matta på självtorkande betong – inverkan av limningsteknik, torkförlopp samt cement-, lim- och mattyper. Publikation P97:1. CTH Byggnadsmaterial. Göteborg. 1997.

[22] *Anders Sjöberg.* Pågående forskning kring golvsystem, fukt och alkali. AMA-Nytt Mark Hus 1/97. Svensk Byggtjänst. Solna. 1997, sid. 15–17.

[23] *Anders Sjöberg.* Ongoing research. Floor systems, moisture and alkali. Bidrag till HB/IAQ'97. Washington. 1997.

[24] *Bertil Persson.* Uttorkning av ytfukt i byggfuktfri betong. AMA-Nytt Mark Hus 1/96. Svensk Byggtjänst. Solna. 1996, sid. 20–23.

[25] *Olof Peterson.* Personlig information. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997.

[26] *Bertil Persson.* Långtidskrympning hos högpresterande betong. Föredrag 2ii073. Tionde internationella kongressen beträffande cementkemi. Göteborg. 1997.

[27] *Göran Fagerlund.* Inverkan av självuttorkning på inre frostbeständigheten hos betong. TVBM-3075. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1997, sid. 227–238.

[28] *Per-Erik Petersson.* Betongs saltfrostbeständighet – fältförsök. Rapport SP 1995:73. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. Borås. 1995.

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

Snabbtorkande betong gav ej upphov till sjuka hus

Bertil Persson
LTH Byggnadsmaterial

En artikel införd i Ny Teknik 1995:40 med rubriken "Snabb betong och PVC-matta bakom sjuka hus" har givit upphov till stor oro i byggbranschen. Fram till 2:a kvartalet, 1994, hade det tillverkats ca 250.000 m² golv av snabbtorkande betong [1] varför det tills dags dato torde finnas ca 350.000 m² golv av denna betong i landet. Den "snabba" betongen innehöll dock för mycket vatten än vad som maximalt medges för att bli betraktad som snabbtorkande.

Artikeln i Ny teknik grundas på omfattande undersökningar vid CTH Byggnadsmaterial, vilka resulterade i en licentiatuppsats [2]. Uppsatsen får betraktas som banbrytande vad gäller försöken att kartlägga en av orsakerna till sjuka hus, se även annan artikel i detta nummer av Betong. Emissioner från byggnadsmaterial är ett sedan länge försummat område inom byggbranschen. Här ges några betongtekniska kommentarer till uppsatsen, främst av semantisk art.

Studerade betonger

I uppsatsen studeras i huvudsak tvenne betonger, dels en normal betong med vattenbindemedelstalet (viktsförhållandet mellan vatten och bindemedel i betongen), vbt= 0.69, dels en annan normal betong med vbt= 0.44 [2]. De i uppsatsen redovisade vbt-talen är något lägre eftersom all den i sanden ingående fukten ej beaktats samt ej heller vattnet i flytmedlet. Därav ökades vbt med ca 0.04 [3]. I bindemedelstalet inräknas cementmängden samt mängden silikastoft. Vbt har stor betydelse för betongens kvalitet, bland annat för dess självuttorkning. Det är känt sedan länge [4] att viktsförhållandet mellan vatten och cement, vct, bör överstiga 0.39 för att en fullständig kemisk reaktion skall kunna äga rum mellan cement och vatten. Vid vct< 0.40 finns därför oreagerat cement kvar i betongen vilket är en förklaring till att en självuttorkning kan äga rum. I en betong med 5% silikastoft räknat på cementmängden motsvaras den angivna gränsen för självuttorkande betong av vbt< 0.38. Ingen av de bägge betongerna vilka redovisas i uppsatsen [2] uppfyllde således de mest elementära kraven på en självuttorkande betong.

"Huvudorsaken till de höga emissionerna torde ha varit fukten i mattlimmet"

Nomenklatura

Sedan ett par år har det utvecklats en branschstandard vad gäller snabbtorkande/självtorkande betong. Som en övre gräns för vattenbindemedelstalet, vbt, valdes 0.38, det vill säga vid tillverkning av snabbtorkande betong skall det säkerställas att vbt< 0.38. Den övre gränsen för vbt sattes dels med tanke på [4], dels efter erfarenheter från ett stort antal fältförsök i landet. En självtorkande betong skall däremot kunna utstå ett för byggförhållanden normalt klimat dvs regn och snö, utan att ta upp fukt. För en självtorkande betong krävs därför vbt< 0.32. De i uppsatsen [2]redovisade betongerna innehöll således minst 28 l/m³ betong mer vatten än vad som maximalt medges för en snabbtorkande betong respektive 52 l/m³ betong mer vatten än vad som maximalt tillåts för en självtorkande betong. Detta är stora vattenmängder i uttorkningssammanhang; omräknat till ett betongbjälklag i en normal lägenhet ca 600 respektive 1100 l mer vatten att torka ut än för en snabbtorkande respektive självtorkande betong.

Pilotprojekt

Under åren 1991 till 1992 utfördes det ett antal stora pilotprojekt beträffande snabbtorkande/självtorkande betong. Syftet med dessa fältförsök var att bekräfta i laboratorium framtagna forskningsresultat [5]. Under försökens gång byttes dock cementsorten från den i laboratorium använda typen Degerhamn Standard till Slite Standard. Detta skedde främst av ekonomiska skäl men även baserat på andra forskningsresultat [6]. Slite Standard cement innehåller större halter av kalium- och natriumoxid än anläggningscement vilket medverkar till uppkomsten av så kallad alkalisk fukt [2]. I tabell ges ett sammandrag av recept, med mera för de ovan provade betongerna samt för de i pilotprojekten ingående betongerna [2, 3, 7, 8, 9, 10] (kg/m³, etc). Veterligt har de refererade pilotprojekten ej givit upphov till något enda så kallat sjukt hus [11].

Kommentarer

Huvudorsaken till de höga uppmätta emissionerna [2] torde ha varit fukten i mattlimmet. Ytan på betongen var alltför tät och alltför fuktig för att kunna ta upp det med limmet påförda

Tabell Sammandrag av recept, med mera, för provade betonger samt för i pilotprojekt ingående betonger [2, 3, 7, 8, 9, 10] (kg/m³ torrvikt, etc).

Betong	Normal		Finspång		Billeberga	Svalöv	Laröd		
Material	1	2	1	2			1	2	3
Sten	900	920	950	950	-	-	-	-	-
Grus	970	910	1050	1050	-	-	-	-	-
Degerhamn Std	0	0	440	0	0	0	0	0	0
Slite Std	290	380		450	450	440	430	480	400
Silikastoft	0	21	36	0	22	24	34	24	18
Flytmedel	0	3.7	5.1	6.7	4.3	4.3	-	- -	
Vbt	0.69	0.44	0.31	0.40	0.37	0.38	0.35	0.39	0.39
Lufthalt (%)	-	-	-	-	6	6.5	6	5.5	6.1
Underlag för betongen	Plåtform	Plåtform	Lättklinker	Lättklinker	Mineralull	Plåtform	Cellplast	Cellplast	Cellplast

Beteckningar: - = uppgift saknas

vattnet. Från en snabbtorkande betong (vbt< 0.38) avgår dock den ytnära fukten mycket snabbt. Efter 2 veckor i en omgivningsmiljö av RF=60 % (RF=relativ fuktighet), sjönk RF i de snabbtorkande betonger, som vi provade, till ca 75 % närmast ytan [12]. Ytuttorkningen skedde ned till ca 20 mm från ytan. I praktiken torde en längre tid för ytuttorkning vara aktuell, sannolikt minst 1 månad från det att ytuttorkning påbörjas tills dess att mattläggning sker. Ytuttorkning av betongen torde ha stor betydelse för dess förmåga att ta upp fukten från mattlimmet.

Simuleringstekniken [2] torde vidare ha haft en avgörande betydelse för resultaten. Samtliga de så kallade direktslipade (ospacklade) bjälklagen vändes upp och ned omedelbart efter gjutning [2]. Under inverkan av gravitationen samlades därvid luftporerna i betongen mot botten av det blivande bjälklaget medan ballasten i betongen rörde sig mot den yta där mattläggning sedan utfördes. (Minst ca 1% luftporer förekommer i all typ av betong, även vid lägre vbt [13].) Bjälklagen som försågs med spackel vändes däremot ej [2], det vill säga de bjälklag som försågs med avjämningsmassa återspeglade verkligheten på ett bättre sätt än de bjälklag som försågs med en direkt mot betongen klistrad matta. Mattläggning på upp- och nedvända bjälklag torde endast förekomma i samband med förtillverkade bjälklag, där dock en pågjutning av minst 50 mm betong är legio.

Referenser

[1] Carina Nowak. Personlig information. Cementa AB. Göteborg. 1994.

[2] Helene Wengholt Johnsson. Kemisk emission från golvsystem-effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning. Licentiatuppsats. Publikation P 95:4. CTH Byggnadsmaterial. Göteborg. 1995.

[3] Helene Wengholt Johnsson. Personlig information. NCC Teknik AB. Göteborg. 1995.

[4] T C Powers; T L Brownyard. Studies of Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Research Laboratories PCA, Bulletin 22. 1946-1948.

[5] Bertil Persson. Högpresterande betong hydration, struktur och hållfasthet. Rapport TVBM-1009. Licentiatuppsats. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[6] Elisabeth Atlassi, Kristina Nordling & Adrian Radocea. Fuktfri betong – en fråga om rätt materialkombination. Tidskriften Betong no 3 1991.

[7] Bertil Persson. Fuktmätning i betong vid SIAB:s FoU-projekt i Finspång. Rapport U01.05. LTH byggnadsmaterial. Lund. 1991.

[8] Bertil Persson. Uttorkningsgrad hos snabbtorkande betong i Billeberga och Svalöv. Rapport U92.02. LTH byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[9] Bertil Persson. Provtagning och mätning av fukt i betong från Laröd, Helsingborg. Rapport U92.04. LTH byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[10] Bertil Persson. Fuktmätning vid fyra fältförsök med snabbtorkande betong. Rapport TVBM-7015. LTH byggnadsmaterial. Lund. 1992.

[11] Mari Karlsson. Personlig information. NCC Ballast AB. 1995.

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

[13] Bertil Persson. Grundkrypning hos högpresterande betong. Konsortiet HÖGPRESTERANDE BETONG. Rapport M06...14. LTH byggnadsmaterial. Lund. 1995.

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

Sprickbildning i vältbetonggolv

Artikeln omfattar en genomgång av orsaker till sprickbildning och hålrum i ett cirka 10 000 kvadratmeter stort golv av vältbetong. För detta ändamål redovisas laboratoriemätningar och platsmätningar tillsammans med en hålrumskartering Sammanfattningsvis saknades dokumentation på sammansättning, blandningstider, packningssätt, fogindelning och härdning. Vältbetonggolvet uppvisade hålrum och sprickbildning som gjorde att ställda funktionskrav inte kunde uppfyllas – inte heller kravet på god beständighet. Reparationsåtgärder hade varit misslyckade och i vissa fall försämrat funktionen hos golvet. En av konstruktör anvisad fotplåt hade minskats, vilket gav risk för genomstansning och böjbrott. Syftet med arbetet var att ge förslag på åtgärder för att återställa golvet i fullgott skick med fullgod funktion och god beständighet – utan krav på förlängd garanti.

Halva slutkrympningen efter ett halvt till ett år hos utförd vältbetong var av samma storleksordning som slutkrympningen hos en god vältbetong. Hålrum hade uppstått inom 65 procent av fria golvytor varför hela överbetongen inklusive en del av vältbetongen ned till hålrumssprickan bör bytas ut. Hålrum hade uppstått av sig självt varför vältbetongen inte ens kunde uppta belastning från trafikens egentyngd. Förskjuvningskrafter från krympningen hos överbetongen var orsaken till hålrummen i vältbetongen. Fem av tjugo uttagna betongprover visade låg hållfasthet, 17 MPa, jämfört med 43 MPa för övriga prover. Ett av proverna föll sönder av sig självt under transport. Låg hållfasthet berodde på låg densitet, vilken i sin tur berodde av dålig eller obefintligt packning av vältbetongen. För ett prov, med mycket låg hållfasthet, 15 MPa, uppmättes vältbetongtjockleken 180 mm jämfört med 220 mm som nominellt krav. Övre delen av vältbetongen uppvisade låg draghållfasthet (medelvärde 1 MPa med ett lägsta värde om 0,5 MPa). På en stor del av betongproverna hade vältbetongen brutits av mellan 15 och 25 mm från ytan varför dragprovning inte kunde utföras. Övre delen av vältbetongen kunde därför inte anses som bärande i fråga om att fördela punktlaster eller trafiklast. Dimensionerande tjocklek hos vältbetongen varierade mellan 133 och 150 mm i stället för nominellt krav om 220 respektive 180 mm.



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

Utförande och problemställning

Sammansättning hos vältbetong. Laboratoriemätningar av densitet, draghållfasthet och tryckhållfasthet utfördes av CBI Betoninstitutet/SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (CBI/SP) Borås. Platsmätningar utfördes av sprickbildning och hålrum. Undergrunden utfördes av välgraderat grus som hade packats väl. Cirka 30 packningsprov hade tagits ut. Efter provbelastning på 30 platser jämnt fördelade över byggnadsytan godkändes underlaget som bärlager på samtliga punkter enligt Vägverkets metodanvisningar 5606:1993. Vältbetonggolvet utfördes 180 alternativt 220 mm enligt sammansättning som ges i *tabell 1*. Bindemedelsmängden var lägre än vad som rekommenderas, 195 kg/m³, i stället för som minst 340 kg/m³ enligt Betonghandboken [1]. Cementbesparing uppgick således till cirka 300 ton jämfört med ett golv av god vältbetong. Bindemedlet i cement till en andra etapp av vältbetonggolvet innehöll upp till 20 procent slagg eller kalkstensfiller, vilket kan ha givit en något lägre draghållfasthet i vältbetongen än om rent portlandscement hade använts. Partikelsprång fanns mellan fraktionerna 2 mm och 4 mm från vilket partikelsprång avrådes i Betonghandboken [1].

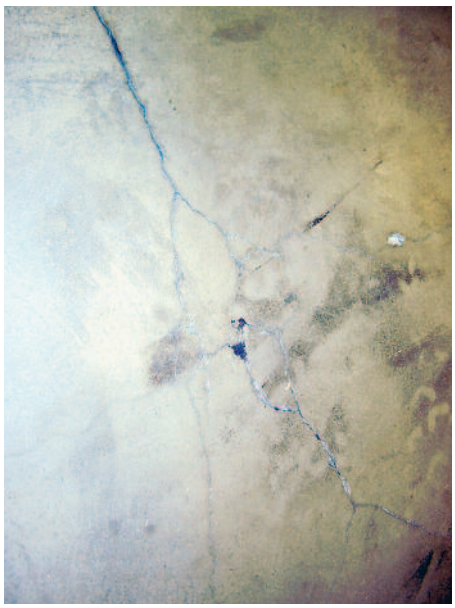
Blandning, utläggning, packning och härdning av vältbetong. Förundersökning hade veterligt inte utförts, vilket krävs enligt Betonghandboken [2]. Betongen blandades i fältfabrik och lades ut i tunna skikt inomhus med avjämnande utläggare. Blandningstider och vattencementtal (vct) samt fuktkvot i delmaterialen var okänd. Vattencementtalet bör vara cirka 0,39 för god vältbetong [1]. Vattencementtal bör beräknas minst en gång per dag samt fuktkvoten kontrolleras fortlöpande. Fuktkvoten bör enligt Betonghandboken kontrolleras för varje tillverkad mängd om 100 kvadratmeter, men det är okänt om så har skett. Redovisning av provkuber saknas. Tryckhållfasthet bör kontrolleras ur det tillverkade materialet med minst en kub per dag, Kango, eller minst tre kuber per kalendervecka enligt Betonghandboken [2]. Vältning skedde omedelbart efter utläggning med vält av okänd tyngd och typ. För skikt med 150 mm i tjocklek bör vibrerande envalsvält eller tandemvält med tyngden sex ton användas i sex vibrerande överfarter för att ge skiktet en fullgod packning [3]. För skikt med 250 mm i tjocklek bör vibrerande envalsvält eller tandemvält med tyngden tio ton användas i sex vibrerande överfarter för att ge skiktet en fullgod packning. Redovisning av packningsgrad saknas. Packningsgraden bör enligt Betonghandboken provas efter första utläggningen samt därefter minst två gånger för varje mängd om 200 kubikmeter, i aktuellt fall totalt cirka 25 prover [2]. Ytan på vältbetongen härdades inomhus i luft med temperaturen cirka 10 °C. Vältbetongen bör dock, enligt Betonghandboken, skyddas mot uttorkning och härdas med en vattenabsorberande geotextilduk direkt efter vältningen [4]. Vid höga krav på ythållfasthet bör vattenhärdning ske under fem till sju dygn.

Fogning av vältbetong. Normalt är fogindelning ett konstruktörsansvar, om detta ansvar inte övertas av entreprenören, med hänsyn till särskilda produktionsförutsättningar. Rörelsefogar (isolationsfogar) synes i aktuellt fall inte ha utförts runt om eller mot fasta konstruktioner enligt kravet, inte heller mot angränsande beläggning [5]. Uppstickande rörelsefogar (isolationsfog) om cirka 25

Tabell 1: Sammansättning hos vältbetong.

Etapp	I (kg/m³)	II (kg/m³)
Vatten	?	?
Cement Cemex Portland CEM I 52,5 N	195	
Cement Cemex Komposit CEM II/A-M (S-LL) 52,5 N		195
	(%)	(%)
Grus	50	50
Makadam 8 – 16 mm	30	30
Makadam 16 – 25 mm	20	20

FOTO SAMTLIGA: BERTIL PERSSON



Reflektionspricka från vältbetong genom överbetong.



