

Augusti 2017

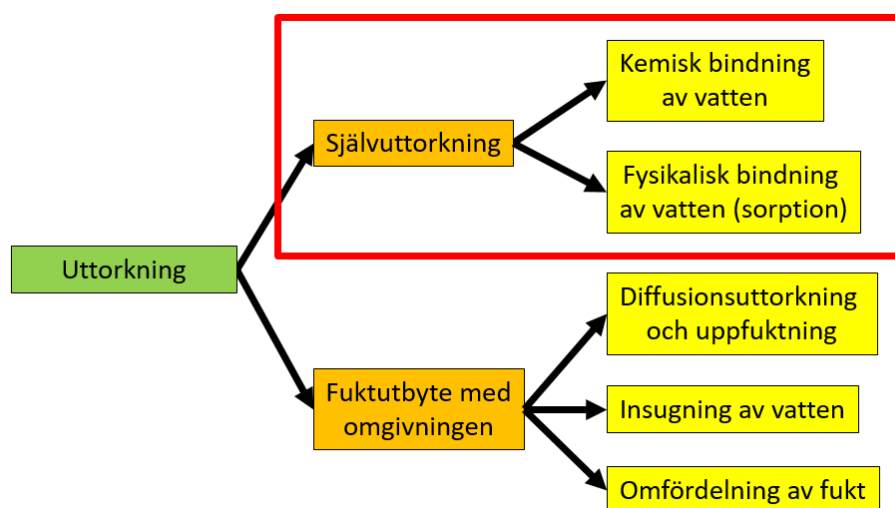
Självuttorkning av betong

BYGGFÖRETAGEN
➤ Produktionsplanering betong

Självtorkning av betong

Rapporten nedan återger en artikel som tidigare publicerats på www.sbuf.se/ppb.

I den tidigare artikeln, Betongfunktion: Uttorkning (Stelmarczyk m.fl. 2017a), gavs en generell bild av betongens uttorkning och en översikt över den bakomliggande fenomenologin. För att kunna ta en djupare titt på mekanismerna och detaljerna är det lämpligt att dela upp ämnesområdet funktionellt, se Figur 1.



Figur 1. Funktionell uppdelning av betongens uttorkningsförlopp.

Fokus i denna artikel kommer att ligga på den rödmarkerade rektangeln i figuren. Självtorkningen är basen i uttorkningsprocessen. Dess nära koppling till hydratationen lägger grunden för hela uttorkningen. De två huvudsakliga fenomenen som bidrar till självtorkningen är kemisk bindning av en del av blandningsvattnet genom hydrationsprocessen samt fysikalisk bindning av återstående vatten i den porstruktur som uppstår i och med hydratationen. I denna artikel ges en relevant översikt av vetenskapen bakom dessa mekanismer, en diskussion av fenomenologins praktiska effekter samt en jämförelse mellan betong baserad på Bascement med krossballast och Ordinarie Portlandcement (OPC) med naturballast.

Observera dock att både hydratationen och betongens porsystem i verkligheten är mycket mer komplicerade än vad som beskrivs nedan. Meningen med denna artikel är

att presentera de fenomenologiska huvuddragen samt diskutera de mest dominerande mekanismerna och principer för att kunna dra slutsatser relevanta för självtvorkning. Som exempel kan nämnas att s.k. hysteres, dvs. en slags fördröjning i sorption inte kommer att diskuteras – den är i högsta grad relevant för omfördelning av fukt under tvorkning, särskilt då utbyte av fukt sker med omgivningen. Den spelar dock en väldigt liten roll vid självtvorkning. Det finns även andra mekanismer och detaljer som inte kommer att tas upp – forskningsmässigt intressanta i sig, men inte fullt relevanta för denna tillämpningsorienterade diskussion.

