

Beräkning av uttorkning för betong med Byggcement

I sortimentet av cement från Cementa AB byttes för några år sedan standard portlandcement ut mot Byggcementet. I utvecklingen av det nya cementet eftersträvades att det skulle ha egenskaper mycket lika med det utgående standard portlandcementet. Formellt blev nu cementet ett blandcement (portlandkalkstenscement, CEM II), eftersom det innehåller en viss mängd finmalt kalkfyller. Dessutom har portlandklinkern en någon större finmaldhet (större specifik yta) än i det äldre standard portlandcementet. Sammantaget förväntas detta påverka porfördelningen i den cementpasta som bildas vid hydratationen, och detta bör i sin tur påverka fuktegenskaperna i vissa lägen. Föreliggande artikel anger ett sätt att modifiera den traditionella fuktmodellen med hänsyn till den förväntade pastastrukturen vid användning av Byggcement. Innan modellen kan bli etablerad måste dock ett antal väl genomförda materialtekniska försök med Byggcement genomföras och analyseras, och i nuläget är tyvärr inte denna process genomförd i den utsträckning som vore önskvärt.

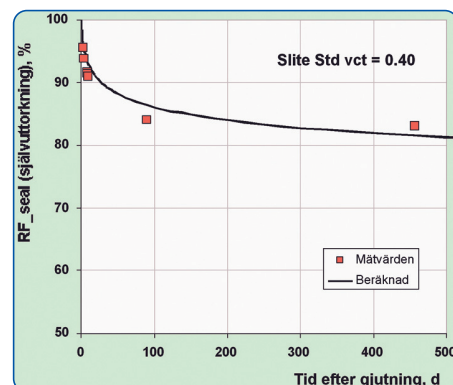
Ett mycket viktigt arbete för utvecklingen av en materialinriktad makromodell för

beskrivning av fukt i betong utfördes under 1990-talet på Chalmers [1] inom det nationella projektet "Högpresterande betong", se även [2]. Det nya med denna modell var att man kunde beakta inblandningen av silikastoft och studera betonger med låga vattencementtal. Denna modell och dess tillämpning för variabel temperatur redovisades i Bygg & teknik 2005 [3], och modellen bygger på samlade forskningsinsatser från Chalmers, LTH (Lund) och LTU (Luleå).

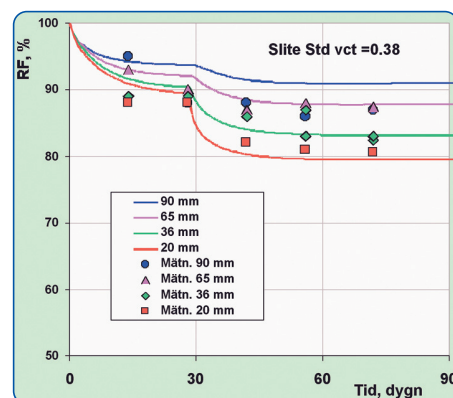
I [1] var allra största delen av försöken utförda med betonger tillverkade av anläggningscement avsedda för anläggningskonstruktioner, medan vi är här mer intresserade av husbyggnadstillämpningar. I det senare fallet dominerar idag användningen av Byggcement (tidigare standardcement), och i [1] finns en komplett försöksserie med Slite Std (utan inblandning av silika) för vattencementtalet 0,40. Jämförelse mot delar av dessa resultat kommer här att användas för att verifiera utvecklingen av det nya datorprogrammet baserat på modellen i [3].

Med parametrar beskrivna i [1] får man vid tillämpning av det utvecklade datorprogrammet de isotermer som redovisas i *figur 1*. Baserat på modellen för fuktisotermerna och härdningsutvecklingen i hydratiserande betong kan man sedan beräkna självuttorkningen, vilket ger resultatet presenterat i *figur 2*. För både beräkningen av isotermerna och självuttorkningen kan man konstatera att det nya datorprogrammet ger värden som är likvärdiga med motsvarande resultat i [1].