Reparationen – pågående spricka intill reparation.



Hålrumskrater. Fortgående spricka i reparation.



Fortgående spricka intill reparation.

mm krävs i detta fall till följd av golvets storlek i syfte att säkerställa golvets rörelsemöjlighet framgent mot nämnda fasta konstruktioner, såväl horisontellt som vertikalt. Där man är beroende av lastöverföring bör kontraktionsfogar utföras med ett inbördes avstånd av mellan fem och sex meter [5]. Kontraktionsfogar synes inte ha utförts i detta fall. Längsta möjliga avstånd mellan kontraktionsfogar vid aktuell plattjocklek är tretton meter, men kontraktionsfogar hade, som sagts, inte utförts [5]. Tvärsgående kontraktionsfogar borde ha utförts och även längsgående kontraktionsfogar med avstånd högst lika med det mellan de tvärsgående kontraktionsfogarna. De längsgående kontraktionsfogarna bör sammanfalla med en längsgående arbetsfog. Till exempel kan var tredje arbetsfog sågas upp. Arbetsfogar synes ha utförts i riklig mängd. Arbetsfogarna synes ha stått öppna över natt. Mellanlägg har förmodligen inte lagts mot tidigare utförd vältbetong eller asfaltklistring skett mot denna varför sprickbildning har skett okontrollerat kring fogen till följd av vidhäftning mot föregående gjutetapp. Sågning synes inte heller ha skett i arbetsfogen eller asfaltklistring i syfte att undvika vidhäftning mot den tidigare utförda vältbetongen. Med hänsyn till det ovan sagda hade vältbetonggolvet spruckit på ett okontrollerat sätt, i alla riktningar, överallt.

Kantförstyvningar. Där punktlast finns nära en rörelsefog bör dessutom en kantförstyvning utföras, vilket i detta fall gäller alla rörelsefogar, eftersom det inte kan förutses exakt var punklaster kan placeras [6]. Kantförstyvning synes ha utförts mellan etapperna. Det är oklart om kantförstyvning har utförts i ytterkanterna av golvet vilket också är ett krav enligt Betonghandboken [6]

Blandning, utläggning, fogning och härdning av överbetong. Sammansättning för pågjutning av 20 mm överbetong ges i *tabell 2 på nästa sida*. Överbetongen har lagts ut mot en väl vattnat och primerbehandlad vältbetong cirka tio till tjugo dygn efter utläggning av vältbetong. Primerbehandling utfördes på följande sätt:

1. Först ströks en ”vidhäftningsprimer” bestående av polymerdispersion ut.

2. Slurry bestående av cement, sand, polymerdispersion och tillsatsmedel lades ut.

Välbetongytan bedömdes dock ha varit för blöt för att överbetongen skulle kunna utföras med gott resultat. Härdning skedde inte heller av överbetongen.

Belastning och krympning. Belastning av golvet skedde cirka två månader efter utläggning av överbetong, det vill säga betongen i golvet torde ha nått nära nog sin sluthållfasthet. Tidig belastning torde således inte ha varit orsaken till sprickbildning och hålrum. Krympningen, som är fuktberoende, hade dock inte nått sitt slutvärde vid belastningen. Det kan ta upp till två till tre år tills det att fukten i golvet har kommit i jämvikt med omgivningen och därmed krympning har stabiliserats till ett medelvärde. Krympning hos vältbetong uppgår till cirka 0,10 till 0,15 promille, det vill säga cirka en fjärdedel av krympningen hos normal betong [7]. På 100 meters sträcka skulle således total krympningen efter två till tre år uppgå till mellan 100 000 • 0,1 • 0,001 = 10 mm till 100 000 • 0,1 • 0,0015 = 15 mm. Aktuellt värde på krympningen efter cirka ett halvt till ett år kan kontrolleras genom att mätning av summan av sprickvidder i jämförelse med totalsträckan. Med ledning därav kan därefter en slutprognos på krympningen göras [8], [9], [10].

Problemställningar. Efter en genomgång av utförandet kunde följande problemställningar sammanfattas:

1. Omfattande hålrum och sprickbildning gjorde att vältbetonggolvet inte uppfyllde ställda funktionskrav.

2. Vältbetonggolvet uppfyllde inte heller kravet på god beständighet.

3. Reparationsåtgärder hade varit misslyckade och hade försämrat funktionen hos golvet.

4. Exempelvis hade injektering skett, vilken i stället givit hålrum på omgivande golv.

5. Alternativt hade reparation skett med för starkt/för svagt material vilket endera givit upphov till sprickor i omgivande golv eller i reparationsmaterialet i sig självt.

Genomstansning och böjdragbrott

Vältbetonggolvets uppgift är att fördela punktlaster på en större yta än den kon som bildas i samband med ett genomstansningsbrott av betong (skjuvning) och att genom vältbetongens böjdraghållfasthet förhindra sprickor i underkanten av golvet under stora punktlaster. Om inte sprickvidden kan kontrolleras kan golvet

Tabell 2: Sammansättning hos överbetong (vct okänt).

Etapp	I – II (kg/m³)
Vatten	Tillsätts efter behov
Cement Rudersdorf Portland Cem I 32,5	420
Makadam 2 – 5 mm	800
Sand 0 – 4 mm	1 000
Polymertillsats i dispersion	60

Tabell 3: Maximal dimensionerande punktlast (kN) för vissa kombinationer betongtjocklek/bredd på kvadratisk fotplåt (mm) för projekterad betong C28/36.

Betongtjocklek/plåtbredd (mm)	120	150
180	**59**	66
220	81	**90**

inte heller beräknas för dessa brottfall, genomstansning av betong och böjdragbrott. I aktuellt fall var sprickbildningen okontrollerad varför golvet redan av detta skäl inte uppfyllde krav på byggnadsverkets goda bestånd. Om en kon utbildas genom stansbrott av betongen övergår punktlasten i stället till bärlagret varvid en deformation av detta sker. Detta innebär sättning. Risken för böjdragbrott är i allmänhet avgörande vid dimensionering av vältbetonggolv utom vid större tjocklekar, där även genomstansning av betong vid stora punktlaster (containerfallet) kan bli förödande för konstruktionens goda bestånd [11]. Kontrollen av konstruktionen genomfördes under förutsättning att vältbetongen hade erhållit en fogindelning genom sågning till en tredjedel av vältbetongens tjocklek i ett rutnät med avståndet tjugo gånger tjockleken, i aktuellt fall med tjocklekar 180 och 220 mm endera c/c 3,6 eller 4,4 meter [12]. Vidare förutsattes att vältbetongens krympning vara högst 0,15 promille varför fogöppningen blev liten i sprickan under den sågade delen av vältbetongen, således mellan 0,15 • 3 600 • 0,001 = högst cirka 0,5 mm respektive 0,15 • 44 400 • 0,001 = högst cirka 0,7 mm, vilket uppenbart inte var fallet.

Eftersom fogindelning inte hade skett eller kontraktionsfogar inte heller hade utförts så hade spricköppningarna blivit större än vad som förutsätts i dimensioneringsanvisningarna. Små sprickvidder är förutsättningen för att tvärkraft bör kunna upptas i sprickan. Vid en större spricka än vad som föreskrivs kan tvärkrafter inte tas upp i denna utan tillåten last intill sprickan minskas kraftigt. Om en stor punktlast placeras nära en arbetsfog får därför särskilda beräkningar göras, från fall till fall. Nedanstående beräkningar avser därför endast punktlast mer än cirka en meter från sprickor. Aktuell konstruktion hade utförts för två fall:

1. Tjocklek 180 mm med punktlast 60 kN
2. Tjocklek 220 mm med punktlast 90 kN.

Tjockleksförhållanden i dessa fall antyder att dimensionering för böjdragbrott av vältbetongen har varit avgörande (kvadratiskt samband det vill säga $(220/180)^2 = 1{,}5$).

Genomstansning av betong. Bärförmågan beräknades med Bestämmelser för Betongkonstruktioner 1994, BBK 94 [13]:

$$V_u = \eta \cdot u_1 \cdot d \cdot f_{v1} / 1{,}3 \quad (1)$$

$$f_{v1} = \xi \cdot 0{,}45 \cdot f_{ct} / \zeta \quad (2)$$

$$f_{ct} = f_{ctk} / (\eta\gamma_m \cdot \gamma_n) \quad (3)$$

$$u_1 = 4 \cdot b + \pi \cdot d \quad (4)$$

där

b betecknar sidlängd på kvadratisk stålplåt under ben till pallställ
d plattjocklek
f_{ctk} karaktäristisk draghållfasthet lika med 1,95 MPa för C28/36, är lika med okänd för utförd betong
u_1 betecknar genomstansningsarean av betong för en kvadratisk stålplatta
V_u betecknar bärförmågan beräknas med BBK 94
γ_n betecknar partialkoefficient för aktuell säkerhetsklass (säkerhetsklass 1) är lika med 1,0
η betecknar en excentricitetsfaktor som oftast sätts lika med 1 vid centrisk last
$\eta\gamma_m$ betecknar en partialkoefficient med hänsyn till osäkerheten i bärförmågan är lika med 1,5
ξ betecknar storlekfaktorn enligt BBK 94 för vältbetong med tjockleken mindre än 0,2 m eller lika med 0,22 m, ξ är lika med 1,4 [14]
ζ betecknar en spricksäkerhetsfaktor lika med 2.

Bärförmågan divideras med γ_n lika med 1,3 just i fallet genomstansning av betong. Insättning i ekvationer (1) till (4) ger följande uttryck:

$$V_u = 1 \cdot (4 \cdot b + 3{,}14 \cdot d) \cdot d \cdot 1{,}4 \cdot 0{,}45 \cdot f_{ctk} / ((1{,}5 \cdot 1{,}0) \cdot (2 \cdot 1{,}3) = 0{,}162 \cdot (4 \cdot b + 3{,}14 \cdot d) \cdot d \cdot f_{ctk} \quad (5)$$

Tabell 3 visar maximal dimensionerande punktlast (kN) för vissa kombinationer betongtjocklek/bredd på kvadratisk fotplåt (mm) för projekterad betong C28/36. Beräkningen visar att en kvadratisk 150 mm fotplåt var tillfyllest för att klara genomstansning för betong C28/36. För en bedömning av karaktäristisk draghållfasthet för utförd betong C14/18 kan försöksdata användas, dels med hänsyn till förväntad tryckhållfasthet, dels med hänsyn till cementhalten. I bägge fallen förutsattes att utförd vältbetong hade kompakterats till 98 procent av Proctorvärdet enligt formeln [16]:

$$R_d = \gamma_{utborrad\ cylinder} / \gamma_{Proctoranalys} \cdot 100 \quad (6)$$

där

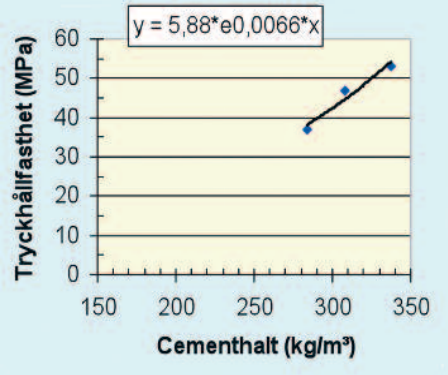
Rd betecknar packningsgrad (%)
$\gamma_{utborrad\ cylinder}$ betecknar densitet hos cylinder
$\gamma_{Proctoranalys}$ betecknar densitet efter modifierad Proctoranalys.

Med ledning av provning av vältbetong packad till 98 procent kunde följande samband beräknas, *figur 1* [17]:

$$f_c = 5{,}88 \cdot exp(0{,}0066 \cdot C) \quad (7)$$

där

f_c betecknar tryckhållfasthet för utborrad cylinder med diameter 100 mm och längd 100 mm (lika med tryckhållfasthet för kub med sidan 150 mm (MPa)
C cementhalt (kg/m³).



Figur 1: Tryckhållfasthet efter provning av vältbetong packad till 98 procent (Proctor).

För aktuell betong enligt tabell 1 erhålls extrapolerat f_c är lika med 21 MPa för vältbetong packad till 98 procent, det vill säga betongklass motsvarande C14/18. Tryckhållfastheten kan även bedömas med hjälp av andra resultat baserade på vattencementtal [18]:

$$f_c = 0{,}5 \cdot (23{,}1 + 0{,}83 \cdot (162 \cdot (0{,}809 - vct))) \quad (8)$$

Insättning i ekvation (8) av vattencementtal lika med 0,39 enligt anvisningar i Betonghandboken och vct är lika med 0,67 enligt recept för vältbetong ovan och ger i stort sätt en halvering av hållfastheten, från f_c lika med 40 MPa till f_c lika med 21 MPa. Jämfört med kraven i Betonghandboken på C28/36 synes betongklass motsvarande C14/18 sannolikt ha utförts. En halvering av tryckhållfastheten torde även ha halverat draghållfastheten hos betongen, det vill säga f_{ctk} är lika cirka 1 MPa för utförd betong. Beräkning

Tabell 4: Dimensionerande last (kN) för betongklass motsvarande C14/18 vid vissa kombinationer betongtjocklek/bredd på kvadratisk fotplåt under punktlast (mm).

Betongtjocklek/plåtbredd (mm)	120	150	380	460
180	30	34	**61**	70
220	42	46	79	**90**

Tabell 5: Dimensionerande plattjocklek för betong C28/36 vid vissa kombinationer av kvadratisk fotplåt (mm) och punktlastens dimensioneringsvärde (kN).

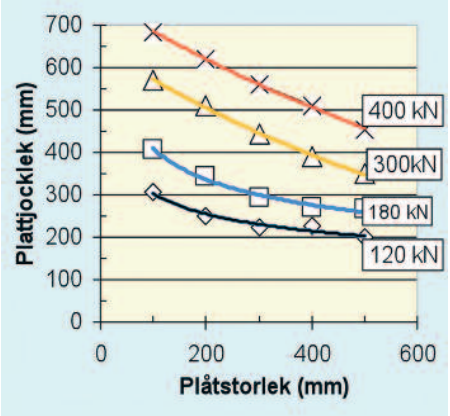
Punktlastens dimensioneringsvärde (kN)	**60**	130	**90**	195
120	**178**	270	**218**	355
150	139	220	174	295

av genomstansning av betong sker därför sambandet (kN):

$$V_u = 0{,}000162 \cdot (4 \cdot b + 3{,}14 \cdot d) \cdot d \cdot 1 \quad (9)$$

Tabell 4 visar dimensionerande last (kN) för betongklass motsvarande C14/18 vid vissa kombinationer betongtjocklek/bredd på kvadratisk fotplåt under punktlast. Fotplåten bör för betongklass motsvarande C14/18 utföras minst 380 mm (6 kN punktlast) upp till 460 mm kvadratiskt (90 kN punktlast c/c 800 mm) för att fylla krav på genomstansning enligt BBK 94.

Böjdragbrott. Även om genomstansning är det allvarligast med genombrott som följd bör även kapaciteten för böjning kontrolleras. Kontrollen har skett med beräkningsprogram GIPI [11]. I containerlastfallet förutsätts belastningsytan vara kvadratisk även om GIPI kräver en cirkulär yta. Omräkning har därför skett till en kvadratisk yta enligt vissa antaganden. Beräkningarna har utförts för C28/36 medan betongklass motsvarande C14/18 torde ha utförts varför samtliga beräkningsvärden även i detta fall har minskats enligt ett lineärt förhållande mot höjden av plattan. *Tabell 5* visar dimensionerande plattjocklek för fogad vältbetongbeläggning C28/36 för samtliga klimatzoner och samtliga materialtyper i terrass, *figur 2* [15]. Figur 2 visar erforderlig plattjocklek vid given kvadratisk plåtstorlek och last. Figur 2 gäller för containerlastfallet det vill säga punktlast vid vissa kombinationer av kvadratisk fotplåt under punktlast och punktlastens dimensioneringsvärde (kN). Värden för 60 kN och 90 kN har extrapolerat från givna värden för 130 kN och 195 kN enligt GIPI. Beräkningen visar att kraven på böjbrottmoment uppfylls med en 120 mm kvadratiskt fotplåt. Beräkningen får anses som mycket osäker, dels med hänsyn till att utförd betongkvalitet är okänd, dels med hänsyn till att såväl interpolation



Figur 2: Erforderlig plattjocklek vid given kvadratisk plåtstorlek och last.

som extrapolation har skett vid beräkningen. *Tabell 6* visar erforderlig tjocklek (mm) för fogad vältbetongbeläggning betongklass motsvarande C14/18 för samtliga klimatzoner och samtliga materialtyper i terrass förutsatt att även böjdraghållfastheten har halverats i likhet med tryckhållfastheten [14]. Beräkningen gäller för containerlastfallet det vill säga punktlast. Värden för punklasterna 60 kN och 90 kN har interpolerats fram. Även för böjmomentbrott krävs för betongklass motsvarande C14/18 en kvadratisk plåt med bredd upp till 450 mm.

Mätningar på plats

Metoder. Sprickvidd och hålrumsutbredning uppmättes. Belyst spricklupp användes. Tillgängligheten var dock begränsad i lokalen. För nära kontakt med golvet användes en bilmontörsvagn. Det bör understrykas att endast cirka hälften av slutkrympningen förelåg ett halvt till ett år efter gjutning varför det är rimligt att räkna med en fördubblad sprickvidd jämfört med mätvärdet. För hålrumskartering användes ett 12 mm armeringsstål med längden 1 m, vilket stöttes mot golvytan c/c cirka 200 mm intill dess hålrum erhölls varefter karteringen fortsatte. Vid fria ytor användes samma indelning av hålrumskarteringen. Det bör understrykas att utvecklingen av hålrum var beroende, dels av slutkrympningen, som i sitt slutläge föreligger efter cirka tre år, dels av belastningen, alternativt av deformationen av vältbetongen i vertikal led.

