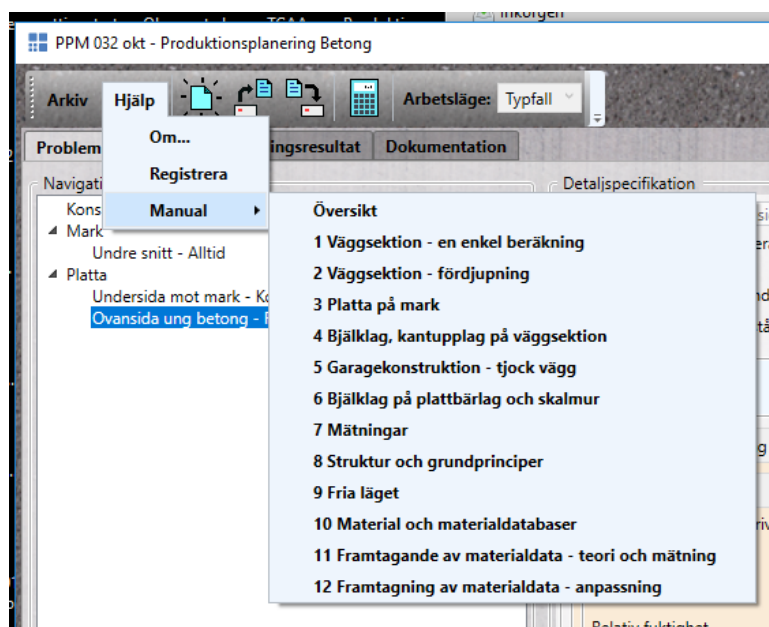


Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning

PPB version 2.0 är frisläppt. Programmet kan räkna på fukt och ersätter det gamla Torka S. Fuktberäkningen i PPB är nyutvecklad från grunden. Den är baserad på fullständigt reviderade materialmodeller och nyligen uppmätta fundamentalegenskaper för betong med Bascement. PPB simulerar temperatur- och fuktförlopp samtidigt, vilket gör att fukttillståndet hela tiden tar hänsyn till den varierande temperaturen. Fuktberäkningen tar hänsyn till s.k. hysteres i både sorption och transport, vilket ger ett korrekt materialbeteende inte bara vid ren uttorkning utan även vid omfördelning och uppfuktning. Simuleringen av hydratationsförloppet tar hänsyn till att cementet binder olika mängd vatten beroende på vid vilken temperatur det hydratiserar, vilket kan ge stora skillnader i självuttorkning. Nu är det för första gången möjligt att simulera ett uttorkningsförlopp och ta hänsyn till alla ovanstående fenomen samtidigt. I artikeln nedan behandlas PPB:s fuktfunktion och hur den skall användas, bakomliggande materialdata och deras inmätning samt slutligen hur betong med Bascement fungerar i praktiken.

Att räkna på fukt och värme i PPB

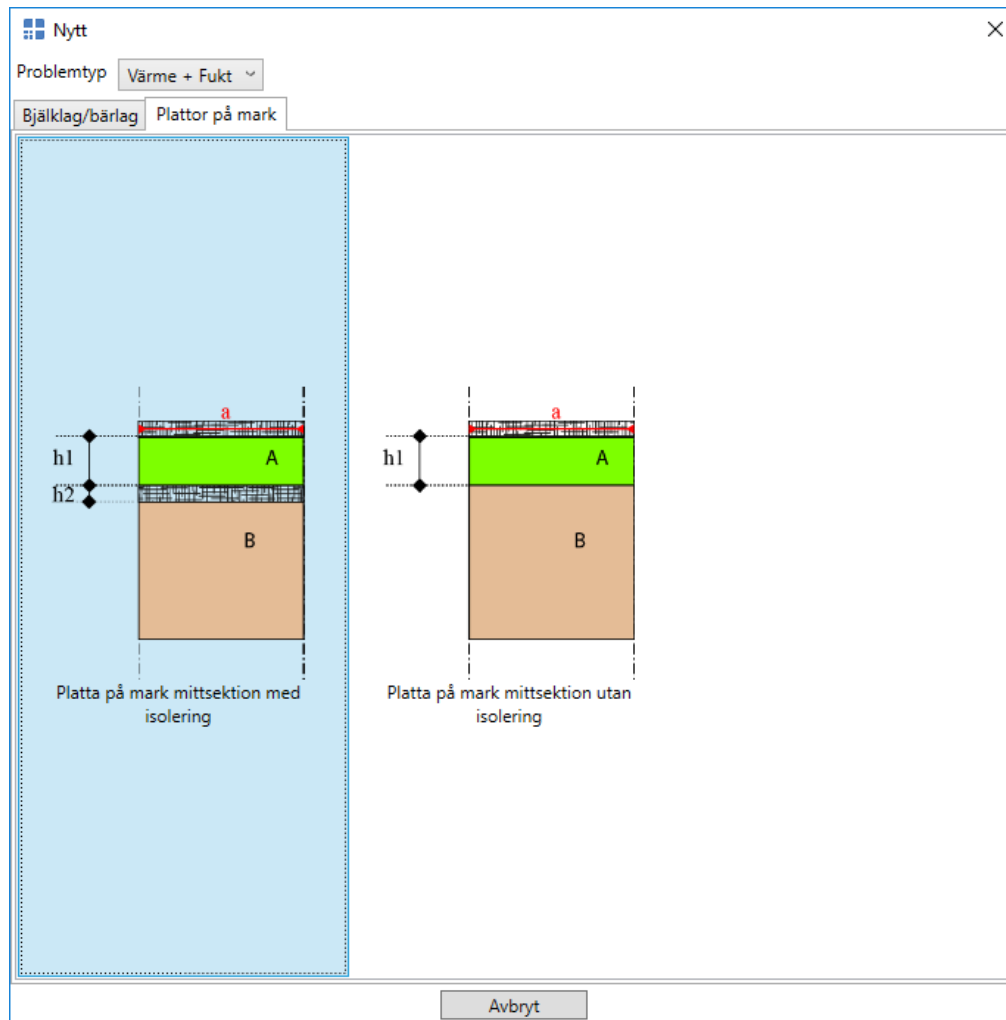
För att komma igång med PPB rekommenderas det i programvaran inbyggda utbildningsmaterialet. I menyn **Hjälp** -> **Manual** -> ... , som visas i Figur 1, finns utbildningsmaterialet i form av PDF-filer, uppdelat i 12 olika kapitel. För att snabbt komma igång med alla grundläggande funktioner rekommenderas kap. 1 – 6. Utbildningsmaterial avseende fuktdelen är inte framtaget ännu, men PPB fungerar till stor del likadant för värme + hållfasthet som för värme + fuktberäkning. Vidare i artikeln förutsätts grundläggande kunskap motsvarande kap. 1–6 och fokus kommer endast att ligga på de delar som tillkommit på grund av fukt.



Figur 1 Menyn Hjälp -> Manual -> ... med utbildningspaketets alla delar.

Att räkna på fukt i PPB innebär automatiskt att man även beräknar temperaturutvecklingen i konstruktionen fr.o.m. gjutningsögonblicket. Betongens självuttorkning är beroende av hydratationsförloppet i så hög grad att det inte går att anta någon form av "standardhydratation".

Uttorkningen kommer att bli olika beroende på när på året man gjuter och vad man gör med konstruktionen de första dagarna. Därför är det mycket viktigt att välja rätt startdatum för beräkningen och ort för väderleksdata, men även parametrar som i fuktsammanhang ofta får för litet fokus så som formisolering, täckning, formrivningstid, gjuttemperatur mm. När man skapar en ny beräkning, börjar man med att välja problemtyp och typfall, se Figur 2. I detta exempel väljs typfallet "Platta på mark mittsektion med isolering".



Figur 2 Val av problemtyp och typfall då ny beräkning skapas i PPB.

När typfallet är valt, matar man in information kring konstruktionen, betongen, den omgivande miljön mm. Den fuktspecifika informationen rör huvudsakligen vad som händer runt konstruktionen, dvs. för randbeskrivningar. Ett exempel på detta visas i Figur 3, där angivna parametrar avser vad som påverkar plattan från ovasidan.