För en viss uppfattning om beräkning av uttorkningsförlopp har valts data från LTH [4] för Slite Std och vattencementta-



Figur 2: Jämförelse mellan beräknad och mätt självuttorkning för betong tillverkad med Slite Std och vattencementtalet 0,40. Mätningar enligt [1].



Figur 3: Jämförelse mellan beräknade och mätta fuktprofiler vid uttorkningsförsök för betong tillverkad med Slite Std och vattencementtalet 0,38. Mätningar enligt [4].

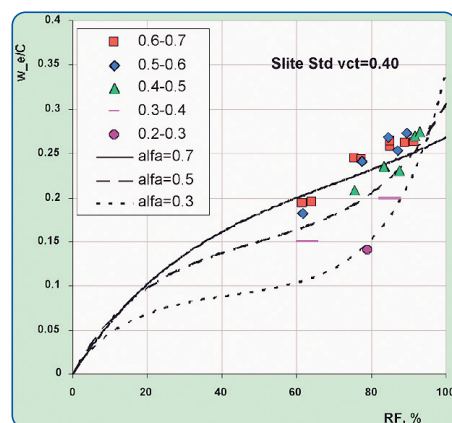
let 0,38. Härdningsförhållande var 1) vattenhärdning i två veckor och 2) förseglad härdning i två veckor följt av 3) uttorkning för en yttre miljö med relativ fuktighet (RF) lika med 60 procent. Resultatet redovisas i *figur 3*, där det framgår att överensstämmelsen är i enlighet med vad man kan förväntas få. Slutsatsen av dessa jämförelser är att man kan anse att man med det nya datorprogrammet har en fungerande modell för fuktberäkningar med betonger tillverkade av det äldre, svenska standard portlandcementet Slite Std.

Fukt i betong för Byggcement

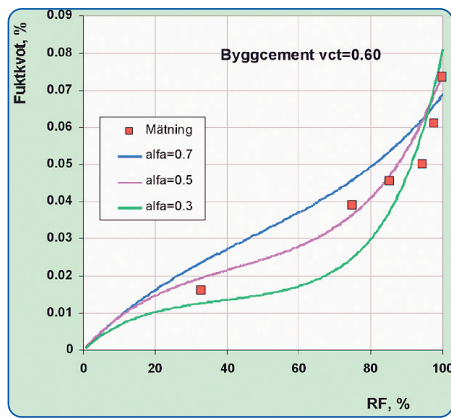
I [5] redovisas fuktmätningar i två försöksserier för betong med Byggcement, där vattencementtalet var 0,38 respektive 0,60. Vi startar här med att studera vattencementtalet 0,60. De beräknade isotermerna och självuttorkningen jämförs med uppmätta värden i *figur 4* och 5,



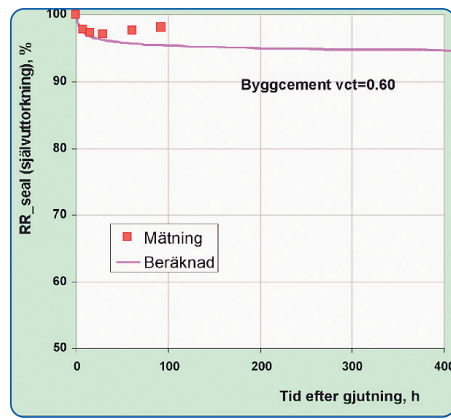
Artikelförfattare är
Jan-Erik Jonasson,
Luleå tekniska
universitet,
Curt-Arne Carlsson
Betongindustri AB
och **Kristina
Mjörnell**, SP
Sveriges Provnings-
och Forskningsinstitut.



