

Mars 2019

Självuttorkning och temperatur

A photograph of concrete steps and a wall. The concrete shows signs of weathering, including discoloration and small pits, which are likely the result of self-healing and temperature effects discussed in the document. The lighting creates strong shadows, emphasizing the texture of the concrete.

BYGGFÖRETAGEN
➤ Produktionsplanering betong

Självtuttorkning och temperatur, dvs. hur man får uttorkning att fungera

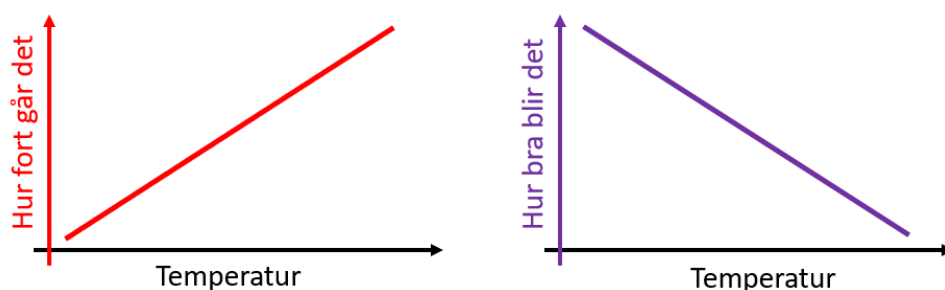
Rapporten nedan återger en artikel som tidigare publicerats på www.sbuf.se/ppb.

Självtuttorkning i betong bestäms inte endast av betongens vattencementtal (vct). Den är i allra högsta grad beroende av hydratationsförloppet och vid viken temperatur hydratationen sker. Detta medför att variationer i väderlek och årstid, grad av isolering och täckning, konstruktionstjocklek samt gjuttemperatur påverkar självtuttorkningen för betong med samma vct. Denna artikel går systematiskt igenom vilka materialtekniska fenomen som ligger bakom temperaturens effekt på självtuttorkningen. Vidare studeras effekten i både förenklade fall såväl som i mer realistiska gjutningar. Slutligen undersöks temperaturens inverkan på mätningar och jämförelser av uttorkning i labbmiljö. Det observeras vidare att temperaturberoendet ställer höga krav på utformning, förståelse och hantering av provkroppar och mätmetodens begränsningar för att korrekta slutsatser skall kunna dras av mätresultat. Det kan visare konstateras att mätning av endast RF ger en mycket begränsad bild av modern tät betongs uttorkning och kan inte användas för att med säkerhet skilja mellan självtuttorkning och diffusionsuttorkning.

Hydratation, temperatur och kemisk bindning av vatten

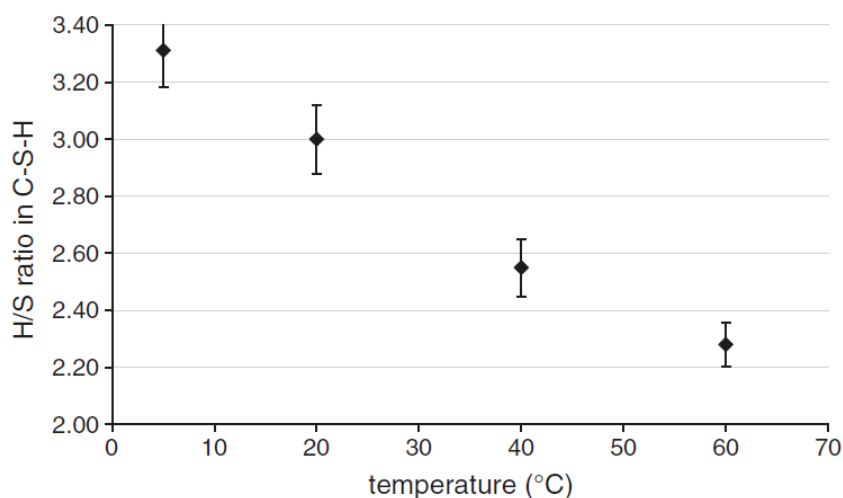
Under många år har den allmänna uppfattningen varit att hydratationens beroende av temperaturen endast har att göra med hastigheten. Resultatet, avseende hållfasthet eller grad av självtuttorkning, skulle alltså bli detsamma oberoende av temperaturförloppet. Det enda som skulle skilja var hur fort man kom till en viss hållfasthet eller grad av självtuttorkning. Genom ny kunskap börjar denna syn sakta luckras upp, först genom att man upptäckte att sluthållfastheten för betongen blir lägre om den får hydratisera fort (vid hög temperatur) och högre om man låter den hydratisera långsamt (vid låg temperatur). Internationellt kom indikationerna på detta fenomen på 1960-talet, se Verbeck & Helmuth 1968. I Sverige kom de första labbresultaten inom området under 1980-talet. Därefter följde en rad undersökningar,

som slutligen resulterade i de första modellerna för industriellt bruk ca 2007–2008, och blev implementerade i beräkningsverktygen ConTeSt och BetoPlus 2007. Senare kom indikation att denna princip även kan gälla uttorkning, se Johansson 2012. Idag har vi en djupare insikt i vad som sker i betongen, när den får hydratisera vid olika temperaturer och vi kan bättre förstå detta fenomen. Betongens hydratation har ett dubbelt beroende av temperaturen. Det är naturligtvis mycket riktigt att hastigheten i de kemiska reaktionerna är kopplat till just temperatur. Ju varmare det är desto fortare går det. Men det finns även ett annat beroende som rör inte bara ”hur fort det går” utan ”hur bra det blir”. Det andra beroendet är dessutom riktat tvärt om mot temperaturen jämfört med det första – det tycks blir bättre ju kallare det är, dvs. ju långsammare det går, se Figur 1.