Resultat. *Figur 3 på nästa sida* visar aktuell (uppmätt) krympning, krympning hos vältbetong (sprickor större än 0,7 promille) samt halva slutkrympningen för god vältbetong enligt Betonghandboken. Vältbetonggolvet uppvisar liten krympning, cirka 0,050 promille, att jämföra med halva slutkrympningen cirka 0,063 promille för god vältbetong enligt Betonghandboken. Låg krympning hos vältbetongen var dock till föga gagn i sammanhanget eftersom överbetongen uppvisade desto större krympning, cirka 0,119 promille det vill säga ungefär lika med det värde som slutkrympning förväntas bli för god vältbetong enligt Betonghandboken. För brukaren är krympningen i ytan avgörande för ytans goda bestånd. *Figur 4 på nästa sida* visar aktuell (uppmätt) krympning parallellt med sifferlitterade linjer (sprickor längs bokstavslitterade linjer) samt halva slutkrympningen för god vältbetong. Vältbetonggolvet uppvisar stor krympning, 0,095 promille, respektive mycket stor krympning, 0,247 promille, att jämföra med halva slutkrympningen cirka 0,063 promille för god vältbetong (Betonghandboken).

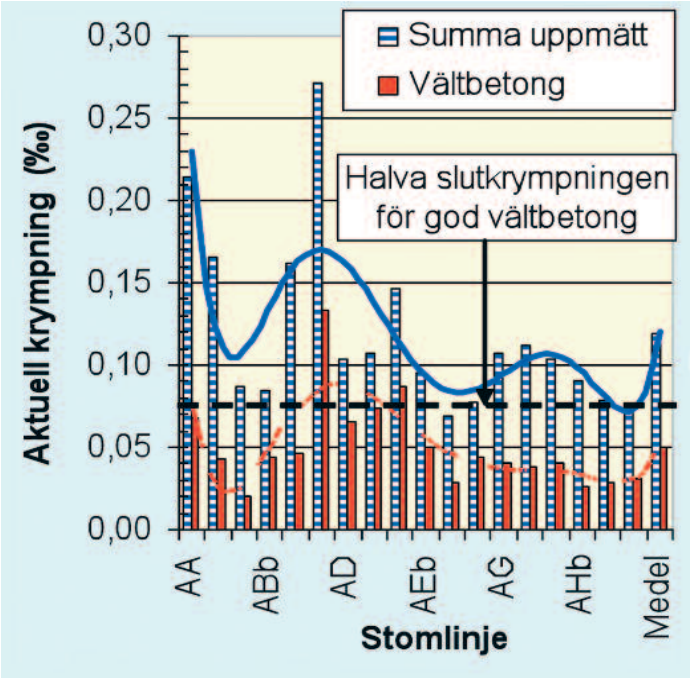
Figur 5 på nästa sida visar andel hålrum i golvet. Det kan konstateras att 65 procent av tillgängliga ytor hade hålrum. Hålrum leder på ganska kort sikt till hålrumskratrar och kan inte accepteras. Hålrumskratrar äventyrar också vältbetongens goda bestånd. Hålrum hade uppstått i övre delen av vältbetongen till följd av utebliven härdning och därmed för låg skjuvningshållfasthet i vältbetongen för att uppta krympningskrafter från överbetongen. Som för sprickbildningen kan det

Tabell 6: Erforderlig tjocklek (mm) för fogad vältbetongbeläggning betongklass motsvarande C14/18.

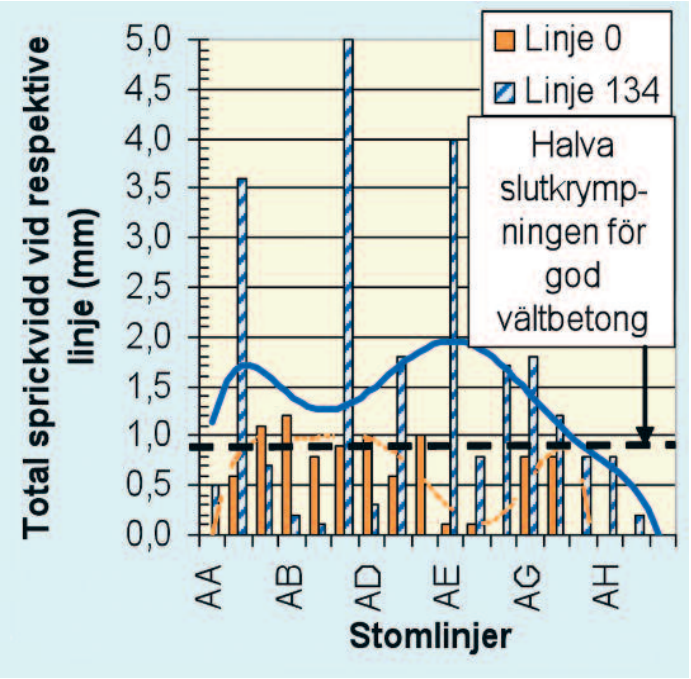
Punktlastens dimensioneringsvärde (kN)	65	**60**	98	**90**	130
100	270	257	355	335	435
200	220	209	295	276	370
300	200	191	260	245	320
400	190	**181**	250	**240**	290
500	180	172	230	**200**	350

Tabell 7: Relativa styvheten hos ett tvärsnitt med en dimensionerande höjd av 220 mm i förhållande till ett tvärsnitt av god vältbetong enligt Betonghandboken.

d (mm) / f_c (MPa)	15	25	35	45	55	65
140	0,15	0,19	0,23	0,26	0,28	0,31
160	0,22	0,29	0,34	0,38	0,43	0,46
180	0,32	0,41	0,48	0,55	0,61	0,66
200	0,43	0,56	0,66	0,75	0,83	0,90
220	0,58	0,75	0,88	1,00	1,11	1,20

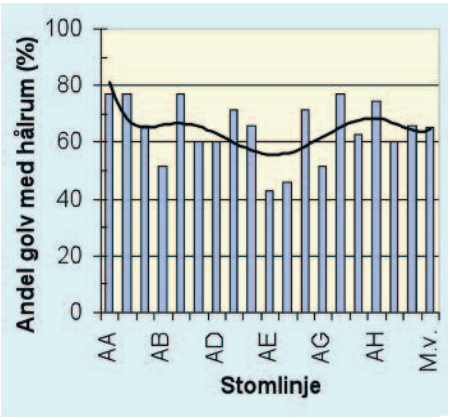


Figur 3: Aktuell (uppmätt) krympning, krympning hos vältbetong (sprickor större än 0,7 promille) samt halva slutkrympningen för god vältbetong.

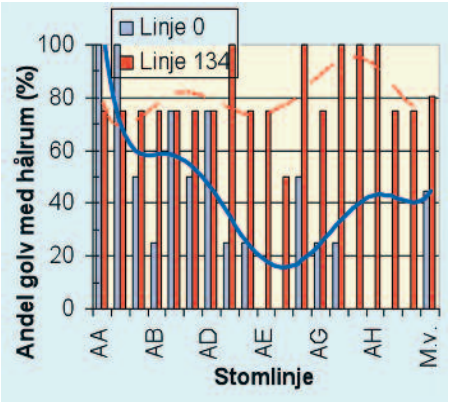


Figur 4: Aktuell (uppmätt) krympning parallellt med sifferlittererade linjer (sprickor längs bokstavslittererade linjer) samt halva slutkrympningen för god vältbetong.

också konstateras att hålrum var mest frekvent förekommande där trafiken var som störst. Överbetongen tålde inte ens trafik utan last. *Figur 6* visar på samma sätt andel hålrum vid utvalda stomlinjer 0 och 134. Vid linje 134, där trafiken var större än vid linje 0, var även hålrumsfrekvensen nära nog dubbelt så stor (81 procent) som vid linje 0 (45 procent). Återigen: vid den utvalda stomlinjen 134 tålde golvet inte trafik utan last, utan att hålrum uppstod i välbetongen. Hålrummet berodde av för låg draghållfasthet i vältbetongen cirka 50 mm från ytan. Hålrum uppstod förmodligen av sig självt eftersom vältbetongen inte kunde uppta förekommande krympningskrafter från överbetongen.



Figur 5: Andel hålrum på tillgängliga ytor. M.v. är lika med medelvärde.



Figur 6: Andel hålrum vid linje 0 (trafik utan last) och 134 (trafik med last). M.v. är lika med medelvärde.

Orsaker till sprickbildning och hålrum. Hålrum och sprickbildning följer hand i hand. Hade väl hålrum uppstått så följde inom kort även sprickbildning. Fenomen går därför inte att strikt särskilja. Diskussionen gäller i huvudsak krympningssprickor eftersom hålrum kan konstateras bero av utebliven härdning av övre delen av vältbetongen. En huvudorsak till sprickbildning mittför bärande pelare var avsaknad av isolationsfogar mot fasta genomföringar, stora stålpelare, ränder och anslutande golv. Sprickor i arbetsfogar/etappfogar kan förklaras av att sågning, i syfte att erhålla en kontrollerad sprickbildning, inte hade utförts. Kraftiga sprickor längs mitten av områden med trafiklast kan bero av att bjälklagets styvhet har minskat i och med bristfällig härdning av ytan på vältbetongen. Golvet böjde förmodligen uppåt med en böjmomentspricka som följd. Detta bekräftades av att en bilmontörvagnen vid inmätningen av sprickorna av sig själv på grund av gravitationen åkte från sida till sida av trafikstråket. Lägre styvhet hos vältbetongen kan också bero av att elasticitetsmodulen hade blivit lägre än för en god vältbetong. Elasticitetsmodulen beror nämligen av tryckhållfastheten enligt sambandet:

$$E = 0{,}45 \cdot \sqrt{f_c} \qquad (10)$$

Styvheten hos ett osprucket tvärsnitt beror av dimensionerande höjden upphöjd till tre. Om tvärsnittet spricker, som synes ha varit fallet i områden med trafiklast, minskar tvärsnittets styvhet jämfört med om tvärsnittet hade varit osprucket. *Tabell 7 på föregående sida* visar relativa styvheten hos ett tvärsnitt med en dimensionerande höjd av 220 mm i förhållande till ett tvärsnitt av god vältbetong enligt Betonghandboken. Beräkning har skett med sambandet:

$$EI = 1/((1/(0{,}45 \cdot (f_c)^{0{,}5})) \cdot (1/(2860 \cdot d^3/12))/0{,}0000000001305) \qquad (11)$$

där

d betecknar dimensionerande höjd
f_c betecknar tryckhållfasthet
EI betecknar styvheten.

Som synes var höjden på tvärsnittet av avgörande betydelse för uppböjningen hos bjälklaget. Om vältbetongen utförs med tryckhållfasthet 15 MPa och 140 mm i dimensionerande höjd (exklusive ohärdad betong) blir till exempel styvheten endast 15 procent av den som erhålls med god vältbetong enligt Betonghandboken. Även om vältbetongen utförs med korrekt tryckhållfasthet, 45 MPa, som god vältbetong enligt Betonghandboken bör ha, men med 140 mm i dimensionerande höjd (exklusive ohärdad betong) blir ändock styvheten endast 26 procent av den som erhålls med en god vältbetong enligt Betonghandboken.

Att härda ytan av vältbetongen väl är avgörande för dess sprickbildning och därmed goda bestånd. Det framkom att vältbetongen i etapp I lufthärdades under tio dygn med värmefläkt samt att vältbetongen i etapp II lufthärdades under tjugo dygn före det att överbetongen lades. Sannolikt hade utebliven härdning lett till

ett mindre dimensionerande tvärsnitt än tänkt i och med att cementet i ytan på vältbetongen inte hade hydratiserats i tillräckligt hög grad. Ytan sprack förmodligen så gott som direkt efter gjutning. Eftersom dessutom lägre cementhalt hade använts jämfört med en god vältbetong enligt Betonghandboken, hade tryckhållfastheten blivit lägre än för en god vältbetong enligt Betonghandboken. Sammantaget förklarar dessa bägge parametrar sprickbildningen. I och med att punktlasten ökar, ökar också upptrycket från marken under vältbetong mellan punktlasterna. Betongen spricker alltmer efterhand – möjligen får en beräkning i stället utföras för sprucket tvärsnitt, vilket ökar uppböjningen etter mer.

Hålrum inträffar i övre delen av vältbetongen cirka 50 mm från ytan. Utförd dimensionerande höjd på vältbetongen minskade således. Ett närmare studium av sprickfördelningen tydde på att denna var lastberoende. I vissa områden med trafiklast fanns knappt några sprickor alls – i andra områden var antalet sprickor och sprickvidden sammantaget mycket stor. Detta var allvarligt eftersom vältbetonggolvet, i sånt fall, synes vara underdimensionerat för ändamålet – redan efter cirka ett halvt år. Mest frapperande var koncentrationen av sprickor närmast befintlig byggnad, dels beroende av att trafiklasten där var större, dels beroende av att punktbelastningen successivt hade ökat från denna sida av vältbetonggolvet, figur 3. Det förefaller således som om även sprickbildningen skulle vara belastningsrelaterad till följd av större trafiklast inom vissa områden än för övriga delar av golvet. All utförd vältbetong skulle då på sikt spricka eftersom golvet inte hade utförts för att uppfylla ställda krav på trafiklast. Anledningen till större sprickbildning vid vissa områden än för golvet i övrigt skulle också kunna vara fördelningsrelaterat det vill säga större punktlast fanns eller hade funnits där än för golvet i övrigt. Utan åtgärd fick samma utveckling av sprickvidd förväntas i motstående del av vältbetonggolvet som i den del som ligger närmast befintlig del. Även av figur 4 liksom tidigare för figur 3 framgår en koncentration av sprickor där som störst där trafiken var som störst. Att sprickbildning är stor i linje 134 mellan de utvalda stomlinjerna AE och AF, kan förklaras av en smal passage där trafik passerade för att hämta/lämna last. Att golvet inte tålde trafik utan last tyder på att trafik utan belastning skapar sprickor i golvet efter ett halvt år.

Provningar i laboratorium

Material och metoder. I syfte att kartlägga orsaken till problemen togs tre prover på vardera platsen ut. Dessutom togs tre prover ut på ett område där en till synes fullgod reparation hade utförts med utbyte av överbetong. Vid fullgott utförande skulle denna reparation eventuellt kunna stå modell för reparation av resten av golvet förutsatt att reparationssättet är väldokumenterat. Följande provningar och mätningar utfördes på borrkärnor om 100 mm i diameter:

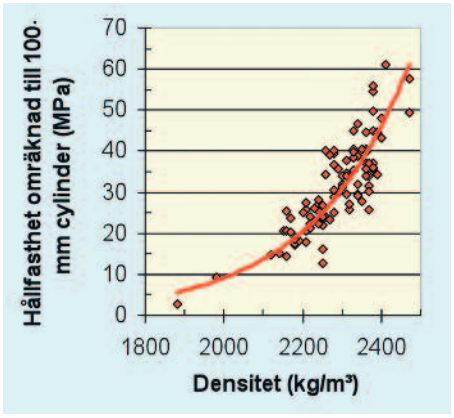
1. Tjocklek hos vältbetong och pågjutning
2. Densitet baserad, dels på totalvikt hos kapat vältbetongprov, dels, ungefärlig, baserad på totalvikt, hos dragprovad pågjutning
3. Draghållfasthet, dels mellan pågjutning och vältbetong, dels i överkanten vältbetong
4. Tryckhållfasthet på vältbetongprov (kapades/slipades till cirka 100 mm i längd).

Vissa borrkärnor bröts itu under transport till CBI/SP varför antalet borrkärnor minskade. Återstående borrkärnor försågs med en pålimmad platta för provning av överbetongens draghållfasthet. Därefter kapades den pålimmade provdragningplattan bort från överbetongen för bestämning av densiteten hos överbetongen. Densitet baserades på totalvikt hos kapat vältbetongprov. Densitet, ungefärlig, baserades på totalvikt hos dragprovad pågjutning. Draghållfasthet bestämdes mellan pågjutning och vältbetong. Draghållfasthet bestämdes alternativt i överkanten av vältbetongen (om brott först utstod där). Tjocklek hos vältbetong bestämdes genom mätning av den utborrade cylinderns totallängd. Tjocklek på pågjutning bestämdes genom mätning. Tryckhållfasthet på vältbetongprov bestämdes på kapade och slipade cylindrar till cirka 100 mm i längd.

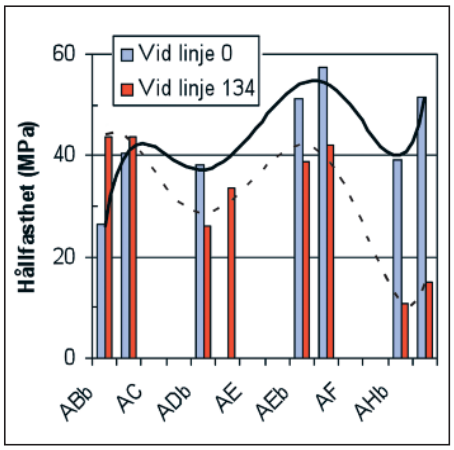
Resultat. *Figur 7* visar hållfasthet hos prover utborrade ur vältbetonggolv som funktion av uppmätt densitet. Stor spridning i resultaten tydde på brist i kontroll vid betongtillverkningen, av vattenhalt, av vattencementtal, fuktkvot, packning, utlagd tjocklek, härdning etcetera, jämfört med god vältbetongteknik. *Figur 8* visar geografisk fördelning av tryckhållfasthet i vältbetonggolvet.

Figur 9 visar draghållfasthet som funktion av tryckhållfast på parallellt uttagna prover.