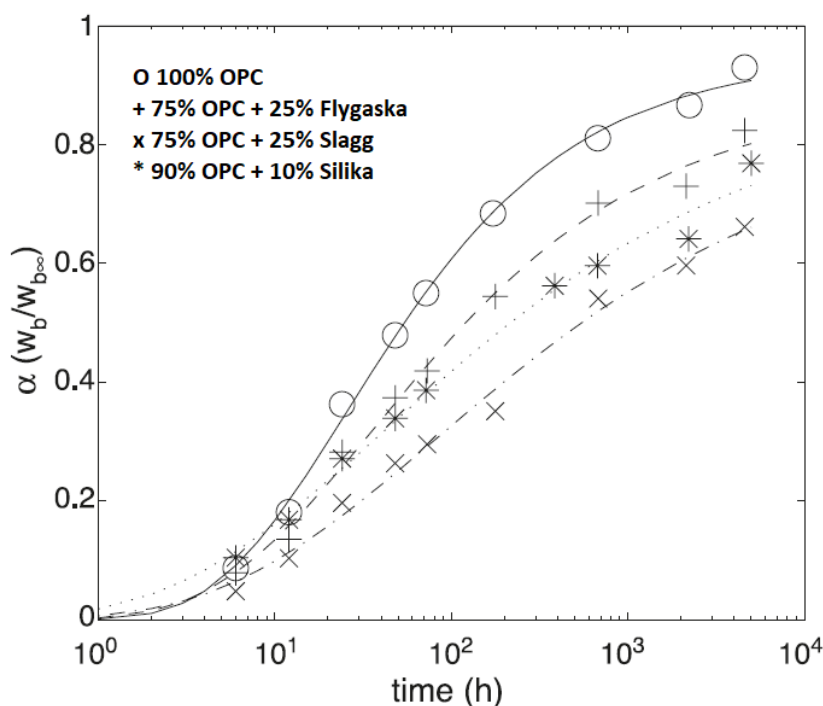
Hydratation

Hydratationen står i centrum av självtvorkningen. Det är en process som består av olika kemiska reaktioner. När cementet kommer i kontakt med vattnet under blandningen av betongen börjar dess beståndsdelar att lösas upp. Denna upplösningsprocess genererar en första portion värme i princip omedelbart. Efter någon till några timmar kommer hydratationen igång. Det är en process där de upplösta komponenterna i cementets beståndsdelar reagerar kemiskt med varandra samt vattnet och bildar nya kemiska föreningar som avsätter sig i fast form och ger betongens dess fasta struktur.

I Ordinarie Portlandcement (OPC, CEM I) hittar man de fyra klassiska s.k. klinkermaterialen som bindemedel: de dominerande kalciumsilikaterna alit och belit samt i väsentligt mindre omfattning förekommande kalciumaluminat och kalciumferroaluminat. Alla fyra reagerar med vatten, friger värme och bildar fast material. De reagerar med litet olika hastigheter. Kalciumaluminat reagerar snabbast och man brukar reglera denna reaktionshastighet för att inte få för tidig sättning av betongen med hjälp av gips, tillsatt i produktionen av cementet. Sammanfattningsvis kan sägas att klinkermaterialen reagerar relativt snabbt. Inom 1–3 dygn har normalt sett merparten av reaktionen ägt rum vid ca 20° C, vilket också framgår av den ringmarkerade kurvan i Figur 2. Bland reaktionernas slutprodukter hittar man huvudsakligen portlandit och s.k. C-S-H-gel från silikatreaktionerna men även andra föreningar från aluminatreaktionerna.

När det gäller reaktionsmönster för mineraliska tillsatsmaterial så som flygaska, slagg och silikastoft blir bilden mer komplicerad. Flygaska och silikastoft tillhör materialgruppen som kallas puzzolaner. Namnet kommer från orten Pozzuoli i Italien där material med liknande egenskaper förekommer naturligt i marken. Det som kännetecknar puzzolaner är att de innehåller en signifikant mängd reaktiv silika. Silika reagerar dock inte med vatten direkt utan med hydroxidjoner. I praktiken krävs alltså någon hydroxid (natriumhydroxid, kalciumhydroxid e.d.) som är löst i vatten för att silika skall reagera. Då puzzolaner används tillsammans med klinker i betong kommer silika att reagera med portlanditen (kalciumhydroxid) som är en av produkterna från klinkerns hydratation. Först måste alltså klinkern hydratisera och bilda portlandit i tillräcklig omfattning och sedan kommer puzzolanreaktionen igång med delar av portlanditen. Slagg klassificeras som halv-puzzolan. Den innehåller normalt både

reaktiv silika, som reagerar med hydroxidjoner, samt kalciumföreningar, som kan reagera direkt med vatten på ett liknande sätt som klinker gör.