Navigation

- Konstruktionsgeometri & tid
 - Mark
 - Undre snitt - Alltid
 - Isolering
 - Platta
 - Undersida mot isolering/mark - Kompletterande fuktrand
 - Ovansida ung betong - Från 0,00(h)

Detaljspecifikation

Kopiera detalj från minsta...

Föreskrivna krav

☒ Härdningsklass Härdningsklass 3 Kontrollpunkter...

Randtyp: Ovansida ung betong

Väder Vädret

☐ Använd initial beskrivning

Temperatur (°C) 15.0 ☐ Varierande Redigera...

Vindstyrka Vindstill [~1 (m/s)] ☐ Varierande Redigera...

Relativ fuktighet 80.0 ☐ Varierande Redigera...

☒ Använd klimatdata (baserat på öppna data från SMHI)

Övergå till klimatdata eft 7

Klimat för ort Stockholm

Tätt hus

☒ Använd

Tätt hus efter (dagar) 90

Torkningsklimat

☒ Använd

Torkningsklimat efter (dagar) 120

Lufttemperatur

☒ Temperatur (°C) 20.0

☐ Temperaturdifferens (°C) 10.0

Luftfuktighet

☒ Relativ fuktighet (%) 60.0

☐ Skillnad i ånghalt (g/m³) 4.00

Inomhusklimat

☒ Använd

Inomhusklimat efter (dagar) 360

Temperatur (°C) 20.0

Luftfuktighet

☒ Relativ fuktighet (%) 50.0

☐ Skillnad i ånghalt (g/m³) 2.00

Glattning

☒ Simulera Inställningar...

Täckning

Typ Ingen

Figur 3 Fuktspecifik information för ovansidan hos en platta på mark.

Beskrivningen av väderleken kan ske på 3 olika sätt:

- Initial beskrivning: Man specificerar själv omgivningens temperatur, vindförhållanden och relativ fuktighet, antingen som konstanta värden eller som funktioner av tid.
- Klimatdata: Man väljer ort i listan, som är regionsmässigt sorterad från norr till söder, och använder genomsnittsdata på månadsbasis från SMHI för orten i fråga.
- Kombinerad beskrivning: man använder bägge beskrivningarna ovan och då används initialbeskrivningen först och efter specificerat antal dagar övergår PPB till klimatdata för angiven ort.

I början av beräkningen är konstruktionen helt oskyddad och upplever direkt den ovan angivna väderleken. Vidare kan man ange en valfri kombination av tre olika typer av miljöer:

- Tätt hus – inverkan av vind och regn tas bort men väderlekens temperatur och relativ fuktighet gäller.

- Torkningsklimat – inverkan av vind och regn tas bort. Styrning kan nu anges av lufttemperatur (fast värde eller skillnad mot väderlek) samt luftfuktighet (fast RF eller skillnad i ånghalt mot väderlek).
- Inomhusklimat - inverkan av vind och regn tas bort och styrning av temperatur (fast värde) samt fuktmiljö (fast RF eller skillnad i ånghalt mot väderlek).

För varje miljö anger man huruvida den används över huvudtaget och, i så fall, när den startar. Om miljöåtgärderna kombineras måste torkningsklimatet inträffa efter tätt hus och inomhusklimatet efter torkningsklimatet.

Värmeberäkningen äger rum för hela konstruktionen vilket i detta fall är plattan, isoleringen samt 2 meter ner i marken (ner till det djup där marktemperaturen antas vara konstant). Fuktberäkningen begränsar sig till den unga betongen, betongplattan i detta exempel, och omfattar inte isoleringen eller marken. Detta innebär att man måste specificera vad som försiggår fuktmässigt under plattan, ett s.k. randvillkor för fukt. Detta görs genom att man väljer förseglad rand, dvs ingen fukttransport, eller anger ett RF och ett ångmotstånd, se Figur 4. I detta fall väljs förseglad rand, dvs. inget fuktutbyte med isoleringen.



Figur 4 Specifikation av fuktförhållanden för plattans underkant mot isolering.

Några andra data som kan vara lätta att missa, men är viktiga att kontrollera och justera i PPB:s beräkning är:

- Starttidpunkt (datum och tid) – styr klimatdata och väderleken
- Cementhalt och 28-dygns hållfasthet – betongrecept som väljs har förinställda standardvärden för dessa uppgifter, men normalt varierar de mellan betongstationerna. Cementhalten är själv mycket viktig då den påverkar temperaturförloppet. Då recept väljs efter vattencementtal, kommer cementhalten att styra även mängd blandningsvatten. 28-dygns hållfastheten påverkar automatisk formrivning, om den används, vilket har inverkan på temperaturen och indirekt även på fukten.
- Betongens temperatur vid gjutning samt temperatur för andra anslutande block i beräkningen, i detta fall mark samt isolering.
- Uppgifter som styr automatisk simulering av formrivning – påverkar temperatur
- Uppgifter som styr automatisk simulering av glättning (ytbehandling av betongen) – ev. täckning tas bort under glättningen, vilket påverkar temperaturförloppet.

När allt är inmatat återstår det att köra beräkningen och därefter att utvärdera resultaten.

Flera olika beräkningsresultat

PPB levererar ett antal olika slags resultat. Värmeberäkningen ger inte bara temperatur utan även andra hydratationsrelaterade parametrar. Fuktberäkningen har en delvis fördröjd start. Sorptions-

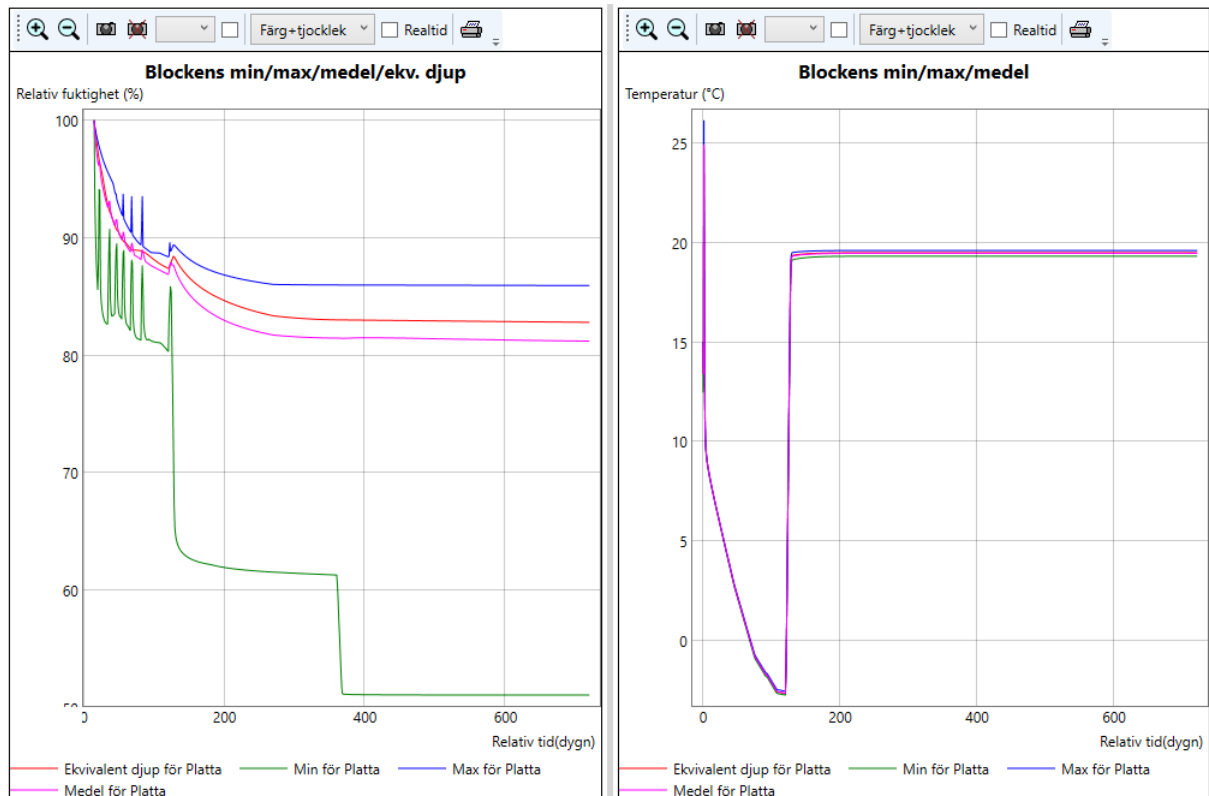
och transportegenskaper ändras mycket snabbt dagarna efter gjutning och vi har helt enkelt inte kunnat mäta upp dem. Av detta skäl simuleras endast kemisk bindning av vatten till följd av hydratationen direkt från start. Simulering av fuktflöde i konstruktionen och fuktutbyte med omgivningen startar 14 dagar efter gjutning. Tabellen nedan ger en sammanfattning av alla slags resultat som beräknas.