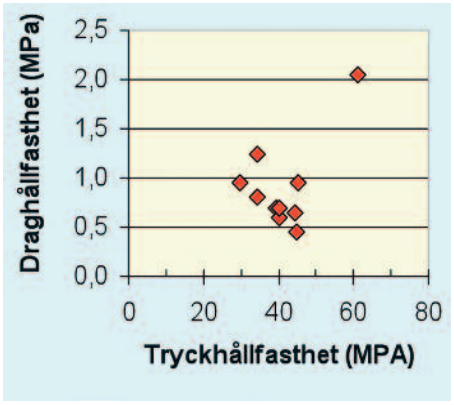
Analys och diskussion. Provning skedde av torr cylinder med diametern och längden cirka 100 mm. C-klassning avser våt provkropp vid 28 dygns ålder, cylinder med diameter 150 mm och längd cirka 300 mm/kub med sidan 150 mm. Omräkning av provresultaten sker därför från torr cylinder med diameter och längd cirka 100 mm till våt kub med sidan 150 mm med användning av formfaktorer. Hållfasthetstillväxten anses dock som obetydlig eftersom vältbetongen inte härdades med vatten enligt Betonghandboken utan i luft. Omräkningsfaktor från torr till våt provkropp minskar hållfastheten med tjugo procent [19], [20]. Tryckhållfastheten för utborrad cylinder med diameter och längd cirka 100 mm är dock



Figur 7: Hållfasthet hos prover utborrade ur vältbetonggolv som funktion av densitet.



Figur 8: Geografisk fördelning av tryckhållfasthet i vältbetonggolvet.



Figur 9: Draghållfasthet som funktion av tryckhållfasthet på parallellt uttagna prover.

direkt jämförbar med tryckhållfastheten för en kub med sidan 150 mm varför ingen omräkning behöver ske härvidlag [17]. På sedvanligt sätt omvandlas cylinderhållfasthet till kubhållfasthet vid beräkning av C-klass genom division med 0,8. Följande samband gäller således (MPa):

$$f_{C1} = 0{,}92 \cdot 0{,}8 \cdot f_c \quad (12)$$

$$f_{C2} = 0{,}92 \cdot f_c \quad (13)$$

där

f_{C1} betecknar uppmätt hållfasthet på torr cylinder med diameter och längd 100 mm

f_{C2} betecknar omräknad kubhållfasthet, 150 mm.

För att erhålla C-klass bör sedan avdrag göras med 1,5 gånger standardavvikelsen. Normalt kan packningsgraden för vältbetong fastställas genom analys av tryckhållfasthet som funktion av densiteten, figur 7. Så är även fallet för utförd konstruktion. För fem betongprover med ett medelvärde på hållfastheten av 17 MPa var densiteten 2 150 kg/m³ att jämföra med densiteten 2 350 kg/m³ för övriga betongprover med ett medelvärde av 43 MPa i tryckhållfasthet. För draghållfasthet i vältbetong gäller följande samband (MPa) [17]:

$$f_{ct} = 0{,}58 \cdot f_c^{0{,}54} \quad (14)$$

För aktuella uttagna prover, där dragbrott genomgående har skett i överkant av vältbetongen där ett krav på karaktäristisk draghållfasthet, f_{ct} lika med 1,95 MPa, gäller det vill säga ungefärligen 4 MPa i provad draghållfasthet. Samband mellan draghållfasthet och tryckhållfasthet framgår av figur 9. Draghållfastheten för vältbetongens yta minskade med ökad tryckhållfasthet vilket är en synbar effekt av utebliven vattenhärdning. Omvänt kan givetvis tryckhållfastheten för god vältbetong beräknas ur draghållfastheten enligt sambandet:

$$f_c = 2{,}74 \cdot f_{ct}^{1{,}85} \quad (15)$$

Övre delen av vältbetongen hade inte härdats med vatten ned till cirka 30 till 35 mm under vältbetongens yta varför dess hållfasthet endast uppgick till en del av kravet C28/36 i betongklass. Ytskiktet på vältbetongen kan förmodligen inte ta full punklast det vill säga maximal påkänning är lika med 90 000/(150 • 150) är lika med 4 MPa att jämföra med en från dragbrottpåkänningen till tryckhållfasthet beräknad tryckhållfasthet i vältbetongens ytskikt (som lägst cirka 0,6 MPa). Övre delen av vältbetongen kunde därför inte anses uppfylla konstruktionskraven. Övre delen av vältbetongen kunde därför inte heller fördela lasten till en kon i syfte att erhålla en större kon vid lastfördelning på undergrunden utan punktlasten får anses gå vertikalt genom överbetongen och övre delen av vältbetongen. Bärigheten för genomstansning av betong minskar därför eftersom endast dimensionerande tjocklek kan beaktas. Dessutom var betongklassen lägre än kravet på god vältbetong C28/36 varför utförd vältbetong i sig endast kunde ta en del av den belastning som en fullgod vältbetong specifikt skulle kunnat ha tagit i genomstansning av betong. I fråga om böjmomentkapacitet minskades denna med kvadraten på dimensionerande höjd med hänsyn till minskad dimensionerande tjocklek. Dessutom var betongklassen lägre än för en god vältbetong. Utförd vältbetong kunde därför endast ta en del av den belastning som en fullgod vältbetong skulle ha kunnat tagit i böjmoment.

Sammantaget uppgick bärigheten för genomstansning av betong och böjmoment till den andel som kan tas med hänsyn till minskad dimensionerande höjd jämfört med handlingarna multiplicerad med den andel som utförd vältbetong kunde ha tagit jämfört med en god vältbetong skulle ha kunnat tagit i tryckhållfasthet. Vid last över cirka 35 procent av maximal punktlast uppfylldes således inte kravet enligt BBK94 i fråga om genomstansning av betong hos golvet respektive vid last över cirka 19 procent av maximal punktlast uppfylls inte heller kravet enligt BBK94 i fråga om böjbrott av golvet. Överbetongen hade uppenbarligen utförts med alltför hög hållfasthet i förhållande till den ohärdade vältbetongens för att krympningskrafter från överbetongen skulle kunna upptas i vältbetongen. Vältbetongen hade spruckit i sin övre del på ett tidigt stadium med utbredd hålrum som följd på ett djup av 2 till 35 mm under vältbetongens yta. Vidhäftningen mellan överbetong med hög cementhalt och ohärdad vältbetong med låg cementhalt var således inte problemet. Problemet låg i stället i för hög cementhalt och liten kornstorlek i överbetongen samt fördröjd gjutning jämfört med vältbetongen, vilket gjorde att skillnaden i krympning mellan överbetong och vältbetong inte kunde överbryggas med förskjuvningskrafter. I stället uppstod skjuvningsbrott i konstruktionens svagaste del cirka 2 till 35 mm från vältbetongens yta. Denna skjuvspricka fanns redan före dragprovningen på avståndet 5 till 45 mm från vältbetongens yta. I ett reparerat parti av golvet fanns en skjuvspricka på plats cirka 15 till 25 mm från vältbetongen yta, vilket antydde att vältbetongen inte heller i detta fall kunnat uppta skjuvkrafter från krympning hos reparationsmaterialet.

Åtgärdsalternativ

Åtgärder förutsatte att utförd vältbetong efter provning visat sig ha tillräckligt hög hållfasthet för att, efter en omberäkning av stansning och böjbrott, ensam kunna ta punktlaster, även intill befintliga arbetsfogar och i detta fall utan kantförstyvning av golvet. Normalt krävs för vältbetong hållfastheten C28/36, vct lika med 0,39 eller lägre vct samt minst 340 kg/m³ cement men så hade utförandet uppenbart inte varit. Hållfastheten var i stället beräkningsmässigt cirka betongklass motsvarande C14/18 i vältbetongen. Föreliggande mätningar och provningar visar att betongkvaliteten för vissa prover var av betongklass motsvarande C14/18 och lägre än vad som förutsätts för en god vältbetong C28/36 samt att en del av utförd vältbetong hade ännu lägre hållfasthet till följd av utebliven härdning samt att isolationsfogar (rörelsefogar) och fogning inte har utförts.

Kompletterande hållfasthetsprovningar. Det gick inte att fastställa hur stor del av vältbetongen som kunde nyttjas respektive hur stor del som måste kasseras genom att kulblästras, slipas eller fräsas bort, cirka 45 mm av vältbetongen. För att fastställa nivån på god vältbetong krävdes kompletterande prover av hållfastheten i höjdled. Då dessa prover hade utförts återstod en konstruktionslösning enligt åtgärdsalternativ, vilken fick detaljeras av ansvarig konstruktör. Hållfastheten hos den efter kulblästring, slipning eller fräsning kvarstående ytan kunde kontrolleras med studsmätare. Andra åtgärdsalternativ torde inte kunna utföras med bibehållna lastkrav enligt handlingarna.

Förstoring av fotplåt under punktlast. Genomförande av åtgärdsalternativet förutsätter att fotplåtar under punktlaster förstoras för att undvika genomstansning av betong hos golvet. Beräkningen förutsatte att kvarvarande vältbetong hade varierande dimensionerande tjocklek samt draghållfasthet varierar enligt föreliggande provningsresultat från CBI/SP. Ovanstående samband (9) används. För rektangulär plåt gäller att $4 \cdot b$ ersätts med $2 \cdot (b_1 + b_2)$, där b_1 betecknar sidlängd för ena längdsidan av plåten och b_2 betecknar sidlängd för andra tvärsgående längdsidan av plåten

$$V_u = 0{,}000162 \cdot (2 \cdot (b_1 + b_2) + 3{,}14 \cdot d) \cdot d \cdot f_{ctk} \quad (16)$$

I *tabell 8 på nästa sida* ges exempel på beräkningar med samband (16). Dimensionerande tjocklek kan dock ändras med hänsyn till kompletterande hållfasthetsprovningar. Grundpåkänningen har beräknats vid konisk utbredning av lasten till grunden (efter genomstansning av betong).

Del av vältbetong och överbetong ersätts med ny betong. Med hänsyn till att delar av överbetongen uppvisade hålrum samt med hänsyn till att kontraktionsfogar saknades bör vältbetongens övre del ersättas med armerad betong med voter. Eljest kommer en vertikalrörelser att uppstå på ömse sidor om fogarna vid trucktrafik. Kontrollerade sprickor med storlek över 0,7 mm förstärks genom att vältbetongen utbilas och ersätts med en votformad, dubbelt rutarmerad betong C28/36, stenmax 8 mm till en bredd av cirka 1 m vid sprickorna med armering längs med sprickan i sin tur ansluten till armerad överbetong C28/36 med förskjuten armering till exempel i form av dubbla rutnät eller en minsta armeringsmängd som enligt konstruktören bör förhindra att krympsprickor uppstår i fogar och över golvet. Detaljprojektering av den nya armerade överbetongen och av de armerade voterna bör utföras av konstruktör. Överkanten på vältbetongen kulblästras, slipas eller fräses bort för att säkerställa att allt löst material avlägsnas i syfte att undvika hålrum. Före vidare konstruktion kontrolleras hållfastheten hos betongytan efter urtag av nya borrkärnor eller med studsmätare. Primerbehandling sker av ytan på

Tabell 8: Med samband (16) beräknad punktlast V_u vid genomstansning enligt BB 94 (kN).

V_u (kN)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	d (mm)	f_{ctk} (MPa)	Grundpåkänning vid genom stansning (MPa)	
112	110	350	220	1,95	0,26	Originalanvisningar från konstruktör
87	140	140	220	1,95	0,26	Korrekt utfört med 220 mm betong
64	140	140	180	1,95	0,26	Korrekt utfört med 180 mm betong
9	140	140	220	0,21	0,27	Utfört med defekt betong, 90 kN
75	140	140	200	1,95	0,31	Provning med korrekt betong, 90 kN
75	140	140	200	1,95	0,15	Provning med korrekt betong, 45 kN
24	140	140	150	0,95	0,46	Utfört med defekt betong, 90 kN
20	140	140	133	0,95	0,55	Utfört med defekt betong, 90 kN
27	350	1100	220	0,21	0,15	Utfört med defekt betong, 180 kN
87	550	1100	150	0,95	0,15	Utfört med defekt betong, 180 kN
79	600	1110	133	0,95	0,15	Utfört med defekt betong, 180 kN
88	550	1110	150	0,95	0,15	Utfört med provad betong, 180 kN

Beteckningar:
b sidlängd på stålplåt under ben till pallställ (mm)
d betecknar tjocklek på betongen (mm)
f_{ctk} karaktäristisk draghållfasthet är lika med 1,95 MPa för C28/36 (MPa)
V_u betecknar bärförmågan beräknad med BBK 94 (kN)

vältbetongen minst ett dygn före gjutning av överbetong. Isolationsfogar om 25 mm utförs väl över betongytan mot alla fasta föremål och pelare. Krympningshämmande medel bör användas i betongen i syfte att minska slutkrympningen hos överbetongen. Den nya överbetongen bör direktslipas för att nå en ytfinish enligt önskemål från beställaren. Ytan härdas under minst en vecka. Ytbeläggning bör förseglas på ett effektivt sätt för att hindra tidig avdunstning från ytan. Ett fullgott och beständigt resultat torde nås på detta sätt. Behov av arbetsfogar, krympfogar etcetera, anges av konstruktör på ritning. Minimitjockleken hos pågjutningsbetongen bör vara 80 mm.

Slutsatser

Följande slutsatser kunde dras efter analys av sprickbildning i ett vältbetonggolv:

1. Undergrunden var väl packad och uppfyllde ställda krav.
2. Vattenhallen och därmed sammansättningen hos vältbetongen var okänd.
3. Ingen som helst materialkontroll hade skett vid tillverkningen av vältbetongen.
4. Packningen av vältbetongen hade inte kontrollerats.
5. Härdningen av vältbetong hade inte skett.
6. Hållfastheten i vältbetong var hälften så stor som för god vältbetong.
7. Överbetongen hade för hög hållfasthet i förhållande till vältbetongen varvid hålrum uppstod med krympningskrafterna enbart som orsak.
8. Överbetongen hade lagts på för blöt vältbetong.
9. Hålrum hade därför uppstått som ett medelvärde i 65 procent av golvet.
10. Fogindelning hade inte skett av golvet, vilket, tillsammans med för låg hållfasthet hos vältbetongen och för hög hållfasthet hos överbetongen, hade lett till stor, okontrollerad sprickbildning över golvytan, varför dess funktion och goda bestånd var satt ur spel.
11. Delar av vältbetongen torde på tas bort ned till fullgod vältbetong och ersättas med fullgod vältbetong.
12. Alternativt, där vältbetongen i sin hela tjocklek var undermålig, torde vältbetongen få ersättas med armerad betong. ■

Referenser

[1]. *Betonghandbok. Arbetsutförande. Projektering och byggande*. Svensk Byggtjänst. 1994, sid 544.
[2]. *ibid*, sid 556.
[3]. *ibid*, sid 552.
[4]. *ibid,* sid 554.
[5]. *ibid*, sid 549.
[6]. *ibid*, sid 548.
[7]. *ibid*, sid 547.
[8]. Bertil Persson. *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. Rapport TVBM-1009. ISSN 0348-7911. LTH. Lund. 1992. 400 sid.
[9]. Bertil Persson. *Quasi-instantaneous and Long-term Deformations of HPC with Some Related Properties*. Rapport TVBM-1016. ISBN 91-630-6969-5. LTH. Lund. 1998. 500 sid.
[10]. Jan-Erik Jonasson (LTU), Bertil Persson (LTH), *Elastiska deformationer, krympning och krypning*, ISBN 91-7332-928-2, Högpresterande betong, Svensk Byggtjänst, Stockholm, sid 173–208.
[11]. Johan Silfwerbrand. *Dimensionering av platsgjutna industriytor i betong*. Rapport 63, Brobyggnad. Institutionen för Byggkonstruktion. Kungliga Tekniska högskolan. Stockholm. 2001, sid 27.
[12]. *ibid*, sid 23.
[13]. *ibid*, sid 24.
[14]. *ibid*, sid 26.
[15]. *ibid*, sid 40.
[16]. Ronny Andersson. *Beläggningar med vältbetong – fysikaliska egenskaper*. CBI rapporter 3·86, sid. 28.
[17]. *ibid*, sid 36.
[18]. Bertil Persson. *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. LTH. Lund. 1992, sid 149, 153.
[19]. Tatiana Berglund. *Omräkningsfaktorer för tryckhållfasthet*. TVBM-5023. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1992, sid 25.
[20]. Bertil Persson. *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. LTH. Lund. 1992, sid 165.

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

Stora emissioner från avjämningsmassor vid kompatibilitetstest

Bertil Persson
LTH



Figur 1 – Provkroppar med avjämningsmassa.

I samband med en större kompatibilitetstest av golvmaterial och betong vid LTH Byggnadsmaterial konstaterades stora egenemissioner från avjämningsmassor. Odören av rutten fisk spreds sig två våningar upp i laboratoriet på LTH och fanns kvar ca 1 vecka, figur 1. När väl ytan på proverna hade torkat till 60% relativ fuktighet, RF, var avjämningsmassan luktfri. Ingen lukt utan fukt som ett ordstäv säger!

Lukt av rutten fisk

Frågan ställdes: vad var det som luktade? Leverantören av avjämningsmassa bedyrade att avjämningsmassorna ej avgav några som helst emissioner.

