

Betongfunktion: *Uttorkning*

Produktionsplanering Betong handlar om funktionsbetong. I den nuvarande versionen av programmet är funktionen lika med utvecklad värme respektive uppnådd hållfasthet, för att planera och avgöra när glättning och formrivning kan ske på ett säkert sätt. Vidare beräknas även när betongens hållfasthetsklass uppnås, dvs när 28-dygns hållfasthet innefattas. Det handlar om hur man åstadkommer detta i specifik miljö med olika val av material och arbetssätt. Allt fokuserar på betongens funktion inriktat på användarens behov av planering.

Nu är det dags att gå vidare med nästa funktion – uttorkning. Det pågår redan ett intensivt arbete inom PPB. Det handlar om fuktflöde, simulering av fuksamverkan mellan material och beräkning av uttorkningstider. Utöver utvecklingen av själva mjukvaran genomförs omfattande inmätning av Bascementets egenskaper samt en omfattande revidering och nyutveckling av materialmodeller. Allt görs med syfte att ge samma flexibilitet och precision i planeringen av uttorkning som för existerande glättning, formrivning och 28-dygns hållfasthet.

Fukt: Hur svårt kan det vara?

Den centrala processen som styr betongens egenskaper är naturligtvis hydratationen. Där reagerar bindemedlen med vatten. Betongen övergår från flytande till fast fas. Ur fuktsynvinkel händer huvudsakligen två saker under hydratationen: en del av betongens blandningsvatten binds kemiskt till cementet och som en följd bildas en porstruktur, där fysikalisk bindning av vatten, s.k. sorption (se förklaring längre ner i texten), och transport av kvarstående vattnet utspelar sig. Detta ger de tre huvudsakliga fenomenologiska områdena som anses påverka betongens uttorkning, se fig. 1. Verkligheten är dock mycket mer komplicerat än den enkla figuren. För att få en rättvis bild av hur uttorkningen egentligen går till måste man titta närmare på de enskilda fenomenen och hur de påverkar varandra.

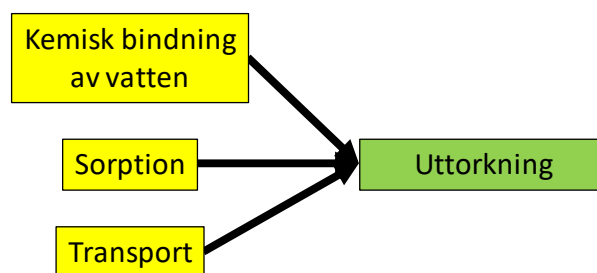


Fig. 1 Förenklad bild av fenomenen bakom uttorkning av betong

Den kemiska bindningen av vattnet är ett resultat av de kemiska reaktioner som sker under hårdnandet. För Ordinarie Portlandcement (OPC), dvs. CEM I, sker detta förhållandevis enkelt. Klinkermaterialen reagerar med vatten på litet olika sätt och binder det i form av olika slutprodukter, t.ex. portlandit (kalciumhydroxid) och så kallad C-S-H-gel. I modern betong med mineral tillsatser, som t.ex. flygaska eller slagg, dvs. betong baserad på CEM II, blir denna bild dock mer komplicerad. Mineral tillsatserna reagerar på ett annat sätt än OPC och binder väsentligt mindre vatten per kilo bindemedel än vad klinker gör. Förenklat kan sägas att slagg binder något sämre än klinker, flygaska

påtagligt sämre och silikastoft "binder negativt", dvs. frisläpper en del av vattnet som klinkern tidigare bundit som portlandit. Detta innebär för en betong med mineraliska tillsatser att hydratationen förbrukar en mindre mängd av blandningsvattnet, jämfört med en betong med ren OPC och samma vattencementtal (vct). Det blir helt enkelt mer vatten kvar i betongen efter hydrationsprocessen.

Porstrukturen är ett fysikaliskt resultat av hydrationsprocessen. Cementet binder vatten och blir till ett fast material som håller ihop ballasten. Detta fasta material är poröst med porer av olika storlekar. Luftporer, som skydd för exempelvis frysning, och kapillärporer, där kondensation av vatten på grund av kapillärkrafter sker, är två exempel. Dessa porer kan vara vattenfyllda eller innehålla luft med viss del vattenånga. Ur fuktsynvinkel är porstrukturen mycket viktig då det är där sorption och transport av fukt äger rum.

Sorption är ett begrepp som anger hur vattnet binds fysikaliskt i porstrukturen. Adsorption på porväggar och kapillärkondensation är två exempel på hur detta sker. För en viss betong med en viss porstruktur ger sorptionen sambandet mellan fukthalt och relativ fuktighet, dvs. hur mycket fukt (kg/m^3) finns inlagrat i porsystemet vid viss relativ fuktighet (%) i porsystemets luft. Det bör även nämnas att olika mekanismer bidrar till s.k. hysteres i porsystemet. Hysteres är en slags fördröjning i porsystemets sätt att reagera på förändring i relativ fuktighet, beroende på om betongen fuktas upp (absorption) eller torkas ut (desorption). Samma porer fylls på och töms vid olika relativ fuktighet. Detta innebär att för att kunna räkna ut fukthalten räcker det inte med att veta den relativa fuktigheten för tillfället. Man måste känna till hela uttorknings- och uppfuktningshistoriken samt även temperaturhistoriken. Förenklat kan sägas att porsystemet har ett minne och reagerar med viss fördröjning, vilket komplicerar fuktbindnings- och uttorkningsprocessen för en betongkonstruktion.

Omfördelning av fukt, dels som ånga och dels som vatten, sker i betongens porsystem och kallas allmänt för transport. De två dominerande transportmekanismerna är ångdiffusion i de luftfyllda porerna och kapillärsugning i de vattenfyllda. Beroende på porstorleksfördelningen, dvs. andelen porer av olika storlekar, och mängden fukt i porsystemet samverkar dessa två mekanismer på ett mycket komplext sätt med varandra. Transportegenskaperna är dessutom temperaturberoende och påverkas av samma s.k. hysteres som sorptionen, se förklaring ovan.

Sätter man ihop dessa fenomen och ritar ut inbördes beroenden erhålls bilden i fig. 2. De två blåa rutorna visar de två processerna som äger rum: hydratation samt omfördelning av fukt. Resten är olika slags konsekvenser därav och/eller mått på vad som sker. De svarta pilarna visar de naturliga konsekvenserna i systemet, så som beskrivits ovan. De röda pilarna visar konsekvenser som går "bakåt" i resonemangskedjan och åstadkommer s.k. cirkelberoenden. Omfördelning av fukt påverkar fukthalten – det är rätt naturligt. Fukthalten och sorptionen påverkar pågående hydratation – det är kanske inte lika självklart. Hydratationen är beroende av lokal tillgång till kondenserat vatten samt utrymme för att bilda reaktionsprodukter. Detta styrs av hur porsystemet ser ut samt av hur vatten är fördelat i det.

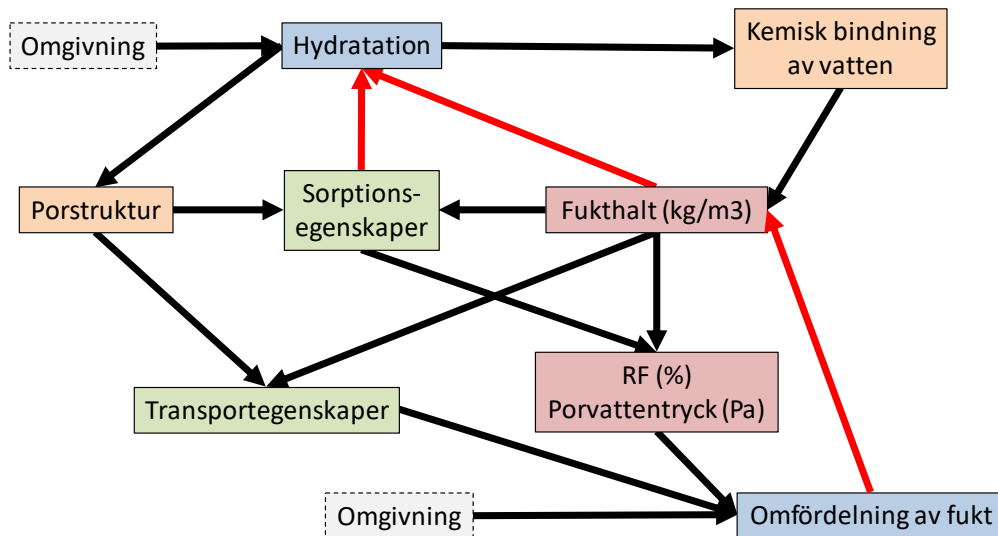


Fig. 2 Fenomen och inbördes beroenden under uttorkning av betong.

Ett exempel kan vara på sin plats här. Om man skyddar ytan av nygjuten betong mot uttorkning i tidigt skede erhålls en fin hydratation eftersom vattnet i betongen initialt hålls kvar och finns tillgängligt för cementet att reagera med. Låter man i stället ytan tidigt torka mot luft, så försvinner en del av vattnet och hydratationen kommer inte att gå lika långt. Detta kommer att ge en öppnare porstruktur och en betong som är mer benägen att suga i sig vatten om det regnar på den.

Sammanfattningsvis kan sägas att fuktbilden i betongen är mycket komplex. För allmän förståelse, prediktering och/eller rimlighetsbedömning av mätresultat måste detta förstås och beaktas. Förenkling av sambanden i fig. 2 leder till att man tappar en väsentlig del av fenomenologin och får följaktligen otillförlitliga resultat. Som exempel kan nämnas att om endast kemisk bindning beaktas, har man ingen aning om hur det icke förbrukade vattnet binds i porstrukturen. Då vet man inte viket RF man har. Man har ingen aning om hur vattnet omfördelas. Man vet inte heller hur hydratationen och vattnets kemiska bindning vidare fortskrider i närheten av betongens yta, där uttorkning av fukt oftast sker till omgivningen.

Inmätning av Bascementets egenskaper

För att kunna räkna på uttorkning av betong med Bascement i PPB, mäts en rad egenskaper in. Här räcker det inte med några enkla uttorkningsmätningar. Mineraliska tillsatser förändrar betongens beteende så fundamentalt att dess grundegenskaper måste först mätas in var för sig.

Hydratationen och dess beroende av både fukt och värme mäts in. Tidigare data i PPB avseende Bascementets beteende är förenklade. De räcker för simulering av värmeutveckling och hållfasthet, men inte vid fuktsimulering. De nya inmätningarna omfattar värmeutveckling, hållfasthetstillväxt samt kemisk bindning av vatten. Som tidigare nämnt aktiveras klinkern och flygaskan på olika sätt. Klinkern reagerar med vatten och flygaskan med portlandit (kalciumhydroxid), som i sin tur är en reaktionsprodukt från klinkerns reaktion. Detta medför att flygaskereaktionen blir fördröjd jämfört med klinkern.

Även sorption, dvs. porsystemets förmåga att binda fukt, mäts in från grunden. Egenskaperna undersöks vid olika åldrar. Här kan en liten inblick ges i resultaten i fig. 3. Diagrammet visar desorptionskurvor (uttorkning) för:

- Basement - 12 månader gammal betong med vct 0,40 och helkross som ballast.
- OPC - vct 0,3, 0,4 och 0,5 från Betonghandboken, Nilsson 1980. (Dessa data har korrigerats med 10%RF använt för torrsvikt för att bli jämförbara med uppmätningen för Basementet. Olika vattencementtal visas här som jämförelse för bedömning av skillnaden i porositet mm.)

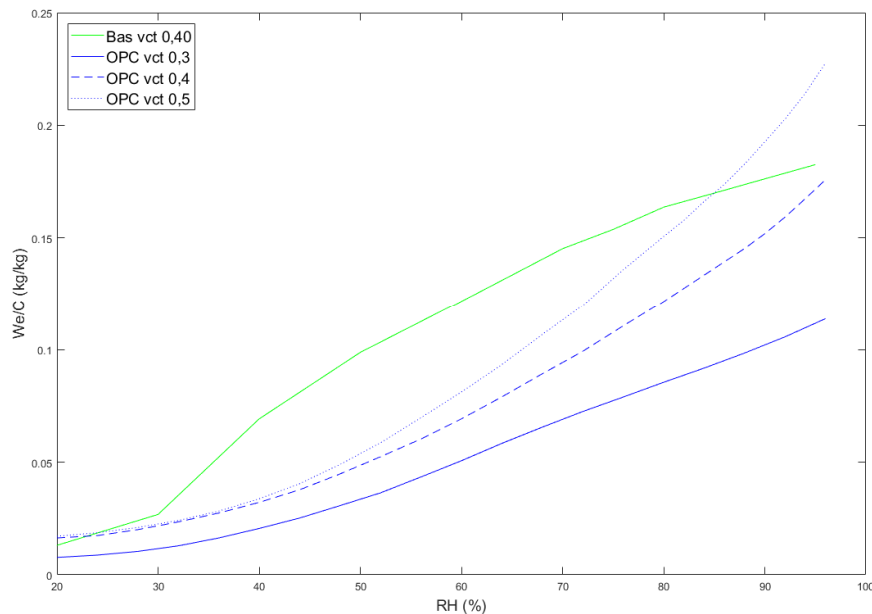


Fig. 3 Jämförelse av desorptionskurvor, bunden fuktmängd per cementmängd (kg vatten per kg cement) som funktion av relativ fuktighet (%). OPC - källa: Betonghandboken, Nilsson 1980. Basement – källa: opublicerad, pågående inmätning av Stelmarczyk et al. 2018 inom SBUF Projekt 13198 samt 13140.

Porositeten är marginellt högre i Basementets desorptionsisoterm. Däremot finns huvudsakliga skillnaden i kurvformen. Flackheten i den övre delen av det hygroskopiska området (ca 75–95% RF) är framträdande vilket i praktiken innebär att endast en liten förändring av fukttillståndet hos betongen är tillräckligt för att påverka den relativa fuktigheten förhållandevis mycket. Ur uttorkningssynvinkel är detta naturligtvis fördelaktigt i sig, men för att verkligen utnyttja detta måste betongen först binda nog med vatten kemiskt för att tas sig ner från 0,4 kg vatten / kg cement (vct) till ca. 0,17-0,18 kg/kg vid 95% RF. Därefter krävs vidare uttorkning genom kemiskt bindning eller diffusion. Eftersom flygaska inte binder vatten lika bra som rent Ordinarie Portlandcement kan denna fördel visa sig vara svår att utnyttja. En annan, negativ effekt av flackheten är försvårande av mätning av relativ fuktighet. Denna mätning kräver fuktjämvikt mellan betong och givare. En liten förändring av fukttillståndet hos betongen till följd av fuktutbyte med givaren kan påverka den relativa fuktigheten förhållandevis mycket. Detta får till följd att det blir svårare att mäta betongens relativa fuktighet med bibehållen precision.

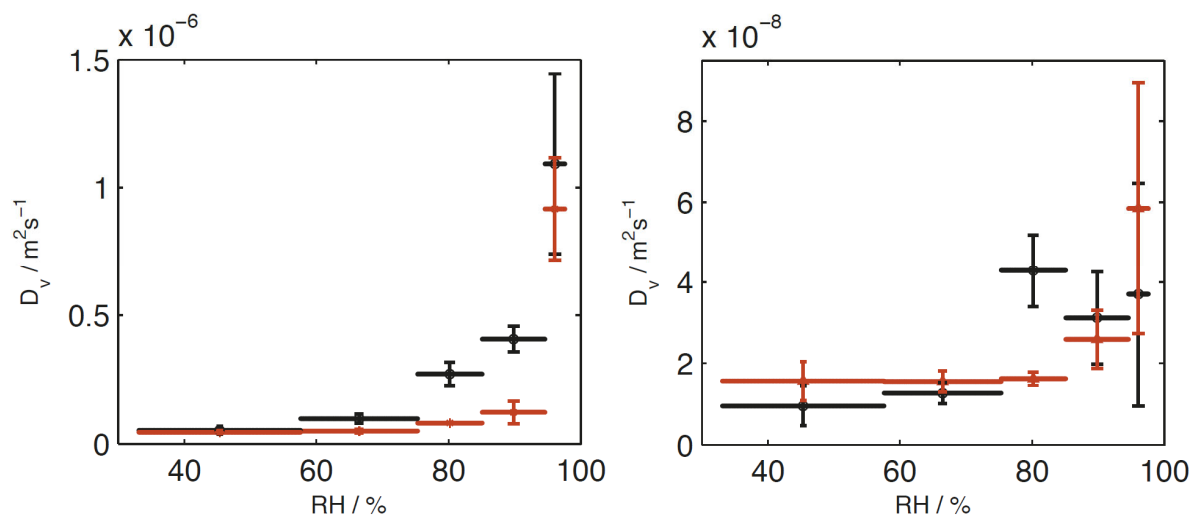


Fig. 4 Jämförelse av transportkoefficient för ånghalt som funktion av relativ fuktighet. Till vänster – CEM I (OPC) vct 0.4, till höger – CEM III B (30% klinker + 70% slagg) vct 0.4, svart – under desorption, röd – under absorption. Källa: Saeidpour, Doctoral Thesis, Paper III, LTH 2015.

Den kanske svåraste egenskapen som nu mäts in är betongens förmåga att transportera fukt. Eftersom transporten är väldigt långsam, jämfört med t.ex. hydratationen, blir mätningarna känsliga och tar tyvärr mycket lång tid att utföra. Vilka skillnader, jämfört med OPC, man kan vänta sig finns det idag klara data på. I fig. 4 visas en jämförelse på transportegenskaper för CEM I (OPC) samt CEM III B (OPC med 70% slagg). Hur relevant denna jämförelse är för Bascementet är svårt att bedöma. Detta är dock den enda kända inmätningen av transportegenskaper för betong med mineral tillsats. Mätningen verkar vara behäftad med vissa osäkerheter, vilket också diskuteras i källmaterialet. Det som däremot framgår med ansevärd säkerhet ur jämförelsen är skillnadens magnitud mellan CEM I och CEM III B. Transportkoefficienterna för fukt i den slagginblandade betongen är ca 15-20 ggr lägre än för ren OPC. Fördelen med en sådan betong är att den inte kommer att suga in särskilt mycket vatten om det regnar på den. Nackdelen är dock att diffusionsuttorkning mot omgivningen, dvs. uttorkning av det vatten som inte binds kemiskt men skall ut, kommer att ta mycket längre tid.

Redan idag kan man alltså dra vissa sammanfattande slutsatser. De tidiga mätresultaten samt andra relevanta, publicerade forskningsresultat ger en tydlig fingervisning av fenomenologin som uttorkning baserar sig på. Både kemisk bindning och transport påverkas av mineraliska tillsatser på ett för uttorkning negativt sätt. Det som återstår att mäta in är exakt hur mycket, för att kunna prediktera den exakta skillnaden.

Revidering av materialmodeller

Som tidigare nämnt gör flygaskans närvaro i Bascementet att hydratationen blir mer komplex. För att dels modellera den med hög noggrannhet, dels få grepp om flygaskans och cementklinkerns olika inverkan på kemiskt bundet vatten, revideras materialmodellen för betongens mognad och hydratation.

Även modellering av sorption och transport ses över. Här kombineras data från bägge slags mätningar till att anpassa parametrar för beskrivning av ett gemensamt porsystem. Detta kan i sin tur

användas vid beräkningen av både sorption och transport vid olika fukt- och temperaturtillstånd i betongen.

Utveckling av mjukvara

Som första steget i mjukvaruutvecklingen har ett forskningsverktyg med namnet *FEM φ -ca* tagits fram. Mjukvaran räknar än så länge på endimensionellt fuktflöde men med mer avancerade materialmodeller än jämförbara verktyg.

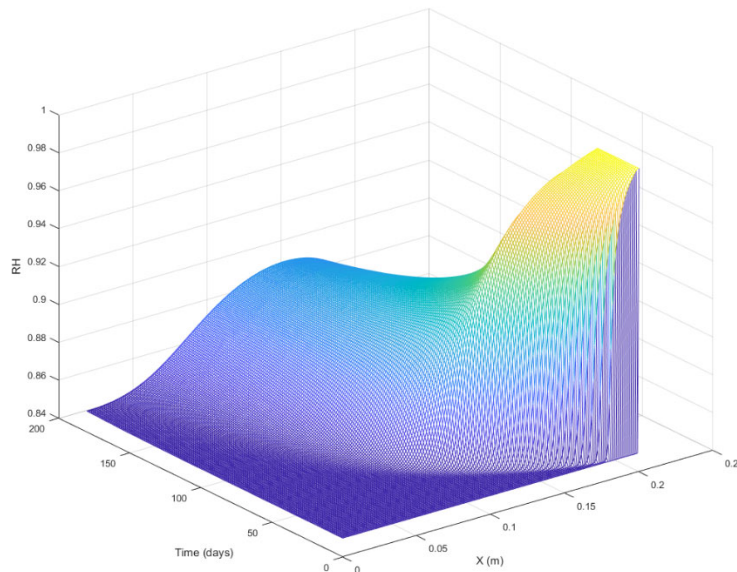


Fig. 5 Exempel på beräkningsresultat från *FEM φ -ca*.

Den används främst för utveckling och validering av materialmodeller men är även ett försteg till den skarpa mjukvaran som kommer att finnas i PPB. Fig. 5 visar ett typiskt exempel på resultatet från en beräkning i *FEM φ -ca*. En 0,2m tjock betongplatta, som ursprungligen uttorkats till 85% RF utsätts för vatteninsugning under 30 dagar på ovansidan för att därefter uttorkas mot luft med 85% RF.

Tidschema

En första version av PPB, med kapacitet att räkna på uttorkning under de första ca 6–9 månaderna efter gjutning, kommer att frisläppas under Q3 2018. Under Q1 2019 planeras en uppdatering av programmet, vilken i huvudsak baseras på kompletterande materialdata från långtidsmätningar av betongens fuktegenskaper. Detta kommer att utöka simuleringskapaciteten till längre tidsperioder samt ge grund för simulering av fuktsamverkan med olika golvbeläggningsmaterial.

Sammanfattningsvis innebär detta att betongens relativa fuktighet kommer att kunna simuleras på konstruktionens alla djup både under uttorkningsskedet men också upp till flera år efter golvläggning, då fukten omfördelas i konstruktionen. Simuleringsresultaten kommer således att visa det som i praktiken är av störst intresse för att bedöma om golvläggning är möjlig vid en viss tidpunkt, det vill säga relativa fuktigheten i gränssnittet mellan betongen och golvbeläggningsmaterial efter fuktomfördelning.

Artikelförfattare

M.Sc. Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

M.Sc.Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier, Tekniskt sakkunnig RBK

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

Dr. Fredrik Gränne, NCC Sverige AB

Ing. Mattias Gunnarsson, Fuksakkunnig, Peab Sverige AB

Artikeln är ursprungligen publicerad 2017-06-07.

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