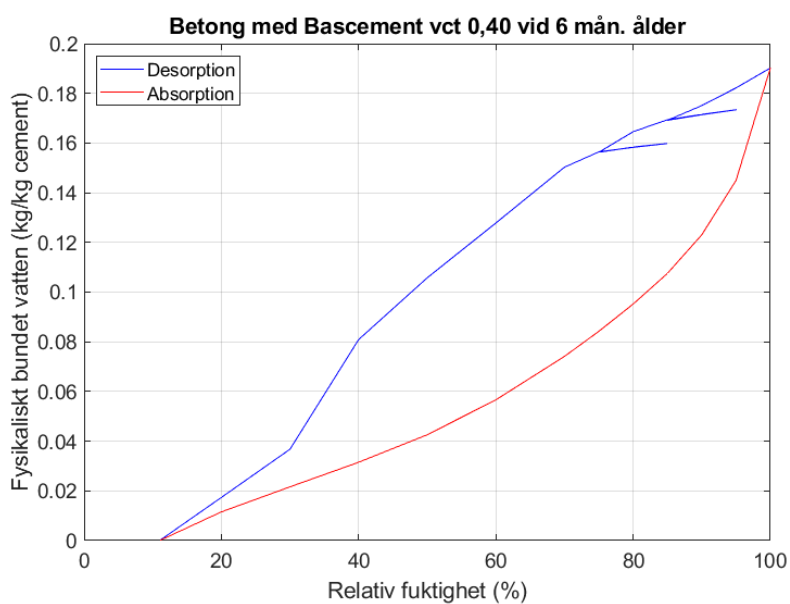
Figur 1. Två principer för temperaturens inverkan på hydratation

Bland anledningar till detta har man inom forskningen föreslagit skillnader i porstruktur som bildas, olika sammansättning av slutprodukter för hydratationen samt olika proportioner mellan hur mycket av slutprodukterna som bildas, beroende på vid vilken temperatur betongen hydratiserar. I denna artikel tittar vi huvudsakligen på slutprodukternas sammansättning. Den dominerande slutprodukten är den s.k. C-S-H-gelen. Den bildas tillsammans med portlandit som slutprodukt av de dominerande klinkermaterialens (kalciumsilikaterna alit och belit) reaktioner med vatten. Även puzzolaner, som reagerar med vatten och portlandit, bildar C-S-H-gel, dock inte riktigt likadan. Många ämnen har en väl definierad kemisk sammansättning, som t.ex. portlandit. C-S-H-gelen är inte lika enkel i sin sammansättning eller struktur. Den består huvudsakligen av kalciumoxid, kiseldioxid och vatten med små inslag av även andra ämnen. Dess struktur kan variera på flera olika sätt. I denna artikel fokuserar vi på att den kan innehålla olika mycket kemiskt bundet vatten, i proportion till de andra huvudbeståndsdelarna. En noggrann undersökning av egenskaper hos C-S-H-gelen som bildats vid olika temperaturer ges i Gallucci m.fl. 2013. Nedan återges en figur ur denna artikel, där förhållandet mellan mängd vatten och mängd kiseldioxid bestämts som funktion av hydratationstemperatur, se Figur 2.



Figur 2. Förhållande mellan mängd kemiskt bundet vatten och kiseldioxid i C-S-H-gel som funktion av hydratationstemperatur, från Gallucci m.fl. 2013.

Då mängden kiseldioxid är i princip proportionerlig mot mängd hydratiserad cement, kan slutsatsen dras att C-S-H-gelen kan binda upp till ca 50% mer vatten i proportion till mängd hydratiserad cement, om den får hydratisera vid 5 °C i stället för 60 °C. Ett normalt hydratationsförlopp i en typisk platta på mark sker inte vid konstant temperatur, vilket gör det svårt att direkt översätta denna siffra till en verklig effekt. Däremot kan man studera desorptionskurvan och bilda sig en uppfattning om hur mycket procentuell skillnad i mängd kemiskt bundet vatten kan betyda i uppnådd procent RF.



Figur 3. Fysikaliskt bundet vatten (kg/kg cement) som funktion av relativ fuktighet för betong med Bascement, vct 0,40, under desorption och absorption vid 20 °C, inmätt inom SBUF 13198.

För att göra en sådan bedömning får man utgå från mängd fysikaliskt bundet vatten för olika RF, vilket kan avläsas i Figur 3. Därefter tar man vattencementtalet i fråga och subtraherar den mängd vatten som kommer att bindas fysikaliskt i porsystemet. Då får man den mängd vatten som man måste få bort från porsystemet – antingen genom att binda det kemiskt eller genom diffusion. Låt oss anta att diffusionen är så liten att man kan bortse ifrån den, vilket för betong med Bascement visats i Stelmarczyk m.fl. 2019. Detta innebär att allt vatten som skall bort från porsystemet måste bindas kemiskt. Tabellen nedan visar en jämförelse för just sådana beräkningar för betong med Bascement med vct 0,40. Sista kolumnen antar 95% RF som jämförelsenivå och visar hur många procent mer vatten som behöver bindas kemiskt för att sänka RF till en lägre nivå.

RF [%]	Fysikaliskt bundet vatten vid desorption [kg/kg C]	Vatten som behöver bindas [kg/kg C]	Ökning jämfört med 95% RF
95	0,1822	0,2178	0,00%
90	0,1751	0,2249	3,27%
85	0,1692	0,2308	5,99%
80	0,1646	0,2354	8,10%
75	0,1563	0,2437	11,90%

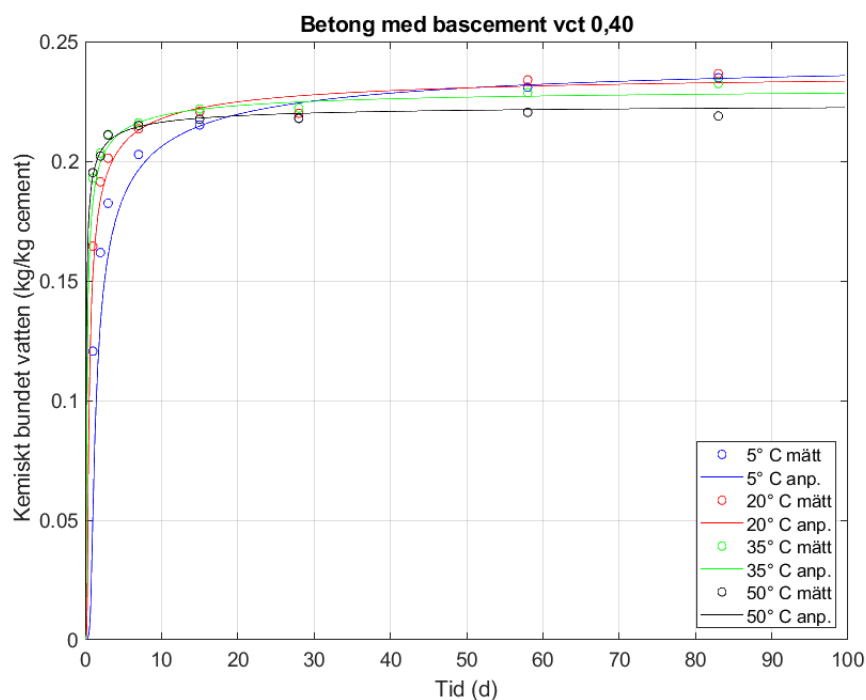
Tabell 1. Jämförelse mellan mängd kemiskt bundet vatten vid självtvorkning till olika relativa fuktigheter med kemiskt bundet vatten vid självtvorkning till 95% RF som referens, för betong med Bascement, vct 0,40 vid 6 månaders ålder.