Resultattyp	Beräknas i	Beräknas fr.o.m.
Temperatur	Hela konstruktionen	Gjutning
Mognadsålder	Ung betong	Gjutning
Tryckhållfasthet	Ung betong	Gjutning
Relativ fuktighet	Ung betong	14 dagar efter gjutning
Ånghalt	Ung betong	14 dagar efter gjutning
Ångans partialtryck	Ung betong	14 dagar efter gjutning
Fysikaliskt bundet vatten	Ung betong	14 dagar efter gjutning
Kemiskt bundet vatten	Ung betong	Gjutning

Tabell 1 Sammanställning av vilka resultat som beräknas i PPB

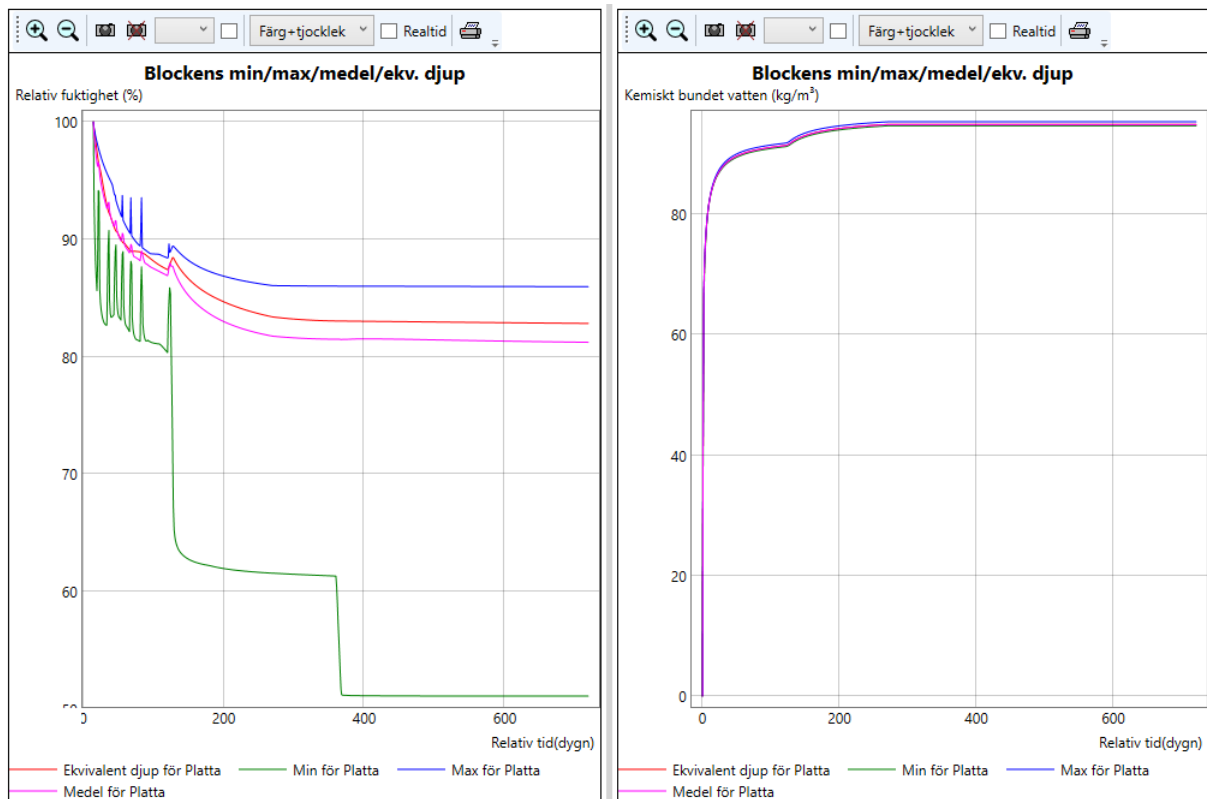
Dessa resultat kan presenteras i form av färgkartor och kurvdiagram. I kurvdiagrammen visas värden för det ekvivalenta djupet samt för min-, max- och medelvärden över konstruktionsblocket i fråga. De tre sistnämnda motsvarar alltså inte något fast djup utan visar verkligen min, max eller medel vid resp. tidpunkt. Vill man se andra kurvor, t.ex. för valfria djup i konstruktionen, kan man ändra i kurvdefinitionerna i diagrammen och även definiera egna diagram, se PPB:s Utbildningsmaterial del 2.

PPB:s kanske största styrka är möjligheten att titta på olika värden bredvid varandra och på detta sätt förstå bättre vad som egentligen händer i konstruktionen. Då PPB simulerar fukttillstånden under varierande temperaturförhållanden kan det vara av värde att visa RF och temperatur bredvid varandra, se Figur 5. I temperaturdiagrammet syns hydratationstoppen, därefter väderlekens inverkan under höst och vinter och slutligen uttorknings- och inomhusmiljön. I RF-diagrammet ser man också miljöns inverkan på uttorkningsförloppet, men även förskjutningarna på grund av förändring av temperaturen i konstruktionen.



Figur 5 Resultatexempel, relativ fuktighet och temperatur som kurvdiagram.

En annan intressant jämförelse bygger på kombinationen av RF och kemiskt bundet vatten, se Figur 6. Kurvor för kemiskt bundet vatten planar ut då självuttorkningen slutar. Att studera dessa två diagram ger en bra insikt hur mycket självuttorkningen resp. diffusionsuttorkningen bidrar till slutvärdet för RF.



Figur 6 Resultatexempel, relativ fuktighet och kemiskt bundet vatten som kurvdiagram.

Fundamentalegenskaper bakom materialdata

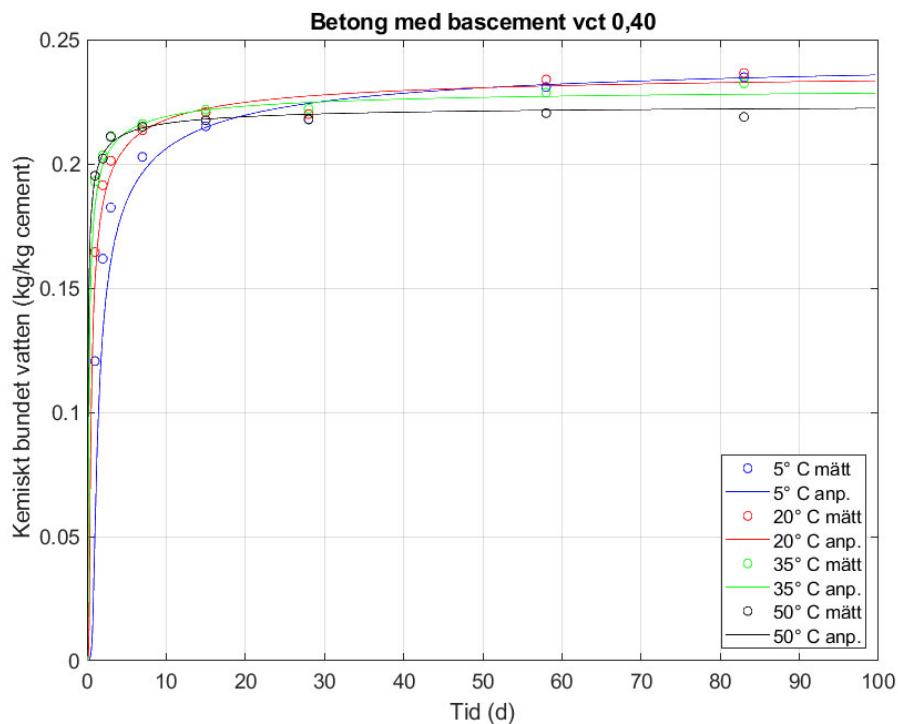
Materialdata för betong med Bascement baserar sig på mätningar, utförda vid avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH under 2016-2018. Först och främst har olika s.k. fundamentalegenskaper mätts in. I dessa mätningar försöker man separera ut en specifik egenskap och mäta upp hur den varierar med olika parametrar av intresse. I detta fall har fundamentalegenskaperna omfattat:

- Kemiskt bundet vatten.
- Fysikaliskt bundet vatten, s.k. sorption.
- Transportförmåga.