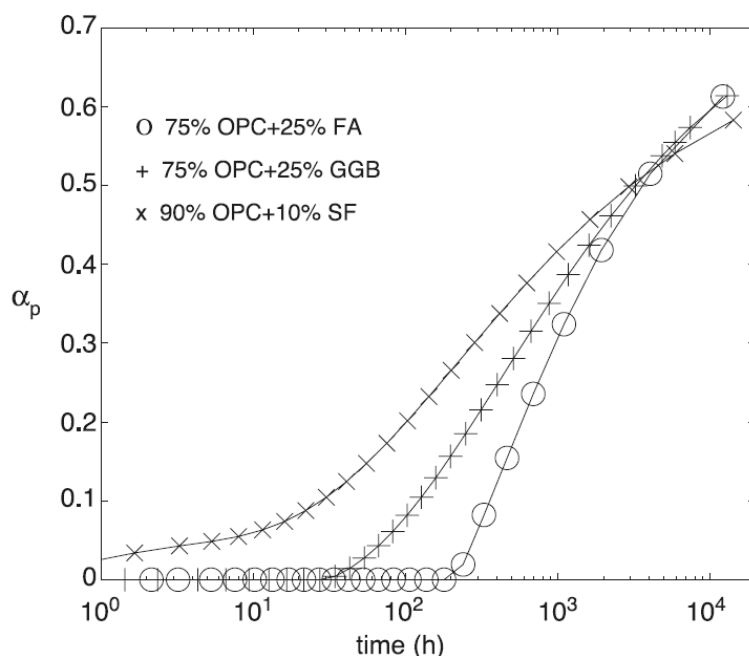


Figur 2. Hydratationsgrad α , som funktion av tid, uppskattad från mängd kemiskt bundet vatten, för betong baserad på cement med olika bindemedelssammansättningar, härdad vid 23° C, från Pane & Hansen 2005.

Eftersom puzzolanreaktionen är beroende av tillgången till portlandit blir den av naturlig anledning försenad jämfört med klinkerns reaktion. Detta resulterar normalt i en långsammare totalreaktion för cementet jämfört med en ren OPC, vilket visas i Figur 2. Vid jämförelse av totalreaktionernas reaktionsgrader i Figur 2 med reaktionsgrader för de specifika tillsatserna i Figur 3, framgår ytterligare komplikationer. Det cementet som reagerade snabbast bland de med tillsatsmaterial var flygaskecementet, vilket innehåller den långsammaste tillsatsen. Detta förklaras av att totalreaktionen för ett cement med mineraltillsatser inte endast kan ses som en enkel summa av klinkerns och tillsatsens reaktioner. Tillsatserna påverkar nämligen klinkerns sätt att reagera. Klinkerns reaktion accelereras av flygaskans närvaro, även om flygaskans reaktion själv är väldigt sen. Närvaro av slaggens kalciumföreningar kan medföra att belit, ett av kalciumsilikaterna i klinkern, försenas och inte reagerar alls tills slaggens kalcium har reagerat färdigt.

Det är viktigt att observera att mineraltillsatserna påverkar cementets reaktionshastighet. Generellt sett hårdnar betongen långsammare med CEM II än med CEM I. Dels reagerar mineraltillsatserna annorlunda och långsammare än vad klinkern gör, dels påverkar mineraltillsatsernas närvaro själva klinkerns reaktion på olika sätt. Detta tillsammans med varierande sammansättningar hos

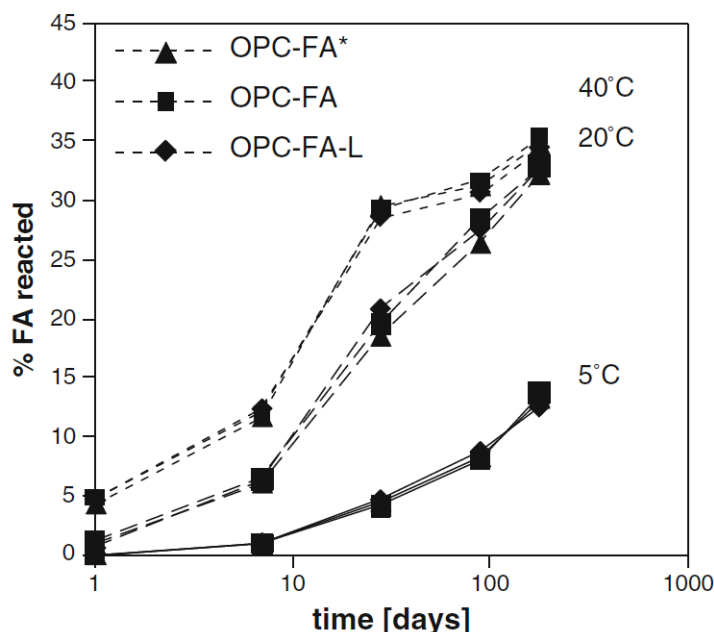
olika slag och flygaskor gör att det blir svårt att generellt sett prediktera en betongs beteende utan att först mäta in hydratationsegenskaper för en given blandning av klinker och mineraltillsats.



Figur 3. Reaktionsgrader α_p , som funktioner av tid, för resp. tillsatsmaterial i blandningarna i Fig. 2, från Pane & Hansen 2005.