Skillnaden för självtvorkning till 95% resp. 85% RF för denna typiska betong är bara ca 6% mer vatten som bundits kemiskt. Detta antyder att det borde finnas en rejäl tvorkningspotential i temperaturberoendet hos kemisk bindning av vatten om man lyckas styra och utnyttja det.

Under ett normalt hydratationsförlopp reagerar ca 70–80% av cementet under de första dygnet efter gjutningen. Temperaturen under denna period kommer att bestämma hur mycket vatten varje kg cement binder. Detta innebär att:

- **Ju högre temperaturoppen blir under hydratationsförloppet desto sämre utnyttjas cementets förmåga att binda vatten kemiskt**
- **Snabb hydratation ger sämre självtvorkning – långsam hydratation ger bättre självtvorkning**
- **Hydratationsförloppet under de första dagarna efter gjutning är av högsta betydelse för hur bra självtvorkning man får**
- **Det finns inget standardmässigt hydratationsförfarande ur fuktsynvinkel**
- **Vct är inte allena rådande och bestämmer inte självtvorkning**

Nyckeln till att utnyttja detta är naturligtvis en effektiv prediktering av detta fenomen och det första steget är inmätning av detta beroende. Under inmätningen av bascementets fundamentalegenskaper fångades temperaturberoendet in hos kemiskt bundet vatten, se Figur 4.



Figur 4. Kemiskt bundet vatten (kg/kg cement) som funktion av tid för betong med Bascement, vct 0,40 härdad i förseglad tillstånd vid olika temperaturer, inmätt inom SBUF 13198.

Figuren ovan visar klart bägge typer av temperaturberoende hos hydratationen:

- I början ser man att de högsta hydratationstemperaturerna ger den snabbaste tillväxten av kemiskt bundet vatten
- Efter en tid kommer dock den s.k. cross-over-effekten då kurvorna för de högre temperaturerna planar ut medan kurvor för de lägre fortsätter växa, för att så småningom växa förbi kurvor för de högre temperaturerna och resultera i högre slutvärden.

För betong med Bascement blir skillnaden i mängd kemiskt bundet vatten inte lika stor som indikerat i Figur 2. Här handlar det om ca. 12–19% skillnad mellan hydratation vid 5 resp. 60°C, beroende av vattencementtalet.

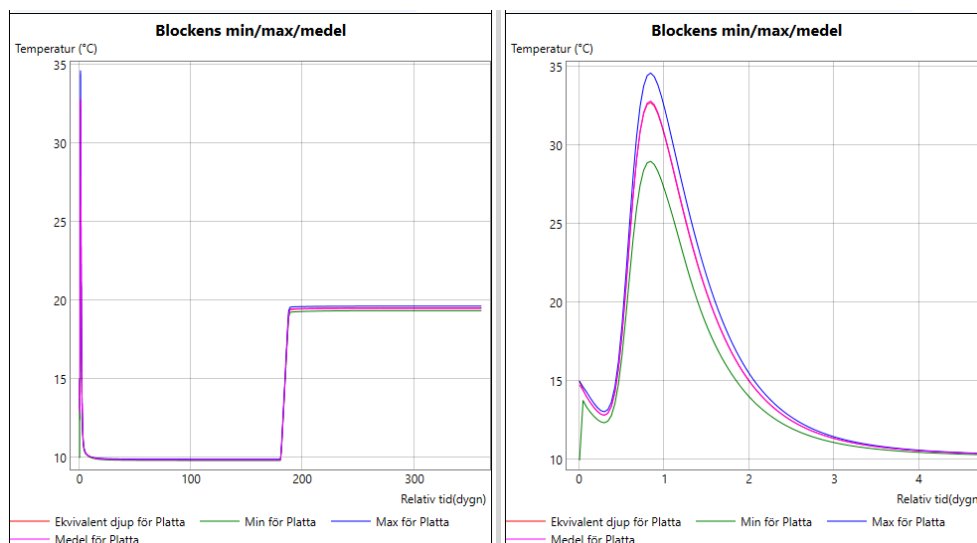
Då Produktionsplanering Betong (PPB) utför en icke isotermisk simulering av fukttillstånd kombinerad med en temperatursimulering, får man bägge temperaturberoendena automatiskt in i uttorkningsberäkningen. Det enda som användaren behöver göra är att noggrant specificera samtliga förutsättningar för gjutningen:

- **Material:**
 - **Betongrecept**
 - **Ev. korrigering av cementhalt och 28-dygnshållfasthet**
 - **Gjuttemperatur**
- **Omgivande material:**
 - **Ev. marktyp och ev. isolering**
 - **Starttemperatur**
- **Väderlek**
 - **Ort för klimatdata från SMHI**
 - **Ev. detaljbild av startveckan (temperatur, vind och RF)**
- **Hantering av gjutningen**
 - **Ev. form inkl. isolering och formrivning**
 - **Ev. täckning inkl. tidpunkt för borttagning**
 - **Ev. glättning**
- **Hantering av uttorkning**
 - **Tätt hus**
 - **Ev. torkningsklimat**
 - **Ev. inomhusklimat**

För kännedom kan noteras PPB:s nuvarande materialmodell (v 2.0.14) för hydratation skiljer inte på hurvida hydratationen avtar p.g.a. att cementet tar slut eller att det kapillärkondenserade vattnet tar slut i lämpliga porer. Detta kan medföra att PPB överskattar den kemiska bindningen av vatten i betong under 75–80% RF. För uttorkningssimulering i tät betong är detta ett estetiskt problem då det inträffar efter att man väl uppfyllt sitt uttorkningskrav i konstruktionsdelen. Ny och korrigerad version av materialmodellen finns tillgänglig och kommer att frisläppas tillsammans med omfördelningsberäkningar i hela golvsystem i en kommande uppdatering. Fram till dess bör beräknade uttorkningsnivåer under 75–80% RF tas med en nypa salt.