Utöver dessa utfördes även mätningar av olika uttorkningsförlöpp där relativ fuktighet samt mängd avdunstat vatten registrerades. Samtliga mätningar baserar sig på betong med tre olika vattencementtal: 0.32, 0.40 och 0.55. Skarpa industriella recept för konsistensklass S4 med helkross användes. Bascementet i försöken innehöll 14,4 % flygaska.

Kemiskt bundet vatten mättes in genom s.k. termogravimetrisk analys. Ett litet hydratiserat betongprov (ca 1,5 g) hettas successivt upp till ca 1000 °C samtidigt som provet vägs och viktförlusten registreras som funktion av temperatur. Under upphettningen bryts hydrationsprodukter sönder och det kemiskt bundna vattnet frigörs. Viktförlusten kan således räknas om till hur mycket vatten cementet bundit kemiskt.

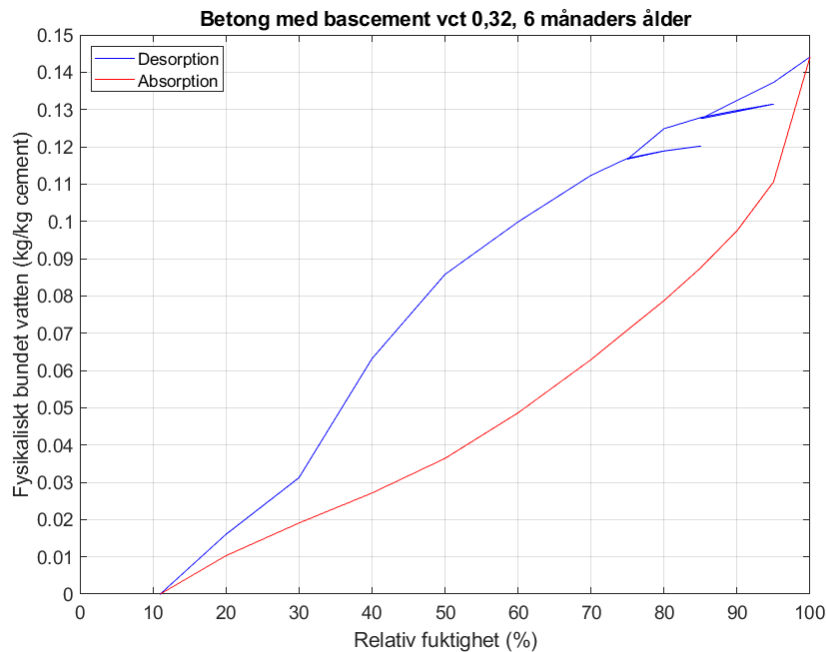
Denna analys har utförts för prover som fått hydratisera i förseglat tillstånd, s.k. membranhärdning, vid olika temperaturer. Ett exempel på erhållna resultat ges av Figur 7 där både uppmätta värden samt anpassade kurvor visas för vct 0.40.



Figur 7 Kemiskt bundet vatten, vikt per vikt cement, som funktion av tid för betong med bascement vct 0.40, membranhärdat vid olika temperaturer, uppmätta samt modellanpassade värden.

Den registrerade nivån kan uppfattas som hög. Här bör nämnas att mätningen utformades så att den skulle fungera ihop med mätningen av fysikaliskt bundet vatten – den ena skulle börja mäta där den andra slutade. Det är brukligt att torka prover i ugn vid 105 °C före termogravimetrisk analys för att få bort fysikaliskt bundet vatten. Problemet med detta förfarande, som tidigare upptäckts, se Feldman & Ramachandran 1971, är att en del av det kemiskt bundna vattnet, lösare bundet s.k. kristallvatten, också lämnar provet. För att få vara konsekvent i den totala inmätningen valdes uttorkning vid 20 °C och 11 % RF som förbehandling före termogravimetrisk analys, då det är vid exakt samma förhållanden som inmätning av fysikaliskt bundet vatten slutar (och definierar nollpunkt för sorption). Detta resulterar i en högre nivå av kemiskt bundet vatten än vad historiskt observerats.

Sorption, dvs. fysikaliskt bundet vatten, mättes upp genom att man placerar ett litet betongprov i en s.k. sorptionsvåg. Därefter varierar man luftens relativa fuktighet och mäter upp viktförändringen i provet. På så sätt kan man koppla den relativa fuktigheten, som provet är i jämvikt med, och den mängd fysikaliskt bundet vatten som provet innehåller. Ett exempel på sorptionsdata ges av Figur 8 där kurvor för desorption (uttorkning) samt absorption (uppfuktning) visas för 6 månader gammal betong med vct 0.32. På desorptionskurvan ser man dessutom två avstickande kurvstycken. Det är s.k. skanningloopar – man växlar till uppfuktning ett par steg och sedan återgår till uttorkning.



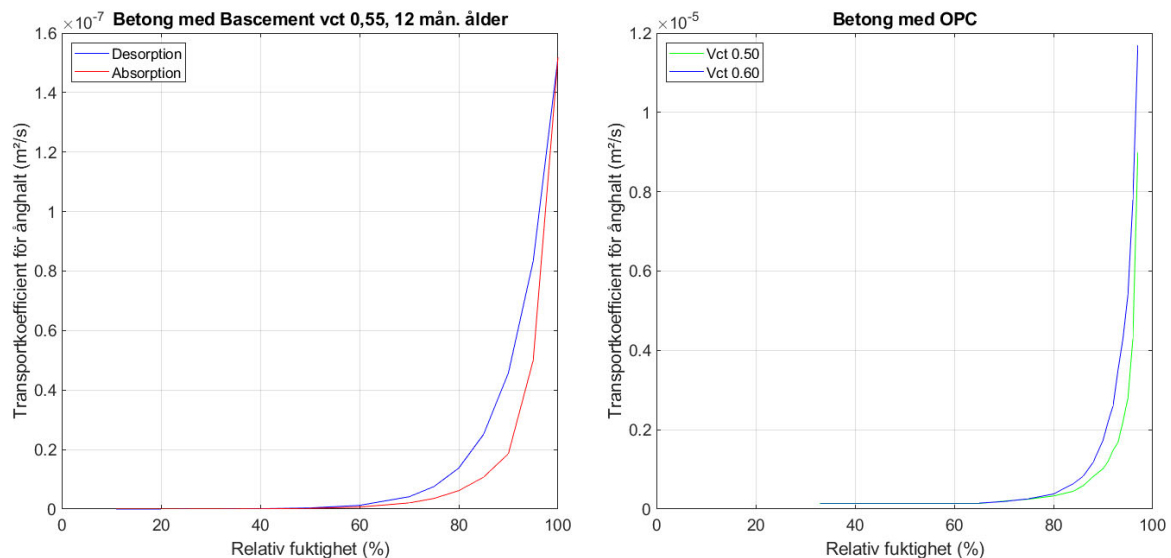
Figur 8 Fysikaliskt bundet vatten, vikt per vikt cement, vid 20 °C som funktion av relativ fuktighet för betong med Bascement vct 0.32 och 6 månaders ålder, vid desorption inkl. två skanningloopar och absorption.

Här bör nämnas att 11 % RF valdes som slutnivå för uttorkning och nollpunkt för sorption. Vid lägre relativa fuktigheter avgår nämligen även en del av kemiskt bundet vatten, se Feldman & Ramachandran 1971. Samma tillstånd, 11 % RF vid 20 °C, användes som start för mätning av kemiskt bundet vatten.

Inmätning av transportförmågan kan ske på olika sätt. Det mest klassiska är kanske koppmetoden, där man utsätter en skiva av betong för olika RF på respektive sida och genom vägning får fram flödet igenom skivan. Det är en bra metod men det tar lång tid att få fram resultat med den. LTH:s ursprungliga förslag till inmätning av transport byggde på koppmetoden och hade vi använt oss av den hade vi fått vänta ytterligare 1-1,5 år på resultat. I stället bestämdes transportförmågan i två steg, först genom mätning av dynamiskt fuktförlopp och sedan slutlig kalibrering genom totalanpassning mot valideringsmätning av uttorkningsförlopp.

I det första steget återanvändes registrerade förlopp från sorptionsmätning, med den skillnaden att i stället för slutvikten för varje steg i RF, vilket används i sorptionsdata, så kom hela insvägningsförloppet till användning. Då hastigheten i viktförändringen beror av transportförmågan vid resp. RF kan man med mer avancerad matematisk analys beräkna transportkoefficienterna från dessa förlopp - ett förfarande som liknar andra beräkningar av transportkoefficienter från dynamiska förlopp t.ex. enligt Zhang m.fl. 2016. Denna metod testades först på data från både sorptionsvåg och koppförsök för bruk med OPC samt bruk med slagginblandning från Olsson 2018. Här vill författarna rikta ett stort tack till Nilla Olsson, NCC, för att låta oss få tillgång till dessa data. Med validerad metodik beräknades transportdata från sorptionsmätningar för betong med Bascement. Då dessa mätningar gjordes på betongprov där endast en liten del av ballasten fanns med (mer fick inte plats i sorptionsvågen), gav dessa anpassningar en transportkurva med en något överskattad transportförmåga för det lilla provet, vilket därför behövde en korrektionsfaktor för att motsvara den

riktiga betongen. När samtliga fundamentaldata slutligen användes i gemensam uttorkningsberäkning och resultaten jämfördes mot valideringsmätningar kunde dessa korrektionsfaktorer justeras in. Detta förfarande har därmed möjliggjort att branschen och användarna av PPB inte behövt vänta ytterligare över 1 år på ett nytt fuktverktyg. Ett exempel på erhållna transportdata ges i Figur 9 där transportkoefficient för ånghalt visas vid olika RF vid både uttorkning (desorption) och uppfuktning (absorption) för 12 månader gammal betong med vct 0.55.



Figur 9 Transportkoefficient för ånghalt, som funktion av relativ fuktighet för betong med Bascement vct 0,55 och 12 månaders ålder, vid desorption samt absorption, samt betong med OPC vct 0,50 och 0,60 efter Hedenblad 1993. Observera skillnad i tiopotens för storleken på transportkoefficienterna mellan diagrammen.

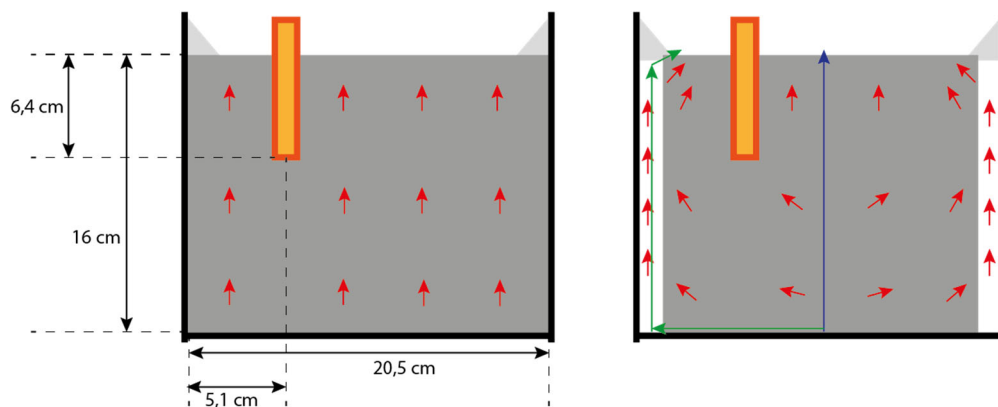
Detta är en direkt bekräftelse på vad vi tidigare skrivit om den ökade tätheten i betong med mineraliska tillsatser där puzzolan reaktion äger rum, Stelmarczyk m.fl. 2017a, b, c samt 2018. Eftersom flygaskan reagerar efter att merparten av klinkern hydratiserat, är det med hög sannolikhet just den som delvis täpper till porsystemet. Detta ger vid vct 0.55 en transportförmåga som är ca en sextiondel (1/60) jämfört med betong med ren OPC för samma vct, se Hedenblad 1993. För lägre vattencementtal är förhållandet mellan transportförmågan för betong med Bascement och med rent OPC inte lika drastiskt. Generellt sett, ju lägre vct desto mindre blir den relativa förtätningen av betong med Bascement jämfört med betong med OPC. Det antyder att flygaskan inte kan förtäta porsystemet hur långt som helst, utan att det finns en gräns även för detta fenomen. Det är dock fortfarande så att minskande vct för betong med Bascement ger minskande fukttransport och de ovan presenterade kurvorna ger de högsta värdena för fukttransport, som vi lyckats få fram i denna inmätning.

Validering av materialdata

Framtagningen av fundamentaldata innebar mätning av tre olika aspekter av betongen var för sig. Alla dessa mätningar är behäftade med olika slags mätfel. Även om man anstränger sig för att minimera mätfelen och göra de separata mätningarna så kompatibla med varandra som möjligt, kommer det alltid att finnas behov av mindre justeringar när man slutligen sätter ihop dessa

delresultat till en helhet. Därför utfördes även s.k. valideringsmätningar, där betong utsattes för enkelsidig uttorkning och resulterande RF samt mängd avgivet vatten uppmättes.

För att slippa hantera stora stycken betong, motsvarande ett riktigt bjälklag eller platta på mark, föreslogs "hinkmetoden" av LTH. Man gjuter betong i en 5 liters målarhink och tätningsmassa anbringas i kanten mellan betong och hinkvägg. Därefter låter man hinken vara öppen och betongen får diffusionstorka genom överytan. Betongens RF registreras med RF-givare monterade i mäthål som borrarats från ovansidan. Valideringsmätningarna utfördes följaktligen enligt LTH:s rekommendation. När slutlig simulering och justering av fundamentaldata mot uttorkningsresultat från hinkarna skulle ske ringde larmklockorna, då de nödvändiga justeringarna för transport var mycket större än förväntat och dessutom åt fel håll. Fler uttorkningsmätningar behövdes och då med annan metodik för att avgöra var felet låg. Som tur var kunde Sveriges Byggindustrier, Skanska, NCC samt Peab förse oss med ett lämpligt antal, väl dokumenterade och inmätta, skarpa gjutningar. Jämförelsen gav ett entydigt resultat: hinkarna överskattade fukttransporten och uttorkningen. Vid närmare analys är det inte svårt att förstå varför.



Figur 10 Hinkar för uttorkningsmätning, tvärsnitt genom mitten. Vänster – så skulle det fungera i teorin, höger – så fungerar det i praktiken. Röda pilar – fuktflöde, blåa och gröna pilar – jämförelse mellan två möjliga vägar för fuktflöde från mitten av botten, grön med mycket mindre motstånd än blå. Orange markering indikerar placering av RF-givare. Luftspaltens bredd i höger figur har överdrivits för tydlighetens skull.