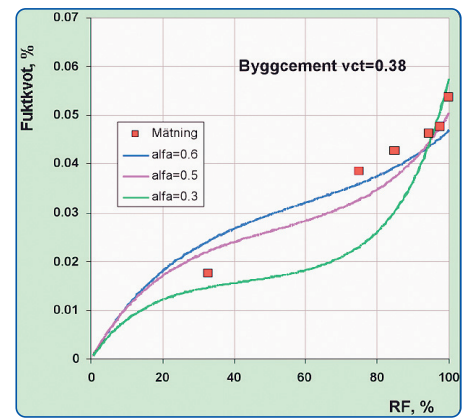
Figur 1: Jämförelse mellan beräknade och mätta isotermer för betong tillverkad med Slite Std och vattencementtalet 0,40. Mätningar enligt [1].



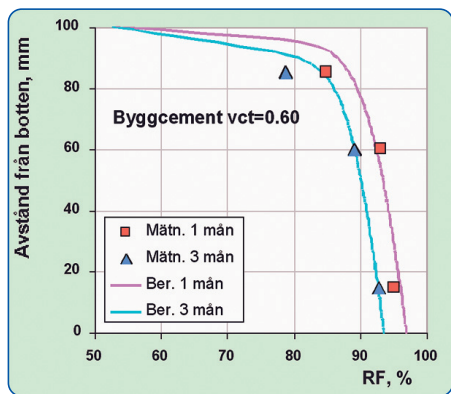
Figur 4: Jämförelse mellan beräknade och mätta isotermer för betong tillverkad med Byggcement och vattencementtalet 0,60. Mätningar enligt [5].



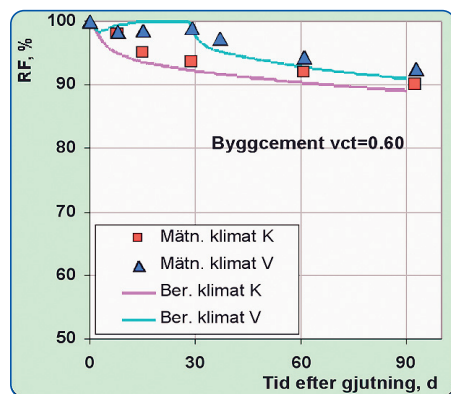
Figur 5: Jämförelse mellan beräknad och mätt självuttorkning för betong tillverkad med Byggcement och vattencementtalet 0,60. Mätningar enligt [5].



Figur 7: Jämförelse mellan beräknade och mätta isotermer för betong tillverkad med Byggcement och vattencementtalet 0,38. Mätningar enligt [5].



a) Fuktprofiler vid uttorkning i konstant klimat.



b) Fuktutveckling 40 mm från fri betongyta, två olika omgivande klimat.

Figur 6: Jämförelse mellan beräknade och mätta fuktprofiler vid uttorkningsförsök för betong tillverkad med Slite Std och vattencementtalet 0,60. Mätningar enligt [5].

och två olika härdningsmiljöer vid uttorkning redovisas i figur 6. I samtliga dessa fall kan man konstatera att fuktparametrar för Slite Std kan med nöjaktigt resultat tillämpas för Byggcement och vattencementtalet 0,60.

Detta beror sannolikt på att inblandningen av kalkfyller till övervägande del kompenseras av portlandcementets finmaldhet vad gäller hydratationsgraden. Dessutom leder sannolikt det relativt stora vattencementtalet till att en nära likvärdig kapillärporositet dominerar fukt beteendet

Uppgången i mätt självuttorkning efter viss tid i figur 5 är sannolikt en effekt av att mätare av typen Humi-Guard, i lägen där de sätts in för tidigt och blir utsatta för alltför hög fuktighet, ger felaktiga värden efter viss tid. De olika uttorkningsklimaten i figur 6 är: "K" betecknar förseglad härdning i ett dygn plus uttorkning med RF i luften lika med 50 procent; "V" betecknar förseglad härdning i ett dygn plus vattenlagring till 28 dygn och därefter uttorkning vid RF lika med 50 procent.