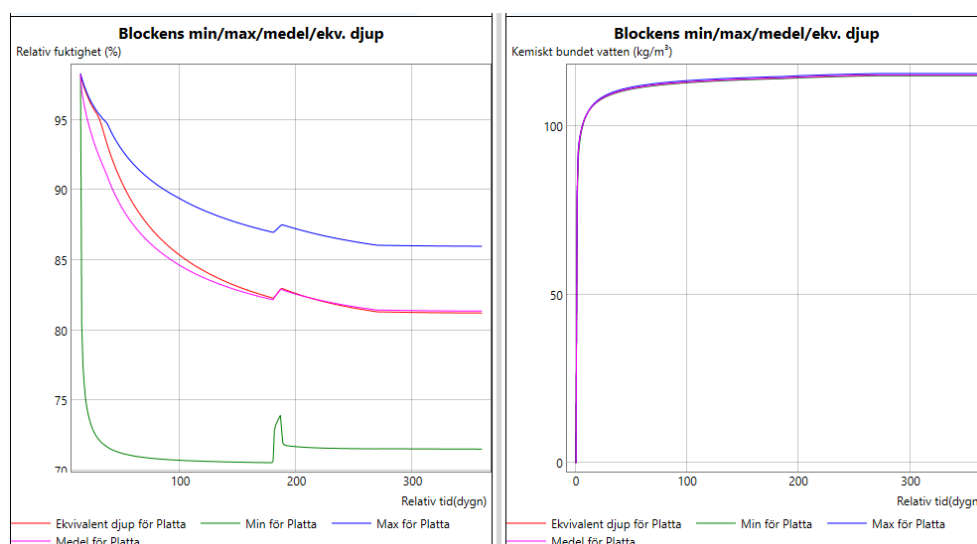
Självtuttorkningen är beroende av hydratationstemperaturen

■ För att få en förbättrad förståelse hur temperatureffekten påverkar verkliga konstruktioner med sina förutsättningar studeras en 140 mm tjock platta på mark, som ett illustrativt exempel. Plattan gjuts på 100 mm isolering. För att förenkla fallet något och göra det mer lämpligt för denna studie specificeras väderleken manuellt till 10 °C, vindstilla och 70% RF, med en temperaturhöjning till 20 °C efter 180 dagar. På ytan läggs en presenning för att garanterat få bort fuktutbyte med omgivningen. Presenningen läggs på betongytan 1 vecka efter gjutningen för att inte störa värmeutbytet under hydratationstoppen. Den aktuella betongen har ett vct 0,40 och gjuttemperaturen är 15 °C. Simuleringen omfattar 1 år och slutvärden för uppnådda fuktresultat jämförs.



Figur 5. Temperaturutveckling för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 10 °C initialt och 20 °C efter ett halvår, vänster - hela förloppet, höger – de första dygnen.

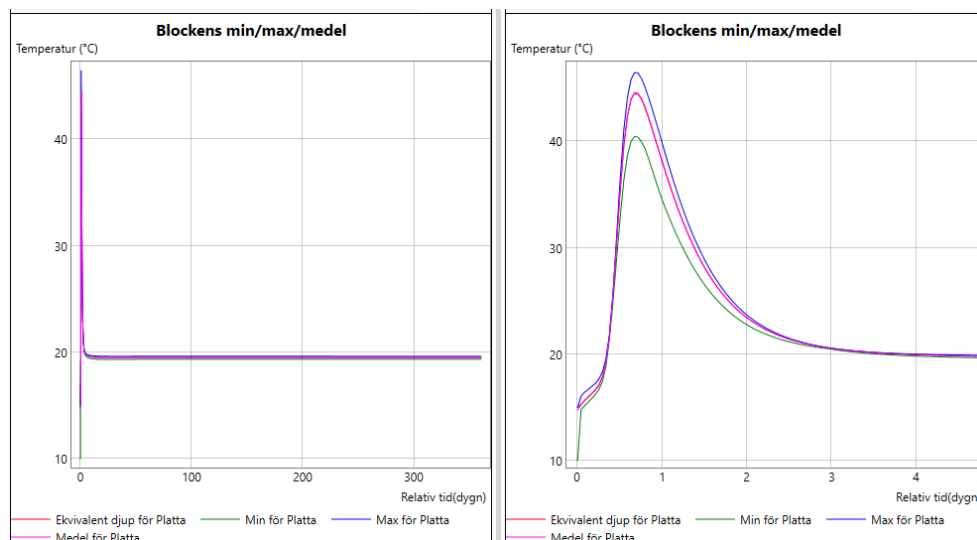
Figur 5 visar temperaturförloppet under simuleringen. Först ser man ett typiskt härdningsförlopp med en temperaturtopp strax innan ett dygn, för att sedan återgå till den omgivande temperaturen, som ändras efter ett halvår. Det ekvivalenta djupet uppnår som max en temperatur på ca 32,7 °C.



Figur 6. Relativ fuktighet (vänster) och kemiskt bundet vatten (höger) för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 10 °C initialt och 20 °C efter ett halvår.

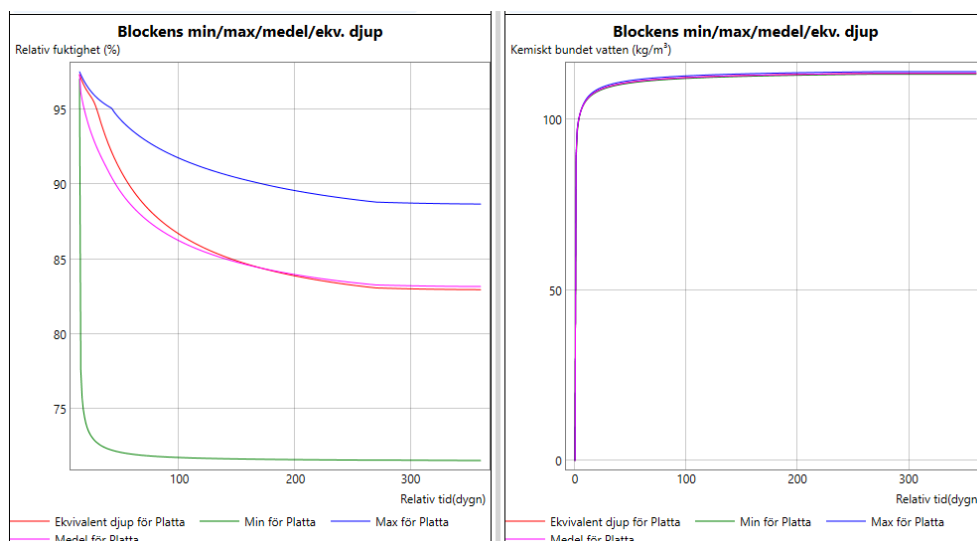
Figur 6 visar både den relativa fuktigheten och det kemiskt bundna vattnet. På det ekvivalenta djupet blir RF ca 81,3 % och det kemiskt bundna vattnet stannar på 115,3 kg/m³. Vad händer nu om den omgivande temperaturen stiger? Låt oss göra en ny

beräkning med samma förutsättningar och 20 °C som lufttemperatur under hela beräkningen.



Figur 7. Temperaturutveckling för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 20 °C under hela förloppet, vänster - hela förloppet, höger – de första dygnen.

Figur 7 visar det erhållna temperaturförloppet i konstruktionen. Maxvärdet för temperaturen på ekvivalent djup hamnar nu på ca 44,5 °C. Här bör nämnas att den kemiska bindningen kommer att påverkas av temperaturen under hela hydrationsförloppet och inte bara av temperaturtoppen. Maxvärdet används här endast som en enkel indikator på ungefär hur fort hydratationen gick.



Figur 8. Relativ fuktighet (vänster) och kemiskt bundet vatten (höger) för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 20 °C under hela förloppet.

Figur 8 visar vidare den erhållna relativa fuktigheten och det kemiskt bundna vattnet för den nya beräkningen. Det ekvivalenta djupets värden hamnar på ca 83,0 % RF och 113,5 kg/m³. Hade målet varit att uppnå 85% RF med en säkerhetsmarginal på 2,5%, vilket är ett relativt vanligt scenario, hade denna skillnad i lufttemperaturen varit avgörande för om tvorkningen lyckas. Man kan tycka att ca 2 kg/m³ skillnad i kemiskt bundet vatten inte låter särskilt stort, men med en flack desorptionsisoterm kan den i detta fall ge en skillnad på 1,7% i RF.

Lufttemperatur under första halvåret (°C)	Max temperatur för ekvivalent djup (°C)	Uppnådd relativ fuktighet för ekvivalent djup (%)	Uppnådd kemisk bindning av vatten för ekvivalent djup (kg/m ³)
5	25,5	78	118,7
10	32,7	81,3	115,3
20	44,5	83	113,5
25	49,4	83,8	112,7

Tabell 2. Jämförelse av max. temperatur, uppnådd relativ fuktighet samt kemisk bindning av vatten efter 1 år för 140 mm platta på 100 mm isolering och mark, med varierande lufttemperatur första halvåret och 20 °C därefter.

Tabell 2 visar ett antal beräkningar som tittar på exakt samma exempel som ovan (platta på mark), där lufttemperaturen under första halvåret varierats. Skillnaderna är klart tillräckliga för att orsaka huvudbry på en arbetsplats om man råkar ligga på fel sida om dem. Här skall understrykas att i dessa jämförelser varierades endast lufttemperaturen. I verkligheten kommer skillnader i blåst, grad av isolering och ev. täckning, tjockleken på konstruktionen samt valet av vct att påverka värmeutvecklingen, hydratationsförloppet, den kemiska bindningen av vatten och slutligen graden av erhållen självttvorkning.

Årstidsvariationer

Nu kan det vara läge att knyta ihop den nyvunna kunskapen om temperaturens inverkan på självttvorkning med ytterligare ett par realistiska situationer. Låt oss för detta ändamål återigen titta, fast nu något noggrannare, på sammanställningen av tvorkningsresultat presenterade i den förra artikeln i detta forum, Stelmarczyk m.fl. 2019. Det handlar alltså om samma konstruktion – 140 mm platta på 100 mm isolering på mark – som nu gjuts under mer realistiska förhållanden. Väderdata från SMHI används för Stockholm som ort. Marktemperatur och gjuttemperatur anpassas något till årstiden. I första jämförelsen utfördes gjutningen i början på oktober, utan täckning av plattan, se Tabell 3.

Vct	RF efter självtorkning 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 3. 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.

Den andra jämförelsen titta på samma gjutning som sker i början av augusti, se Tabell 4.

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 4. 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.

Vid jämförelse inom resp. tabell syns en tydlig variation i uttorkningsresultat som funktion av studerat vct. Detta är vad man förväntar sig då lägre vct leder till högre grad av självtorkning på grund av det mer fördelaktiga förhållandet mellan mängd vatten och mängd cement, som binder vattnet. Vid jämförelse mellan tabellerna syns temperatureffekten. Då främst omgivningen, men även den levererade betongen är normalt varmare i augusti, blir maxtemperaturen i konstruktionen högre och självtorkningen inte lika effektiv för samma betong och resp. vct.

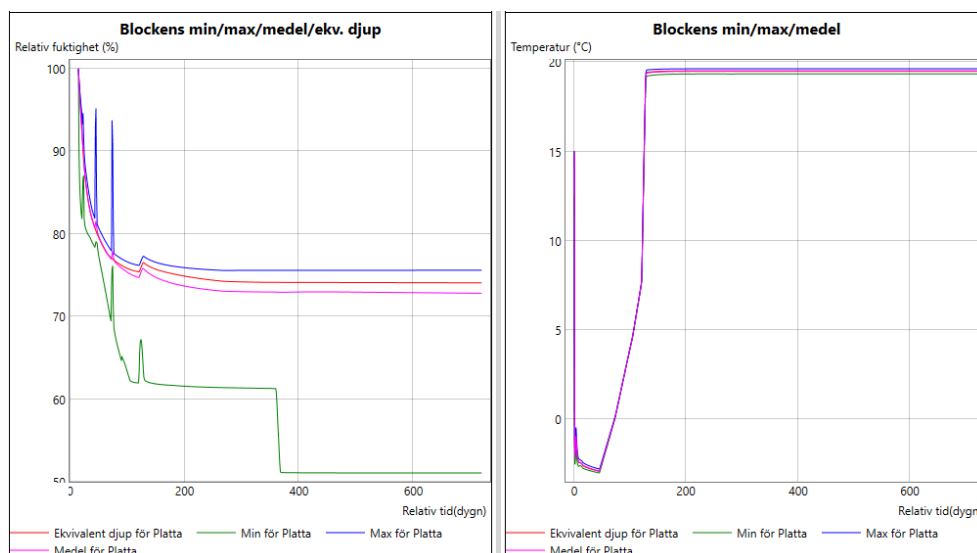
Här är värt att notera att:

- även ett mycket lågt vct (0,32) inte medför en självtorkning för augustigjutningen, som uppfyller uttorkningskravet
- det är inte endast maxtemperaturen som har betydelse utan hela temperaturförloppet – i en simulering tidigare fanns betong vct 0,4 med en maxtemperatur något högre än i augustigjutningen ovan men med något lägre resulterande RF, jämför Tabell 4 med Tabell 2.
- vissa konstruktioner är inte lämpliga att gjuta sommartid med betong med Bascement om tuffare uttorkningskrav skall uppfyllas

Kylan inte endast av godo

Vid jämförelse av sommar- och höstgjutning är det lätt att dra slutsatsen att kylan är lösningen på uttorkningsproblem. Till viss del kan det vara så. Låt oss titta på en vintergjutning av samma platta på mark för att se var de goda förutsättningarna tar slut. Stockholm behålls som ort. Gjuttidpunkten flyttas till början av januari och en något