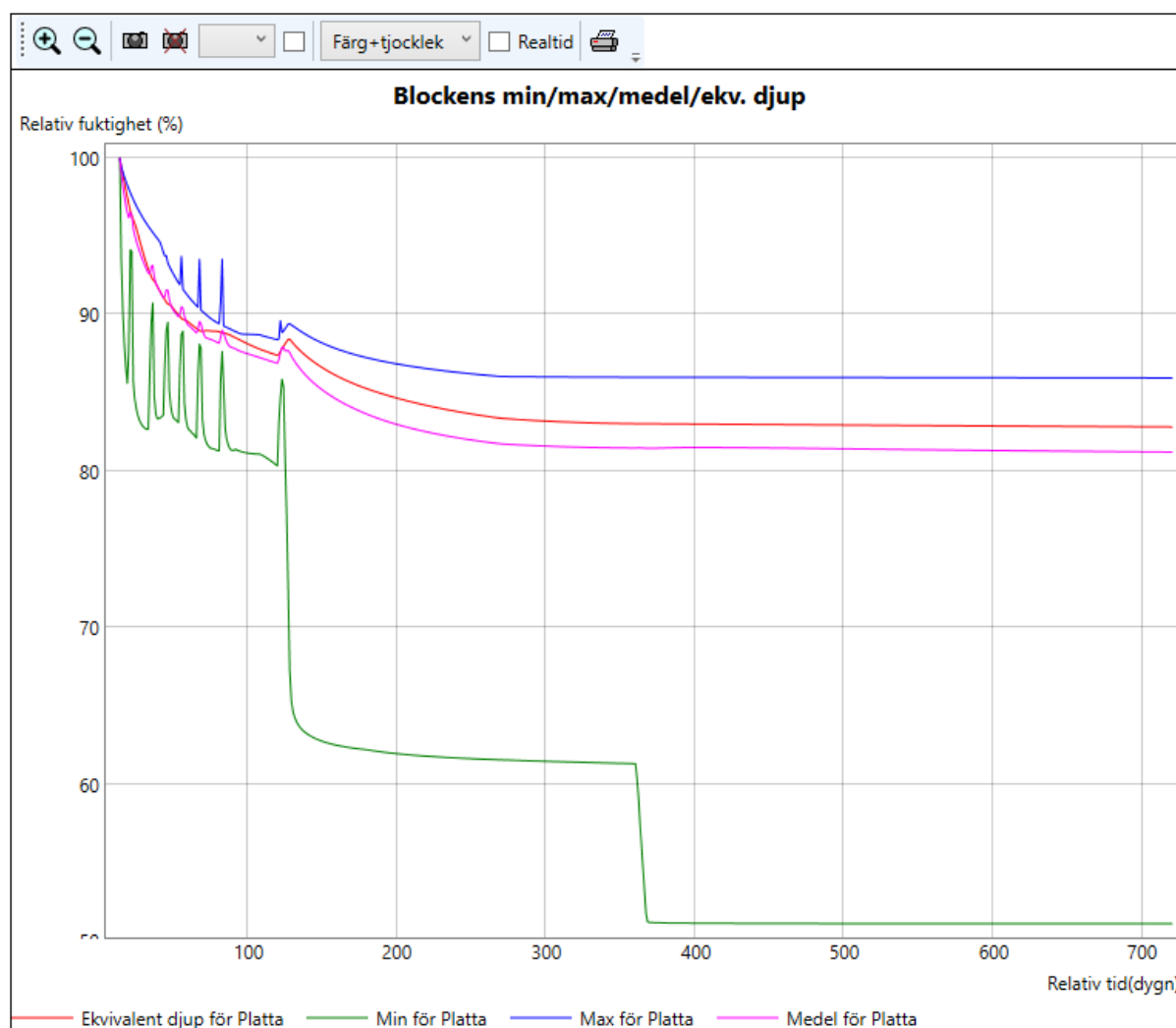
Förklaringen ligger i betongens krympning, som gör att betongen minskar något i diametern efter gjutning så att det uppstår en luftspalt mellan den och hinkens vägg. Denna luftspalt kommer att fungera som en jättelång por och störa fukttransporten i betongen så att den inte motsvarar enkelsidig uttorkning, se Figur 10. Man kan tycka att tätningsmassan skulle kunna avhjälpa problemet. Det är dock en illusion, vilket inses genom jämförelse av möjliga vägval för betongfukten i mitten av hinkens botten att nå luften ovan, se blå och grön markering i Figur 10. Då naturen fungerar enligt minsta motståndets princip kommer fukten i merparten av hinken uppleva transporten genom sidospalten som lättare än genom betongen rakt upp till ytan.

I vårt projekt löstes problemet med valideringsdata genom att skarpa mätdata från industrin fick ersätta de läckande hinkarna. Nya simuleringar gjordes och de resulterande justeringarna låg inom förväntade och rimliga gränser. Vi vill dock varna för "hinkmetoden" avseende simulering av enkelsidig uttorkning i allmänhet då den använts på sistone inte bara i vårt projekt utan även i andra mätningar, t.ex. presenterade av Cementa och LTH i höstas, se Johansson & Johansson 2018. Denna

metod fungerar inte för simulering av enkelsidig uttorkning. Transporten kommer att överskattas, vilket i sin tur kommer att ge en överskattning av fuktutbyte med omgivningen.

I princip omöjligt att diffusionsuttorka

Hur fungerar då betong med Bascement i praktiken? Låt oss titta på en 0.14m tjock platta som gjuts på 0.1m cellplast på mark. Gjutningen sker i början på oktober i Stockholmstrakten. Plattan täcks inte efter gjutning. Initialt väljs betong med vct 0.55.

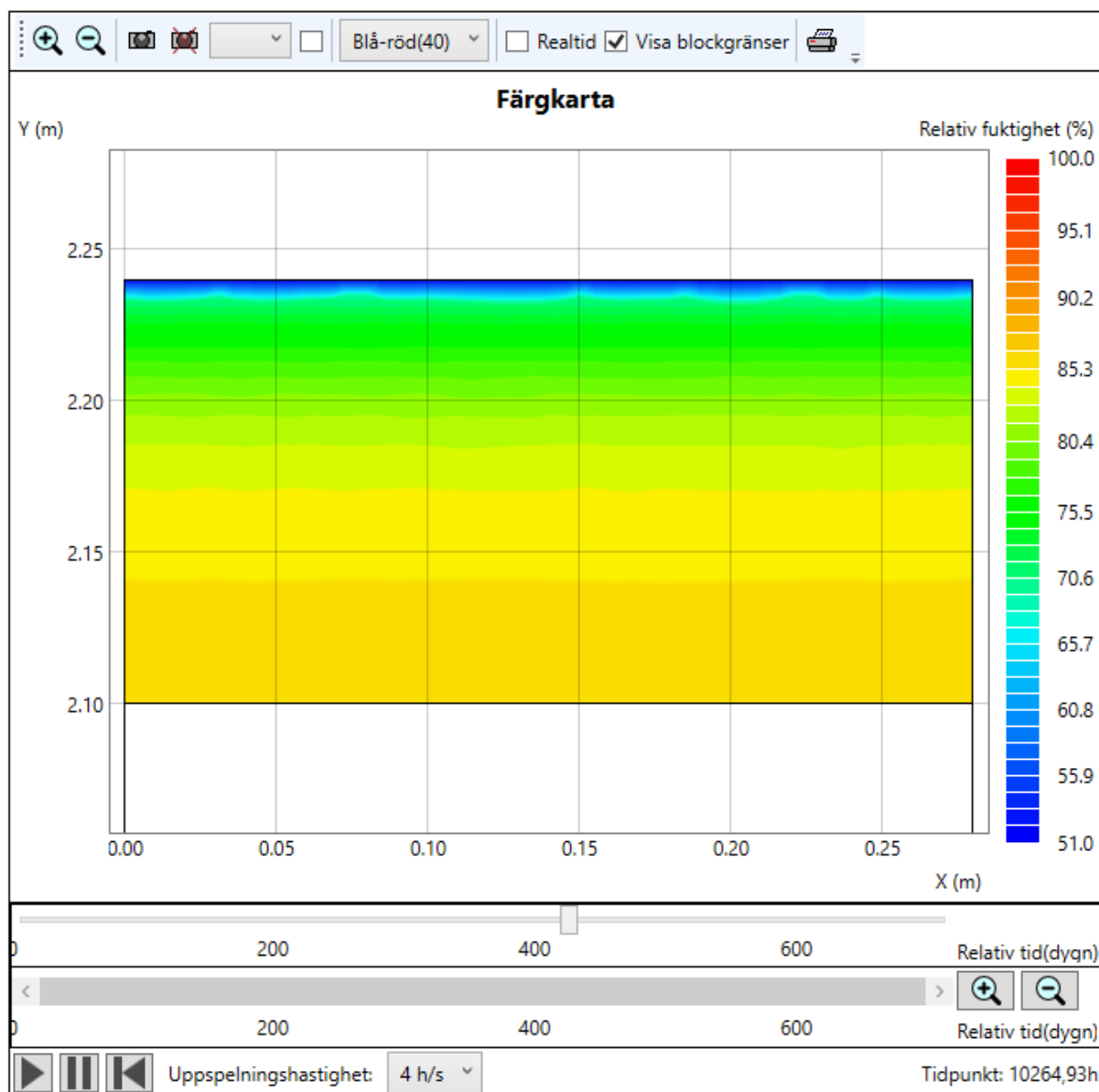


Figur 11 Relativ fuktighet för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, vct 0.55.