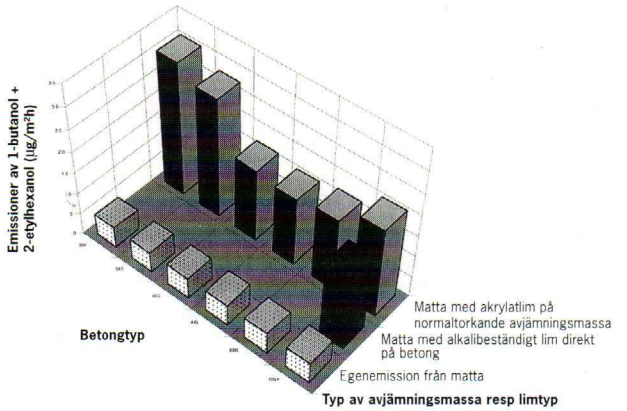
Protokoll visade att så var fallet vid RF = 50% enligt Nordtests noggranna procedur. I sin rätta miljö dvs mellan betong och ett tätt ytskikt översteg emellertid RF vida 50%, vilket var förklaringen till fisklukten. I syfte att mäta upp emissionerna kapslades provkropparna in med obelagd aluminiumfolie. Efter denna försegling erhölls RF = 83% i ytan av provet som efter ett halvt år sändes till Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP, Borås för emissionsmätning, figur 2, [1-3]. Bl. a. uppmättes trimetylamin från avjämningsmassan. Eftersom fisklukten ej kunde märkas vid uttorkning av betongytan enbart, kom odören uppenbarligen från avjämningsmassan.

Emissionerna från avjämningsmassa trängde dock ej igenom de provade mattorna och hade således ingen inverkan på inneluften, figur 2. Vid användning av ett alkalibeständigt lim erhölls nämligen inga tillskottemissioner av 1-butanol och 2-etylhexanol, figur 2. Förhållandena torde vara mer riskfyllda vad gäller emissioner av 1-butanol och 2-etylhexanol, då golv av lösliggande mattor eller parkett placeras på de provade avjämningsmassorna. Via ventilering i ränderna står då de provade avjämningsmassorna i kontakt med innemiljön. Under lösliggande mattor förekommer ofta höga RF-nivåer i vart fall RF = 83% som använts vid föreliggande mätningar. Än högre RF-nivåer är möjliga under parkettgolv, vilket placeras på plastfolie (upp till 95% RF kan förekomma i avjämningsmassan under plasten).

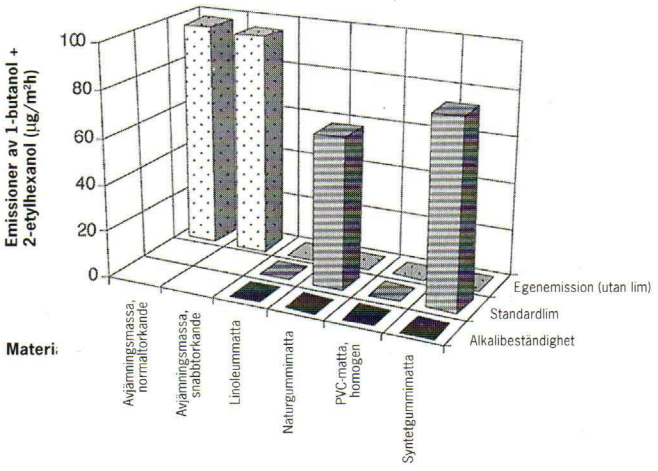
Lim och matta avgörande

I övrigt provades ett mycket stort antal mattyper, betonger, ytbehandlingsmetoder och limtyper under de tre år som kompatibilitetstesten pågått. Sammanfattningsvis hade limmet och mattan en helt avgörande betydelse för om tillskottsemissioner av 1-butanol och 2-etylhxanol skulle uppstå från golvsystemet eller ej [4]. Ett alkalibeständigt lim och en lågemitterande linoleum eller PVC-matta borgade väl för ett emissionsfritt golvsystem vad gäller 1-butanol och 2-etylhexanol. Användes däremot en standard PVC-matta uppstod stora tillskottsemissioner i synnerhet då golvet utfördes på betong med lågt vattencementtal, vct, även om en tämligen torr avjämningsmassa fanns mellan betongen och mattan, figur 3.

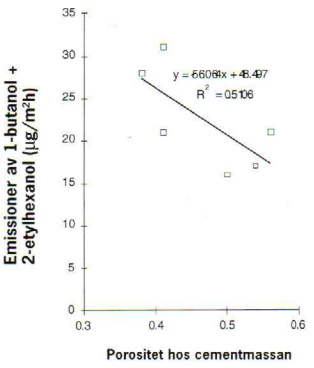
Orsaken till de större emissionerna från golv på låg-vct-betong var troligen cementpastans porositet, dvs. att en låg-vct-betong reflekterade emissionerna så gott som helt och hållet medan en mera porös betong kunde ta emot och transportera emissioner nedåt, figur 4, [3].



Figur 3 - Inverkan av betongtyp på emissioner av 1-butanol + 2-etylhexanol från golvsystem med standard PVC-matta 1 månad efter mattlimning. Beteckningar: G = glasfiller, K = kemiska flyttillsatsmedel; L = luftporbildare; R = referens; S = självkompakterande; V = vattenglas; 38 = vct (%).



Figur 2 - Emissioner av 1-butanol + 2-etylhexanol från provgolv med och utan matta.



Figur 4 - Emissioner av 1-butanol + 2-etylhexanol 1 mån. efter mattlimning från golvsystemen med standard PVC-matta limmad med akrylatlim på en betong med normaltorkande avjämningsmassa versus beräknad porositet hos cementpastan.

Referenser

1. Birgitta Ek-Olausson. Emissionsprovning av material. Rapport 99K7 0224. Kemi och Materialteknik. SP. Borås (1999) 8 sid.

2. Birgitta Ek-Olausson. Emissionsprovning av material. Rapport KMo F000143. Kemi och Materialteknik. SP. Borås (2000). 13 sid.

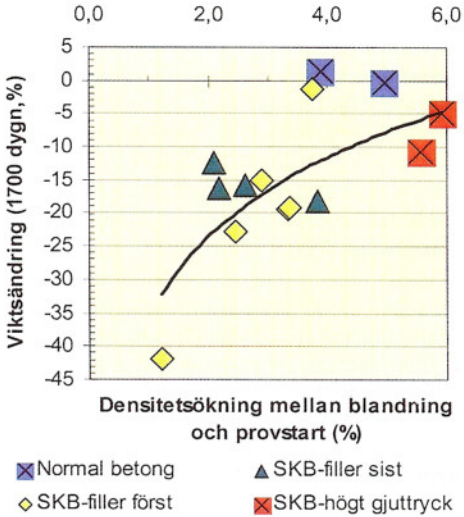
3. Bertil Persson. Kompatibilitet mellan golvmaterial och betong – Effekt av produktionsmetoder på emissioner, fukt och karbonatisering. Rapport TVBM-7149. LTH Byggnadsmaterial. Lund (2000) 133 sid.

4. Bertil Persson. Kompatibilitet mellan golvmaterial på betong. "Compatibility between Flooring Materials and Concrete." Artikel insänd till RILEM (1999) 16 sid.

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

Sulfatnedbrytning av kalkstensfillerbetong

Främst självkompakterande betong, SKB, innehåller ofta stora mängder kalkstensfiller, vilket är gynnsamt för att ett sulfatangrepp ska ske, thaumasitisk, TSA. Långtidsprovningar vid Lunds tekniska högskola, LTH, under 1 700 dygn vid 5 °C visar att så är fallet även för betong med sulfatresistent Anläggningscement. Kalkstensfiller påverkar SKB genom bildning av kolsyra speciellt vid låga temperaturer, där kolsyrans löslighet är som störst för att TSA ska ske. Även andra resultat framkom av femårsförsöket nämligen att TSA även var beroende av kompakteringen hos SKB. Egentligen sker ingen aktiv kompaktering av SKB, vibrering, utan i detta fall var fråga om 5,5 m gjuttryck. Kompakteringen uppmättes som skillnaden i densitet mellan färskt tillstånd och hårdnat, *figur 1*. Resultaten i figur 1 manar till eftertanke eftersom det verkar som om beständigheten mot TSA även skulle vara kompakteringsberoende, vilket är allvarligt för metoden som sådan, att inte vibrera betong alls. I övrigt visar figur 1 att normal betong med Anläggningscement utan kalkstensfiller väl klarade TSA i hög koncentration, 18 g/l natriumsulfat, under fem år.



Figur 1: Relativ vikt efter fem års TSA som funktion av relativ kompaktering.

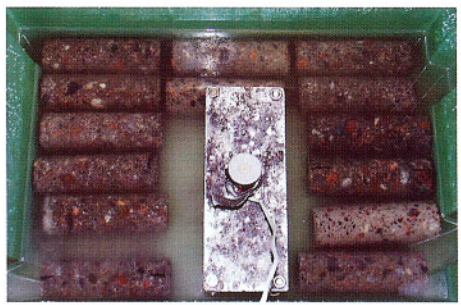


FOTO: STEFAN BACKE

Försöksuppställning för TSA-försök med omrörning vid 5 °C.

Bertil Persson
LTH Byggmaterial, Lund.

Referens:

Bertil Persson. *Beständighet hos självkompakterande plastfiberbetong.* Arbetsrapport 0503:01. Uppdragsgivare: Vägverket. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2004, 69 sid.

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

Sveriges billigaste bostadshus byggdes av betong

Bertil Persson,
LTH Byggnadsmaterial, Lund

För två år sedan uppfördes i Malmö två bostadshus som vid en senare efterkalkyl skulle visa sig bli Sveriges hitintills billigaste, index beaktat. Totalt sett hamnade prislappen på 8.650:- kr per kvm. Byggtekniken och materialvalet var helt avgörande för det ekonomiskt framgångsrika bygget. Stommen utfördes av betong, såväl innerväggar som ytterväggar och bjälklag. Av estetiska skäl försågs husen med utvändig tegelbeklädnad. Trots den kvalificerade konstruktionen blev byggtiden kort, ca 1/2 år från gjutstart till inflyttningen. Det robusta stommaterialet till bygget gjorde att problem med fukt och mögel helt kunde undvikas.

Effektiv kombination av prefab och allbetong

Husstommen på Kv. Kapellmästaren, Lindesborg, Malmö, utfördes ej av renodlad allbetong ej heller av förtillverkade betongelement, utan i en kombination av de bägge byggmetoderna. Det är tydligt att det i denna nisch man kan finna de mest kostnadseffektiva lösningarna. Invändigt ställdes först prefabricerade skalväggar på plats (typ Precon) på vilka lades plattbärlag.[1] Utvändigt monterades oisolerade väggelement av betong vilka isolerades och bekläddes i efterhand med fasadtegel, figur 1. Mellan skalväggarna på rekordhuset i Malmö göts betong K30. Till bjälklagen användes en betongkvalitet vars hållfasthet medgav montage av nya skalväggar ovanpå bjälklagen redan första måndagen efter gjutning. Bjälklagen göts på fredagar, oberoende av väder och vind. Allt mellan K30 och K70 provades till betongbjälklagen. På projektet provades även självtorkande självkompakterande betong, figur 2.[2] Varvtiden var 1 vecka mellan bjälklagen – en förutsättning för det gynnsamma ekonomiska utfallet. Bygget var vädertåligt. De robusta materialen medgav regn utan att fukt och svartmögel uppstod. Det stod faktiskt vatten på alla bjälklag under en stor del av byggtiden vilket betong bara mår bra av. Väggarna på bygget blev så släta att de kunde direktmålas utan föregående spackling och tapetsering. Även härvidlag sparades mycket pengar jämfört med allbetongsystemet, där väggarna ofta får rappas och filtas för att en tillräckligt jämn yta skall erhållas.

Fukttåligt golvval

Till golv valdes klinker eller parkett, figur 3. Merkostnaden var obetydlig jämfört med limmade plastmattor. Å andra sidan krävdes inga hänsyn till betongens uttorkningstider i och med att parketten skildes från betongen med ett skikt av plastfolie. För att få ett plant golv avjämnades betongen med flytspackel. Från första början avsåg man att prova ett antal olika golvsystem på projektet. Denna plan övergavs dock av etiska skäl. Golvens uttorkning och emissioner från plastmattor limmade på de aktuella betongerna följdes dock i ett parallellt forskningsprojekt inom SBUF. [1] [2] [3] [4] Detta projekt ledde till ett antal rekommendationer vad gällde fukt- och emissionssäkra golvsystem på betong:

- Välj fuktsäker betong med vct = 0.38 (merkostnad ca 0.25% av totala byggkostnaden)
- Torka betongytan minst 1 månad i RF = 60% (inryms normalt i en byggcykel)
- Avjämna betongytan med minst 5 mm lågalkaliska cementbruk (avjämningsmassa)
- Torka det lågalkalisk bruket (avjämningsmassan) ca 1 dygn/mm i RF = 60% (även denna tid ryms normalt inom byggcykeln)
- Limma golvmattan med ett alkalibeständigt lim
- Kontrollera golvmattans egenemissioner (s.k. TVOC bör ej överstiga 0,1 mg/kvm·h) [5 - 7]

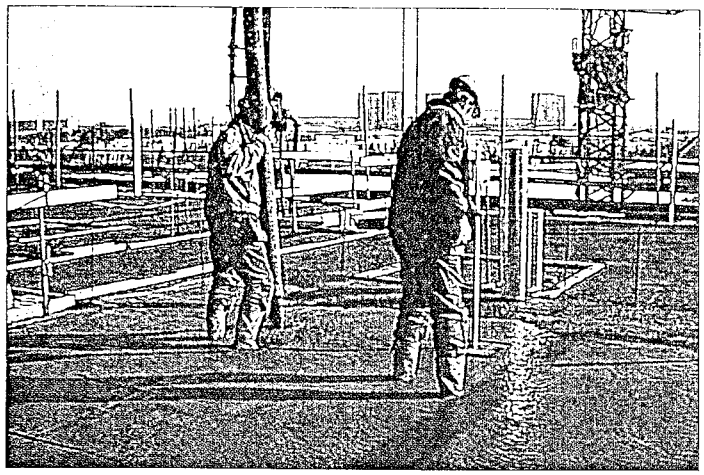
Fuktsäker betong

Fukt och mögel har länge varit betongbranschens gissel. Detta problem har fått sin slutliga lösning i och med att högpresterande betong kom i bruk [8]. Egenskaperna vad gäller uttorkning hos högpresterande betong (byggfuktfri, snabbtorkande eller självtorkande som den även kallas) är välkända hos forskare och betongleverantörer. Däremot är dessa egenskaper helt eller delvis okända för de flesta beställare och konstruktörer. Här har branschen länge försummat sin informationsskyldighet genom att "ligga lågt". Skall fuktsäker betong slå igenom måste en helt annan ackvisition komma till stånd. Fuktsäker betong säljer sig inte själv precis eftersom den är ca 20 öre per liter dyrare än normal betong. Men att använda normal betong med högt vct till t ex en platta på mark borde egentligen ej vara möjligt med hänsyn till de stora risker som finns för fukt och mögel. Det ett samhällintresse att dessa riskkonstruktioner elimineras så snart som möjligt genom att fuktsäker betong kommer i allmänt bruk [9].

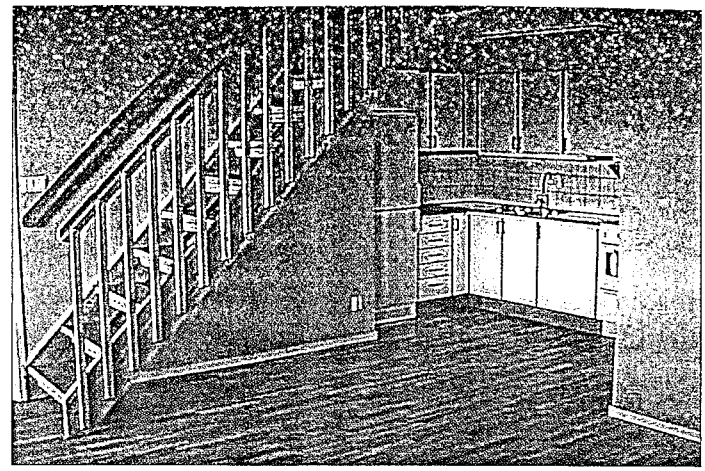
I ett nyligen avslutat examensprojekt vid LTH Byggnadsmaterial studerades bl a byggfuktsäker betong, med vattencementtal, vct = 0.38.[10] En hitintills okänd egenskap observerades då hos den byggfuktsäkra betongen, nämligen en under mycket lång tid fortgående självuttorkning hos betongen, såväl i ytan som mitt i det 300 mm tjocka bjälklaget.[11] Man bör således inte tala om ekvivalent mätdjup eller normenligt mätdjup för en betong med vct = 0.38. Det finns inget sådan mättdjup utan det är ytfukten som måste studeras. Är väl ytan torr på golvsystemet så fortsätter betongen att torka även efter mattlimning.[11] Är däremot ytan på underlaget allför fuktig vid mattlimningen ryms inte limfukten under mattan utan problem kan uppstå. Inget sådant fall uppstod i det nu aktuella SBUF-projektet vid en månads uttorkning. I figur 4 visas s.k. fuktprofiler från golv med täta ytskikt på byggfuktsäker betong med avjämnings-



Figur 1 – Fasaderna till rekordbygget murades med tegel (foto: Per Johansson).



Figur 2 – Ett av bjälklagen göts med självtorkande självkompakterande betong (foto: Per Johansson).



Figur 3 – Till golvmaterial valdes parkett och klinker (Foto: Per Johansson).

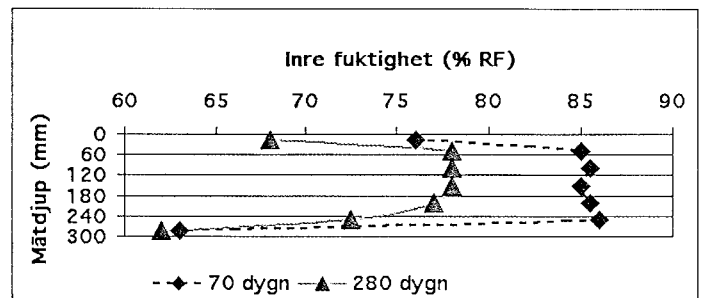
massa. Ytan bara fortsätter att torka, mycket lång tid efter mattlimning, vilket ger golvsystemet en inbyggd fuktsäkerhet. [10] Samhället kan spara mycket stora belopp på att fuktskadeutredningar och saneringar slopas efter en generell övergång till byggfuktsäker betong. Om alla bostadsbjälklag i Sverige gjuts i fuktsäker betong blir merkostnaden ca 40 milj. kr per år. Beräkningen bygger på ett antagande om 800.000 kvm 250 mm tjocka betongbjälklag samt 100.000 kvm platta på mark (100 mm). Om å andra sidan normal betong med högt vct används krävs omfattande fuktmätningar, vilka i sig kostar mycket pengar. Till dessa kostnader kommer, ofta efter ett par år då garantitiden gått ut, fuktskador som ett brev på posten. Med fuktsäker betong krävs nästan inga fuktmätningar alls [12]. Dessutom har inget fuktskadefall konstaterats då fuktsäker betong använts. T ex gäller att en enda fukt- och mögelskadad skola ofta kostar miljonbelopp att sanera. Till dessa problem kommer olägenheter för personal, allergier, etc. till följd av de emissioner som uppstår från fukt- och mögelskadade golv [6].

Sammanfattning och slutsatser

I Malmö uppfördes för två år sedan två bostadshus som blev Sveriges hitintills billigaste, index beaktat. Prislappen hamnade på 8.650:- kr per kvm, totalt sett. Följande slutsatser drogs:

- Byggtekniken och materialvalet var avgörande för det ekonomiskt sett framgångsrika bygget i Malmö
- Stommen utfördes av betong, såväl innerväggar som ytterväggar och bjälklag
- Trots en gedigen konstruktion blev byggtiden kort, ca 1/2 år från gjutstart till inflyttning

Valet av stommaterialet betong gjorde att problem med fukt och svartmögel helt kunde undvikas.



Figur 4 – Fuktprofiler genom golvsystem på betong med vct = 0.38, dels 1, dels 8 mån. efter mattlimning (medelvärde av 8 golvsystem).[10] Självuttorkningen fortsatte efter mattlimning varför man ej kan tala om s.k. ekvivalent eller normenligt mätdjup för fuktsäker betong

Referenser

[1] Bertil Persson. Modern betong och filigranform förutsättningarna för ett rekordbygge i Malmö. Husbyggaren 6/99, 34-43

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

[3]Bertil Persson. Kompatibilitet mellan golvmaterial och betong – Effekt av produktionsmetoder på emissioner, fukt och karbonatisering, Rapport TVBM-7149, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 1999, 133 sid.

[4] Bertil Persson. SBUF-projektet: Samverkan mellan golvsystem och betong, Betong 4/2000, 22

[5]Bertil Persson. Stora emissioner från avjämningsmassor vid kompatibilitetstest. Betong 2/2000, 23

[6]Bertil Persson. Byggfuktfri betong 10 år. Husbyggaren 2/2001.

[7]Bertil Persson. Fukt och emissioner från provgolv till Barnkliniken, Universitetssjukhuset, Lund, Rapport U00.17, Lund, 2000, 13 sid.

[8] Lars-Olof Nilsson. Är högpresterande betong lösningen på fuktproblemen? Byggforskning 1995.

[9]Göran Fagerlund och Bertil Persson. Högpresterande betong utan byggfukt, Cementa 3/90, 18-19.

[10] Petter Flodén-Nilsson. Kvalitetssäkring av fuktmätningar samt uttorkning av betong vid Barnkliniken, Universitetssjukhuset, Lund, Rapport TVBM-7047, Lund, 2000, 53 sid.

[11] Bertil Persson, Problem vid mattläggning på högpresterande betong – inverkan av ytans fukttillstånd, Betong. 96/4, 21-23, 45.

[12]Bertil Persson. Betong anpassad för ett effektivt byggande, Bygg & Teknik 7/96, 27-31.

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

Tillverkning och vissa egenskaper hos självkompakterande betong

Artikeln omfattar en genomgång av resultat från två examensarbeten vad gäller partikelfördelning och vissa egenskaper hos självkompakterande betong. En jämförelse görs med pågående försök med normal betong. Reologiska studier genomfördes vid Scancem Research AB, Slite, optimering med hänsyn till hållfasthetstillväxt vid LTH Byggnadsmaterial, Lund samt fullskaleförsök vid Skanska Prefab AB, Hjärup.

Arbetet visar en mycket stor inverkan av partikelfördelningen på gjutbarheten hos betongen. Bestämda relationer erhölls vad gäller mängden finpartiklar i den självkompakterande betongen; cement + filler (< 0,125 mm). En med hänsyn till gjutbarheten optimerad självkompakterande betong uppvisade en långsam hållfasthetstillväxt jämfört med normal betong. Vid konstant vattencementtal,vct, erhölls dock cirka 15–20 MPa högre 28-dygnshållfasthet för självkompakterande betong än för normal betong. Arbetet utfördes 1999.






*Artikelförfattare är **Bertil Persson**, LTH Byggnadsmaterial, Lund, **Christer Dieden**, Skanska Prefab AB, Staffanstorp, **Lars-Göran Sjökvist**, LTH Byggnadsfysik, Lund, och **Rickard Andersson**, NCC Hus AB, Malmö.*

Självkompakterande betong kom i bruk i Japan för cirka tio år sedan. År 1998 var cirka 0,1 procent av all platsgjuten i Japan självkompakterande med en klar tendens till en minskning av användningen där [1]. Omräknat till svenska mått innebär den japanska tillämpningen cirka 2 000 m³ självkompakterande betong i Sverige. Det klart största enskilda objektet i Japan utgör ett av fundamenten till Akashi-Kaikyo bron där dock betongytan (av beständighetsskäl) utfördes i polymerimpregnerad förtillverkad betong [2]. Andelen självkompakterande förtillverkad betong i Japan är cirka 0,5 procent med en tendens till ökad användning. Användning av självkompakterande betong innebär givetvis fördelar vad beträffar arbetsmiljön men även för omgivningen [3]. Traditionell tillverkning av normal betong innebär hög ljudnivå, speciellt i prefabindustrin.

Risken för arbetsskador till följd av de vibrationer som uppstår i samband med kompaktering av betong har dock numera minimerats genom att en modern vibrostav har försetts med en gummiled. Från handtaget i vibrostaven leddes tidigare vibrationer in i handen och armen på byggnadsarbetaren, vilket ledde till arbetsskador. Betongformen och armeringen kan dock komma i svängning vid användning av vibrostav, varvid ett genomträngande, dovt buller alstras. Detta buller kan verka störande inte minst då betongproduktionen sker i befintlig bostads-, industri- eller kontorsbebyggelse. Till självkompakterande betong används det främst ett så kallad tredje generationens flytmedel, till exempel polykarboxylateter, (cirka en procent av cementmängden) [4]. För att betongen inte ska separera då den gjuts (dvs stenmaterialet falla till botten av formen) krävs det vidare endera tillsats av ett så kallat viskositetshöjande medel eller av filler [5]. Viskositetshöjande medel används sedan länge vid undervattensgjutningar samt till självkompakterande betong i tunnlar [6]. Endast cirka 1 kg/m³ betong erfordras av det så kallat viskositetshöjande medlet. Ett viskositetshöjande medel är emellertid mycket dyrt varför det är mer ekonomiskt att använda olika typer av filler. Fillermängden varierar normalt mellan 50 och 250 kg/m³ [7]. Följande typer av filler användes med framgång för att undvika separation i en självkompakterande betong:

- Flygaska,
- Glasfiller,
- Kalkstensfiller,
- Kvartsitiskt filler (finsand),
- Silikastoft.

Reologiska studier

Betonger med vct = 0,40, 0,45 och 0,80, studerades. Studierna av den självkompakterande betongen utfördes med en BML-viskosimeter på ett begränsat antal delmaterial:

- Flytmedel av typ polykarboxylateter (Glenium 51),
- Slite Standard cement,
- Kvartsitiskt filler (finsand från Baskarp respektive Hassle-Bösarp),
- Kalkstensfiller (Köping 500)
- Naturgrus 0–2, 0–4 respektive 0–8 mm,
- Makadam 1–2, 2–4, 4–8, 8–11 respektive 11–16 mm.

Inledningsvis användes en partikelfördelning som gäller för en normal betong [8], vilket gav upphov till stor separation av makadam. Det visade sig att det krävdes cirka 550 kg (cement + filler) per m³ betong för att undvika separation och samtidigt erhålla en självkompakterande betong utan inre friktion [9]. Motsvarande flytsättmått uppgick till 500 mm på fem sekunder med 700 mm som ett maximum [10]. Blockeringsrisken för grov ballast kontrollerades med så kallad L-låda.

Hållfasthetstillväxt

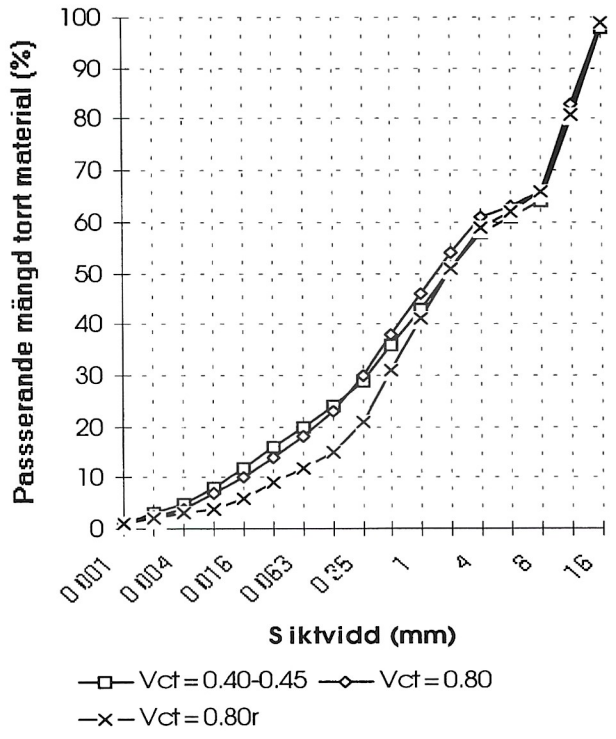
Med ledning av de reologiska studierna utfördes optimeringen av den självkompakterande betongen med hänsyn till hållfasthetstillväxt med följande delmaterial [9, 10]:

- Flytmedel, cement och filler enligt ovan,

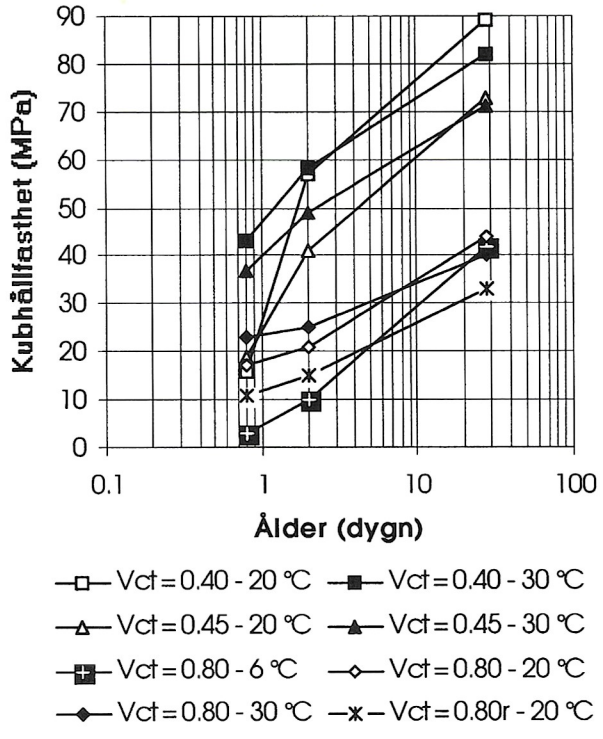
Tabell 1. Recept för studerade betonger (kg/m³ torrt material).

Vct	0,39f	0,40	0,45	0,80	0,80r
Flytmedel polykarboxylateter (Glenium 51)	2,2	2,8	1,5	1,0	–
Portlandcement (Slite Standard)	420	420	420	245	244
Kalkstensfiller (Köping 500)	106	106	106	245	–
Naturgrus 0–8 mm	840	840	840	930	1 130
Makadam 8–11 mm	420	420	420	460	244
Makadam 11–16 mm	420	420	420	280	480

f = fältförsök; r = referens (normalkompakterande betong)



Figur 1. Partikelfördelning för de studerade betongerna [9, 10]. r = referens (normalkompakterande betong)



Figur 2. Hållfasthetstillväxt för de studerade betongerna [9, 10]. r = referens (normalkompakterande betong)

❍ Naturgrus 0–8 mm,
❍ Makadam 8–11 respektive 11–16 mm.

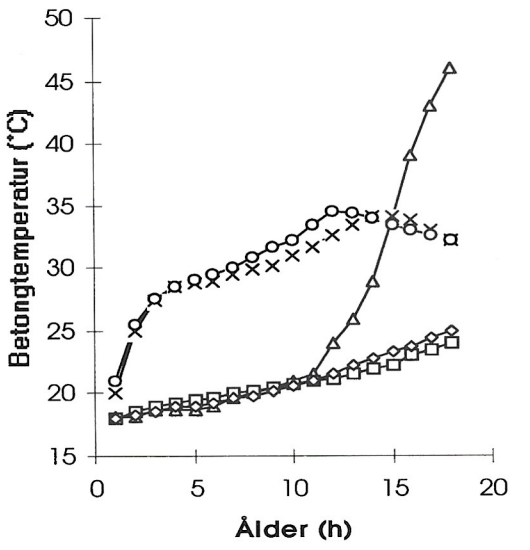
Betong med cirka 550 kg (cement + filler) per m³ betong studerades. Recept ges i *tabell 1*, respektive partikelfördelningen för de aktuella betongerna i *figur 1* [9, 10]. Betongerna erhöll flytsättmåttet 500 mm på fem sekunder samt cirka 700 mm som slutflytsättmått. Efter en timme var flytsättmåttet större än 600 mm. Blockeringsrisken för grov ballast kontrollerades med så kallad L-låda. Optimeringen utfördes vid 6, 20 respektive 30 °C. Det aktuella flytmedlet gav upphov till en påtagligt förlängd öppethållandetid (vilket i sig var syftet med flytmedlet, dvs att förhindra en alltför tidig hydratation [11]). Det var ej möjligt att minska doseringen av flytmedel och samtidigt upprätthålla kraven på god gjutbarhet utan vibrering. Effekten av den längre öppethållandetiden minskades då härdningen skedde vid högre temperatur [9, 10].

Vid vct = 0,40 krävdes cirka 30 °C för att nå halva 28-dygns hållfastheten inom 16 timmar från gjutning respektive vid vct = 0,80, minst 20 °C för att nå halva 28-dygns hållfastheten inom två dygn från gjutning. Vid 6 °C försenades starten för hydratationen med cirka ett dygn, vilket gör att betongen ej kan användas utomhus vid kall väderlek (regn till exempel skulle skada ytan; betongen blir ej gåbar dagen efter gjutning). I *figur 2* sammanfattas hållfasthetstillväxten för betongerna [9, 10] samt i *figur 3* aktuell temperaturutveckling [9, 10]. Den förlängda öppethållandetiden var ett påtagligt problem vad gällde ytbehandling av den färska betongytan. Denna ytbehandling bör kunna ske inom samma arbetsskift som gjutningen. Vid 28 dygns ålder erhöll den självkompakterande betongen (vid konstant vct) cirka 15–20 MPa högre tryckhållfasthet än den normala betongen. Följande hållfasthetstillväxt erhölls för de aktuella betongerna den första månaden:

$$f_{cc20} = (27 - 24 \cdot vct) \cdot \ln(t) - 30 \cdot vct + 41 \quad (1)$$

$$f_{cc30} = (16 - 13 \cdot vct) \cdot \ln(t) - 57 \cdot vct + 69 \quad (2)$$

där;
f_{cc20} betecknar tryckhållfastheten vid 20 °C
t betecknar ålder (dygn)



Figur 3. Temperaturutveckling för de studerade betongerna [9].

Krympning och krypning

Sex betongcylindrar med diametern 100 mm samt längden 500 mm tillverkades av betongen med vct = 0,80, se tabell 1 [10]. Krympningen studerades under cirka ett halvt år i förseglad miljö samt i en omgivningsfukt av RF = 60 procent, i bägge fallen vid 20 °C. Den uppmätta uttorkningskrympningen var cirka 0,1 promille mindre än den som ges av Betonghandbok Material för motsvarande provkroppsdimension [10, 12]:

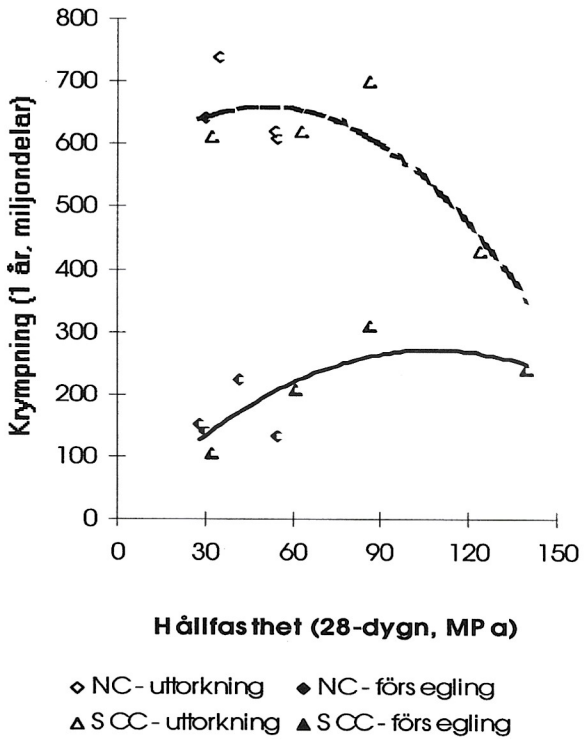
$$\varepsilon_{cs} = 0{,}72 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{(t-1)}{(t-60)}} \quad (3)$$

där;
ε_{cs} betecknar uttorkningskrympningen hos betong med vct = 0,80 (promille)
t betecknar tid efter avformning (dygn).