En annan viktig skillnad i tillsatsmaterialens sätt att reagera i betong, jämfört med klinkern, är temperaturkänsligheten. Alla kemiska reaktioner påverkas av temperatur. De sker snabbare vid högre temperatur och långsammare vid lägre. Detta fenomen är väl känt inom byggindustrin. Betongen hårdnar långsammare vid lägre temperatur och detta tas hänsyn till detta vid gjutningar i kall miljö. Även tillsatsernas reaktioner påverkas av temperatur. En jämförelse visas i Figur 4 där reaktionsgraden för flygaskan i tre olika blandningar mäts upp vid tre olika temperaturer.

Här syns tydligt att flygaskans reaktion är mycket känslig för temperatur. Att flygaskan reagerar långsamt vid normaltemperatur (20° C) framgick redan tidigare. I kall miljö blir reaktionen väsentligt mer långsam. Endast ca 7–8% av flygaskan har enligt diagrammet reagerat efter ca 100 dagar vid 5° C, jämfört med ca 26–28% vid 20°C. Detta beror delvis på själva flygaskans reaktionskänslighet och delvis på att portlanditen måste bildas först av klinkerns reaktion, som i sin tur också sker långsammare vid låg temperatur. Alla tillsatser vars reaktion bygger på slutprodukter från klinkerns reaktioner blir utsatta för förseningseffekter från två reaktionssteg, både sitt eget samt klinkerns.



Figur 4. Reaktionsgrad för flygaska som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC-FA*: 70% OPC +30% FA, OPC-FA: 65% OPC + 35% FA, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

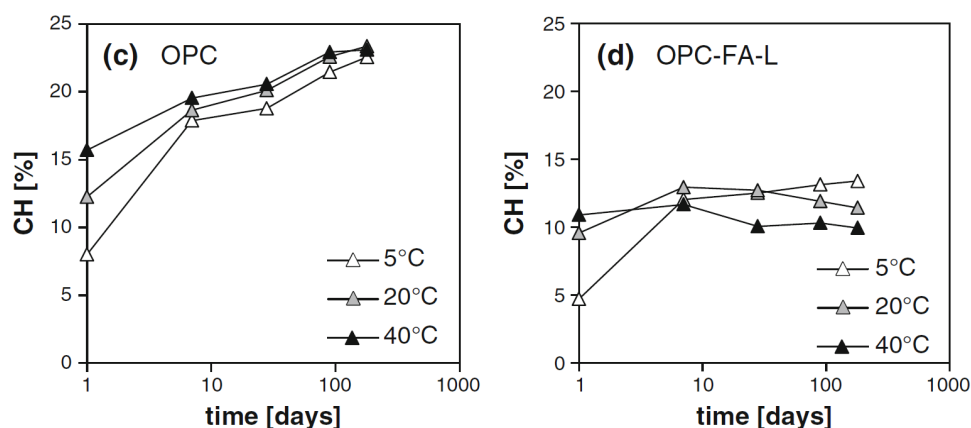
Man bör inte glömma att det även finns andra faktorer som påverkar reaktionerna i betongen, deras hastighet samt känslighet för temperatur. Klinkerns sammansättning är av vital betydelse. Malningsgraden för cementet påverkar reaktionshastigheten då cementkornens yta blir större per kg cement när kornens storlek minskar och detta accelererar hydratationen. Även närvaro av material som inte aktivt deltar i reaktionen har betydelse. Detta ses klart på effekter av filler. Närvaro av finpartiklar ger fler s.k. kristalliseringskärnor vilket accelererar cementets reaktion. Dagens allt ökande användning av krossballast kan också bidra på liknande sätt då mängden finpartiklar i kubiserad krossballast är påtagligt större än i naturballast.

Basement (CEM II) med sitt innehåll av 15% flygaska skiljer sig alltså avseende hydrationsbeteende från CEM I. Hydratationen är långsammare och har större temperaturkänslighet. Detta ger en klar skillnad i hållfasthetstillväxt i kall miljö (se Stelmarczyk m.fl. 2016) och kan med rätta förväntas påverka kemisk bindning av vatten och självtvettorkning.