För betongen i [5] med vattencementtalet lika med 0,38 kan man vid beräkning av isotermer se en tydlig systematisk skillnad mellan beräknade och mätta värden, se figur 7. Vid låga RF ger beräkningarna för stor förångningsbar vattenhalt, medan mätvärdena ligger högre än beräkningarna

för RF cirka 75 till 90 procent. Detta beteende kan man i mindre utsträckning också se för Slite Std och vattencementtalet 0,40 i figur 1. Här betecknas detta som en "fil-lerpuckel".

Även i andra försök [6] vid låga vatteninnehåll och höga hydratationsgrader har man noterat detta beteende. En möjlig fenomenologisk beskrivning kan vara att det vid små kapillärporvolym, det vill säga vid låga vattencementtal och höga hydratationsgrader, bildas porer där finmaterialiet i cementet och/eller i ballasten bidrar till att forma porer som i storleksordning ligger mellan gelporer (radie mindre än cirka 15 Å) och huvuddelen av traditionella kapillärporer (radie större än cirka 100 Å), det vill säga porradier inom cirka 20 till 100 Å.

Modifierad modell för betongens porstruktur för Byggcement

Om man antar att den inerta finmaterialdelen i cementet fysikaliskt alltid binder en del av det förångningsbara vattnet kan man generellt beskriva detta med

$$w_{Fc} = \delta_f \cdot F_C \quad (1)$$

där w_{Fc} är lika med förångningsbar vattenhalt [kg/m³] betraktat som fysika-

liskt bundet till inert fyller; F_C är lika med (i detta fall) kalkfyllerhalten [kg/m³] i Byggcementet; δ_f = koefficient som bestäms vid anpassning mot försök.

För en betong innehållande Byggcement och silikastoft beskrivs nu mängden förångningsbart vatten, se figur 8 på nästa sida, vid fukt mättnad av

$$w_{tot} = w_0 - 0,75 \cdot w_n^{net} \quad (2)$$

$$w_{gel} = \alpha_c \cdot \delta_{gel}^c \cdot C + \alpha_{Si} \cdot \delta_{gel}^{Si} \cdot Si \quad (3)$$

$$w_{Fc} = \delta_f \cdot F_C \quad (4)$$

$$w_{cap}^* = w_{tot} - w_{gel} - w_{Fc} \quad (5)$$

där w_{cap}^* är modifierad kapillär vattenhalt [kg/m³] vid fukt mättnad.

Det kemiskt bundna vattnet beskrivs av

$$w_n^{net} = \alpha_c \cdot \xi_c \cdot C - \alpha_{Si} \cdot \xi_{Si} \cdot Si \quad (6)$$

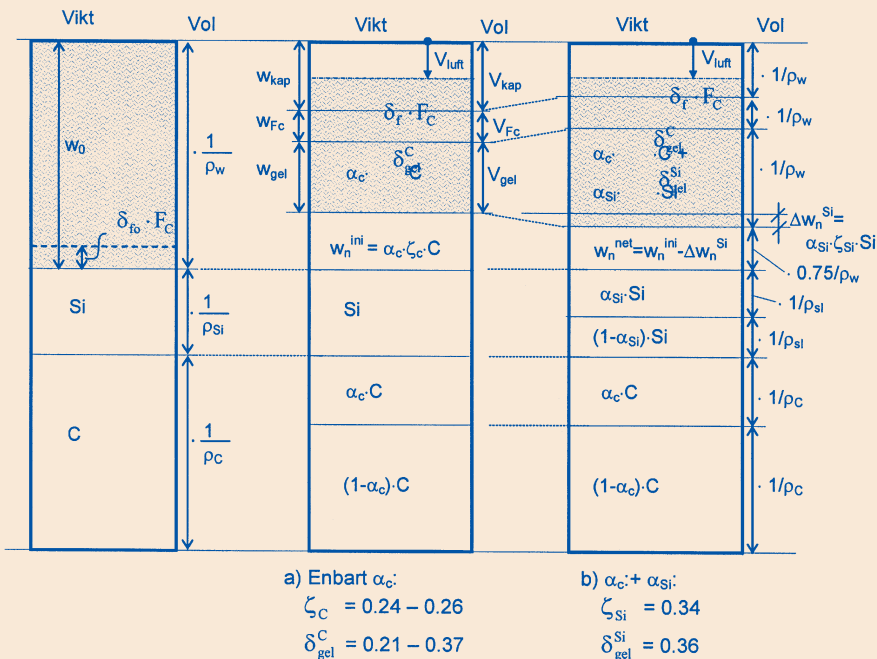
Modifierad kapillärporositet beskrivs som modifierad kapillärvolym i relation till den totala pastavolymen enligt ekv (7) nedan:

$$p_{cap}^* = \frac{V_{cap}^*}{V_{paste}} = \frac{w_0}{C} - \left[\frac{w_n^{net}}{C} \cdot 0,75 + \frac{w_{gel}}{C} + \frac{w_{Fc}}{C} \right] \quad (7)$$

$$= \frac{w_0}{C} + \frac{\rho_w}{\rho_c} + \frac{\rho_w}{\rho_{Si}} \cdot \frac{Si}{C} + \frac{\rho_w}{\rho_F} \cdot \frac{F_C}{C}$$

Enligt definitionen i ekv (7) har även kalkfyllerdelen räknats in i den modifierade pastavolymen. Konsekvensen av ovanstående modellering är att innehållet av fyller "tätar till" betongen genom att den modifierade kapillärdelen blir mindre. Enligt basmodelleringen leder detta, förutom ändrade fuktisotermer och konsekvenser därav, till sänkta diffusionsparametrar och sänkt hydratationshastighet, se vidare [3]. Detta förefaller logiskt riktigt, men huruvida det speglar ett korrekt beteende kan endast visas genom jämförelser med väl utförda materialinriktade försök.

För en betong med Byggcement definieras här bindemedelshalten som summan av mängden portlandcement (C), mängden kalkfyller i cementet (F_C) och mängden silikastoft (Si) enligt



Figur 8: Kvantifiering av strukturen i hydratiserande betong tillverkad av Byggcement. De tonade områdena anger förångningsbart vatten.

$$B = C + \left(\frac{F_C}{B}\right) \cdot B + \left(\frac{Si}{B}\right) \cdot B \quad (8)$$

Utifrån denna definition och angiven bindemedelshalt beräknas mängden portlandcement enligt

$$C = B \left(1 - \frac{Si}{B} - \frac{F_C}{B}\right) \quad (9)$$

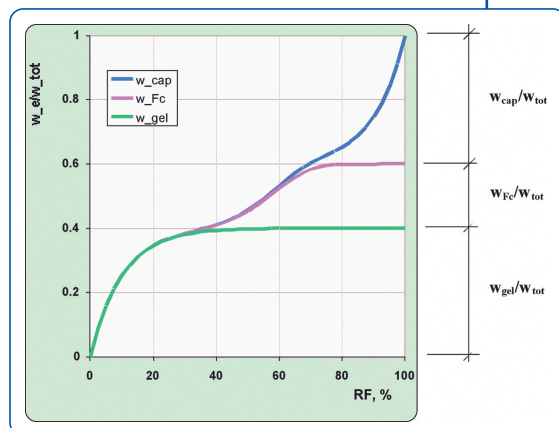
och utifrån ett känt vattenbindemedelstal (w_0/B) beräknas vattencementtalet enligt

$$\frac{w_0}{C} = \frac{w_0}{B} / \left(1 - \frac{Si}{B} - \frac{F_C}{B}\right) \quad (10)$$

Beskrivning av isotermer för Byggcement

Den förångningsbara vattenmängden, w_e , för referenstemperaturen kan uttryckas av gel- och kapillärmättnadsgraderna, γ_{gel} och γ_{cap} , med ett tillägg för fillerdelen, γ_{Fc} , enligt

$$\frac{w_e}{C} = \gamma_{gel} \cdot \frac{W_{gel}}{C} + \gamma_{cap} \cdot \frac{W_{cap}}{C} + \gamma_{Fc} \cdot \frac{W_{Fc}}{C} \quad (11)$$



Figur 9: Illustration av isotermer enligt ekvation (11).

med

$$\gamma_{gel} = \frac{1 - \exp(-\mu \cdot \varphi_{ref})}{1 - \exp(-\mu)} \quad (12)$$

och

$$\gamma_{cap} = \frac{\exp(\mu \cdot \varphi_{ref}) - 1}{\exp(\mu) - 1} \quad (13)$$

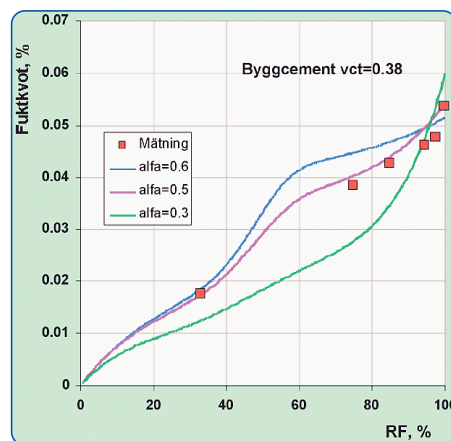
samt

$$\gamma_{Fc} = \frac{1 - \exp(-(\varphi_{ref} / \varphi_F)^{\kappa_F})}{1 - \exp(-1 / \varphi_F)^{\kappa_F}} \quad (14)$$

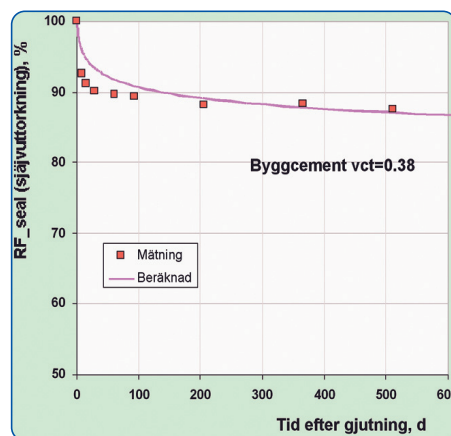
där μ uttrycks av

$$\mu = \mu_1 - \alpha_C \cdot 10 \quad (15)$$

Ekvation (11) illustreras i figur 9, där fillerdelen, ekv (14), utgör huvuddelen av

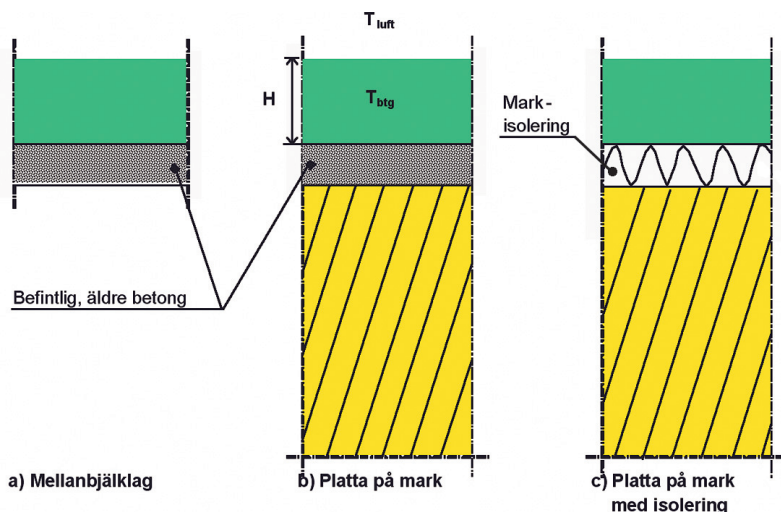


Figur 10: Jämförelse mellan beräknade och mätta isotermer för betong tillverkad med Byggcement och vattencementtalet 0,38. Mätningar enligt [5].



Figur 11: Jämförelse mellan beräknad och mätt självuttorkning för betong tillverkad med Byggcement och vattencementtalet 0,38. Mätningar enligt [5].

vattenhaltshöjningen inom området RF lika med cirka 50 till 80 procent. För att ha möjlighet att modellera både fillerdelens läge på fuktskalan och dess beroende



Figur 12: Tillämpningsfall för studier av temperatur och fukt i betongen. Mellanbjälklaget kan antingen gjutas mot traditionell form (stål, trä, plyfa) eller mot plattbärlag.

av hydratationsgraden föreslås följande samband

$$\varphi_f = \varphi_{f0} \cdot (1 - \alpha_c) + \alpha_c \cdot \varphi_{f1} \quad (16)$$

$$\kappa_f = \kappa_{f0} \cdot (1 - \alpha_c) + \alpha_c \cdot \kappa_{f1} \quad (17)$$

$$\delta_f = \delta_{f0} \cdot (1 - \alpha_c) + \alpha_c \cdot \delta_{f1} \quad (18)$$

där φ_{f0} , φ_{f1} , κ_{f0} , κ_{f1} , δ_{f0} , och δ_{f1} får karaktären av generella anpassningsparametrar.

En tillämpning av modellen med fillerpuckeln visas i figur 10 och 11 för Byggcement och vattencementtalet 0,38. Som framgår av exemplet i figur 10 kan modellen anpassas till rimliga isotermer, i detta fall för hydratationsgraden 0,5. Även självtorkningen kan styras till överensstämmelse, men då det för aktuell försöksserie inte finns några mätningar av härdningsförloppet, kan man inte med säkerhet säga att man fått en rimlig fenomenologisk modellbeskrivning. Detta senare kan vara viktigt i fall där man vill extrapolera anpassningen till närliggande receptbeskrivningar utan att göra nya försök.

Beräkningsfall för framtaget datorprogram

Det framtagna datorprogrammet har utvecklats för direkt tillämpning av fallen mellanbjälklag och platta på mark, se figur 12. För mellanbjälklaget kan man välja mellan traditionella formar eller kvarsittande form (av typen plattbärlag).

Slutord

Ingen beräkning, hur komplicerad den än är, blir bättre än de försöksresultat som ligger i botten.

[SISU = Skrot In ger Skrot Ut]

För platta på mark utan isolering kan man även behandla pågjutning av en befintlig betongplatta. Yttre randvillkor (täckning, vindhastighet) är beskrivna i typfallsförslag med möjlighet till variation i tid, men man har även möjlighet att själv sätta in godtyckliga numeriska värden. Lufttemperatur och relativ fuktighet kan naturligtvis varieras godtyckligt i tid. ■

Referenser

[1]. Norling Mjörnell K, 1997: *Moisture Conditions in High Performance Concrete – Mathematical Modelling and Measurements*. Chalmers University of Technology. Doctoral Thesis, Göteborg.

[2]. Nilsson L-O and Mjörnell K, 2005: *A Macro-Model for Self-Desiccation in High Performance Concrete*. In the Proceedings of the Fourth International Research Seminar on Self-Desiccation and its Importance in Concrete Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, June 2005, Report TVBM-3126, Lund.

[3]. Jonasson J-E, Carlsson C-A och Mjörnell K, 2005: *Modell för beräkning*

av fuktighet i moderna betonger vid variabel temperatur. Tidskriften Bygg & teknik, Nr 7, oktober, 2005.

[4]. Hedenblad G, 1995: *Uppmätta fuktfordelningar respektive viktminskningar vid uttorkning av högpresterande betong*. Internrapport M8:1, HPC Consortium.

[5]. Norling Mjörnell K, 2003: *Uttorkning av byggfukt i självkompakterande betong*. Avrapportering av SBUF-projekt.

[6]. Helsing Atlassi E, 1996: *Desorptionisotermer för högpresterande betong. Kap 3 i Sammanställning av uppmätta fuktgenskaper för högpresterande betong*. Internrapport M8:2, HPC Consortium.