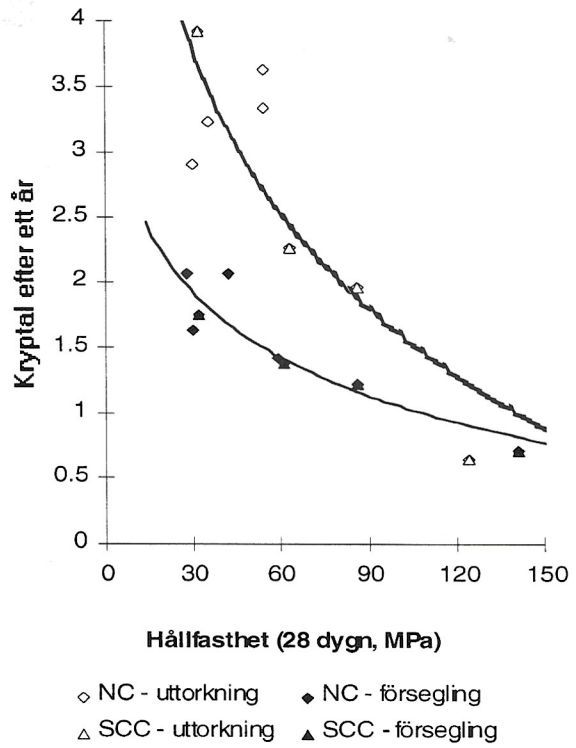
För förseglade provkroppar erhölls:

$$\varepsilon_B = 0{,}01 \cdot [\ln(t) + 1] \quad (4)$$

där;
ε_B betecknar den förseglade



Figur 4. Krympning efter ett år som funktion av 28-dygnshållfastheten [13].



Figur 5. Kryptal efter ett år som funktion av 28-dygnshållfastheten [13].

krympningen hos betong med vct = 0,80 (promille)

t betecknar tid efter avformning (dygn).

Krympningen studerades även för provkroppar med samma dimension som ovan, dels för normalkompakterande betongen, NC, dels för självkompakterande, SCC. De självkompakterande betongerna vid denna studie innehöll kvartsitiskt filler [13]. I *figur 4* ges krympningen efter ett år. Följande samband erhölls för ettårskrympningen:

$$\varepsilon_B = 4{,}9 \cdot f_{cc} \cdot (1 - 0{,}0047 \cdot f_{cc}) \quad (5)$$

$$\varepsilon_D = 4{,}1 \cdot f_{cc} - 0{,}040 \cdot f_{cc}^2 - 560 \quad (6)$$

där;

f_{cc} betecknar 28-dygnshållfastheten ($25 < f_c < 140$ MPa)

ε_B betecknar förseglad krympning (miljondelar)

ε_D betecknar uttorkningskrympningen (miljondelar).

E-modulen, E_I studerades för 88 stycken provkroppar, varvid följande samband erhölls (GPa):

$$E_{NC} = E_{SCC} = 3{,}75 \cdot \sqrt{f_{cc}} \quad (7)$$

Självkompakterande och normal betong med kvartsitiskt filler erhöll följande kryptal efter ett år [13], *figur 5*:

$$\varphi_B = 0{,}72 \cdot [6{,}1 - \ln(f_{cc})] \quad (8)$$

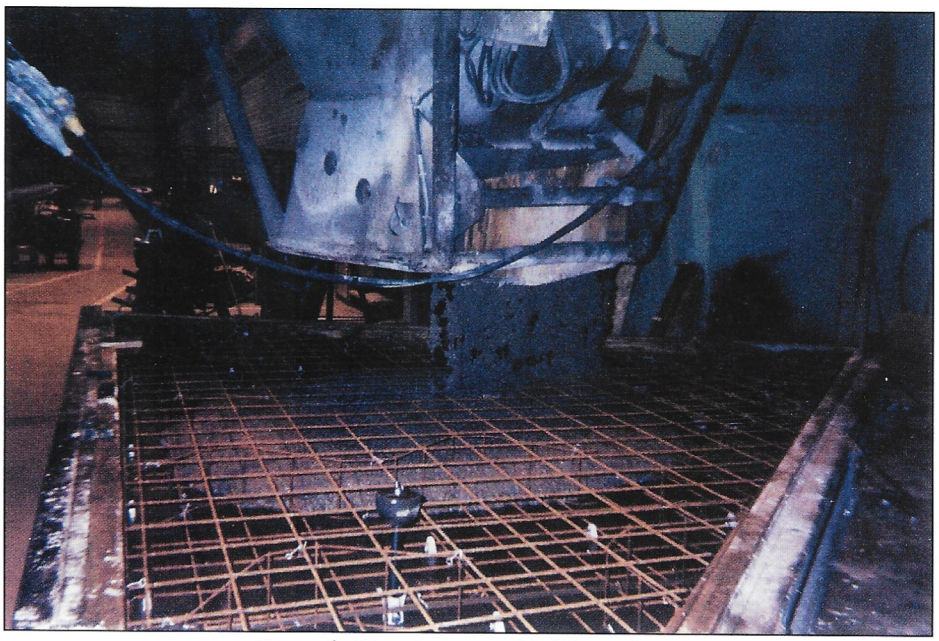
$$\varphi_D = 1{,}8 \cdot [(5{,}5 - \ln(f_{cc})] \quad (9)$$

där;

f_{cc} betecknar 28-dygnshållfastheten ($25 < f_c < 140$ MPa)

φ_B betecknar kryptalet efter ett år (försegling)

φ_D betecknar kryptalet efter ett år (uttorkning).



Figur 6. Gjutning av en bjälklagsplatta.

Fältförsök

Självkompakterande betong med vct = 0,39 användes i fullskalig produktion av några betongelement, se tabell 1 (beteckning: 0,39r). [9]. I stort sett samma betongsammansättning användes som vid ett av laboratorieförsöken. Mängden flytmedel kunde dock minskas med cirka 25 procent på grund av den så kallade uppskalningseffekten. Blandningstiden för självkompakterande betong fördubblades jämfört med normal betong, från cirka 1½ min till cirka 3 min, vilket givetvis minskade blandarkapaciteten då självkompakterande betong användes i stället för normal betong. *Figur 6* visar gjutning av en bjälklagsplatta och *figur 7* en färdiggjuten platta respektive *figur 8* avformade pelare utförda i självkompakterande betong. De aktuella betongelementen i självkompakterande betong levererades till forskningsbyn Ideon, Lund, inom ramen för ordinarie produktion. Betongplattans yta var dock ej helt självnivellerande utan den sista centimetern fick avjämnas mekaniskt med en sloda, figur 7.

Artikeln fortsätter och avslutas i nästa nummer av Bygg & teknik, som kommer ut vecka 47.

Tillverkning och vissa egenskaper hos självkompakterande betong, fortsättning

***Bertil Persson et al* fortsätter här artikeln från Bygg & teknik 7/99, som redovisar resultaten från två examensarbeten vad gäller partikelfördelning och vissa egenskaper hos självkompakterande betong.**

Figur 8 visar pelare vilka fick efterlagas på grund av ytporer (instängd luft). Detta problem kan dock lösas genom att formen fylls underifrån. Av tidsskäl blev det ej möjligt att genomföra fältförsök med vct = 0,80-betongen. Andra försök tyder dock på att en 60 procentig produktivitetsökning är möjlig [3] till priset av en avsevärd ökning av materialkostnaden för den självkompakterande betongen.

Ekonomi och arbetsmiljö

Utländska tillämpningar av självkompakterande betong till förtillverkade element tyder på att materialkostnaden ökade med cirka 15 procent jämfört med användning av normal betong [14]. Materialmerkostnaden för självkompakterande betong med vct = 0,39 i fältförsöken ovan uppgick till 150 kronor/m³ eller cirka 20 procent jämfört med motsvarande normala betonger [9]. Till denna kostnad kommer kostnaden för en extra silo för kalkstensfiller samt eventuellt kostnaden för en extra blandare med hänsyn till att blandningstiden ökar, från cirka 1½ min för normal betong till cirka 3 min för självkompakterande. Självkompakterande betong är vidare mer känslig för felblandning än normal betong varför det föreligger en påtaglig risk för ökad kassation. *Tabell 2* visar att gjutmomentet endast utgjorde cirka fem procent av totala tidsåtgången i samband med fältförsöken ovan [9]. Andra fördelar än en minskad arbetsåtgång i samband med gjutningen får således motivera en användning av självkompakterande betong vid förtillverkning av element till exempel [9]:

- ett minskat armeringsarbete till exempel ett minskat antal armeringsklotsar och minskad najning,
- en lägre ljudnivå i fabriken,
- en säkrare arbetsmiljö med pumpning av betong istället för basktransport,
- en automatiserad gjutning.

I *tabell 3* ges de direkta materialkostnaderna för självkompakterande betong med vct = 0,80 respektive för en normal betong med samma vct (beteckning: 0,80r). Den direkta merkostnaden för material blev cirka 30 procent. Merkostnader för förlängd blandningstid, eventuell ny silo för kalkstenfiller, ökad tillverkningskontroll, etc tillkommer. Tillämpningar i Sverige vad gäller platsgjuten självkompakterande betong tyder dock på att en viss minskning av totalkostnaderna är möjlig [15, 16]. Som framgår ovan gav de självkompakterande betongerna betydligt högre hållfasthet än normala betonger med motsvarande vct. Det finns därför en möjlighet att ersätta en del av cementet i den självkompakterande betongen med restmaterial, så kallad grön betong [17], och på så sätt göra den självkompakterande betongen mer ekonomisk.

Tabell 2. Tidsåtgång i samband med produktion av förtillverkade element (fältförsök) [9].

Arbete	Andel tid (%)
Rengöring av form	20
Preparering av form	5
Armering	30
Gjutning	5
Ytbehandling	20
Härdning	1
Efterbearbetning	19
Totalt	*100*

Tabell 3. Direkta materialkostnader för självkompakterande betong och normal betong med vct = 0,80 [10].

Vct	0,80	0,80r
Flytmedel polykarboxylateter (Glenium 51)	48	0
Portlandcement (Slite Standard)	153	153
Kalkstensfiller (Köping 500)	55	0
Naturgrus 0–8 mm	74	96
Makadam 8–16 mm	59	54
Summa	*390*	*304*

r = referens (normalkompakterande betong)

Slutsatser

Efter omfattande laboratoriestudier blev det möjligt att bestämma en så kallad ideal partikelfördelning med hänsyn till gjutbarhet för självkompakterande betonger. Betong med vct = 0,40, 0,45 och 0,80 studerandes. En jämförelse gjordes med ett pågående krypförsök. Laboratorieresultaten bekräftades med fältförsök med förtillverkade element (betong med vct = 0,39). Följande slutsatser drogs:

- Ungefär en ¼-del av mängden torrt material i den färska självkompakterande betongen ska ha en gradering av högst 0,125 mm (cement + filler) dvs cirka 550 kg/m³.
- Vid konstant vct erhöll den självkompakterande betongen cirka 15 à 20 MPa högre 28-dygnshållfasthet än den normalkompakterande betongen.
- Vid vct = 0,40 krävdes 30 °C för att nå halva 28-dygnshållfastheten inom 16 timmar från gjutning respektive vid vct = 0,80, cirka 20 °C för att nå halva 28-dygnshållfastheten inom två dygn.



Figur 7. Färdiggjuten betongplatta.



Figur 8. Avformade pelare vilka fick efterlagas på grund av ytporer (instängd luft).

❑ Vid 6 °C försenades starten för hydratation cirka ett dygn, vilket gör att självkompakterande betong praktiskt taget ej kan användas utomhus vid kall väderlek.
❑ Vid konstant 28-dygnshållfasthet var krympningen av samma storleksordning hos självkompakterande betong och normalkompakterande betong. E-modulen var lika stor i förhållande till tryckhållande till tryckhållfastheten, i normal som i självkompakterande betong.
❑ Vid konstant 28-dygnshållfasthet var krypningen av samma storleksordning hos självkompakterande betong och normalkompakterande betong förutsatt att kvartsitiskt filler användes (data saknas för närvarande för krypning hos betong med kalkstensfiller).
❑ Materialmerkostnaden för självkompakterande betong varierade mellan 20 och 30 procent jämfört med normal betong. ■

Referenser

[1] *Masahiro Ouchi*. Självkompakterande betong – utveckling, tillämpningar och försök. Sjuttonde nordiska betongforskningsmötet. Reykjavik. Norsk Betongförening. 1999, 29–34.

[2] *Bertil Persson*. Brosystemet mellan Honshu och Shikoku: Japanska rekordbroar. Bygg & teknik 2/99, 56–60.

[3] *Bertil Persson*. Självkompakterande husbyggnadsbetong i Okayama, Japan – och i Malmö. Husbyggaren 2/99, 6–13.

[4] *Ei-ichi Tazawa*. Personlig information. Hiroshima Universitetet. Hiroshima. 1998.

[5] *Kenji Sakata*. Personlig information. Okayama Universitetet. Okayama. 1998.

[6] *Bertil Persson*. Tunnel genom vattenförande sediment utan föregående injektering. Bygg & teknik 1/99, 28–29.

[7] *Bertil Persson*. Japanska försök avseende hållfasthet och E-modul i väggar av vibreringsfri betong." Betong 2/99, 16–17.

[8] *Bertil Persson*. Ideal partikelfördelning i högpresterande betong." Betong 95/3. 1995. Stockholm, 6–8, 39.

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

[10] *Christer Dieden*. Självkompakterande husbyggnadsbetong – sammansättning, hållfasthet och krympning. Rapport TVBM-5040. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 50 sidor.

[11] *Bertil Persson*. Krympning och krypning hos självkompakterande betong. Sjuttonde nordiska betongforskningsmötet. Reykjavik. Norsk Betongförening. 1999, 55–57.

[12] Betonghandbok Material. AB Svensk Byggtjänst. Solna. 1994.

[13] *Bertil Persson*. Krypning, krympning och elasticitetsmodul för självkompakterande betong. Bidrag till det första internationella RILEM-symposiet beträffande självkompakterande betong. Stockholm. 1999, 239–250.

[14] *Klaus Juvas*. Självkompakterande betong. Sjuttonde nordiska betongforskningsmötet. Reykjavik. Norsk Betongförening. 1999, 69–70.

[15] *Peter Billberg, Örjan Petersson och Thomas Österberg*. Gjutning av tre broar med självkompakterande betong. Sjuttonde nordiska betongforskningsmötet. Reykjavik. Norsk Betongförening. 1999, 91–93.

[16] *Lars Söderlind*. Fullskaleförsök med husbyggnadsbetong. Bidrag till det första internationella RILEM-symposiet beträffande självkompakterande betong. Stockholm. 1999, 723–731.

[17] *Christian Munch-Petersen*. Resursnåla betongkonstruktioner. Sjuttonde nordiska betongforskningsmötet. Reykjavik. Norsk Betongförening. 1999, 395– 399.

ISOLOCK®
Gör 2-glasfönster till effektiva 3-glasfönster
www.isolock.nu
0930-31655

litteraturnytt

”Det sunda kontoret”

Statistiken är bedrövande. Mer än varannan av våra barn och ungdomar har någon form av allergiska besvär. Ökningen är näst intill explosionsartad. Sedan 1975 har antalet som drabbats av eksem, astma och hösnuva fördubblats. Samhällets kostnader beräknas idag uppgå till drygt fem och en halv miljard kronor per år. Vetenskapen kan ännu inte förklara varför vi får allergier eller varför de ökat.

Men vi vet att vi och de allergiska besvären kraftigt påverkas av vår inomhusmiljö. I genomsnitt tillbringar vi ju 90 procent av vår tid inomhus. Och väldigt lite görs för att anpassa arbetsplatser eller bostäder till allergikernas krav. Men nu finns, åtminstone ett, positivt föredöme.



”Det sunda kontoret”

Det är Vårdalstiftelsen (Stiftelsen för vård- och allergiforskning) som visar att det går att bygga *Det sunda kontoret*. Det är en satsning som innebär att all känd kunskap om hur en inomhusmiljö bör skapas kommer till praktiskt genomförande. Resultatet är dessutom vackert, trivsamt, ekonomiskt fördelaktigt och funktionellt.

Det sunda kontoret är nu dokumenterat och beskrivet i en bok från Svensk Byggtjänst förlag. Den beskriver genom intervjuer och fotografier hur tankegångarna vuxit fram och förverkligats i Centralbadets hus på Drottninggatan/Holländargatan i Stockholm. Eldsjälen *Ewa Ställdal* som är v d för Vårdalstiftelsen redogör för idéerna bakom projektet och hur det vuxit fram. Läkaren *Magnus Wikman*, en av Sveriges främste forskare inom området berättar om allergins gåta. Det sunda kontorets arkitekt *Magnus Eriksson*, byggmästaren *Nils Malmkvist* från Folke Ericsson Bygg AB, konstnären *Bo Ahlén*, fastighetsförvaltaren *Sven-Arne Jansson* från Drott och städledaren *Johan Granqvist* kommer till tals och berättar om sina erfarenheter och lärdomar av det unika projektet. Arkitekturfotografen *Camilla Wirseen* har dokumenterat kontoret. *Ingemar Samuelson* från SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut är den som stått för projektledning, kontroll och val av vilka vetenskapliga kriterier som ska gälla för miljön. SP följer också upp Det sunda kontoret årligen för att kontrollera att det verkligen förblir sunt. För genom brister i till exempel städning, ventilation eller materialval kan det sundaste kontoret snabbt bli osunt. Den minutiösa uppföljningen av projektering, byggande och förvaltning av Det sunda kontoret har resulterat i att SP utfärdat det hittills enda ”P-märket” för Vårdalstiftelsens kontor.

Boken riktar sig kanske främst till dem som arbetar med innemiljöfrågor samt utformning och inredning av arbetsplatser. Men den kommer nog också att med behållning läsas av många av de (enligt statistiken) drygt 500 000 svenskar som upplever att de har besvär av en dålig innemiljö.

”Det sunda kontoret”, som kostar 285 kronor plus moms, är författad av *Sture Nilsson* och fotograferad av *Camilla Wirseen* och kan beställas från Svensk Byggtjänst förlag, 08-457 11 00 eller www.byggbokhandeln.com.

”Bygga rätt för städning och fönsterputs”

På uppdrag av Fastighetsbranschens utvecklings- och arbetsmiljökommitté gav *Gudrun Linn* 1997 ut en mycket omfattande handbok om ”*Fastigheten som arbetsmiljö*”.

Nu kommer Gudrun Linn ut med ett omredigerat utdrag från denna tidigare bok. Men nu fokuserar hon på frågor som rör städning och fönsterputs. Bra städning börjar på ritbordet, heter det. Denna bok går grundligt igenom alla de lättglömda detaljer, stora och små, som måste beaktas när man projekterar och bygger. Missar i detta skede resulterar i både högre driftskostnader och sämre miljö för hyresgäster och personal.

De riktlinjer som redovisas är strukturerade så att de passar den som ska projektera ett hus; Det börjar med riktlinjer för markanläggningar, gångväg, entré och tomtplanering och fortsätter med husstomme, pelarstommar, balkstommar och så vidare.

Boken, som bland annat vänder sig projektörer och byggherrar och kostar 220 kronor plus moms, kan beställas från Svensk Byggtjänst förlag, 08-457 11 00.

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

Tioårsjubileum för snabb/självtorkande betong

Bertil Persson
LTH Byggnadsmaterial

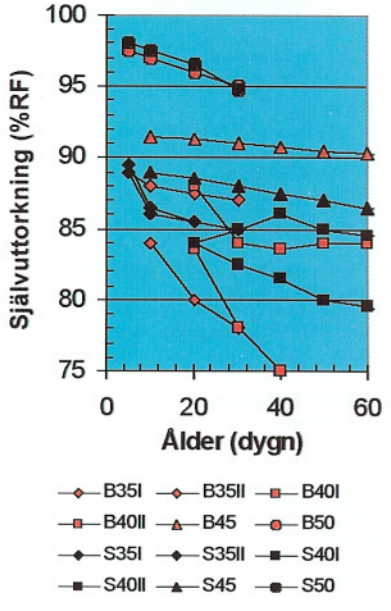
Något försenat hölls 10-årsjubileet för snabb/självtorkande betong i Lund i juni,2002. Seminariet innehöll 18 föredrag vilka finns samlade i en volym på 250 sid. [1]. Seminariet utgjorde en uppföljning på likartade seminarier, 1997 och 1999 [2,3]. Ordföranden 2002 var professorerna Fagerlund, Lund, Sellevold, Trondheim, Scrivener, Lausanne och van Breugel, Delft. En författareförteckning finns som Appendix.

Mekanismer

Erika Holt, Helsingfors [1, 1-25] och Tor-Arne Hammer, Trondheim [1, 27-38] redogjorde för de mekanismer som styr självuttorkning. En viktig effekt av självuttorkning är autogen krympning. Definitioner gavs på plastisk krympning och autogen dvs. före och efter cementets bindetid.

François Beltzung, Zürich, undersökte 9 europeiska cement med avseende på självuttorkning [1, 113-125]. Cementtypen och främst dess innehåll av C_3A var av avgörande betydelse för självuttorkningen. Även klinkermineralet C_4AF hade viss inverkan men bara en tiondel så stor som inverkan var av C_3A. Resultaten baserades på indirekta mätningar av autogen krympning och överensstämde väl med tidigare rön [4]. Omfattningen av Beltzungs undersökning var mycket större än för tidigare försök.

Anders Anderberg presenterade självuttorkning hos svenska cement, Byggcement och Slite Std, vid varierande vattencementtal, vct, ett mycket diskuterat ämne [1, 103-112], figur 1. Genomsnittligt gav Byggcement något bättre självuttorkning än Slite Std trots att Byggcement innehåller ca 10% mindre C_3A än vad cementet Slite Std gör. Resultaten enligt Anderberg går således i motsatt riktning mot [1, 113-125] och [4] vilket kan bero på att en reaktion äger rum mellan C_3A och kalkmjöl i Byggcement. I annat fall skulle Slite Std cement självuttorka bättre än Byggcement eftersom innehållet av C_3A är större i än Slite Std cement än i Byggcement [1, 113-125] och [4], figur 1.



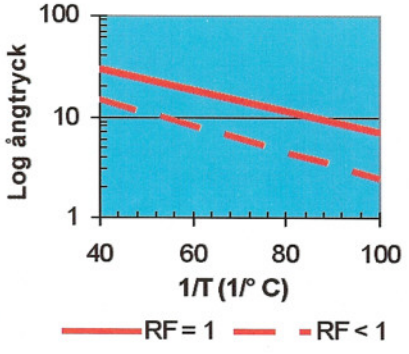
Figur 1 – Självuttorkning hos Byggcement (B) och Slite Std cement (S) [1, 103-112]. Beteckning: 40 = vct (%).

Temperaturberoende

Erik Sellevold visade att utvidgningskoefficienten beror mycket av temperaturen, från ca $12 \cdot 10^{-5}$/°C till $22 \cdot 10^{-5}$/°C [1, 67-76]. Vid högre temperatur rör sig betongen mycket mer med temperaturen än vid lägre enligt Sellevold. Variationen i utvidgningskoefficient med temperaturen beror enligt Sellevold på olika porvattentryck vid olika temperatur, figur 2.

Ryochi Sato visade liknade resultat genom försök på betong utförda nära 0°C [1, 51-65]. Hydratation och därmed självuttorkning anses inte inträffa nära fryspunkten. Författaren visade inverkan av temperatur på relativ fuktighet, RF, i betong [1, 175-195]. För betong med ett lågt vct var inverkan av temperatur på RF mycket större än vid högre vct, ca 4 ggr större vid vct = 0.35 (högpresterande betong) än vid vct = 0.70 (normal betong), figur 3. Detta är en i praktiken ofta förbisedd effekt. I praktiken innebär temperatureffekten att olägenheter med autogen krympning kan elimineras automatiskt eftersom betong gjuten i större dimensioner oftast får en högre temperatur än om den gjuts i laboratorium. Efter härdning vid hög temperatur tilltar hållfastheten så mycket hos betongen att den autogena krympningen knappt blir mätbar, inte ens efter avsvalning. Mäts däremot autogen krympning hos betong vid låg temperatur kan stor autogen krympning noteras hos högpresterande betong, tabell 1 [1, 175-195]. Exemplet visar betydelsen av att utföra fältförsök för att bekräfta resultat i laboratorium. I den brutala verkligheten är oftast effekten av autogen krympning liten. Temperaturberoendet kan sammanfattas med följande formel:

$$\delta RH/\delta T = 0.6\ (1 - vct) \quad (1)$$



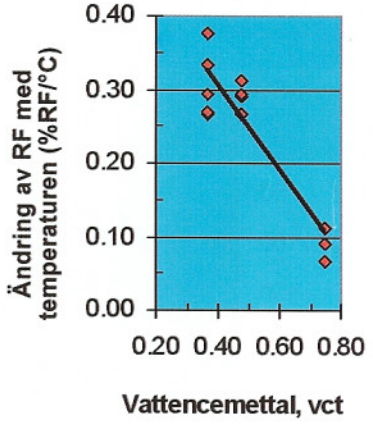
Figur 2 – Ångtryck som funktion av inversen av temperatur, [1, 67-76].

Frostbeständighet och kloridinträngning

I och med att en tillräckligt stor självuttorkning äger rum i betong minskar mängden frysbart vatten under en för saltfrostskador kritisk nivå. Vid LTH Byggnadsmaterial provas för närvarande en schweizisk silikastoftbetong med vct = 0.35 där praktiskt tagen ingen saltfrostavskalning har noterats ens efter 250 cykler trots att betongen inte innehåller någon luftporbildare (endast 1% färsk lufthalt) [5]. Med självuttorkning skapas dessutom ca 2.5 % lufthalt vilken tillsammans med den naturliga luften gör att luftinnehållet i betongen blir tillräckligt för att den skall erhålla en god saltfrostbeständighet.

Hama visade vid seminariet att även inre frostbeständigheten är god hos betong med lågt vct och utan luftporbildare, [1, 139-160], figur 4, troligen till följd av inre självuttorkning. Eftersom klorider inte kan vandra i luft (åtminstone inte om det inte blåser i den vilket inte är fallet i en god betong) kan heller inte klorider transporteras i självuttorkad betong. Fortfarande har dock cementhalten betydelse för kloridinträngningen

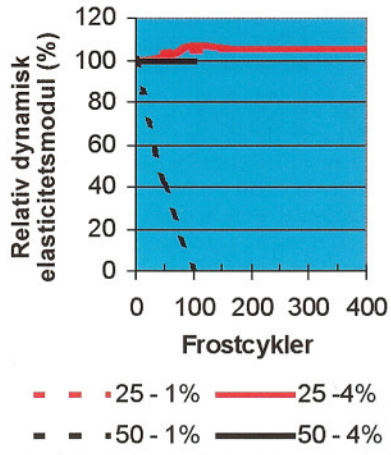
Forts sid 26



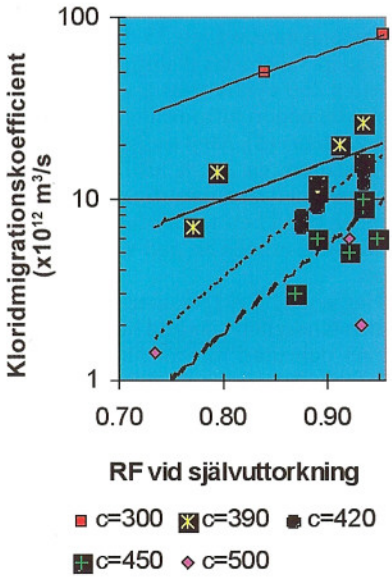
Figur 3 – Inverkan av temperatur på RF vid olika vct [1, 175-195].

Tabell 1 – Inverkan av temperaur på RF vid olika typer av studier [1, 175-195].

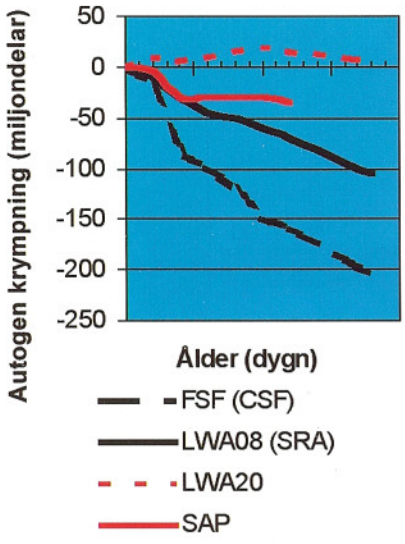
Inverkan	Lab	Plats	Prefab
Temperatur (max, °C)	25	40	55
Temperatur, långtid (°C)	20	10	15
Skillnad (°C)	-5	-30	-40
Inverkan på RF (%)	-1.5	-9	-12
Slutligt RF (%)	75	75	75
Effekt på RF (%)	20	11	8



Figur 4 – Relativ dynamisk elasticitetsmodul vid provning av inre frostbeständigheten [1, 139-160].



Figur 5 – Kloridmigration som funktion av RF vid självuttorkning vid olika cementhalt, c (kg/m³) [1, 175-195].



Figur 6 – Autogen krympning med olika betongsammansättningar (vattenbindemedelstal, vbt = 0.35; 8% silikastoft) [1, 195-205]. CSF = betong med grovt silikastoft. FSF = betong med fint silikastoft. LWA08 = betong med 8 % lättballast. LWA20 = betong med 20 % lättballast. SAP = superabsorberande polymer. SRA = krympningsreducerande medel.

även vid konstant vct = 0.39, troligen eftersom cementgelen binder klorider, figur 5 [1, 175-195]. Cementhalten är fortfarande viktig för beständigheten – detta visades inte minst vid Ölandsbron där en cementsnål betong erhöll för låg beständighet. En annan fråga är hur länge självuttorkningen består i ett ytskikt av betongen. När väl betongen mättats på vatten i tillräcklig mån kan sönderfrysning ske samt klorider vandra in.

Inre härdning

I samband med 10-årsjubileet presenterades ett antal sätt att bemästra självuttorkning och därmed autogen krympning, Konstantin Kovler [1, 161-174] resp. Mette Geiker [1, 195-205]. Endera kan krympningsreducerande medel nyttjas eller kan inre härdning med fuktmättad lättballast ske, figur 6. Bäst resultat dvs minst autogen krympning erhölls med fuktmättad lättballast. Det finns emellertid problem med att använda inre härdning:

- Yttre krympningen kan bli desto större om man tillför mycket vatten i lättklinker
- Brandbeständigheten kan också äventyras till följd av att ångsprängning sker tidigare då en kritisk temperatur överskrids hos en vattenhärdad betong än hos en lufthärdad

Detta och flera frågor skall studeras i en RILEM-grupp som startades vid seminariet [6]. Om inre härdning används blir givetvis också RF högre i betongen vilket kan påverka golvmaterial på betongen.

Sammanfattning

Seminariet om snabb/självtorkande betong visade att påverkan sker av egenskaper inom områden där man minst kunde ana det. Exempel på detta är temperaturutvidgning, frost och kloridinträngning. Den främsta negativa effekten av självuttorkning, autogen krympning, förefaller dock kunna bemästras med inre härdning eller med krympningshämmande medel i betongen. I samband med jubileet lämnades en inbjudan om svenskt deltagande i en nybildad RILEM-grupp på området.

Referenser

1. Bertil Persson, Göran Fagerlund. Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology. Report TVBM-3104. ISBN 91-631-1993-5. LTH Byggnadsmaterial. 2002, 250 pp.

2. Bertil Persson, Göran Fagerlund. Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology. Rapport TVBM-3075. ISBN 91-630-5528-7. LTH Byggnadsmaterial. 1997, 255 sid.

3. Bertil Persson och Göran Fagerlund. Report TVBM-3085. ISBN 91-630-8230-6. LTH Byggnadsmaterial. 1999, 171 sid.

4. Bertil Persson. Consequence of Cement Constituents, Mix Composition and Curing Conditions for Self-Desiccation in Concrete. Materials and Structures 33. 2000, 352-362.

5. Bertil Persson. Högpresterande självkompakterande betong. Red.: König, Dehn och Faust. Leipziguniversitetet. 2002, 1273-1290.

6. RILEM TC-ICC. Konstantin Kovler. Haifa. E-mail: cvrkost@tx.technion.ac.il or Ole Mejlhede Jensen. Aalborg. E-mail: i6omj@civil.auc.dk

Appendix - förteckning av författare

E. Holt
Very Early Age Autogenous Shrinkage: Governed by Chemical Shrinkage or Self-Desiccation?

T. A. Hammer
Is There a Relationship Between Pore Water Pressure and Autogenous Shrinkage Before and During Setting?

J.-P. Charron, J. Marchand, B. Bissonnette, M. Pigeon and B. Zuber
Comparative Study of the Effects of Water/Binder Ratio and Silica Fume on the Volume Instability of Hydrating Cement Pastes at Early-Age

Y. Yang and R. Sato
A New Approach for Evaluation of Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete under Heat of Hydration

E. J. Sellevold and Ø. Bjöntegaard
Coefficient of Thermal Expansion of Concrete: Effects of Moisture

H. Hashida and N. Yamazaki
Deformation Composed of Autogenous Shrinkage and Thermal Expansion due to Hydration of High-Strength Concrete and Stress in Reinforced Structures

K.-B. Park and T. Noguchi
Autogenous Shrinkage of Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures: Influence of Microstructure and Relative Humidity Change

L. Wadsö and A. Anderberg
A Method for Simultaneous Measurements of Heat of Hydration and Relative Humidity

F. Beltzung and F. Wittmann
Influence of Cement Composition on Endogenous Shrinkage

P. Lura, O. Mejlhede Jensen and K. van Breugel
Autogenous Deformation and RH Change in Portland and Blast Furnace Slag Cement Pastes

O. Senbu, Y. Hama and F. Tomosawa
Effect of Self-desiccation on Frost Resistance of Concrete

S. Zhutovsky, K. Kovler and A. Bentur
Autogenous Curing of High-Strength Concrete Using Pre-Soaked Pumice and Perlite Sand

B. Persson
Self-desiccation and Chloride Migration

D. P. Bentz, M. Geiker and O. Mejlhede Jensen
On the Mitigation of Early Age Cracking

M. Tanimura, H. Hyodo, H. Nakamura and R. Sato
Effectiveness of Expansive Additive on Reduction of Autogenous Shrinkage Stress in High-Strength Concrete

C. Pignat, P. Navi and K. Scrivener
Characterization of the Pore Space in Hardening Cement Paste to Predict the Autogenous Shrinkage

I. Maruyama, S.-g. Park and T. Noguchi
Tensile Creep Model Based on Corrosive Attack of Water Vapor on C-S-H Gel Affected by Self-desiccation and Applied Stress