Kemisk bindning av vatten

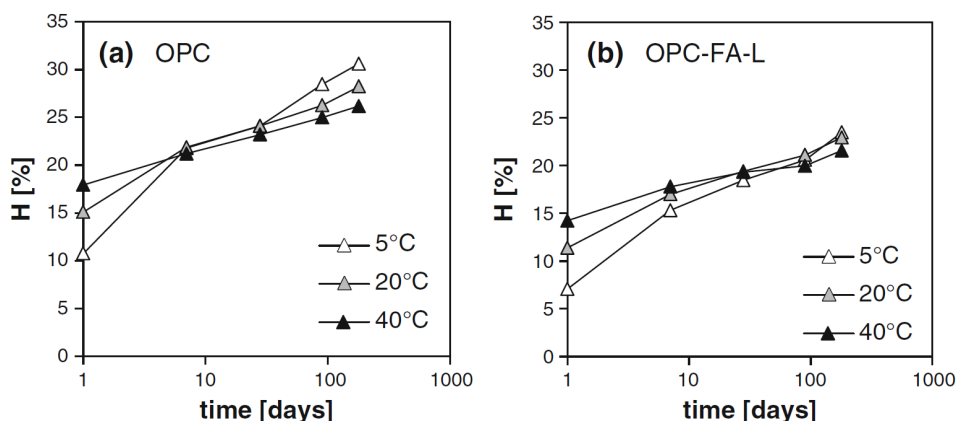
De kemiska reaktionerna under hydratationen binder en del av blandningsvattnet i betongen. Det vattnet kallas för kemiskt bundet vatten. Denna process är grunden för betongens självtvettorkning. Som tidigare nämnt skiljer sig klinkermaterialens och flygaskans reaktioner. Klinkern reagerar direkt med vatten och binder det genom att bilda huvudsakligen s.k. C-S-H-gel och portlandit. Flygaskan kräver portlandit löst i vatten för att reagera och bildar huvudsakligen en C-S-H-gel med något annorlunda

sammansättning än för klinkern. En del av portlanditen förbrukas i denna reaktion vilket klart framgår av Figur 5 där mängd portlandit vid olika temperaturer jämförs för ren OPC och en blandning av OPC, flygaska och kalkstensfiller. En sideeffekt av detta är minskning av korrosionsskyddet för armeringen, som portlanditen står för.



Figur 5. Mängd bildad portlandit (förhållande till totalvikten av bruk utan vatten) som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC: 100% OPC, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

Skillnaden i reaktionerna innebär att en del av det vattnet som bundit av klinkern i portlanditen frisläpps igen av flygaskan för att sedan bindas på nytt. Nettoeffekten av detta är att flygaskan binder vatten, dock i klart mindre omfattning än vad klinkern gör. Detta kan ses i Figur 6 där just den totala mängden kemiskt bundet vatten jämförs mellan ren OPC och samma blandning av OPC, flygaska och kalkstensfiller som i Figur 5. En beräkning baserad på slutvärden i Figur 6 och procentuell sammansättning av cementen ger att mängden vatten som binds per kg flygaska kan uppskattas till ca 54% av mängden vatten som binds per kg OPC.



Figur 6. Mängd kemiskt bundet vatten (förhållande till totalvikten av bruk utan vatten) som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC: 100% OPC, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

Flygaskan binder alltså ca hälften så mycket vatten som klinkern. Varje tillskott av flygaska på bekostnad av klinkerinnehåll i ett cement kommer att resultera i att mindre vatten kommer att bindas kemiskt och mer vatten kommer att finnas kvar i betongen. Detta gäller naturligtvis även Bascementet, även om i mindre omfattning än i Figur 6 eftersom Bascementet innehåller mindre flygaska än blandningen i figuren.

Fysikalisk bindning av vatten

En del av blandningsvattnet binds alltså kemiskt under hydratationen. Efter att detta vatten reagerat med bindemedlen i cementet finns det inte kvar som vatten utan ingår i den hårdnade pastan. Allt vatten förbrukas dock inte på detta sätt, inte ens vid riktigt låga vattencementtal. Det återstående vattnet finns kvar i betongen och binds fysikaliskt i det porsystem som uppstått under hydratationen. Detta fenomen kallas för sorption. För att förstå dess konsekvenser för uttorkning kan en liten presentation av porsystem och dess inlagringsmekanismer vara på plats.

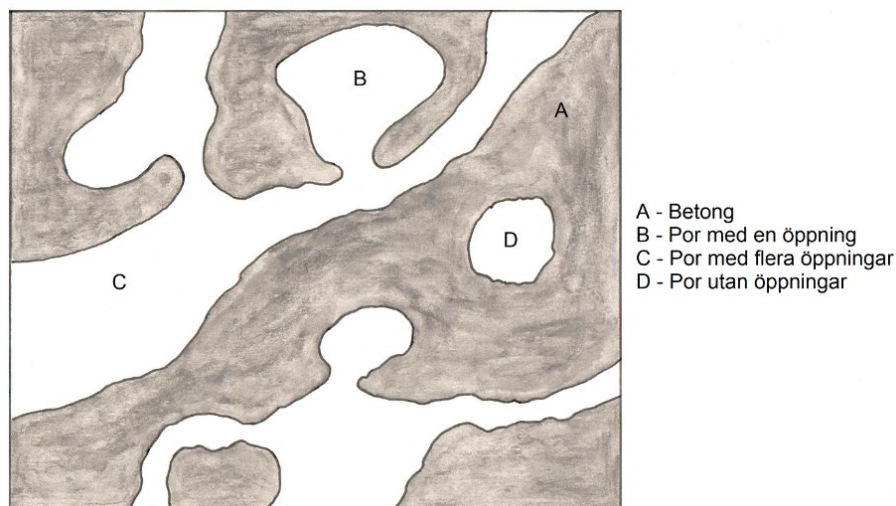
När betongen hydratiserar sker en volymförändring. Volymen för cementet och vattnet innan reaktionen är något större än för reaktionens slutprodukter. Detta resulterar dels i att betongen krymper något, dels i att håligheter bildas i den. Dessa håligheter bildar betongens porsystem. Ett schematiskt exempel på ett porsystem ges av Figur 7. Där visas tre typer av porer som bidrar till tre olika beteenden när det gäller inlagring av vatten:

- Porer med endast en öppning (se B i Figur 7) – ”återvändsgränder”. Dessa porer bidrar till inlagring av vatten men deltar inte i transporten av det.
- Porer med två eller fler öppningar (se C i Figur 7). Dessa porer bidrar till både inlagring av vatten och till transport.
- Porer utan öppningar (se D i Figur 7) - isolerade porer. Dessa porer innehåller en mängd vatten som inte deltar i vare sig transporten eller förändringarna i inlagring av vatten i porsystemet eftersom poren inte är ansluten till resten av porsystemet.

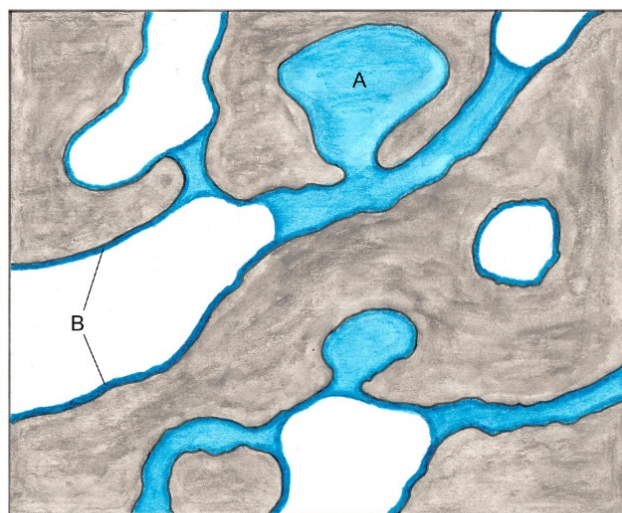
De två dominerande mekanismerna för fysikalisk bindning av vatten i porsystemet visas i Figur 8.

- **Kapillärkondensation** står för den stora volymen av fysikaliskt bundet vatten. Detta fenomen bygger på vattnets ytspänning och kapillärkrafter, som uppstår i porerna. Följden blir en fysikalisk kraftbalans mellan vattenångans partialtryck och spänningen i en menisk som bildas när vatten kondenserar till flytande fas i en por. Det praktiska resultatet av det blir det samband som råder mellan storleken på vattenfyllda porer och omgivande relativ fuktighet – ju högre RF desto större porer är vattenfyllda.
- **Adsorption** på ytor av porsystemet bidrar också till det fysikaliskt bundna vattnet. Mekanismen bakom bygger på att enstaka vattenmolekyler binds med väldigt svaga krafter till ytor av andra material och bildar en mer eller mindre

sammanhängande, tunn film. I verkligheten är detta en mycket dynamisk process där molekyler binds och lossnar hela tiden. Det som är intressant är nettoeffekten av detta utbyte och principen som gäller är ”ju högre RF desto fler molekyler sitter fast vid varje ögonblick på väggarna i porsystemet”. I betongen är det brukligt att räkna med upp till 5 molekyltjocklekar för det adsorberade lagret av vatten – detta vid väldigt höga RF naturligtvis.



Figur 7. Ett exempel på porsystem utan vatten.