Av kurvdiagrammet för relativ fuktighet, se Figur 11, framgår att RF på ekvivalent djup ser ut att stanna strax under 85% RF. Då en beräkning i PPB inte automatiskt inkluderar påslag för mätosäkerhet, se RBK 2017, måste mätosäkerhetens storlek vara känd och dras ifrån målvärdet avseende RF innan en jämförelse görs. Om plattan skall uppfylla kravet på 85% RF på ekvivalent djup och mätosäkerheten för den mätmetod som används vid fuktmätningen är 2,5% måste man alltså sikta på ca 82,5% på ekvivalent djup i beräkningen.

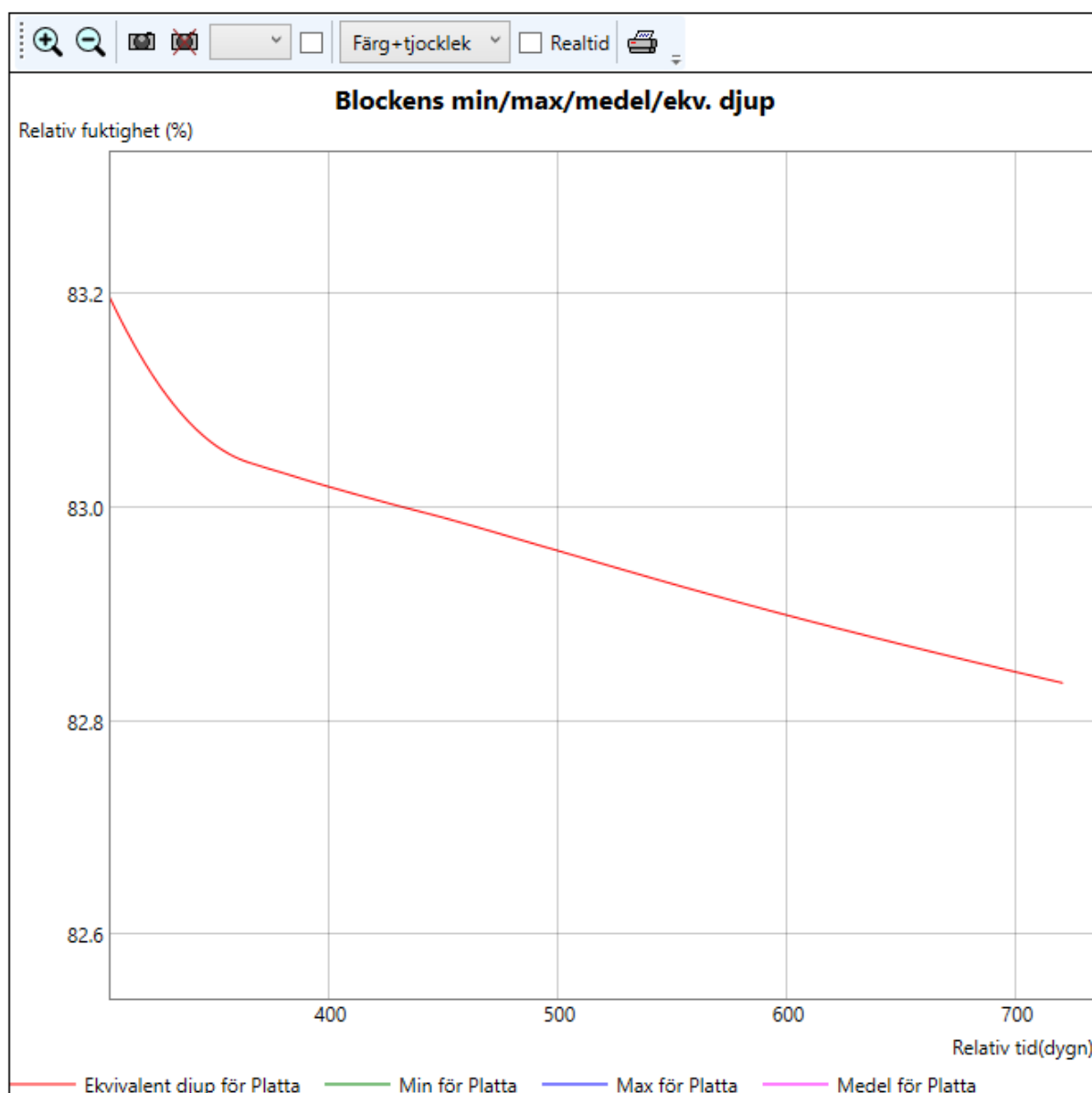
Analyserar man vidare resultaten, förstår man vad som händer i konstruktionen:

- Först syns att antal spikar, främst i maxvärdet för RF vilka motsvarar inverkan av simulerat regn.
- Under samma period minskar kurvorna stadigt, vilket är en effekt av självuttorkning.
- Vid 90 dagar blir det tätt hus och regnets inverkan upphör.
- Vid 120 dagar höjs temperaturen från vintermiljö till 20° C i uttorknings- samt senare inomhusmiljö, vilket förorsakar ett hopp i RF då sorptionen och den termodynamiska jämvikten i porsystemet förskjuts, för att sedan fortsätta uttorkningen längs litet annorlunda kurvor, jämför med tidigare visad Figur 5.
- När självuttorkningen upphör, där tidpunkten framgår av jämförelse med kurvdiagram för kemiskt bundet vatten, jämför med tidigare visad Figur 6, stabiliseras värdet på ekvivalent djup och endast minvärdet ser ut att förändras.
- För att förstå min och maxvärden för RF bör man ta en titt på färgkartan och identifiera var i konstruktionen de ligger, se Figur 12. Minvärdet ligger på ovansidan som är i kontakt med först uttorknings- och sedan inomhusklimatet. Maxvärdet ligger i botten av plattan, där temperaturen varit som högst och den kemiska bindningen varit sämst, se vidare i artikel för förklaring.



Figur 12 Färgkarta för relativ fuktighet vid ca 430 dygn för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, vct 0.55.

Resultatet av denna simulering är alltså inte tillräckligt bra då konstruktionen inte lyckats uppnå mål-RF korrigerat med mätosäkerhet, ca 82,5% under de första två åren efter gjutning. En fråga man rimligen ställer sig är varför det inte verkar finnas någon effekt av diffusionsuttorkning på ekvivalent djup. Om man förstörar skalan i kurvdiagrammet för relativ fuktighet för kurvan för ekvivalent djup, se Figur 13, ser man att det visst sker en diffusionsuttorkning. Men den är oerhört långsam, ca någgra tiondels procent RF per år. Detta förklaras väl av de låga transportegenskaperna för betongen, se tidigare visad Figur 9. Här bör också tilläggas att detta är det högsta inmätta vattencementtalet, dvs. den mest öppna betongen. Lägre vct kommer att ge ännu mindre transport av fukt och ännu långsammare diffusionsuttorkning.



Figur 13 *Relativ fuktighet på ekvivalent djup för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, vct 0.55, förstora del motsvarande ren diffusionsuttorkning.*

För att uppfylla uttorkningskravet gör vi fler beräkningar med betong med lägre vct. Nyckelresultaten för dessa ges av Tabell 2.

Vct	RF efter självuttorkning på ekvivalent djup	Tidpunkt för 82,5 % RF på ekvivalent djup	Max. temperatur
0.55	83.4 %	Ej uppnådd	26 °C
0.40	80.5 %	189 d	33 °C
0.32	75.7 %	135 d	33 °C

Tabell 2 *Uttorkningsresultat för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, gjuten i Stockholm i början på oktober utan täckning. Simuleringstid 2 år efter gjutning.*

Här ses klar och tydligt att sänkt vct löser uttorkningsproblemet i detta fall, då betong med vct 0.40 uppfyller uttorkningskravet efter 189 dagar och har man mer bråttom så kan man sänka vct ytterligare.

Betong med bascement blir alltså tätare och får en mycket lägre transportförmåga än motsvarande med endast OPC. Detta är ett resultat i enlighet med kunskapen om tätheten för betong med andra mineraliska tillsatser som tidigare presenterat i Stelmarczyk m.fl. 2017c och 2018. Diffusionsuttorkningen är så låg att den i praktiken kan ses som obefintlig för de flesta konstruktioner.

Självtorkning beroende av initialt hydratationsförlopp

Att sänka vct är dock inte alltid lösningen på fuktproblemen. Detta har att göra med hydratationsförloppet i betongen, närmare bestämt dess hastighet med maxtemperatur som huvudindikator. Fenomenologin bakom är något komplex och kräver egentligen en egen artikel, vilken också planeras. Just nu kan man förenklat säga att cement binder vatten olika effektivt beroende på vid vilken temperatur reaktionen sker. Ju långsammare reaktion och lägre temperatur desto fler gram vatten binds kemiskt per gram cement. Fördelen är att man får mer självtorkning ut ur cementet om man hydratiserar långsamt. Nackdelen är att man får mindre självtorkning ut ur samma cement om man hydratiserar snabbt.

I de föregående beräkningsexemplen var maxtemperaturerna relativt låga, se Tabell 2. Detta berodde på att ingen täckning användes och gjutningen skedde i början av oktober. Om vi tar samma gjutning med samma förutsättningar och utför den i början av augusti bli resultatet mycket annorlunda, se sammanställning i Tabell 3.

Vct	RF efter självtorkning på ekvivalent djup	Tidpunkt för 82,5 % RF på ekvivalent djup	Max. temperatur
0.55	84.6 %	Ej uppnådd	35 °C
0.40	84.1 %	Ej uppnådd	43 °C
0.32	83.2 %	Ej uppnådd	45 °C

Tabell 3 Uttorkningsresultat för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, gjuten i Stockholm i början på augusti utan täckning. Simuleringstid 2 år efter gjutning.

Maxvärden för temperatur växer med ca 10 °C då omgivningens temperatur är högre än i det föregående fallet. Detta påverkar kemisk bindning negativt och inte ens vct 0.32 ser ut att uppfylla uttorkningskravet inom 2 år efter gjutning.

I sådana fall måste man fundera på mer okonventionella åtgärder för att minska maxtemperaturen under gjutningen. Minskad cementhalt i receptet brukar vara en bra idé. Mer om detta i mitten av februari i en kommande artikel om temperatureffekter och uttorkningsåtgärder.

Betongens självtorkning är alltså starkt beroende av hydratationsförloppet. Samma betong gjuten vid lägre temperatur ger bättre självtorkning än vid högre. Skillnaden kan vara så stor att uttorkningskravet missas. Därför är lågt vct inte alltid det självklara svaret på ett uttorkningsproblem. Det är dags att bli uppmärksam på vad som händer med betongen de första dagarna. Detta kan vara skillnaden mellan ett uppfyllt uttorkningskrav och ett missat.

Framtiden

Tack vare SBUF:s omfattande finansiering av projekten 13197, 13198 samt 13140 har vi nu frisläppt PPB med fuktberäkning med materialdata för betong med Bascement. Detta är den första versionen

av PPB med en fuktberäkning. De bakomliggande forsknings- och utvecklingsprojekten har tagit fram mer resultat än vad som redovisat ovan. Vad som inte hunnit göras ännu är att få till en bra och lättanvänd implementation av dessa i PPB. Vi kommer därför att söka finansiering för nya projekt med sikte på att implementera bl.a.:

- Simulering av hela golvsystem med omfördelning av fukt i avjämning, matta och lim.
- Fullskalig 2-dimensionell beräkning med typfall för bl.a. voter, hörn, pågjutning på plattbärlag och HDF.

Data, modeller och fungerande beräkningar på prototypnivå finns redan. Det som saknas är en användarvänlig implementation i PPB. Förhoppningsvis kommer vi återkomma med dessa funktioner i närliggande releaser av PPB.

Slutsatser

Produktionsplanering Betong 2.0 räknar på fukt. Simuleringen omfattar icke-isotermiskt fukttillstånd i betong med Bascement och tar hänsyn till hysteres i både sorption och transport samt till en rad temperatureffekter som t.ex. varierande effektivitet i cementets förmåga att binda vatten kemiskt.

Bakomliggande materialdata baserar sig på separata inmätningar av fundamentalegenskaper för kemisk bindning av vatten, sorption samt transportförmågan. Dessa är sedan justerande tillsammans mot fullskaliga uttorkningsförsök.

Betong med Bascement, dvs. med flygaska, är precis som betong med slagg eller silikastoft, mycket tätare än betong med ren OPC, när det gäller transportförmågan för fukt. Denna sänkning av fukttransporten är så stor att den i princip eliminerar diffusionsuttorkning.

PPB visar tydligt även inverkan av hydratationsförloppet på självuttorkningen. 10 °C skillnad i maxtemperatur de första dagarna kan medföra missat uttorkningskrav även för vct 0.32. Detta innebär att det inte finns någon "standardhydratation" man kan utgå ifrån vid planering av uttorkning. Man måste ta full hänsyn till hela gjutförfarandet för att kunna bedöma självuttorkningen korrekt.

Fundamentaldata bakom PPB blev inmätta för Bascement med 14,4% flygaska. Slutlig validering och injustering gjordes mot betong baserat på olika batcher av Bascement, antagligen med varierande inblandning av flygaska. Cementa själva har presenterat uttorkningsmätningar baserade på Bascement med 11% flygaska. Det har förekommit uppgifter att flygaskhalten i Bascement har varit så låg som 6%. Dessa variationer kan ge en skillnad mellan verklig uttorkning och beräkningsresultat i PPB. Det är idag inte möjligt att ta hänsyn till varierande mängd flygaska i beräkningen. Att tillverkaren i fråga justerar flygaskans inblandningsgrad och löpande förändrar fuktegenskaper för sin produkt kan vi endast beklaga.

Referenser

Feldman & Ramachandran 1971 – R.F. Feldman, V.S. Ramachandran, *Differentiation of Interlayer and Adsorbed Water in Hydrated Portland Cement by Thermal Analysis*, Cement and Concrete Research, 1971.

Johansson & Johansson 2018 – P. Johansson, N. Johansson, *Bindemedlens inverkan på betongens uttorkning*, presentation vid Fuktcentrums Informationsdag i Lund 2018-11-29, finns att ladda ner som PDF från www.fuktcentrum.lth.se

Olsson m.fl. 2018 – N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, samt V. Baroghel-Bouny, *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*, Cement and Concrete Research, 2018.

RBK 2017 – RBK, *Manual – Fuktmätning i betong*, version 6, kap 2.3

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

Stelmarczyk m.fl. 2017b – M. Stelmarczyk, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Självuttorkning av betong*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2017c – M. Stelmarczyk, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2018 – M. Stelmarczyk, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Finns det någon fördel med modern, tät betong?* www.sbuf.se/ppb 2018

Zhang m.fl. 2016 – Z. Zhang, M. Thiery, V. Baroghel-Bouny, *Investigation of moisture transport properties of cementitious materials*, Cement and Concrete Research, 2016.

Artikelförfattare

Civ.ing. Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

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

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

Dr. Fredrik Gränne, NCC Sverige AB