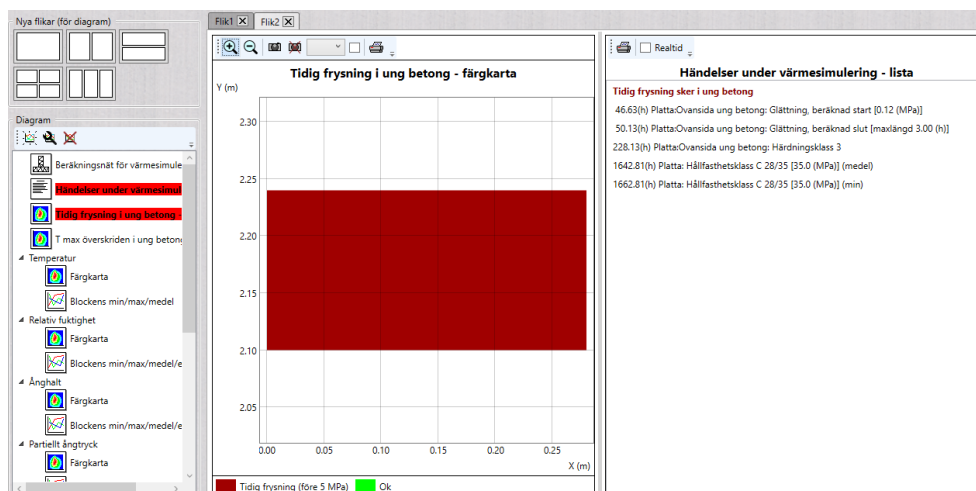
tuffare väderlek läggs manuellt på för första veckan med -3 °C och blåst. För gjutningen används betong med vct 0,55.



Figur 9. Relativ fuktighet och temperatur för en 140 mm platta på 100 mm isolering på mark i Stockholm i början av januari med -3 °C och blåst första veckan, vct 0,55.

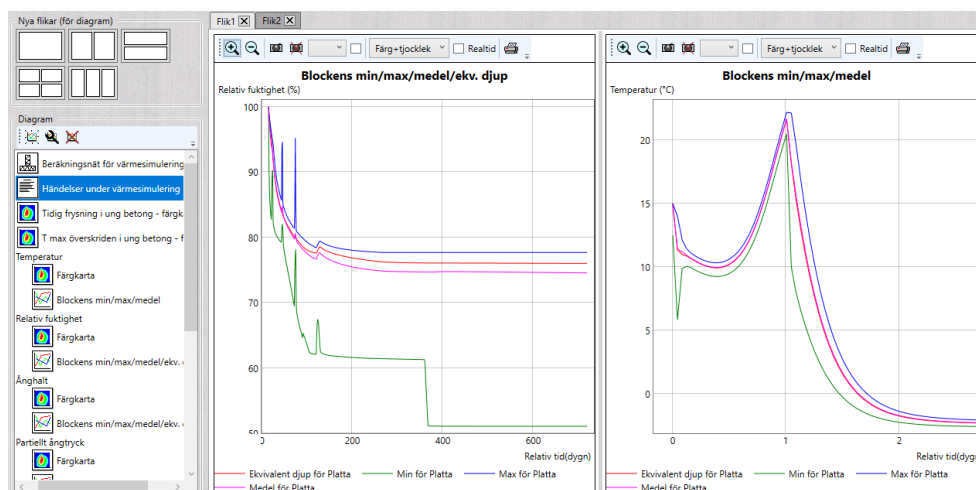
Figur 9 visar ett drömscenario för självtvorkningen då en betong med vct 0,55 nästan dyker ner under 80% RF. Mycket riktigt kan man förvänta sig en effektiv självtvorkning. Ett så högt vct vid högre temperaturer är inte i närheten av den kemiska bindning av vatten som skulle krävas för att uppfylla tvorkningskravet. Vid så låg temperatur bildas dock en C-S-H-gel som innehåller mycket mer vatten. Cementet används mycket mer effektivt och tvorkningen blir därefter. Det som däremot är ett problem ser man endast en indikation på i temperaturdiagrammet. Det finns ingen temperaturtopp! För att tydligare förstå vad som hänt kan man notera varningarna från PPB, se Figur 10.

Denna gjutning kommer att resultera i s.k. tidig frysning. Konstruktionen kommer att frysa, vilket i och för sig är acceptabelt under vissa förutsättningar. Den får dock inte frysa innan den uppnått 5 MPa i tryckhållfasthet, vilket tyvärr sker i detta fall. Kravet i fråga finns för att säkerställa att erforderligt utrymme hunnit utvecklas i betongens porsystem så att vattnet som expanderar vid frysning får plats och inte förstör betongen. PPB utför automatisk kontroll av detta villkor för alla simuleringar och varnar med röda markeringar bland resultaten om villkoret inte uppfylls.



Figur 10. Varningar för och färgkarta med omfattningen av tidig frysnig i en 140 mm platta på 100 mm isolering på mark i Stockholm i början av januari med -3 °C och blåst första vecka, vct 0,55.

Man kan även titta på en färgkarta och se vilka delar i konstruktionen som är drabbade – i detta fall hela plattan. För att lösa detta problem räcker det i just detta fall att lägga på en 20mm tjock isolermatta, som täckning under första dygnet. Uttorkningen störs inte nämnvärt mycket men temperaturutvecklingen får en liten topp och varningarna försvinner, se Figur 11.



Figur 11. Relativ fuktighet och temperatur för en 140 mm platta på 100 mm isolering på mark i Stockholm i början av januari med -3 °C och blåst första vecka, med 20 mm isolermatta som täckning under första dygnet, vct 0,55.

Sammanfattningsvis kan sägas att låg hydratationstemperatur är bra för självtorkning och vi rekommenderar att läsaren försöker utnyttja detta faktum som verktyg för planering och styrning av torkningsförlopp. Diffusionsuttorkningen är i princip satt ur spel av den låga transportförmågan hos betong med Bascement. Skickligt

utnyttjande av temperatureffekten för självtuttorkning blir det enda verktyget vi har kvar för styrning av uttorkningsförloppet för betong. Naturligtvis har även val av vct en stor betydelse, men skall betongens miljöbelastning begränsas kan inte alla konstruktioner med uttorkningskrav gjutas med vct 0,32.

Det är viktigt att komma ihåg att "det kan bli för mycket av det goda". Man måste även beakta andra krav än uttorkning när gjutningen planeras och dessa bör balanseras mot varandra:

- **Tidig frysning får inte ske i konstruktionen!**
- **Skall ytan glättas får man beakta krav på rimlig glättningstidpunkt. Detta påverkar endast hållfasthetstillväxten i ett väldigt tidigt skede och bör inte krocka med fördelen av låg temperatur efteråt för effektiv självtuttorkning.**
- **Finns krav på formrivningstidpunkt för t.ex. bjälklag får även detta beaktas. Normalt skall 70% av sluthållfastheten för ett bjälklag uppfyllas och det tar ett par veckor innan man är där. Det innebär att ökning av sluthållfastheten (som är en annan effekt av hydratation vid låg temperatur, precis som god självtuttorkning) hinner slå in, vilket medför att detta krav inte heller bör krocka med självtuttorkningen.**

Man bör kontrollera uppfyllande av dessa krav samtidigt med att man planerar sin gjutning och predikterar uttorkningen av sin konstruktion. PPB kan användas för att göra just detta. Här rekommenderas även att man kontaktar den betongstation, som skall leverera den aktuella betongen man avser att använda, och tar reda på den exakta cementhalten och 28-dygnshållfastheten. Det finns en naturlig variation hos dessa parametrar mellan olika betongstationer för betong med samma vct och/eller hållfasthetsklass. PPB:s databas erbjuder genomsnittliga värden på dessa parametrar men man kan enkelt justera dessa för varje beräkning och på detta sätt ta hänsyn till vad just den lokala betongleverantören kan erbjuda.

Svårare att mäta uttorkning och jämföra

▼ Mätning av relativ fuktighet för uttorkningsförlopp i fält sker per definition i skarpa konstruktioner. När man flyttar denna mätning till labbmiljö i samband med olika undersökningar och inmätningar är det av vikt att dessa mätningar är jämförbara med verkligheten. Gjutning av fullskaliga konstruktioner i labbmiljö är i regel inte praktiskt genomförbar. Därför försöker man skala ner konstruktionen. De två frekvent använda metoderna är:

- Back – pall med krage eller motsvarande med en yta på ca 1m
- Hink – som oftast 5 liters målarhink med nästan cylindrisk form, andra volymer kan förekomma

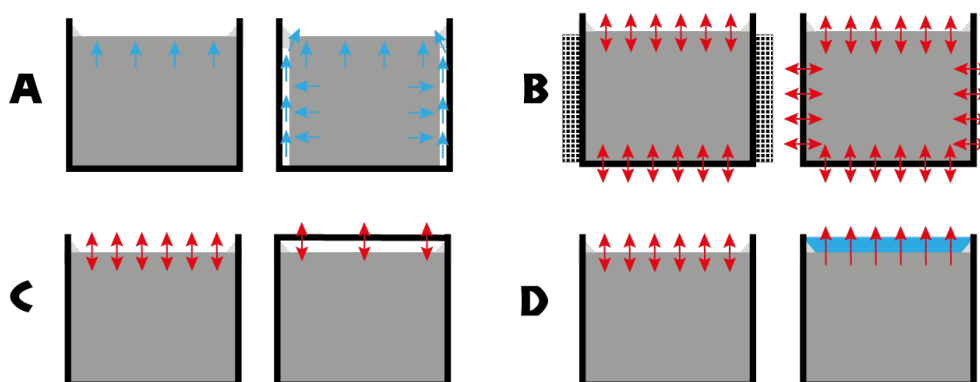
I bägge metoderna är utmaningen att säkerställa att förhållandena under härdningen och uttorkningen motsvarar en fullskalig konstruktion eller åtminstone är jämförbara

mellan proverna i samma undersökning. Hittills har man fokuserat på fuktförhållanden. Nu med ökad kunskap om hur viktig temperaturen under hydratationsförloppet är måste även hänsyn tas till värmeförhållanden. En indikation på hur känslig situationen kan vara ges i Johansson 2012 där klara temperaturskillnader uppmätts i hinkar på 60 mm djup, beroende på hur ovansidan av hinken hanterades (försegling, vattenhärdning mm).

I PPB försökte vi använda isolerade hinkar dels för justering av transportkoefficienter från andra mätningar, se Stelmarczyk m.fl. 2019, och dels för validering av hela simuleringen. Hinkarna skulle nyttjas på två olika sätt:

- Genom att väga hinkarna regelbundet och på detta sätt få en kurva med viktminskning som beskrev hur mycket fukt lämnade betongen genom diffusion
- Genom att mäta RF på ekvivalent djup vid två olika tidpunkter

RF-mätningen har normalt sett mycket högre osäkerhet än viktmätning, dvs vägning med en bra och kalibrerad våg. I detta fall skedde vägning varje vecka under 6 månader. En sådan viktkurva med kontinuerligt registrerade mätvärden innehåller mångdubbelt mer information än två enskilda mätvärden av den relativa fuktigheten. Därför tillskrevs viktmätningen en mycket högre tillförlitlighet och det var gentemot dessa data Bascementets transportegenskaper skulle ha validerats och kalibrerats. Denna möjlighet blev tyvärr förstörd av tillkommande transport av fukt från hinken genom spalten som bildades mellan betongen och hinkens vägg p.g.a. betongens krympning, se Figur 12 a. Detta kunde konstateras genom att de till viktkurvor anpassade transportdata predikterade i full simulering för lågt RF jämfört med vad som mätts upp i hinkarna och i andra referensobjekt (fullskaliga mätningar samt backar enligt ovan). Då viktkurvorna inte gick att använda återstod RF-mätningar från hinkarna. Dessa var för litet information för att kalibrera de inmätta transportdata mot. Med tanke på den omfattande störningen av viktkurvan i samma hinkar antogs till en början att även RF-mätningarna kunde vara störda och man valde att initialt inte lita på dem. I stället användes mätningar från ett 10-tal backar där borrning sker tillräckligt långt från kanter för att med säkerhet inte påverkas av eventuellt kantläckage. I dessa mätningar gavs inte bara tillgång till RF på ekvivalent djup vid både en och flera tidpunkter utan även till profilmätningar från minst 3 djup. I efterhand har de uppmätta RF-värdena i valideringshinkarna i PPB-projektet kontrollerats med hänsyn tagen till avkylning från vattenhärdning under första veckan, se Figur 12 d. Dessa värden har tydligen inte påverkats i nämnvärd omfattning av kantläckaget då alla var inom +/- mätosäkerheten från PPB:s predikterade värden.



Figur 12. Störningar av fukt- och/eller värmetilstånd i hinkar a) störning i fuktflöde ut ur hink p.g.a. sidospalt som bildas genom betongens krympning, b) störning i värmeutbyte med omgivning om hinken är oisolerad jämfört med isolerad hink eller fullskalig konstruktion, c) inverkan av luftkudde mellan betong och lock i hinkar arrangerade för självtorkning, d) nedkylning p.g.a. avdunstning av vatten som används för vattenhärdning av ovansidan.

I den presenterade jämförelsen mellan Bascement, Byggcement och Slite Velox (OPC) i Johansson & Johansson 2018 finns slutsatser inte tar hänsyn till temperatureffekten på självtorkningen. Då hinkarna som användes i försöken inte var isolerade, motsvarar de uppmätta RF-nivåerna inte en ensidigt uttorkad konstruktion, se Figur 12 b. Betongen i hinken hydratiserade vid en mycket lägre temperatur då värmeutbyte skedde genom hinkens alla väggar, vilket inte är fallet för en betong en bit från kanten av en stor platta. Hinken kommer att visa på en mer effektiv självtorkning än i en verklig konstruktion.

Våra mätningar av kemiskt bundet vatten, se Stelmarczyk m.fl. 2019, visar att betong med Bascement har en påtaglig temperatureffekt, vilket påverkar direkt självtorkning. Dessa mätningar är utförda på prover härdade i temperaturstyrda vattenbad med forcerad cirkulation och mätmetoden bygger på vägning med stor precision (termogravimetrisk analys). I Johansson & Johansson 2018 hävdas att ingen temperatureffekt kan påvisas för hinkar med betong med Bascement härdade i luft genom RF-mätning. Avsaknaden av effekten kan förklaras av att luft som konditionering har en mycket sämre förmåga att påverka betongens temperatur än vatten. Detta har huvudsakligen att göra med vattnets höga specifika värme och luftens låga dito. Även cirkulationen av luft/vatten runt proverna påverkar. Det räcker också att man ställer hinkarna litet för nära varandra för att luftkuddar skall uppstå mellan och ge annan omgivande temperatur än i resten av rummet. Sedan har vi skillnaden i mätosäkerhet mellan mätning av RF (relativt hög osäkerhet) och vägning (relativt låg osäkerhet). Jämförelsen i Johansson & Johansson 2018 borde ha hittat en klar temperatureffekt.

Ytterligare ett påstående i Johansson & Johansson 2018 är värt att granska närmare. Det är jämförelsen mellan självtorkning och enkelsidig uttorkning, där det hävdas att betong med Bascement har diffusionsuttorkning jämförbar med betong med ren OPC. Denna slutsats baserar sig på att öppen hink med Bascement visar ungefär samma

sänkning av RF jämfört med försluten hink, som för ren OPC. Redan i Johansson 2012 observerades temperaturhöjningen i betongen som effekt av försegling av ovansidan i hinken med lock medförande isolering genom den luftkudden på ca 2 cm som uppstår mellan betongen och locket, se Figur 12 c. En approximation av denna effekt kan simuleras för betong med Bascement i PPB och resulterar i en RF-skillnad i samma storleksordning som den presenterade skillnaden som påstås bero på diffusion, ca 3–5% RF. Detta innebär att den påstådda diffusionen i betongen med Bascement lika gärna kan vara en temperatureffekt hos självtorkningen – hinken med lock har en isolerande värmekudde. Här går det alltså inte att säga vad som är vad helt enkelt. Utan fundamentaldata som fångar temperatureffekten hos de andra två betongerna kan inga generella slutsatser dras av denna RF-jämförelse för Bascementets räkning.

Mätning av endast RF, särskilt i en inte fullt temperaturkontrollerad mätuppställning tillåter inte dragning av generella slutsatser. För att kunna generalisera måste olika fenomen separeras med säkerhet från varandra, vilket idag sker endast då olika fundamentalegenskaper mäts in var för sig för betong som fått hydratisera i temperaturkontrollerade vattenbad. Mätdata presenterade i Johansson & Johansson 2018 kan mycket väl beskriva den relativa fuktighet som uppstått i undersökningens hinkar. Det som däremot är problemet med undersökningen är:

- att den inte hittat en med mycket säkrare mätmetod påvisad temperatureffekt, vilket ifrågasätter undersökningens kvalitet av mätning och/eller kontroll av hydrationsförhållanden.
- att generella slutsatser dras av mätresultat där andra, helt motsägande förklaringar är fullt möjliga och rimliga.

Att mäta och jämföra uttorkning på ett försvarbart sätt är svårt. Upptäckten av hur viktig temperaturen under hydratationen är för självtorkningen kan förklara en del av detta. Stor hänsyn måste tas till säkerställandet av jämförbara förutsättningar inte bara fuktmässigt utan även värmemässigt då uttorkningsflopp jämförs.

Slutsatser

 Temperaturen under hydratationen har stor inverkan på kemisk bindning av vatten och genom det på självtorkning. Skillnader i omgivande väder och grad av isolering och täckning kan inverka högst kännbart på självtorkningen. Om man beaktar detta och utnyttjar fenomenet till sin fördel kan uttorkning av betong underlättas avsevärt.

Produktionsplanering Betong 2.0 kan simulera både temperaturens inverkan på självtorkning och hållfasthetstillväxt. Programvaran kan användas för effektiv planering av självtorkning genom utnyttjandet av temperatureffekten och samtidig kontroll av uppfyllandet av andra krav så som undvikande av tidig frysning och eventuella önskemål om tidpunkter för formrivning och/eller glättning.

Vid undersökningar och jämförelser av uttorkningsförlopp ställs krav på kontroll och styrning av förhållanden inverkan på både fukt och temperatur i provkropparna. Utan mycket noggrann kontroll av temperaturförhållanden kan man lätt blanda ihop effekter på uttorkningen. Man kan tolka en RF-sänkning på grund av bättre självtorkning som en effekt av diffusion. Säker separation av olika fenomen från varandra krävs för att dra generella slutsatser. Detta sker idag endast då olika fundamentalegenskaper mäts in var för sig för betong som fått hydratisera i temperaturkontrollerade vattenbad. RF-mätning kan i bästa fall ge en jämförelse av total uttorkningseffekt men duger inte som säkert underlag för djupare jämförelse.

Referenser

Gallucci m.fl. 2013 – E. Gallucci, X. Zhang, K.L. Scrivener, *Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H)*, Cement and Concrete Research 2013

Johansson 2012 – P. Johansson, *Uttorkning av betong – Laboratiestudien bakom TorkaS3*, rapport TVBM-3165, LTH 2012

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

Stelmarczyk m.fl. 2019 – M. Stelmarczyk, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, *Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning*, 2019, www.sbuf.se/ppb, numera www.byggforetagen.se/ppb

Verbeck & Helmuth 1968 – G.J. Verbeck, R.A. Helmuth, *Structures and physical properties of cement pastes*, Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968

Författare

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