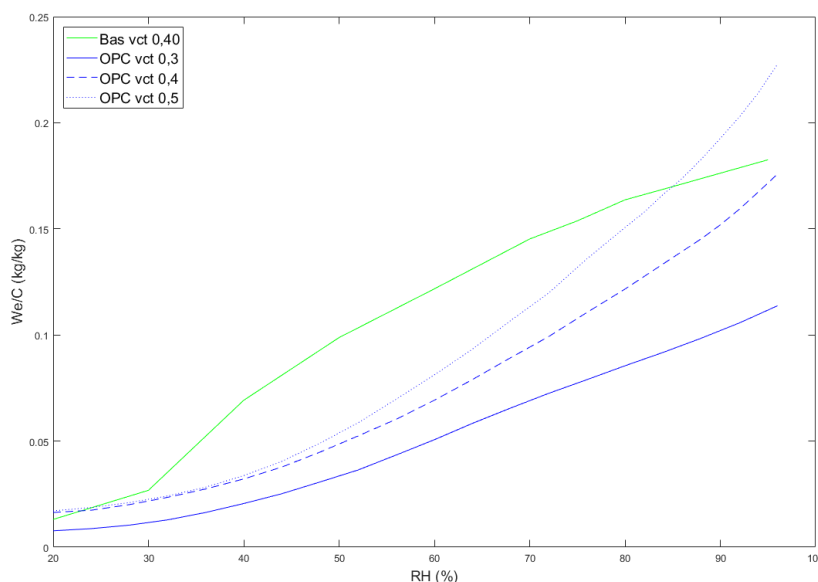
A - Kapillärkondenserat vatten i vattenfylld por
B - Vatten adsorberat på porväggar i icke vattenfylld

Figur 8. Ett exempel på porsystem med vatten.

Vad alla dessa mekanismer innebär för självtorkningen brukar sammanfattas i en s.k. desorptionskurva. Den visar ett samband mellan mängd fysikaliskt bundet vatten i porsystemet (kg vatten per kg cement eller kg vatten per m³ betong) och relativa fuktigheten i luften i porsystemet (%). Vidare säger kurvans namn att sambandet visas

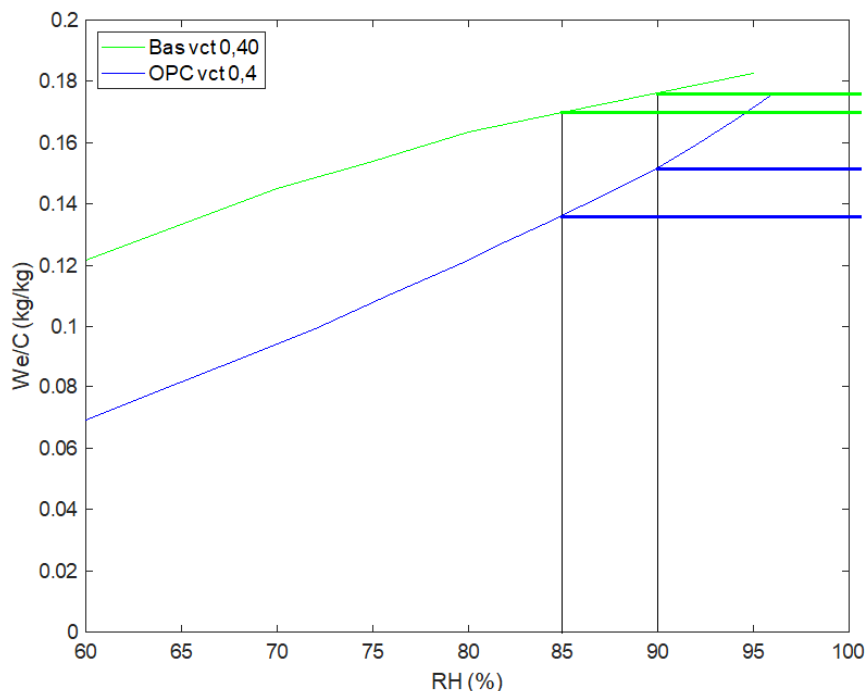
vid uttorkning från helt fyllt tillstånd – desorption. (Obs! 1: Det finns även absorptionskurvor som visar samma samband vid uppfuktning från helt torrt tillstånd, vilket inte är relevant för självtorkning. 2: Absorption skall inte förväxlas med adsorption, som är ett specifikt fysikaliskt fenomen, beskrivet några rader tidigare i denna artikel. Författarna kan endast beklaga att vokabulären på området inbjuder till vissa missförstånd.)

Ett relevant exempel på desorptionskurvor gavs i Stelmarczyk m.fl. 2017a och återges i Figur 9. Som konstaterat i den tidigare artikeln, finns en tydlig skillnad i flackhet/lutning i det övre hygroskopiska området (ca 80–95% RF) samtidigt som skillnaden i porositet vid 95% är marginell.



Figur 9. Fuktalt We/C som funktion av relativ fuktighet vid desorption för betong med Bascement (från Stelmarczyk m.fl. 2017b) resp. OPC (från Nilsson 1980).

Orsaken till skillnaden i flackhet/lutning är fördelningen av storleken bland porerna. Man kan tydligt se i Figur 10 att den totala volymen av porer som töms vid uttorkning från 90% till 85% RF är för Bascementet bara ca. en tredjedel av vad som töms i OPC. Effekten av denna skillnad i porstruktur är tvåfaldig. Vid samma förmåga till kemisk bindning av vatten, kommer denna flackhet i isothermen att underlätta självtorkning. Kemisk bindning av en viss mängd vatten kommer att resultera i större minskning i relativ fuktighet än vid en isotherm med mindre lutning. När en del av klinkern är ersatt med flygaska minskar dock betongens förmåga till kemisk bindning av vatten. I Bascementets fall blir det svårt att säga om fördelen från isothermens mindre lutning kommer att ge någon effekt alls.



Figur 10. Fukthalt We/C som funktion av relativ fuktighet vid desorption för betong med Bascement (från Stelmarczyk m.fl. 2017b) resp. OPC (från Nilsson 1980), jämförelse av skillnad i fukthalt för skillnad i relativ fuktighet motsvarande 85% - 90%.

Samtidigt kommer denna brist på porer i det övre hygroskopiska området att märkas när man försöker mäta relativ fuktighet i betongen. Varje mätning påverkar till viss del tillståndet i mätobjektet. När en givare sätts in i ett mäthål i betongen behöver den ta upp en viss mängd fukt från betongen för att komma i jämvikt med den rådande miljön. Detta påverkar naturligtvis den rådande relativa fuktigheten i betongen i närheten av givaren. Av Figur 10 framgår att **vid samma påverkan i fukthalt (g vatten) på området 85% - 95% RF blir störningen i relativ fuktighet för betongen med Bascement ca 3 gånger större än för OPC**. Detta försvårar mätning av RF i betong med Bascement och kommer med stor sannolikhet att medföra behov av längre väntetider mellan montering och avläsning av givare.

Sammanfattningsvis kan sägas att skillnaden i bakomliggande fenomenologin för sorption mellan betong baserat på Bascement med krossballast respektive OPC med naturballast vid en vct på ca 0,4 består i skillnad i fördelningen av volymen mellan porer med olika storlek, så att det finns mycket mindre porer som töms vid uttorkning i det relevanta fuktområdet. Detta innebär rent praktiskt att:

- vid samma förmåga till kemisk bindning av vatten är detta en fördel vid självtorkning, men om detta verkligen märks i Bascementets fall är svårbedömt då flygaska binder vatten sämre än klinker

- betongen med Bascement är ca 3 gånger känsligare för påverkan från fuktsensorer, vilket kommer att försvåra korrekt mätning av relativ fuktighet

Slutsatser

Det råder en klar skillnad mellan de mekanismer som styr hårdnande i allmänhet och i synnerhet utveckling av fuktegenskaper relevanta för självtorkning, mellan betong baserat på OPC (CEM I) resp. Bascement (CEM II). Mätdata och gällande forskning på området ger klar bild av sämre kemisk bindning av vatten. Det kan även konstateras att betong med Bascement och krossballast utvecklar ett annat porsystem som medför skillnader i fysikalisk bindning av vatten (sorption).

Eftersom

- skillnad i kemisk bindning av vatten har en negativ effekt för självtorkningen
- sorptionen borde ha en positiv inverkan men effekten är i praktiken beroende av kemisk bindning av vatten

måste slutsatsen bli att man rimligen bör förvänta sig sämre självtorkning från betong med Bascement jämfört med OPC. Det bör även noteras att skillnaden i det utvecklade porsystemet också kommer att försvåra verifiering av Bascementbetongens uttorkning genom mätning av relativ fuktighet.

Referenser

De Weerd m.fl. 2012 - K. De Weerd, M. Ben Haha, G. Le Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach; *The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash*; Materials and Structures, 45 (2012)

Nilsson 1980 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, fig. 14.3:6, 1980

Pane & Hansen 2005 – Ivindra Pane, Will Hansen; *Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis*; Cement and Concrete Research, 35 (2005)

Stelmarczyk m.fl. 2016 – M. Stelmarczyk, H. Hedlund, T. Rapp, J.-E. Jonasson, *Entreprenörer sparar pengar med PPB!*, Bygg & Teknik nr 7 2016, finns även på www.sbuf.se/ppb

Stelmarczyk m.fl. 2017a – M. Stelmarczyk, P. Johansson, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Betongfunktion: Uttorkning*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2017b – pågående inmätning av Bascementets egenskaper inom SBUF Projekt 13198 samt 13140

Artikelförfattare

Civ.ing. Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

Civ.ing. Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier, Tekniskt sakkunnig RBK

Dr., Afd. Prof. Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF, PPB Koordinator

Dr. Fredrik Gränne, NCC Sverige AB

Ing. Mattias Gunnarsson, Fuktsakkunnig, Peab Sverige AB

Artikeln är ursprungligen publicerad 2017-09-28.

Artikeln är reviderad 2018-05-24 avseende sorption på grund av revidering av mätdata rörande sorption från Avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH.