

Utredning kring PPBs uttorkningsmodul – Slutrapport 2020-02-06

Sammanfattning

- Arbetsgruppens uppdrag har varit att utreda huruvida fuktegenskaper hos Bascementbetong (baserad på cement med inblandning av flygaska) har kvantifierats och verifierats på ett korrekt sätt i SBUF¹-projekten 13140, 13197 och 13190.
- Det har inte varit möjligt att få tillgång till kompletterande information och mätdata som efterfrågats hos berörda aktörer, utöver det som publicerats i ett antal rapporter och artiklar. Opublicerade data från utförda undersökningar har sekretessbelagts av uppdragsgivare och doktoranden som genomfört dessa undersökningar har inte velat diskutera tillvägagångssätt och resultat med arbetsgruppen.
- Mätdata som finns, men som inte varit tillgänglig, har kunnat ersättas med nyligen publicerade mätresultat för betong och bruk med samma eller liknande sammansättning.
- Publicerade fukttransportdata från SBUF-projekten är inte korrekta. Bascementbetong är inte alls så tät mot fukttransport som gjorts gällande. Temperatureffekter på fukttransport har inte undersökts.
- Bascementbetong har fukttransportegenskaper som är ungefär hälften så stora som för betong baserad på tidigare cementtyper. Detta innebär att erforderliga uttorkningstider fördubblas, om allt annat är lika.
- Fukttransportegenskaper har bestämts i laboratorieförsök inom PPB-projekten men mätresultaten har sekretessbelagts. Dessa mätresultat måste utvärderas, publiceras och användas för kalibreringen av PPBs uttorkningsmodul.
- Flygaskans reaktivitet är starkt temperaturberoende. Detta verkar inte ha separerats från cementets temperaturberoende.
- Bestämning av sorptionskurvor på små prover är osäker pga. icke-Fickskt beteende hos cementbaserade material. Sambandet mellan fuktinnehåll och relativ fuktighet RF i en torkande betong måste verifieras med andra metoder. Nyligen gjorda mätningar indikerar en skillnad på upp till mellan 2 och 10 % RF.
- Det saknas en tillförlitlig metod att mäta RF i betong. En sådan måste tas fram, i första hand för laboratiemätningar.
- PPBs uttorkningsmodul måste revideras med avseende på fukttransportegenskaper och verifieras mot väl kontrollerade och dokumenterade uttorkningsförsök, inklusive självuttorkning.

¹ SBUF = Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond

1. Bakgrund och förutsättningar

Under de senaste fem åren har betongbranschen i Sverige genomgått stora förändringar vad gäller hantering av uttorkning av betonggolv, exempelvis:

- Nya cementtyper har kommit på marknaden, bl a "Bascement" med inblandning av flygaska, främst för att minska koldioxidutsläpp från cementtillverkningen.
- Extremt låga vattencementtal, vct, har börjat användas i betonggolv, för att dra nytta av den större självuttorkningen; så låga (vct 0.32) som vi tidigare bara sett i brokonstruktioner som utsätts för en svår miljö.
- Användning av avjämningsmassor är legio men ofta kontrolleras inte deras uttorkning. En särskild metod, GBR-metoden, är framtagen för detta. S k "självttorkande" avjämningsmassor påstås inte behöva kontrolleras m a p uttorkning.
- Den sedan länge använda prognosmetoden för uttorkning, TorkaS, har ifrågasatts och Rådet för Byggkompetens RBK har föreslagit att predikterad RF ska höjas med ett allt högre RF-tillskott ju lägre vct som används.
- Mätmetoden för kontroll av erhållen uttorkning, RBK-metoden, har succesivt ändrats vilket bland annat fått till följd att allt högre RF-värden erhållits vid mätningar. Metoden är idag ifrågasatt, men något alternativ finns f n inte.
- Uttorkningskraven har inte ändrats utan är fortfarande desamma som i stort sett gällt från 1970-talet fastän nya mätmetoder utnyttjas som ger högre resultat än tidigare vilket innebär att kraven är annorlunda idag än tidigare.
- Ovanstående har ofta fått till följd att självuttorkning inte längre är tillräckligt, trots vct 0.32, för att ett betonggolv ska kunna torkas till en nivå under uttorkningskraven.
- Många aktörer har gjort egna mätningar av uttorkningsförlopp och fukttransportegenskaper, men utan att de publicerats. Mätningar som visas i olika sammanhang och på olika hemsidor visar ofta helt olika resultat. Mätmetoderna har ifrågasatts.
- Att göra fuktomfördelningsberäkningar har blivit vanliga konsultuppdrag. Genom att beakta betongens och golvmateriallets tätheter mot fukttransport kan man visa att högre fuktnivåer än de traditionella uttorkningskraven kan accepteras. Betongens och golvmateriallets fukttransportegenskaper är då avgörande.

De senaste åren har flera aktörer upplevt att uttorkningstiderna blivit längre och man har fått fuktskador där man inte förväntat sig det. Några ordentliga utredningar har inte publicerats. Vad som beror på förändringar hos material och förändringar hos mätmetoder har inte klarlagts. Kort sagt: Det har varit, och är, en väldig "röra"!

1.1 SBUF-projekten

Samtidigt som ovanstående har hänt har tre SBUF-projekt startats med målet att ersätta TorkaS, som prognosverktyg för uttorkning av betonggolv, med en uttorkningsmodul till PPB (ProduktionsPlanering Betong). PPB har tidigare bara använts för tidig värmeutveckling och hållfasthetstillväxt. Undertecknad (L-O Nilsson) medverkade i en förstudie under 2015-2016, SBUF-projekt 13064 (Förstudie och metodutveckling för implementering av fuktberäkningsmodul i datorprogrammet Produktionsplanering Betong), och bidrog med erfarenheter samt tillhandahöll efterfrågad litteratur och data.

Två av SBUF-projekten placerades vid avdelningen för Byggnadsmaterial vid LTH, som har lång erfarenhet av undersökningar av fukt i betong. Projekt 13140, "Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering", var första etappen av ett doktorandprojekt. Projekt 13198 (Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i ProduktionsPlanering Betong). Doktoranden var djupt involverad i båda projekten.

Doktoranden hade samtidigt ett annat SBUF-projekt 13197 (Utveckling och grundimplementering av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong) som avsåg programmering av en uttorkningsmodul till PPB.

Gränsdragningen mellan de tre projekten var inte glasklar; indata till programmeringen skulle bestämmas och programmet kunde användas för utvärderingen av mätningar. En doktorand skulle sedan använda detta för en framtida avhandling. Projekten drevs under stor tidspress; man hade tidigt satt upp en tidplan då en första version av PPBs uttorkningsmodul skulle släppas redan i början av 2018.

Samtidigt har inmätningssprojektet krävt allt större del av laboratorieresurserna, långt mer än vad som var planerat, och finansierat, så att andra projekt vid avdelningen blivit lidande.

Arbetsgruppen har inte haft i uppdrag att utreda dessa problem i projekten och kan bara konstatera att de resultat som kommit ut inte kunnat verifieras och jämföras med andra undersökningar för att säkerställa den vetenskapliga korrektheten då doktoranden inte velat diskutera frågorna med arbetsgruppen.

1.2 Meningsskiljaktigheter i branschen

Det finns även olika uppfattningar om hur det nya Bascementet som saluförs av Cementsa fungerar med avseende på fuktprocesser. Cementsa har klargjort att Bascementet har i princip samma egenskaper som det tidigare cementet utan flygasketillsats. De studier som finansierats av SBUF och Skanska och där doktoranden varit utförare har kommit fram till andra slutsatser nämligen att flygasketillsatsen blockerar betongens uttorkning och i princip blir 60 gånger tätare än ett Portlandcement utan flygasketillsats under vissa betingelser.

Det finns således divergerande uppfattningar om produkterna är lika ur uttorkningssynpunkt. Cementsa och Skanska har genomfört gemensamma studier med relativt stora hinkar som innehållit varierande betongkvaliteter och härdningsförhållanden efter gjutning. Dessa försöksresultat är sekretessbelagda och kan inte utnyttjas för att verifiera huruvida det finns skillnader mellan produkterna eller inte.

Arbetsgruppen har begärt upplysningar från dessa försök men inte erhållit tillstånd att närmare studera resultaten. Avdelningen har inte velat besvara utredarnas frågor då de inte fått lämna ut opublicerade data. Arbetsgruppen har begärt att diskutera de vetenskapliga metoderna och resultaten med doktoranden men denne vägrar att diskutera ärendet.

Det är även intressant att notera att cement innehållande flygaskor i betydligt högre halter än i Bascementet har använts i flera decennier i framförallt Danmark. Byggbranschen i Danmark har inte rapporterat om svårigheter att torka ut betong vilket sålades verifierar att Bascementet inte nämnvärt skiljer sig från tidigare cement. Vidare genomfördes tester med

25% flygasketillsats i cement från Skövde under mitten av 1980-talet. Marknadsföringen av detta cement genomgicks med ett flertal vetenskapliga studier där alla tänkbara egenskaper studerades. Man kunde vid den tidpunkten inte konstatera några större skillnader på produkterna förutom att kohesionsegenskaperna skilde materialen åt vid betonggjutning. Å andra sidan användes vid denna tid andra golvkonstruktioner och limsystem som inte var lika känsliga för fukt vilket kan ha lindrat symptomen med avseende på fuktproblemen.

Inför valet av betong till Öresundsbron provades många olika betonger, bland annat två betonger med inblandning av flygaska. Skillnaden i fuktegenskaper jämfört med andra betonger var marginell, se Nilsson (2002).

Fukttransportkoefficienterna i PPB, om de vore riktiga, skulle få märkliga konsekvenser:

- a. Betong behöver inte längre torkas alls; den är tätare än förekommande golvbeläggningar. Det är "bara" avjämnningen som nu behöver torkas.
- b. RBK-mätningar i betong behövs inte mer; betongens fukttillstånd är ointressant.
- c. PPBs uttorkningsmodul är överflödigt, pga. pkt a.

Med sådana konsekvenser är det naturligtvis extremt viktigt att klarlägga vad som är riktigt.

2. Uppdraget

Undertecknad arbetsgrupp har av Fuktcentrums styrelse fått i uppdrag att "utreda huruvida injustering och verifiering av PPB:s uttorkningsmodul har genomförts på ett vetenskapligt och vederhäftigt sätt. Utredningen görs utifrån tillgänglig dokumentation som tillhandahålls av berörda aktörer."

Avrapportering rörande dittills utfört arbete gjordes i en lägesrapport daterad 13 augusti 2019, se Bilaga 1. I denna redovisades vilken dokumentation som var tillgänglig samt de aktiviteter som arbetsgruppen genomfört. I en bilaga redovisades i detalj den ytterligare information som arbetsgruppen önskade få tillgång till från berörda aktörer.

3. Fukttransportdata - Saknad information

Det som främst saknades var information om de LTH-mätningarna av fukttransport som har gjorts men som var belagda med sekretess. Enligt uppgift skulle sekretessen hävas då slutrapporterna för de tre "PPB-projekten" (13140, 13197 och 13198) godkännts av SBUFs styrelse. Eftersom en av dessa ännu inte godkännts begärde arbetsgruppen att utredningstiden förlängdes till ett antal veckor efter det att slutrapporten för projekt 13140 har godkännts av SBUF och sekretessavtalet därmed har hävts. Enligt uppgift skulle detta ske i första eller andra veckan i oktober. Godkännandet av slutrapporten för SBUF-projektet 13140 dröjde till in i november varför arbetsgruppen fick ytterligare förlängd utredningstid.

Det visade sig dock att de mätresultat som efterlystes ändå inte var tillgängliga, trots att sekretessen är hävd. Enligt korrespondens vi har fått ta del av, mellan SBUF, sökande företag och projektledarna för respektive projekt, får inte opublicerade mätdata lämnas ut.

4. Fukttransportdata - Nya källor och ny information

Den huvudsakliga källan till information om PPB:s uttorkningsmodul och de mätningar som denna uppges vara baserad på har hittills varit en "slutrapport" av Stelmarczyk et al (2019b), daterad 2019-05-10. Denna har godkänts av SBUFs styrelse i slutet av juni 2019 och därefter gjorts allmänt tillgänglig. Rapporten kallas nedan "Slutrapporten".

Vi trodde att en del av våra frågetecken skulle komma att klargöras i den senare inlämnade slutrapporten för projekt 13140, Stelmarczyk et al (2019c), som godkändes i november 2019, men den innehöll inte någon ny teknisk information.

Ett antal artiklar i Bygg & Teknik 7/19 behandlar ett antal aspekter på PPBs uttorkningsmodul, Stelmarczyk et al (2019d-f), men inte heller här redovisas någon ny information om inmätning av materialdata till uttorkningsmodulen.

I samma nummer av Bygg & Teknik finns emellertid en artikel som redovisar fukttransportdata för Portlandcementbruk med och utan inblandning av flygaska, Linderoth & Johansson (2019). Koppmätningar har gjorts på bruk med vct 0.45 vid tre temperaturnivåer. Effekten av inblandning av 15 % flygaska är av storleksordningen en faktor 2; bruket med flygaska har en fukttransportkoefficient som är ungefär hälften av vad bruket utan flygaska har. Resultaten jämförs med fukttransportdata i "Slutrapporten" från PPB i nedanstående figur.

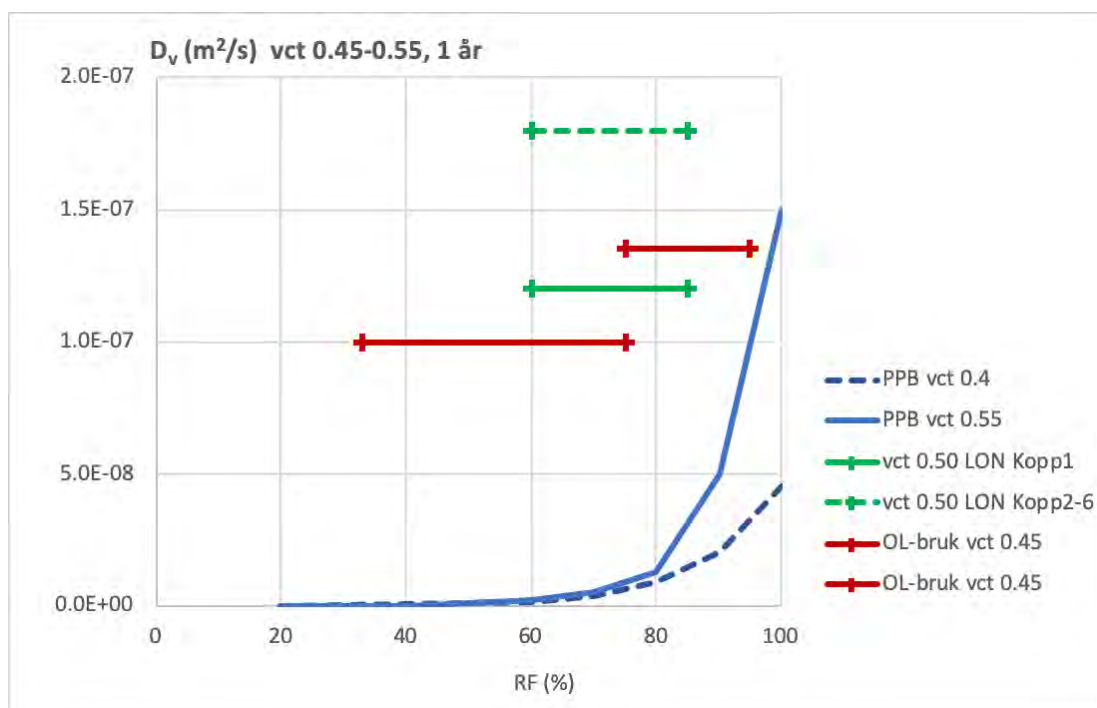
I Figur 1 visas också nya fukttransportdata för Bascementbetong med vct 0.50, Nilsson (2019a), bestämda med koppmätningar på betongskivor ur 15 cm tjocka betongprovkroppar. Något olika resultat erhöles från olika djup i betongen.

Dessa nya fukttransportdata är baserade på direkta mätningar av fukttransport till skillnad från de fukttransportdata som visas av Stelmarczyk et al (2019b), se Bilaga 1. Avståndet är stort mellan dessa mätresultat och data som visas i PPBs "Slutrapport". I RF-intervallet 33-75 % är det minst en faktor 10, något mindre vid högre RF, och då är PPBs data för större vct.

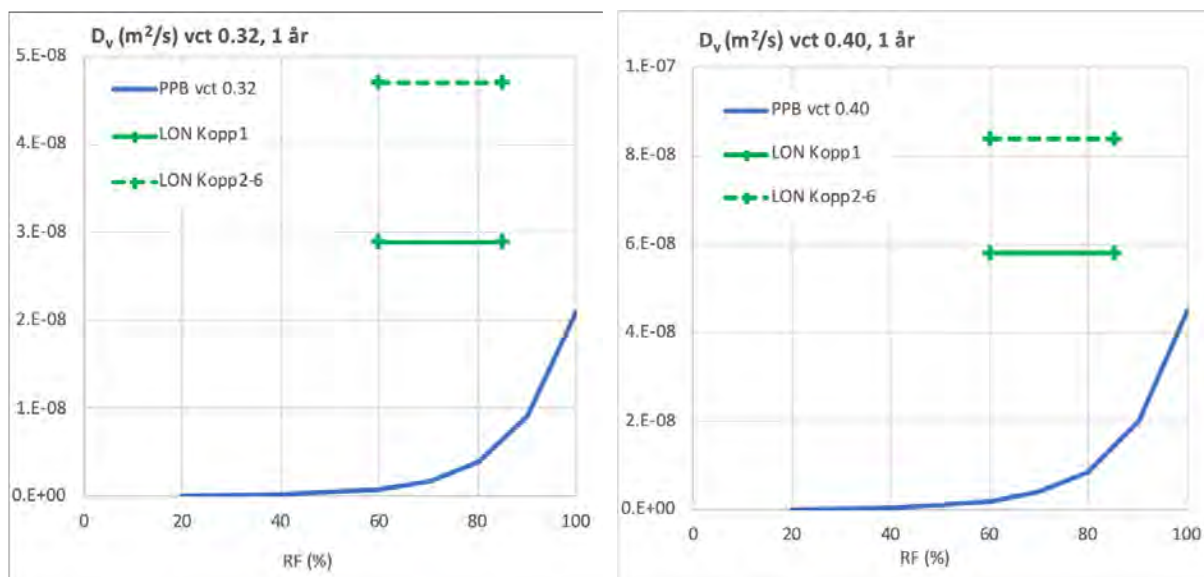
Nilsson (2019a) redovisar också nya mätresultat för fukttransportkoefficienter för Bascementbetong med lägre vct, se Figur 2.

Även för vct 0.32 och 0.40 skiljer sig uppmätta fukttransportkoefficienter från PPBs fukttransportdata med minst en faktor 10.

Nilsson (2019b) redovisar också nya mätvärden från koppmätningar på betong med andra bindemedel än Bascement: Byggcement och s k "Floridacement", vilket är ett rent Portlandcement. Resultaten stämmer väl överens med resultaten av Linderoth & Johansson (2019) på bruk; bindemedlet med flygaskainblandning ger en fukttransportkoefficient som är ungefär hälften av koefficienten för betong/bruk utan flygaska. Detta är långt från de påståenden om skillnaden mellan OPC-betong och "modern betong" som görs i Stelmarczyk et al (2019b). Där nämns exempelvis en faktor 1/60.



Figur 1. Fukttransportkoefficienten D_v , med ånghalt som fukttransportpotential, för Bascementbetong respektive bruk med inblandning av 15 % flygaska, vct 0.45-0.55, härdade 1 år. Data avlästa från figurer i Stelmarczyk et al (2019b) ("PPB") och Linderoth & Johansson (2019) ("OL") samt data från Nilsson (2019a) ("LON") i RF-intervallet 60-85 %, vid +20°C.



Figur 2. Fukttransportkoefficienten D_v , med ånghalt som fukttransportpotential, för Bascementbetong med vct 0.32 respektive 0.40, härdade 1 år. Data avlästa från figurer i Stelmarczyk et al (2019b) ("PPB") samt data från Nilsson (2019a) ("LON") i RF-intervallet 60-85 %.

Av ovanstående framgår det att PPBs "Slutrapport" redovisar fukttransportdata som är osannolika. Det är också volymetriskt osannolikt att en så liten mängd som 15% flygaska av cementmängden skulle kunna blockera alla porer som utgör kanaler för fuktflöden då flygaskan inte skiljer sig i partikelstorlek från cement. Detta påpekades redan i vår lägesrapport, men detta baserades då på jämförelser med mätdata för andra bruk och betonger än sådana med flygaskainblandning. Nu finns direkta mätningar av fukttransportegenskaper, t o m för Bascementbetong, och dessa bekräftar misstankarna.

I PPB-projekten har fukttransportdata uppmätts men resultaten har förkastats eftersom de medförde att PPBs uttorkningsmodul skulle ge felaktiga resultat om de användes. I "Slutrapporten" uttrycks det på följande vis:

- *"Viktkurvor från de egna hinkarna drabbades av störning från extra fuktflöde p.g.a. den spalt som uppstår mellan hinkens vägg och betong då betongen krymper. Därtill anpassade transportkoefficienter resulterade i signifikant underskattning av relativ fuktighet vid jämförelse med RF i samma hinkar och RF från de externa mätningarna". Sid 6-7 i "Slutrapporten"*
- *"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". Sid 96 i "Slutrapporten"*

Åhs (2019) har gjort 3D-beräkningar med Comsol Multiphysics som visar att spalten är helt försumbar. De är dock bara "publicerade" som handouts från en presentation vid Fuktcentrums Informationsdag i Göteborg och Stockholm våren 2019 och nedladdningsbara från Fuktcentrums hemsida. De bifogas här som en bilaga, Bilaga 3.

Att spalten har försumbar betydelse styrks ju också av att Nilsson (2019a) fick samma resultat från "burkar/hinkar" och från mätningar med koppmetoden, på fyra betonger.

Arbetsgruppen har sent fått veta² att det, inom PPB-projekten, också gjorts koppmätningar, dvs direkta mätningar av fuktflöden vid konstant fuktgradient. I "Slutrapporten" (sid 6) sägs däremot att "Koppförsök för inmätning av transportegenskaper utfördes inte". Mätningarna verkar vara gjorda i fyra RF-intervall, och vid flera temperaturnivåer, dvs. betydligt mer omfattande än mätningarna av Nilsson (2019ab).

Resultat från dessa mätningar måste publiceras och användas för kalibrering av PPBs uttorkningsmodul.

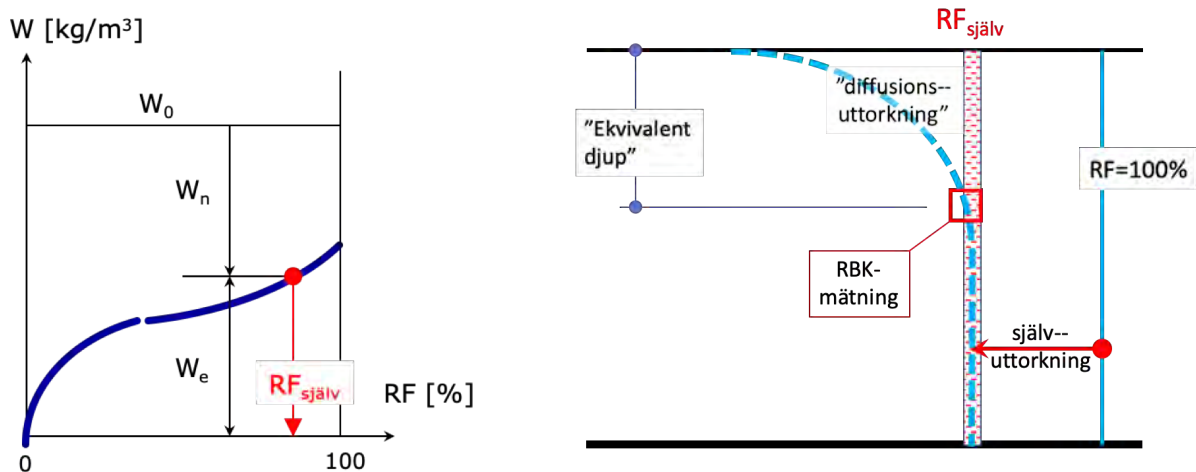
5. PPBs metod att utvärdera fukttransportdata

Metoden PPB använt bygger på att först modellera kemiskt bundet vatten och desorptionisotermer, vilket innebär att man kan modellera självuttorkning. Som sades ovan har denna del av modelleringen inte kontrollerats mot mätningar av ren självuttorkning. Vetenskaplig metodik kräver att ny teknik och nya metoder alltid kontrolleras med andra metoder för att säkerställa korrektheten i de resultat som redovisas.

² Uppgifter via mail 201-12-12 av Peter Johansson, LTH

Sista steget har varit att mäta RF i uttorkningsförsök. Genom att jämföra uppmätt RF efter viss uttorkning, som då inkluderar viss fukttransport till omgivningen, med den RF som modellen ger har skillnaden i RF mellan mätning och modell använts för att kvantifiera fukttransportens storlek i uttorkningsförsöken. Skillnaden har uppenbarligen varit liten vilket gav låga värden hos fukttransportkoefficienterna. Ett problem är också att den mätmetodik som utnyttjats inte ger den precision som krävs varvid små fel i mätresultat kan ge dessa effekter.

Metodiken förklaras i nedanstående figur.



Figur 3. En självuttorkningsmodell (till vänster) ger $RF_{själv}$ på desorptionsisotermen från fukthalten W_e som skillnaden mellan blandingsvattenmängden W_0 och mängden kemiskt bundet vatten W_n . Skillnaden mellan självuttorkningsmodellens $RF_{själv}$ och uppmätt RF (kvadrat) med RBK-metoden på visst mätdjup (till höger) ska förklaras av fukttransport som gett "diffusionsuttorkning". Man borde ha mätt fuktprofiler; detta har bara gjorts för betong med vct 0.55

Metoden förutsätter att övriga ingående parametrar, främst mängd kemiskt bundet vatten och desorptionsisotermerna, är korrekt bestämda, dvs har små systematiska fel. Dessutom blir osäkerheten i metoden stor eftersom konsekvenserna av osäkerheten och eventuella systematiska fel hos främst sorptionskurvorna är stora.

Om PPBs fukttransportdata är felaktiga, är det något annat som inte heller är korrekt, eftersom man hävdar att PPBs fukttransportdata måste vara korrekta för att uttorkningsmodellen ska stämma.

Nedan granskas övriga mätningar inom PPB och frånvaron av sådana.

6. Mätning av kemiskt bundet vatten

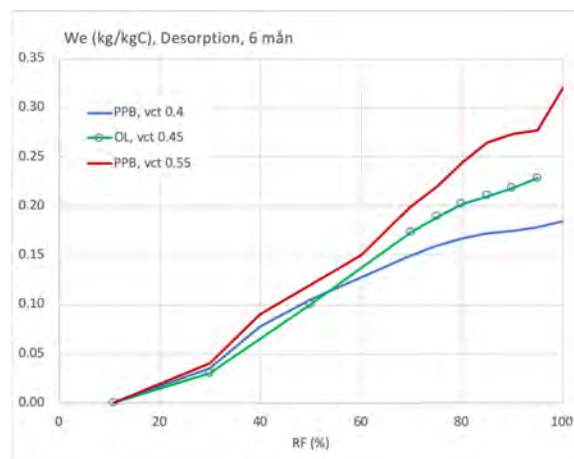
Mängden kemiskt bundet vatten har bestämts med TGA-mätningar på små prover av de tre betongerna under tre månader från gjutning. Proverna har membranhärdats vid fyra konstanta temperaturnivåer: +5°C till +50°C. Mätresultaten för vct 0.40 verkar stämma bra överens med data från Linderöth (2018) för bruk med vct 0.45 och 15 % flygaskainblandning.

Temperaturberoendet finns knappast "inmätt". Resultaten för konstanta temperaturnivåer ligger i princip inom mätosäkerheten; sådana effekter finns dock i litteraturen. Det som behövs för modellering i en hårdande betong är effekten av en temperaturhistoria under första dygnet. Någon sådan mätning har inte gjorts.

7. Bestämning av desorptionsisotermer

Uppmätta desorptionsisotermer för de högre vattencementtalen stämmer någorlunda med Linderoth & Johansson (2019) som också mätt med sorptionsvåg, se figur nedan.

Frågan är dock om dessa sorptionskurvor ger relevant samband mellan fuktinnehåll och RF under uttorkning av betong. Mätningar har gjorts på väldigt små prover. Utvärderingen av mätningar med sorptionsvåg bygger på extrapolering av korttidsmätningar. Extrapoleringen är särskilt svår eftersom inom stora delar av RF-intervallet får man "icke-Fickska" effekter som medför att traditionell extrapolering med Fick's lag inte stämmer.



Figur 4. Desorptionsisotermer för Bascementbetong ("PPB") respektive bruk med 15 % flygaska ("OL") med vbt 0.40, 0.45 respektive 0.55. Värden avlästa från diagram i "Slutrapporten" respektive Linderoth & Johansson (2019).

Man borde ha gjort någon mätning av desorptionsisotermen med någon annan metod, åtminstone några punkter på sorptionskurvorna på betong, t ex med betongskivor i klimatboxar och/eller RF-mätningar på betongprover vars fuktinnehåll är känt. Tyvärr finns det inga publicerade mätningar för moderna cement som gjorts på annat sätt att jämföra med.

Linderoth (2019) har nyligen fått resultat från en jämförelse mellan mätning på små prover i sorptionsvåg och bruksskivor i klimatboxar. Resultaten visade bl a en skillnad på mellan 2 och 10 % RF, vid 80 % RF, för bruk med vbt 0.45 med och utan inblandning av flygaska. En sådan skillnad för Bascementbetong skulle betyda mycket för kalibreringen av en modell för självuttorkning och hur stor diffusionsuttorkning en sådan betong har.

Ett självklart sätt att kontrollera att systemet kemiskt bundet vatten och desorptionskurva ger korrekt resultat är att mäta RF efter ren självuttorkning, dvs på provkroppar som varit konstant förseglade. Några sådana mätningar har inte redovisats.

Uppmätta desorptionsisotermer i PPB är egendomliga/orimliga enligt nedan:

- Desorptionskurvorna vid högre ålder (12 månader) ligger lägre än vid lägre ålder (6 månader) i stora delar av RF-intervallet.
- Desorptionskurvor har inte bestämts vid lägre ålder än 6 månader, trots att ambitionen varit att modellera fuktförlopp redan från 14 dygns ålder.
- Desorptionskurvorna vid olika ålder (6 & 12 månader) samlas i samma punkt vid 100 % RF, vilket skulle innebära att porositeten inte skulle ändras under tiden däremellan.

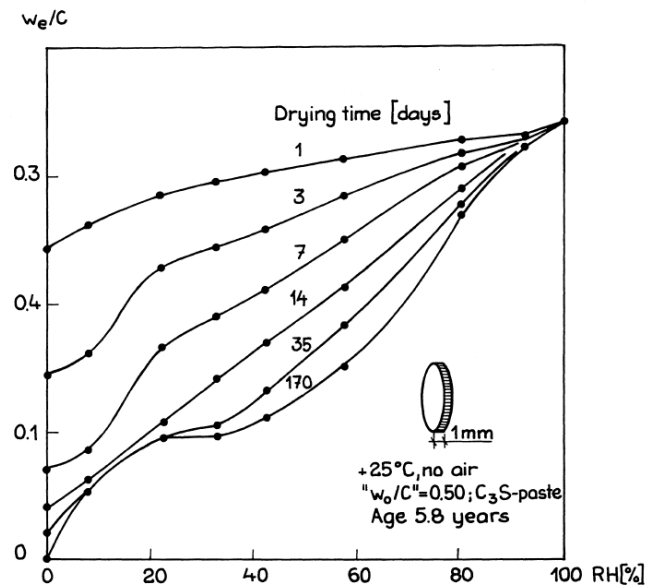
8. Bestämning av fuktberoendet hos fukttransportkoefficienterna

Fuktberoendet hos fukttransportegenskaperna, dvs hur fukttransportkoefficienterna beror av fuktnivån, normalt RF, har kvantifierats genom att analysera kinetiken hos resultaten från de sorptionsvågsmätningar som användes för att bestämma sorptionsisotermerna, se ovan.

Dessa mätningar har skett med väldigt små prover, "ca 50 mg av krossat material utan synliga ballastkorn", dvs synliga ballastkorn har plockats bort. Sådana små prover utsätts då för påverkan av luftens koldioxid. Koldioxid innebär att fuktiga betongprover karbonatiserar, varvid reaktionen bildar karbonater och fritt vatten, och får en annan porstruktur. En normal uttorkningsprocess på betong resulterar inte i någon nämnvärd påverkan på fuktförhållanden i materialet då reaktionsmängderna inte signifikant förmår påverka materialets totala fukthalt. Däremot om man med små prover genomför mätningar kommer provernas fukthalt att påverkas märkbart om de delvis karbonatiseras. Resultaten kan då visa på betydligt långsammare uttorkning till följd av att karbonatiseringsprocessen tillför provkroppen vatten. Det framgår inte av "Slutrapporten" i vilken utsträckning man lyckats skydda de små proverna från karbonatisering. Vidare kan man väl också tänka sig att flygaska inte beter sig som tänkt i så små, krossade prover då flygaska kräver viss miljö för att reagera med cementets hydratationsprodukter.

Små prover av cementbaserade material uppvisar också ett "icke-Fickskt beteende". Fuktändringar följer inte alltid Ficks lagar som de borde göra om fuktflödet kunde beskrivas med Ficks 1:a lag, dvs med en transportkoefficient och en gradient i någon fukttransport-potential, som t ex ånghalt som görs i PPBs uttorkningsmodul. Fuktändringarna hos små prover sker inte bara på grund av fukttransport. Någon form av strukturförändringar sker samtidigt som innebär att platser som binder vattenmolekyler släpper ifrån sig eller tar upp dessa i en annan tidskala än fukttransporten. Vid mätningar på små prover kan dessa förändringar ge helt missvisande information om fukttransportens tidsförlopp.

En av de första att observera sådana effekter var Grudemo (1976), se nedanstående figur, som mätte fuktändringar på tunna skivor av cementpasta i vakuum vid olika RF-nivåer.

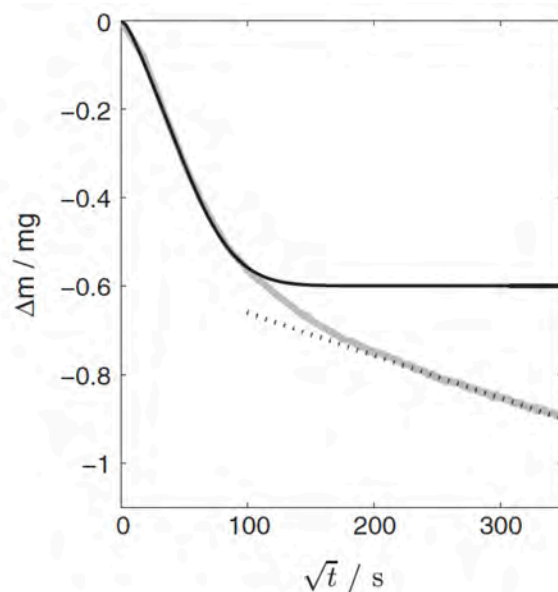


Figur 5. Tidsförloppet vid bestämning av punkter på desorptionsisotermen, C₃S-pasta med vct 0.5, Grudemo (1976), publicerad i Nilsson (1980)

Jämvikt nåddes relativt snabbt vid höga RF respektive låga RF, men i ett mellanområde skedde fuktändringar under tio gånger så lång tid. Detta är ett typiskt "icke-Fickskt beteende".

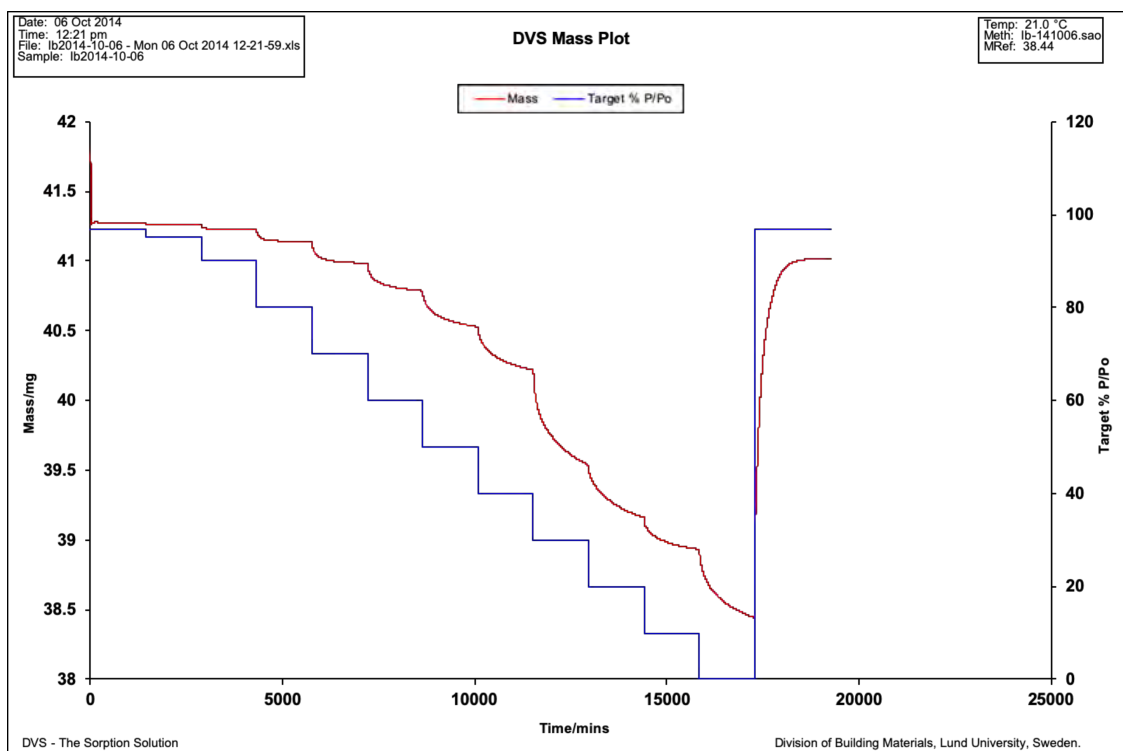
Anderberg & Wadsö (2007) såg inga sådana effekter vid mätningar med sorptionsvåg när de mätte på prover av aluminatcementbaserade avjämningsmassor. Saeidpour & Wadsö (2015), däremot, fick tydliga "icke-Fickska" effekter vid mätning på cementpasta med olika andra bindemedel. Ett exempel visas i nedanstående figur.

Den tjocka grå kurvan i figuren nedan är det uppmätta, icke-Fickska, fuktändringsförloppet som krävde mycket lång tid för att nå jämvikt. Den heldragna svarta kurvan är den man beräknat med Ficks lagar.



Figur 6. Viktändringsförlopp i intervallet 80-90 % RF vid sorptionsmätning på 2 mm tjocka prover av OPC-pasta med vct 0.50, Saeidpour & Wadsö (2015).

I sorptionsvågsmätningar får man liknande effekter som i figurerna ovan. Vi har inte fått tillgång till de mätningar som gjorts i PPB-projektet. "Slutrapporten" refererar emellertid till sådana mätningar som gjorts av Olsson et al (2018). Ett exempel därifrån visas i figuren nedan.



Figur 7. Exempel på kinetiken i en sorptionsvågsmätning på välhärdat cementbruk 1b med OPC+70 % slagg, vbt 0.38, Olsson et al (2018). Blå "trappa" visar RF-stegen, från 97 till 10 % RF. Röd kurva visar viktändringsförloppet.

I de första stegen i figuren ovan, över 90 % RF, kommer provet snabbt till jämvikt. Under 90 % RF är förloppet långsamt och typiskt "icke-Fickskt". Detta kan misstas för en långsam fukttransport men det är en helt annan process som styr tidskalan. Olsson et al (2018) gjorde koppmätningar i flera RF-intervall på samma material och fann då inget fuktberoende hos fukttransportkoefficienten.

Egendomligt nog refererar "Slutrapporten" till resultaten från Olsson et al (2018) och säger sig ha validerat sin metodik med rådata därifrån. Olsson et al (2018) mätte på åtta bruk. Bara tre av dessa uppvisade ett fuktberoende hos fukttransportkoefficienten, men alla hade ett icke-Fickst beteende i sorptionsvågsmätningarna.

"Slutrapportens" stora fuktberoende hos fukttransportkoefficienterna är förmodligen starkt överdrivna, särskilt för de låga vattencementtalen.

9. Mätning av fuktprofiler med RBK-metoden

Fuktnivån efter viss uttorkning har gjorts med RBK-metoden, vilket innebär att ett hål borrar till ett visst djup, hålet dammsuges varefter ett foderrör placeras i borrhålet och tätas nedtill och upptill. Metoden har gradvis ändrats under senare år och ifrågasätts av flera skäl, bl a

- a. borrhningen värmer upp betongen närmast borrhålet mycket kraftigt; +200°C har uppmätts,
- b. borrhningen och dammsugningen torkar ut borrhålets ytor,
- c. uppvärmningen av betongen närmast borrhålet medför att betongens sorptionskurva, förskjuts nedåt, dvs RF ökar vid konstant fukthalt,
- d. uppvärmningen av borrhålet ger upphov till fukttransport inåt i betongen intill borrhålet,
- e. nedre änden av foderröret är svår att täta mot betongen,
- f. spalten mellan foderrör och betongen i borrhålet är en transportväg för fukt som kan ge upphov till läckage som kan vara särskilt betydande vid mätning i låg-vct-betong,
- g. Borrhålet skapar nya energirika ytor som ger upphov till reaktioner som påverkar resultatet tex karbonatisering. Karbonatiseringsreaktionen frigör vatten.
- h. m.m

Ovanstående processer har inte förståtts fullt ut och har inte kvantifierats. Vi vet inte idag om metoden, vid ett visst förfaringssätt, ger för höga eller för låga värden jämfört med den RF man vill bestämma. Några jämförelser med någon annan, tillförlitlig metod har inte gjorts. Det som gjorts under senare år är istället att göra förändringar av metoden och se vilken effekt de har. En del av detta har rapporterats av Johansson (2012, 2014, 2016).

Att använda en sådan metod som RBK-metoden för att bestämma RF i uttorkningsförlopp som användas för att verifiera en uttorkningssimulering är högst osäkert så länge metoden i sig själv inte är verifierad mot någon standardmetod. Vidare är osäkerheten i mätresultaten ca $\pm 2,5$ % RF vilket ger vetenskapliga problem att säkerställa korrektheten i uttorkningsförloppen. RBK-metoden kan däremot utnyttjas för att produktionsstyra praktiska arbetsförlopp.

10. Avslutande kommentarer

Att vetenskapligt verifiera resultat från de aktuella projekten, eller påståenden från cementleverantören, är en svår uppgift då ingen vill låta arbetsgruppen diskutera frågorna med dem som ansvarat för eller genomfört studierna eller låta arbetsgruppen få tillgång till mätresultat som faktiskt föreligger. Branschens erfarenheter är dock att materialet inte beter sig signifikant annorlunda än tidigare produkter utan flygskatillsats. Således pekar utredningen på att resultaten från de vetenskapliga studierna inte överensstämmer med de praktiska erfarenheterna.

Om det föreligger felaktiga tolkningar eller om de försök som utförts är behäftade med vetenskapliga felaktigheter är inte möjligt att helt säkert bedöma då ingen av de berörda parterna vill delge sina uppfattningar eller diskutera den kompletterande information som arbetsgruppen efterlyst. Andra undersökningar har dock kommit till helt andra resultat än i PPB-projekten. Det är uppenbarligen något som inte stämmer.

Betongbranschen har idag en helt annan slutenhet än för ett tiotal år sedan. Då var alla undersökningsresultat tillgängliga och publicerades. Idag är situationen en helt annan där många aktörer gör egna undersökningar och utvecklar egna verktyg och väldigt lite av det publiceras så att det går att granska. Branschens kunder blir helt enkelt hänvisade till att "tro" och lita på aktörernas uppgifter.

Ett bra sätt att komma runt en del av problematiken är att materialleverantörerna tillhandahåller relevanta och uppdaterade uppgifter om vilka egenskaper deras saluförda produkter har, så att alla aktörer har tillgång till detta.

2020-02-06

Arbetsgruppen (Lars-Olof Nilsson & Kyösti Tuutti)

Bilagor

1. Nilsson, L.-O. & Tuutti, K. (2019) *PPBs uttorkningsmodul - Lägesrapport_2019-08-13 inkl_Bilaga: PPBs Uttorkningsmodul – Önskad Information. Utkast 3*. Arbetsrapport 2019-06-08. 13 sidor.
2. Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. & Carlström, S. (2019b) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*. Slutrapport 2019-05-10, SBUF ID: 13197 & 13198. 121 sidor.
3. Åhs, M. (2019) *Simulering av uttorkning i betong med COMSOL Multiphysics*. Presentation vid Fuktcentrums Informationsdagar 2019, 7 sidor

4. Nilsson, L.-O. (2019a) *Burkmetoden – för bestämning av fukttransportegenskaper hos betong*. Rapport 1922, 2019-10-03, Moistenginst AB, 20 sidor
5. Nilsson, L.-O. (2019b) *Fukttransportegenskaper hos betong med olika bindemedel. Koppmätningar för betonger med vbt 0.36*, Rapport 1923, 2019-12-03, Moistenginst AB, 10 sidor

Referenser

- Anderberg, L. Wadsö, *Method for simultaneous determination of the sorption isotherm and the diffusivity of cement-based materials*, Cement Concrete Research 38 (2007) 89–94.
- Grudemo, Å. (1976) *Determination of desorption isotherms of cement paste*, Private communication, i Nilsson (1980)
- Johansson, P. (2012) *Uttorkning av betong - Laboratiestudien bakom TorkaS3*. Rapport TVBM-3165, Avd. Byggnadsmaterial, LTH
- Johansson, P. (2014) *Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 1*. Rapport TVBM-3178, Avd. Byggnadsmaterial, LTH 2014-12-22
- Johansson, P. (2016) *Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 3*. Rapport 2016-06-17, SBUF-ID: 12941 & 13085
- Linderöth, O. (2018) *Binding of moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar Impact of replacement level and curing temperature*. Licentiatavhandling, Avd. Byggnadsmaterial, LTH
- Linderöth, O. & Johansson, P. (2019), *Fuktegenskaper hos cementbundet material med flygaskainblandning*, Bygg & Teknik 7/19.
- Linderöth, O. (2019) *Sorptionskurvor från sorptionsvåg och klimatboxar*, personlig kommunikation 2019-12-10
- Nilsson, L.-O. (1980) *Hygroscopic moisture in concrete - Drying, measurements & related material properties*, rapport TVBM-1003, Avd Byggnadsmaterial, LTH
- Nilsson, L.-O. (2002) *Long-term moisture transport in high performance concrete*. Matériaux et Constructions, Vol.35 - N° 254, December 2002
- Nilsson, L.-O. (2019a) *Burkmetoden – för bestämning av fukttransportegenskaper hos betong*. Rapport 1922, 2019-10-03, Moistenginst AB, www.moistenginst.com.
- Nilsson, L.-O. (2019b) *Fukttransportegenskaper hos betong med olika bindemedel. Koppmätningar för betonger med vbt 0.36*, Rapport 1923, 2019-12-03, Moistenginst AB, www.moistenginst.com.
- Olsson, N., Nilsson, L.-O., Åhs, M. & Baroghel-Bouny, V. (2018) *Moisture transport and sorption in cement-based materials containing slag or silica fume*, Cement and Concrete Research 106 (2018) 23–32
- Saeidpour, M. & Wadsö, L. (2015) *Evidence for anomalous water vapor sorption kinetics in cement based materials*, Cement and Concrete Research 70 (2015) 60–66
- Stelmarczyk, M., Rapp, T. & Hedlund, H. (2019a) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*. Slutrapport 2019-03-29, SBUF ID: 13197 & 13198. 129 sidor.
- Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. & Carlström, S. (2019b) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för*

uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong. Slutrapport 2019-05-10, SBUF ID: 13197 & 13198. 121 sidor.

- Stelmarczyk, M., Hedlund, H. & Rapp, T. (2019c) *Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering*, SBUF ID: 13140 Slutrapport 2019-09-11, 105 sidor.
- Stelmarczyk, M., Rapp, T. & Hedlund, H. & Carlström, S. (2019d-f), *Uttorkning och modern betong, Fuktsamverkan i golvsystem med modern betong och PPB räknar på fukt*, Bygg & Teknik 7/19.
- Åhs, M. (2019) *Simulering av uttorkning i betong med COMSOL Multiphysics*. Presentation vid Fuktcentrums Informationsdag 2019-03-27 i Göteborg och i Stockholm 2019-05-09, <http://www.fuktcentrum.lth.se/verktyg-och-hjaelpmedel/fraan-informationsdagarna/2019-fuktsaekerhet-idag-praktiska-exempel-och-tillaempningar-stockholm/>

Till
Fuktcentrums styrelse

Utredning kring PPBs uttorkningsmodul – Lägesrapport 2019-08-13

Undertecknad arbetsgrupp har av Fuktcentrums styrelse fått i uppdrag att "utreda huruvida injustering och verifiering av PPB:s uttorkningsmodul har genomförts på ett vetenskapligt och vederhäftigt sätt. Utredningen görs utifrån tillgänglig dokumentation som tillhandahålls av berörda aktörer."

Avrapportering rörande dittills utfört arbete ska ske senast 15 augusti 2019. Denna lägesrapport utgör en sådan avrapportering.

Den huvudsakliga källan till information om PPB:s uttorkningsmodul och de mätningar som denna uppges vara baserad på har hittills varit en "slutrapport" av Stelmarczyk et al (2019a) daterad 2019-03-29. Denna version av rapporten har tidigare varit tillgänglig för nedladdning från SBUFs hemsida men var inte det under utredningstiden. En reviderad version av "Slutrapporten", Stelmarczyk et al (2019b), daterad 2019-05-10 har godkänts av SBUFs styrelse i slutet av juni 2019 och därefter gjorts allmänt tillgänglig. Det tekniska innehållet i dessa båda versioner av Slutrapporten är identiskt. Rapporten kallas nedan "Slutrapporten".

De aktiviteter som genomförts hittills kan kortfattat beskrivas på följande vis, i kronologisk ordning:

1. En bakgrund/historik till problemställningen sammanfattades 2019-05-02. Denna inkluderade uttorkningskrav, prognosverktyg, material och materialegenskaper, mätmetoder, nuläge samt PPBs uttorkningsmodul.
2. Slutrapporten granskades, i detalj. Några enkla kontrollberäkningar utfördes.
3. En kortfattad önskelista över kompletterande information upprättades 2019-05-15/19, med frågor att ställa till ett antal berörda parter. Denna diskuterades inom arbetsgruppen och kompletterades/reviderades succesivt.
4. Ett antal rapporter om fuktmätning i betong med lågt vct granskades. Peter Johansson svarade på frågor om delar av dessa.
5. 2019-05-20 inbjöds Marcin Stelmarczyk (MS) via mail till ett möte på Skanskas huvudkontor i Stockholm, för att besvara arbetsgruppens frågor, på valfri dag under perioden 4-7:e eller 10-14:e juni 2019. MS svarade att han önskade en "inskannad kopia på ett justerat och signerat protokoll från Fuktcentrums styrelsemöte" innan han tog ställning till inbjudan. Detta översändes 2019-06-04 per e-mail. MS sade sig då behövs verifiera dokumenten. 2019-06-11 meddelade MS att han fått dem "kontrollerade och verifierade".
6. 2019-06-04 kallades Hans Hedlund (HH) och Marcin Stelmarczyk formellt till ett möte 2019-06-10 på Skanskas kontor i Stockholm, alternativt Skype/Lync, för att klara av en mängd frågor som uppkommit vid granskningen.
7. Till detta möte utarbetades 2019-06-08 ett 11-sidigt dokument med en lång rad önskemål om kompletterande information och frågor om detaljer i PPBs

uttorkningsmodul. Detta dokument mailades 2019-06-09 till de presumtiva mötesdeltagarna. Dokumentet bifogas.

8. Mötet 2019-06-10 hölls via Skype med deltagande av Hans Hedlund och arbetsgruppen. MS deltog ej. De frågor som ställdes gällde främst de mätningar av fukttransportegenskaper som gjorts på LTH. Några svar kunde inte ges; hänvisning gjordes till gällande sekretessavtal. Sekretessavtalet uppgavs upphöra i och med att Slutrapporten skulle godkännas av SBUFs styrelse 2019-06-26.
9. Det aktuella sekretessavtalet inkluderar emellertid tre projekt, 13140, 13197 och 13198. Slutrapporten gäller dock bara två av dessa, 13197 och 13198. Det var därför oklart om sekretessavtalet hävts då Slutrapporten godkänkts. Information om LTH-mätningarna av fukttransport har därför ännu inte varit tillgängliga för utredningen. Förnyat försök att få ta del av dem gjordes 2019-08-11.
10. 2019-08-13 fick vi information, i form av en kopia av ett mail 17/7 från Joakim Jeppsson, om att sekretessavtalet gäller t o m när slutrapporten för doktorandprojektet 13140 godkänkts av SBUF. Han räknar med att detta kan ske i första eller andra veckan i oktober.
11. Vårt 11-sidiga dokument, daterat 2019-06-08, innehåller en rad frågor och ifrågasättanden om PPBs uttorkningsmodul. Detta lämnades till MS & HH 2019-06-09. Rimligtvis bör våra frågetecken komma att klargöras i den kommande slutrapporten. Med det underlag som vi hittills erhållit kan vi inte ge tydliga svar på de frågeställningar som Fuktcentrum efterfrågar .
12. Med bakgrund av detta kräver vi att utredningstiden förlängs till ett antal veckor efter det att slutrapporten för projekt 13140 har godkänkts av SBUF och sekretessavtalet därmed har hävts. LTH-mätningarna är då tillgängliga och våra frågetecken har eventuellt bemötts.

2019-08-13

Arbetsgruppen (Lars-Olof Nilsson & Kyösti Tuutti)

Referenser

Stelmarczyk, M., Rapp, T. & Hedlund, H. (2019a) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*. Slutrapport 2019-03-29, SBUF ID: 13197 & 13198. 129 sidor

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. & Carlström, S. (2019b) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*. Slutrapport 2019-05-10, SBUF ID: 13197 & 13198. 121 sidor

Bilaga

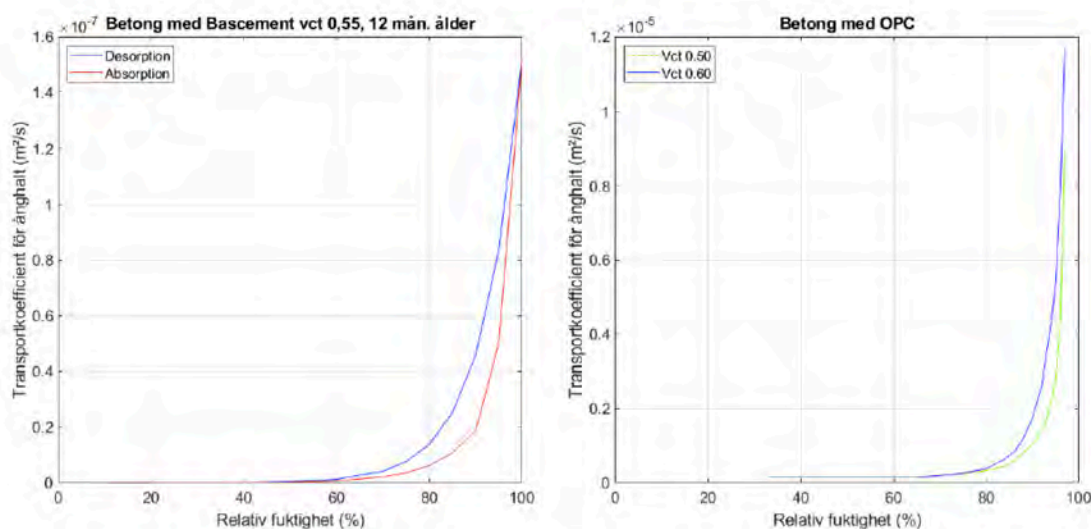
Nilsson, L.-O. & Tuutti, K. (2019) *PPBs Uttorkningsmodul – Önskad Information. Utkast 3*. Arbetsrapport 2019-06-08. 11 sidor.

PPBs Uttorkningsmodul – Önskad Information

Det finns många frågetecken kring detaljerna i utvecklingen av PPBs Uttorkningsmodul. De övergripande stegen är emellertid rätt tydligt beskrivna, men det kan ifrågasättas om de har gett korrekta resultat. Bakgrunden och de olika stegen beskrivs kortfattat nedan, så som de kan förstås från det som har publicerats.

A. Fukttransportegenskaper – ”60 ggr tätare än för OPC-betong”

”Inmätning” av PPBs Uttorkningsmodul, Stelmarczyk et al. (2019a), utmynnar i bl a nedanstående fukttransportkoefficient för bascementbetong med vct 0.55, som sägs vara 60 gånger mindre än för OPC-betong.

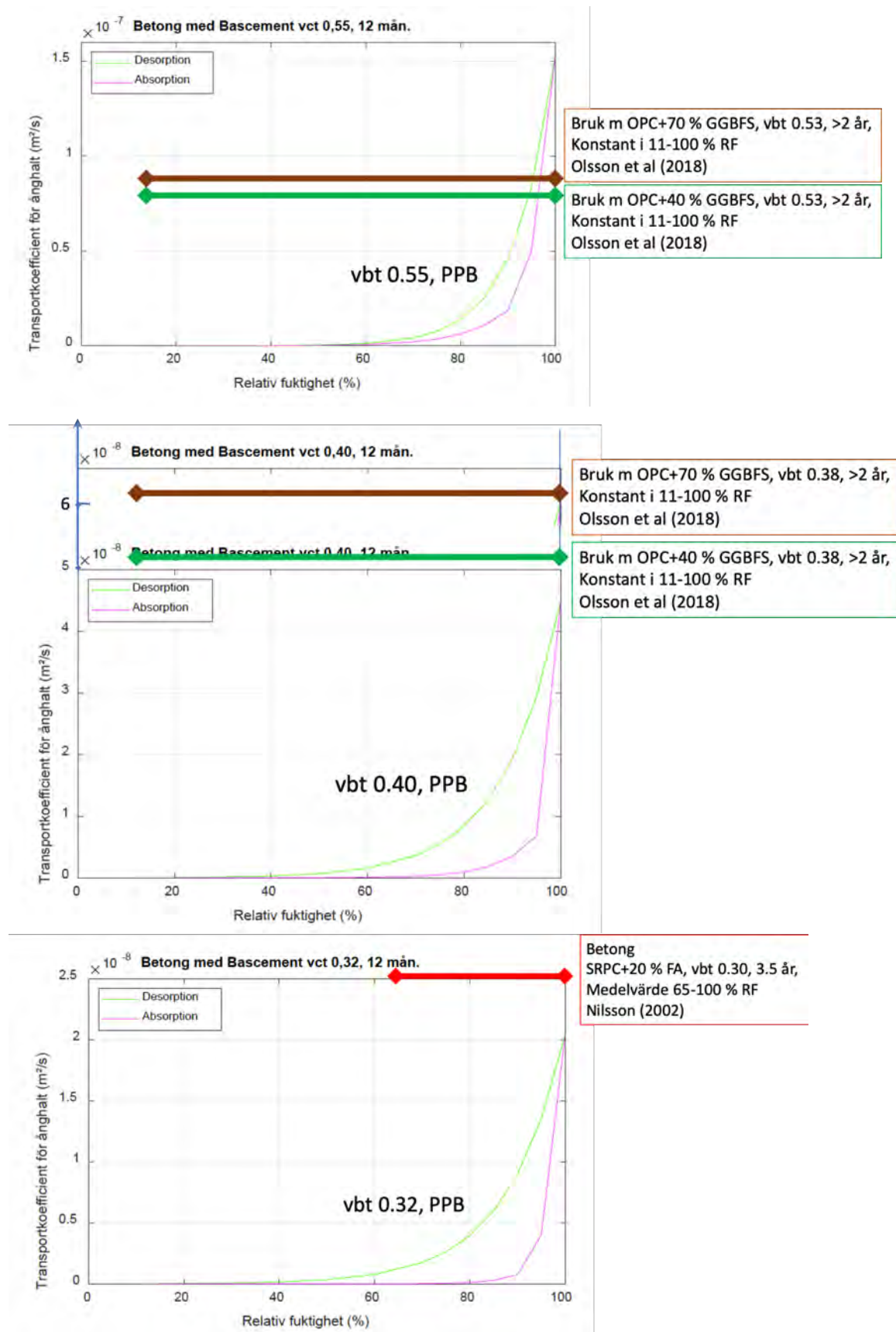


Figur 9 Transportkoefficient för ånghalt, som funktion av relativ fuktighet för betong med Bascement vct 0,55 och 12 månaders ålder, vid desorption samt absorption, samt betong med OPC vct 0,50 och 0,60 efter Hedenblad 1993. Observera skillnad i tiopotens för storleken på transportkoefficienterna mellan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

Det är i princip denna typ av resultat som har föranlett utredningsuppdraget.

Skälen till att resultaten ifrågasätts är bland annat:

1. De redovisade fukttransportkoefficienterna är ”orimligt” låga, i jämförelse med andra mätningar på andra, liknande material, se figur på nästa sida.
2. Fukttransportkoefficienternas absolutvärden har bestämts med en tveksam metod, parameteranpassning, se nedan.
3. Fukttransportkoefficienterna, om de vore riktiga, skulle få märkliga konsekvenser:
 - a. Betong behöver inte längre torkas alls; den är tätare än förekommande golvbeläggningar. Det är ”bara” avjämningen som nu behöver torkas.
 - b. RBK-mätningar i betong behövs inte mer; betongen fuktillstånd är ointressant.
 - c. PPBs uttorkningsmodul är överflödiga, pga. pkt a.
 - d. Med sådana konsekvenser är det naturligtvis extremt viktigt att klarlägga vad som är riktigt.



Jämförelser mellan fukttransportkoefficienter enligt PPB och litteratordata för några betonger och bruk med flygaska respektive slagg; vbt 0.53-0.55, 0.38-0.40 och 0.30-0.32

B. Fukttransportegenskaper – från laboriemätningar (?)

I projektet har tydligen en hel del mätningar gjorts med "hinkmetoden"; vägning och RF-mätning efter viss härdning följt av uttorkning. Ur denna kan fukttransportkoefficienter utvärderas. Metoden har "kasserats" av PPB, Stelmarczyk et al. (2019a), pga. påstått läckage i springan mellan plåthink och betong. Erhållna värden ansågs vara för "höga". Om nu betongen skulle vara så tät som påstås borde inte flödet som ger "läckage" via en extremt liten spalt spela någon större roll.

Koppmätningar, dvs direkta mätningar av stationärt fuktflöde vid konstant fuktgradient, har övervägts, men de skulle kräva för lång tid för att ge resultat.

Önskemål: Det har gjorts mätningar som kan visa fukttransportkoefficienter för de aktuella betongerna.

Önskemål 1: Häv sekretessen kring dessa mätningar så att vi kan få information om dem och granska mätningarna och resultaten från dem.

Önskemål 2: Samma önskemål gäller eventuella koppmätningar.

C. Uttorkningsmodulen - utvecklingssteg

Fukttransportkoefficienterna har bestämts med delvis tveksamma metoder. Av det som publicerats får man nedanstående bild av hur det har gått till. De övergripande stegen är följande:

1. Framtagning av modell för kemiskt bundet vatten, med temperaturberoende.
2. Framtagning av modell för desorptionsisotermer.
3. Pkt 1 och 2 ger en modell för självuttorkning.
4. Framtagning av modell för fuktberoendet hos fukttransportkoefficienter
5. RF-mätningar i ett antal betonger efter viss härdning och uttorkning.
6. Kvantifiering av fukttransportkoefficienterna, genom anpassning av parametrar, för att få modellens RF att stämma med uppmätta RF.

Fråga C0.1: Är detta en någorlunda korrekt beskrivning av utvecklingsstegen?

De olika stegen beskrivs mer i detalj nedan.

Fråga C0.2: Är det något nedan som uppenbarligen har missförståtts?

1. Modell för kemiskt bundet vatten w_n/C

1.a "Inmätning"

Kemiskt bundet vatten¹ har mätts upp med TGA, för olika vct och fyra temperaturnivåer. Detta har gjorts på prover som varit förseglade, dvs de har "självttorkat", dvs RF i dem har sjunkit med tiden under mätningens gång. Värden redovisas bara för 90 dygn. Hydratationsförloppet har planat ut efter 1-2 månader. De erhållna värdena efter två

¹ Anm. "Kemiskt bundet vatten" definieras numera på ett nytt sätt, genom att gränsen mellan fysikaliskt och kemiskt bundet vatten sätts vid torkning i 11 % RF och +20 °C. Värdena är därför högre än vad som tidigare anges i äldre litteratur, i Betonghandboken etc.

månader är ca $w_n/C = 0.19-0.21$, $0.23-0.24$ och $0.26-0.27$ för vct 0.32, 0.40 respektive 0.55, i temperaturintervallet +5- +35 °C.

Nivån för vct 0.55 stämmer väl med Linderoth (2018) som fick $w_n/C = 0.265$ för vbt 0.45 för bruk med OPC och 15 % flygaska.

Det är märkligt att man inte beskriver puzzolanreaktionen för flygaska separat eftersom den förväntas ha ett helt annat tidsförlopp, och temperaturberoende, än cementreaktionerna.

Fråga C1.1: Har detta övervägts? Varför förkastades ett sådant angreppssätt?

1.b Temperaturberoendet

Mängden kemiskt bundet vatten påverkas av härdningstemperaturen, inte bara när det gäller hastigheten i förloppet utan också vilket absolutvärde som erhålls efter lång tid.

Detta kan bero på bl a kända temperatureffekter på ettringitbildningen.

Temperaturberoendet efter lång härdningstid är dock relativt litet, ca 0.01 kg/kgC, i temperaturintervallet +5- +35 °C.

Mätningar har bara gjorts vid olika konstanta härdningstemperaturer. Någon verifiering vid sådana härdningstemperaturförlopp som en verklig betong utsätts för, hög temperatur bara under de första dygnet, redovisas inte.

1.c Frågetecken

Modellering av kemiskt bundet vatten har tidigare² gjorts med utgångspunkt från referensklimatet (+20 °C och) "100 % RF", dvs full tillgång på vatten. För lägre RF (och andra temperaturer) har en "fuktfaktor" använts, som satts = 1.0 vid 100 % RF.

Fråga C1.2: Hur kommer man från mätvärden på förseglade prover där RF sjunker med tiden, och RF-historien inte är känd, till en "komplett" beskrivning av kemiskt bundet vatten vid olika fukthistorier?

2. Modell för desorptionsisotermen w_e/C

2.a "Inmätning"

Desorptionsisoterner har bestämts med sorptionsvåg DVS för betonger med tre vct efter 6 resp. 12 månaders försegling/självtorkning vid +20 °C. Absorptionsisotermerna och skanningkurvorna tas inte upp här eftersom de inte är relevanta för uttorkning.

Egendomligt nog ligger 12-månadersvärdena lägre än vid sex månader, för vct 0.32 och 0.40. Linderoth (2018) fann det omvända för OPC och 15 % flygaska.

Kurvformen hos desorptionsisotermerna är också märklig; de kröker uppåt, vilket få andra mätningar visar.

² Av t ex Norling-Mjörnell (1997)

2.b Frågetecken

En modell ska beskriva desorptionsisotermen vid olika ålder, olika härdningstemperatur, olika temperaturhistorier, olika fukthistorier, etc.

Fråga C2.1: Hur bestäms första punkten, "kapillärt mättad", vid "100 % RF" på ett krossat prov? Hur kommer man tillbaka till "100 % RF" efter absorption?

Fråga C2.2: Följdes inte förloppet mellan 100 och 95 % RF i sorptionsvågen? Om inte, kan inte fukttransportkoefficienten mellan 100 och 95 % RF bestämmas.

Fråga C2.3: Hur långa "jämviktstider" användes för respektive RF-steg?

Fråga C2.4: Hur kommer man till en komplett modell, från mätning vid enstaka (höga) åldrar och en temperaturnivå?

Fråga C2.5: Ligger desorptionsisotermen för vct 0.32 och 0.40 i modellen lägre för högre ålder, som i mätningarna?

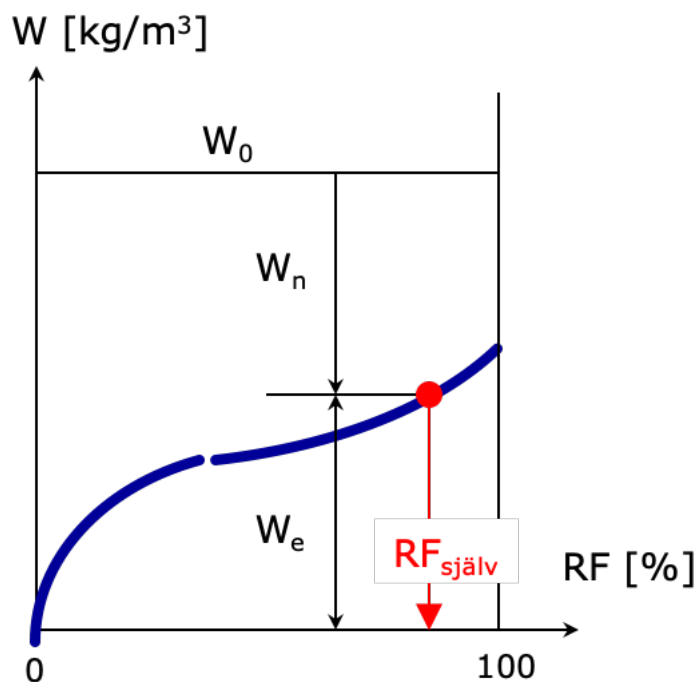
Fråga C2.6: Hur tillämplig är en sorptionsisoterm bestämd med sorptionsvåg, med korta jämviktstider, för långsam uttorkning? Någon jämförelse med desorptionsisotemer bestämda med annan metod under längre tid till jämvikt har inte redovisats.

Fråga C2.7: Är desorptionsisotermen inte alls beroende av a) härdningstemperaturen? b) betongtemperaturen? Hur då? Några mätningar av detta redovisas inte.

Fråga C2.8: Mätningarna har gjorts på krossade prover. Krossningen ger en del effekter. Har dessa beaktats?

3. Modell för självuttorkning $RF(w_0/C-w_n/C)$

Av steg 1 och steg 2 ovan får man direkt en modell för självuttorkning. RF efter självuttorkning kan direkt avläsas på desorptionsisotermen, se figur, med utgångspunkt från blandningsvattenhalten w_0 , dvs vct w_0/C och cementhalten C .



Med det kemiskt bundna vattnet w_n/C enligt ovan kan mängden fysikaliskt bundet vatten $w_e/C = w_0/C - w_n/C$ beräknas vid självuttorkning, dvs förseglad hårdning. Då erhålls $w_e/C = 0.32 - 0.20 = 0.12$, $0.40 - 0.23 = 0.17$ och $0.55 - 0.26 = 0.29$ för vct 0.32, 0.40 respektive 0.55 efter sex månader, vid en konstant hårdningstemperatur av +20 °C.

Inlagt i desorptionsisotermerna skulle dessa fukthalter ge självuttorkning till ca 75, 85 respektive 96 % RF för vct 0.32, 0.40 respektive 0.55. Detta stämmer hyfsat med senare RF-mätningar för vct 0.40 och 0.55, men inte alls för 0.32.

För desorptionsisotermerna vid tolv månader fås p s s RF = 78, 90 resp. 97 % RF efter självuttorkning.

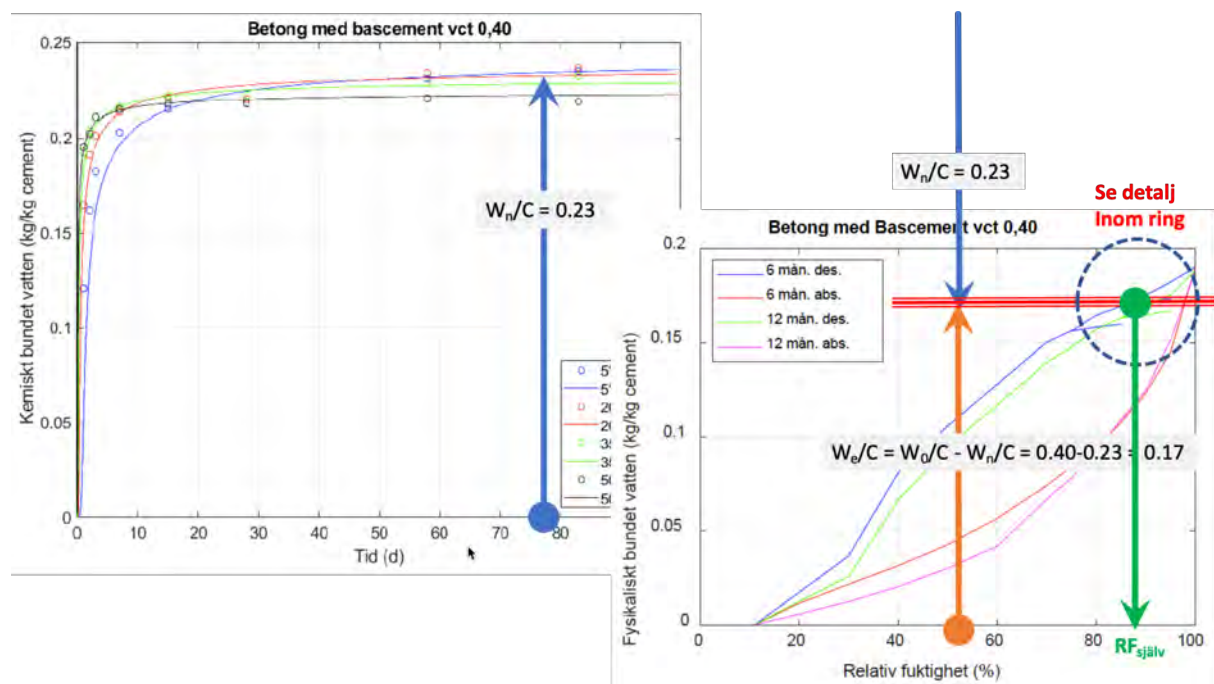
Vid högre hårdningstemperatur blir mängden kemiskt bundet vatten något mindre och RF efter självuttorkning något högre.

Några RF-mätningar efter självuttorkning har dock inte redovisats så modellen har inte verifierats.

Fråga C3.1: Hur stor är "osäkerheten" i självuttorkningsmodellen?

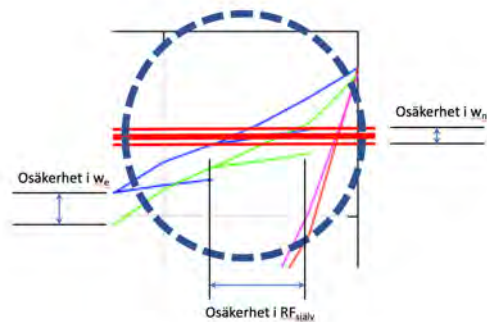
Fråga C3.2: Hur stor är temperaturberoendet i självuttorkningsmodellen?

Ett försök att åskådliggöra osäkerheterna ges i nedanstående figurer.

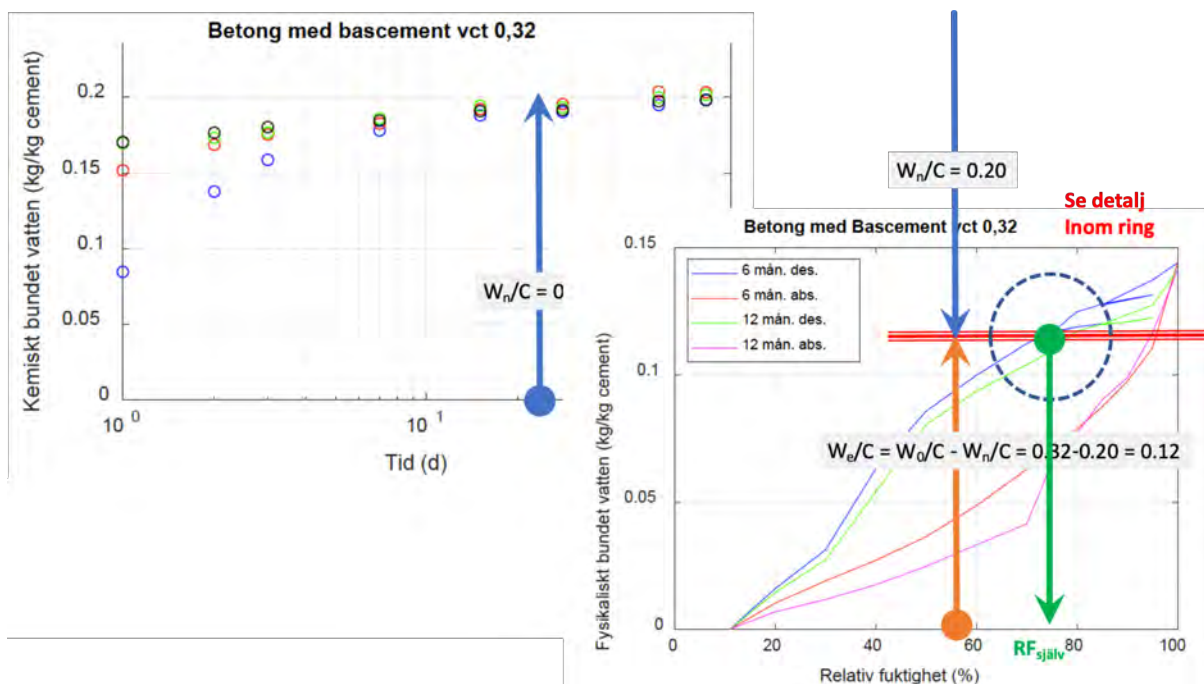


Kemiskt bundet vatten w_n/C (vänstra diagrammet) subtraherat från blandningsvattenmängden w_0/C som ger fysikaliskt bundet vatten w_e/C efter självuttorkning, som lagts in i desorptionsisotermen (högra diagrammet). Betong med vct 0.40; diagram från Stelmarczyk et al. (2019c). Området inom cirkeln förstörat i bilden nedan.

Självuttorkningsmodellen, utan temperatureffekt, för vct 0.40; ger $RF_{själv}$ ca 85 %.



Osäkerheter pga. osäkerheter i kemiskt bundet vatten och dess temperaturberoende, osäkerheter hos desorptionsisotermen och dess beroenden samt den därav följande osäkerheten i RF efter självuttorkning. Eventuellt systematiskt fel i desorptionsisotermen är ej inräknat.



Självuttorkningsmodellen, utan temperatureffekt, för vbt 0.32; ger $RF_{själv}$ ca 75 %.

4. Modell för fuktberoendet hos fuktransportkoefficienter

Fuktransportkoefficientens fuktberoende har kvantifierats med hjälp av tidsförloppen hos viktändringarna i respektive RF-intervall i mätningarna med sorptionsvåg DVS.

Enligt uppgift i en tidigare artikel, Stelmarczyk et al. (2019a), har metodiken validerats med data från Olsson (2018) som bestämde desorptionsisoterner med sorptionsvåg och gjorde koppmätningar på samma material; olika typer av cementbruk.

I slutrapporten beskrivs ett (onödigt?) komplicerat sätt att utvärdera fuktberoendet hos fuktransportkoefficienter från sorptionsdata. Metodiken uppfattas enligt följande.

- a) Provet består av krossmaterial där stora ballastkorn plockats bort, dvs absolutvärden för betong kan inte erhållas.

- b) Samma, krossade prov används i alla RF-steg, varför värdena vid olika RF kan jämföras.
- c) Fukttransportkoefficient och fuktkapacitet antas konstanta i respektive RF-steg.
- d) Alla partiklar i krossmaterialet antas ha sorptionsvägens RF på partikelytan, oberoende av placering i "bädden" av krossmaterial. Kan ifrågasättas, särskilt för höga vct.
- e) Partikelfördelningen har uppskattats och en matematisk analys genomförts för att få fukttransportkoefficienten i respektive RF-steg för krossmaterialet.

Fråga C4.1: Kan vi få se data från mätningarna i sorptionsvägen? De behövs för att avgöra om analysen är riktigt utförd.

Fråga C4.2: Vilka andra antaganden har gjorts? Har partikelfördelningen för krossmaterialet för de olika betongerna bestämts?

Fråga C4.3: Har mer än en mätning gjorts i sorptionsvägen för respektive material?

Fråga C4.4: Hade inte samma resultat erhållits med användande av en "ekvivalent tjocklek" för respektive prov?

Fråga C4.5: Har "kopplingar" mellan mätningar för de tre vct använts? Hur då?

Fråga C4.6: Har "icke-Fickskt" beteende observerats/beaktats?

5. "Verifieringsmätningar" i betonger

RF-mätningar enligt RBK har gjorts i ett antal betonger efter viss härdning och uttorkning. "Uttorkningsmätningar" har gjorts på 11 betongplattor gjutna i backar till tjockleken 110 eller 155/160 mm.

- Betong med tre vct (0.32, 0.40 och 0.55) har levererats av två betongleverantörer. Recepten är annorlunda än i laboratorieförsöken.
- Två plattor hade betong med vct 0.32; en av dessa var frusen månaden innan torkstart.
- En platta hade betong med vct 0.40.
- Övriga åtta plattor hade betong med vct 0.55.
- Tio av plattorna hade ungefär konstant temperatur kring +20C hela tiden.
- Luftens temperatur och relativa fuktighet redovisas vid några tillfällen under upp till 11 månader.
- Vid dessa tillfällen redovisas om plast varit "På" eller "Av", vilket bör kunna indikera när plattorna började torka.
- Betongtemperaturer redovisas inte och nämns inte, vilket är förvånande eftersom det påstås att härdningstemperaturen är så viktig för självuttorkningen. Det sägs heller inte om plattorna varit värmeisolerade, vilket påverkar temperaturfördelningen i 3D och över tid.

RF har mätts i dessa elva plattor enligt RBK-systemet

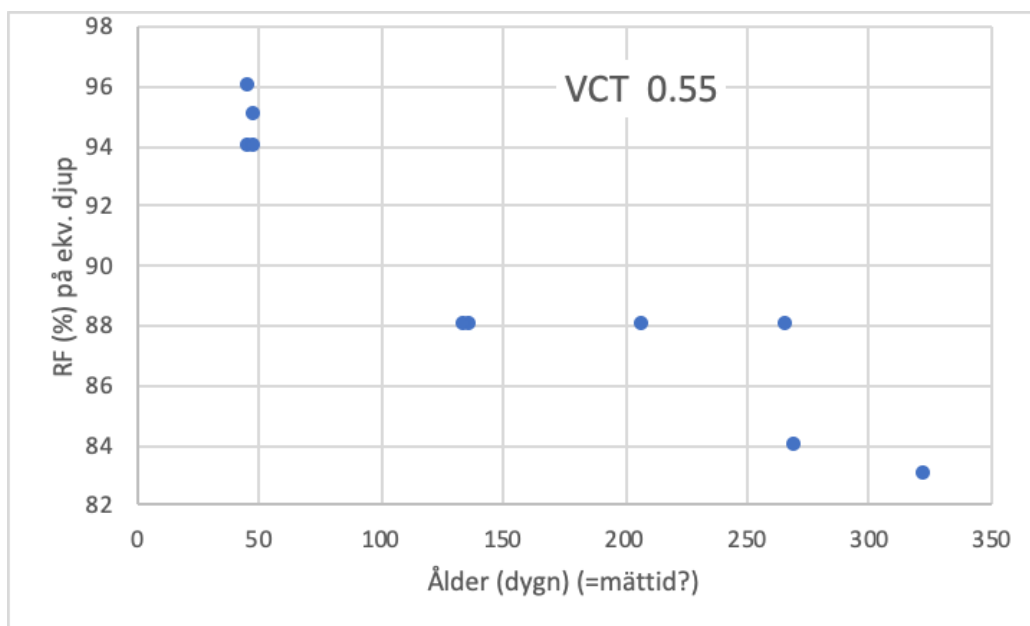
- på "ekvivalent mätdjup" i alla plattorna.
- dessutom på ett par djup till i fem av plattorna.
- men bara en enda fuktprofil, efter mer än en veckas uttorkning, har bestämts.
- bara en gång i respektive platta utom för en platta där mätning gjorts vid två tillfällen.
- men det sägs inte i rapporten när RF-mätningen gjorts annat än för en platta; gissningsvis har RF-mätningar gjorts vid det sista redovisade tillfället.

Kommentarer

- Tidpunkten för RF-mätning i respektive platta måste redovisas.
- Det är ett väldigt "magert" underlag för valideringar att bara ha en eller två plattor för vct 0.32 respektive 0.40 och bara mätning vid ett enda tillfälle (för vct 0.40).
- För vct 0.32 ligger alla RF inom 82-85 % RF, på olika djup och vid två tidpunkter, vilket skulle kunna tolkas som att betongen blir inte torrare med tiden, dvs den har ingen (större) fukttransport. Utan en mycket stor temperatureffekt i självuttorkningsmodellen verkar RF bli lägre efter bara självuttorkning än efter självuttorkning plus diffusionstorkning, vilket är orimligt.
- För vct 0.40 finns bara ett enda mätvärde (86 % RF), efter tre månaders härdning och sju veckors uttorkning. Det finns inget att jämföra med.
- För vct 0.55 finns mätvärden efter olika torktider och en fuktprofil vid ett tillfälle. Detta skulle kunna användas för kontrollberäkningar.

Fråga C5.1: Finns det bara dessa "verifieringsmätningar"? På fotot av platta E, figur 7 i Stelmarczyk et al. (2019c), syns en mängd RF-givare. Har de inte använts i PPB-projektet?

Fråga C5.2: Ger en RBK-mätning verkligen "verklig RF" i betong?



Uppmätta RF i betonger med vct 0.55 efter viss härdning och viss uttorkning; data från Stelmarczyk et al. (2019c). Ser ut som uttorkning pga. fukttransport!

6. Fukttransportegenskaper – från parameteranpassning

Fukttransportegenskaper har mätts i projektet men de har inte använts; de har förkastats eftersom de ansetts ha gett "för stor" fukttransport.

Istället verkar fukttransportegenskaperna kvantifierats genom att jämföra

- a. RF efter självuttorkning enligt modellen
- b. RF mätt efter viss uttorkning till omgivningen, dvs med fukttransport.

Skillnaden mellan dessa två måste förklaras av fukttransport. Eftersom skillnaden (i de få mätningar som gjorts) antagligen är liten "måste" fukttransporten vara liten, annars stämmer inte modellen.

Simuleringarna sägs innehålla icke isotermiskt fuktflöde kombinerat med simulering av värmefflöde. Alla uttorkningsmätningar utom en, se nedan, gjordes vid konstant temperatur, kring +20 °C, varför det inte finns några värmefflöden eller icke-isoterma förhållanden annat än de första dygnen då plattorna är förseglade. Några mätningar eller resultat rörande icke-isotermiskt fuktflöde nämns inte.

Med de "inmätningar" som gjorts för **vct 0.32** i steg 1 och steg 2 borde RF bli ca 75 % RF efter ett halvårs självuttorkning, vid +20 °C, enligt ovan. Om betongen torkar mot omgivningen borde RF bli lägre än så. Den enda RF-mätning som gjorts vid +20 °C för vct 0.32 visade 82-84 % RF. Med dessa värden skulle alltså fukttransport ÖKA RF i betongen! För att "undvika" detta, orimliga, måste temperaturberoendet hos kemiskt bundet vatten göras stort och desorptionsisotermerna "justerats" så att självuttorkningen blir mindre än "inmätningen" vid +20 °C visade.

För **vct 0.40** finns en RF-mätning gjord som visade 86 % RF efter tre månaders härdning och två månaders uttorkning. Någon RF-mätning efter självuttorkning finns inte redovisad. "Inmätningen" i steg 1 och steg 2 borde ge RF ca 85 % vid +20 °C. Även här måste alltså temperaturberoendet hos kemiskt bundet vatten göras stort och desorptionsisotermerna "justerats"

För **vct 0.55** finns fler RF-mätningar. RF efter självuttorkning har inte mätts men kan förväntas vara hög; självuttorkningsmodellen borde ge ca 97 % RF. RF efter uttorkning ger lägre RF som skulle kunna användas för att verifiera fukttransportegenskaper. Något underlag för tidig ålder finns inte så det handlar om att "skruva på parametrar".

Fråga C6.1: Är detta en någorlunda korrekt beskrivning av hur absolutvärdena hos fukttransportkoefficienten kvantifierats?

Fråga C6.2: Hur kan åldersberoendet hos fukttransportkoefficienten utvärderas ur dessa data?

Referenser

Linderoth, O. (2018) *Binding of moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar : Impact of replacement level and curing temperature*. Rapport TVBM-3186, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund

Nilsson, L.-O. (2002) *Long-term moisture transport in high performance concrete*. Matériaux et Constructions, Vol.35 - N° 254, December 2002

Norling Mjörnell, K. (1997) *Moisture conditions in high performance concrete – mathematical modelling and measurements*, report P-97:6, Building Materials, Chalmers, Göteborg

Olsson, N., Nilsson, L.-O., Åhs, M. & Baroghel-Bouny, V. (2018) *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*. Cement and Concrete Research 106 (2018), p. 23-32, 10 p.

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. & Gränne, F. (2019a) *Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning*. 2019-01-18. <https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/>

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. & Gränne, F. (2019b) *Självuttorkning och temperatur, det vill säga hur man får uttorkning att fungera*. 2019-03-15. https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/sjalvtorkning_och_temperatur/

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H. (2019c) *Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong samt Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong*. SBUF ID: 13197 & 13198. Slutrapport 2019-03-29. <http://www.sbuf.se>, nu borttagen

Utveckling av beräkning av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong

samt

Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong

Slutrapport

Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier

Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF PPB Koordinator

Staffan Carlström, Swerock AB

2019-05-10

Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till samtliga branschens representanter som deltog i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet.

Ett specifikt tack riktas till

- Swerock AB samt Skanska Sverige AB för hjälp med de industriella betongrecepten som användes i projektet.
- Sveriges Byggindustrier, Skanska Sverige AB, NCC Sverige AB samt Peab Sverige AB för support med fuktmättningsresultat från uttorkning av provkroppar samt fullskaliga konstruktioner.
- Nilla Olsson, NCC Sverige AB, för tillhandahållande av forskningsresultat som användes i projekten till validering och intrimning av metod för anpassning av transportegenskaper till viktstabiliseringsförlopp i sorptionsvåg.

Projektets arbetsgrupp vill slutligen rikta ett stort och varmt tack till SBUF för finansiering av detta projekt.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar projekten SBUF 13197 (Utveckling och grundimplementation av uttorkning i programmet Produktionsplanering Betong) samt 13198 (Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplanering Betong). Kort bakgrund till projekten ges.

Projektgenomförandet beskrivs inom de olika arbetsområdena inklusive samarbete med doktorandprojektet SBUF 13140. Resultaten presenteras översiktligt inom de respektive områdena samt i detalj i några av bilagorna. Även upparbetade delresultat som ännu inte hunnit frisläppas till industrin tas upp. Slutligen formuleras en rad rekommendationer rörande förslag till omedelbara följdprojekt för implementation och frisläppning till industrin av upparbetade delresultat som ännu inte hunnit ut.

Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	2
Innehållsförteckning	3
1 Inledning	4
1.1 Bakgrund	4
1.2 Rapportens struktur	4
2 Projektens genomförande	4
2.1 Inmätning av materialegenskaper	4
2.2 Revidering av materialmodeller	7
2.3 Anpassning av materialdata	7
2.4 Implementation i PPB	7
2.5 Ändringar i projektorganisationen	8
3 Resultat	9
3.1 PPB 2.0	9
3.2 Materialegenskaper	10
3.3 Materialmodeller	11
3.3.1 Hydratation och kemisk bindning av vatten	12
3.3.2 Sorption	12
3.3.3 Transport	12
3.4 Kommunikation	13
3.5 Icke frisläppta resultat	13
4 Rekommendationer avs. framtida projekt	14
Bilageförteckning	15

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Projekten SBUF 13197 och 13198 startades i syfte att bygga ut mjukvaran Produktionsplanering Betong (PPB) med funktionalitet för beräkning av uttorkningsförlopp i betongkonstruktioner gjutna med Bascement. SBUF 13197 ansvarade för implementation av nödvändig funktionalitet i PPB. SBUF 13198 ansvarade för inmätning av egenskaper hos betong med Bascement och anpassning av materialdata. Projekten skulle genomföras i full samverkan med varandra och med doktorandprojektet SBUF 13140, där revidering och nyutveckling av nödvändiga materialmodeller skulle ske.

Denna rapport redovisar projektetens genomförande och resultat. Rapporten redovisar även rekommendationer inför framtida samarbeten av liknande karaktär samt pekar ut behov av mindre utvecklingsprojekt för att ta vara på alla upparbetade resultat som ännu inte kunnat implementeras i PPB.

1.2 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i fyra delar:

- Inledning – detta kapitel.
- Projektets genomförande – här redovisas det arbetet som utfördes under projektet.
- Resultat – här redovisas en övergripande bild av resultaten. För detaljer se rapportens bilagedel.
- Rekommendationer – här redovisas vad projektet rekommenderar avseende generellt arbete av liknande slag i framtiden. Här finns även rekommendationer för framtida utveckling avseende fukt i PPB.

Rapporten innehåller även bilagor med detaljerade resultat av inmätningen av Bascementets fuktegenskaper och publicerade industriella artiklar från projekten.

2 Projektets genomförande

Projekten genomfördes under ledning av Sveriges Byggindustrier. Majoriteten av arbetet inom SBUF 13197 utfördes av The Green Dragon Magic (GDM). Majoriteten av arbetet inom SBUF 13198 utfördes av projektets akademiska part, Avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH. Även GDM utförde en signifikant del av arbetet inom SBUF 13198 samt stöttade den akademiska parten i utveckling och projektledning.

2.1 Inmätning av materialegenskaper

Denna del av arbetet faller under SBUF 13198. Arbetet var tänkt att utföras av projektens akademiska part självt men krävde rätt omfattande stöd av flera aktörer i projektets arbets- respektive styrgrupp samt från doktoranden från SBUF 13140.

Arbetet baserade sig på en mätplan fastställd med projektens akademiska part i samband med SBUF-ansökan. Först och främst tillverkades det en rad provkroppar för olika slags mätningar. Detta skedde genom gjutning av betong och bruk och senare härdning av gjutkroppar under olika förhållanden, se

exempel i Fig. 1. Därefter, vid lämplig ålder, tillverkades enskilda provkroppar för vidare konditionering och mätning. Mätningarna utfördes bl.a. med hjälp av apparatur för termogravimetrisk analys (se Fig. 2), sorptionsvåg (se Fig. 3), tryckpress för kuber och semi-adiabatisk kalorimeter (se Fig. 6)



Fig. 1 Förseglade cylindrar som härdats initialt i temperaturstyrda vattenbad, på bilden under lagring i klimatrums för senare tillverkning av olika provkroppar.

Under arbetets gång skedde en rad förändringar av denna plan. Tilltänkt monitorering av relativ fuktighet i betongprover under uttorkning fr.o.m. andra veckan efter gjutning visade sig vara omöjlig att utföra. Ett tidigt test av denna mätupställning visade att uppmätta RF-värden stabiliserade sig långsammare än vad betongens egenskaper ändrade sig i början av mätningen. Denna mätning byttes ut mot enstaka mätning av relativ fuktighet vid två tillfällen (3 resp. 6 månader efter gjutning) kombinerad med kontinuerlig vägning av prover för erhållande av ett mätvärde som beskriver vattenavgången p.g.a. diffusionsuttorkning.

Tilltänkta mätningar av sorption vid relativ fuktighet mellan 95% och 100% med metoden *pressure plate* togs bort då de, efter en litteratursökning, visade sig irrelevanta för problemställningen. Betongens porvätska innehåller upplösta salter vilket gör att den i princip inte kan befinna sig i ett fukttillstånd lämpligt för metoden *pressure plate*.

Inmätning av sorptions- och transportegenskaper vid varierande temperatur utfördes inte. Tidigare i projektet utförd termogravimetrisk analys av prover hydratiserade i olika relativa fuktigheter och temperaturer högre än 20 grader C visade orimliga resultat jämfört med prover hydratiserade vid 5 och 20 grader. Slutsatsen drogs att boxar som användes för att generera miljön i fråga läckte vattenånga. Samma typ av boxar skulle användas senare för mätning av sorption och transport vid varierande temperatur men beslut togs att inte utföra det momentet då felaktiga resultat förväntades.



Fig. 2 Utrustning för termogravimetrisk analys. Med hjälp av denna mättes kemisk bindning av vatten.

Kopplingsförsök för inmätning av transportegenskaper utfördes inte. Enligt tidigare uppgift skulle denna test ta ca "någon månad" att utföra. Vid litteratursgranskning upptäcktes stabiliseringstider på ca 1 år för denna typ av inmätning. Då materialet i detta projekt misstänktes vara ännu tätare, byttes hela momentet ut mot annan typ av anpassning av transportegenskaper till redan uppmätta insvägningsförlöpp från sorptionsvåg med slutlig nivåjustering mot vägning av provkroppar i uttorkningsförlöpp. Arbetsmomentet flyttades från projektets akademiska part till GDM.



Fig. 3 Sorptionsvåg (vänster) samt utrustning för generering av nitrogen (höger) som användes i sorptionsvågen. Med hjälp av dessa mättes sorptions- samt transportegenskaper.

Mätning av uttorkningsförlöpp i hink fick ersättas med projektexterna mätningar av relativ fuktighet vid uttorkningsförlöpp i större provkroppar (back) i regi av Sveriges Byggindustrier samt andra kompletterande mätdata från projektdeltagande entreprenörer. Viktkurvor från de egna hinkarna drabbades av störning från extra fuktflöde p.g.a. den spalt som uppstår mellan hinkens vägg och betong då betongen krymper. Därtill anpassade transportkoefficienter resulterade i signifikant

underskattning av relativ fuktighet vid jämförelse med RF i samma hinkar och RF från de externa mätningarna.

2.2 Revidering av materialmodeller

Denna del av arbetet faller under SBUF 13140 och utfördes inte direkt under de projekten som denna slutrapport avser. Arbetet krävde dock en samverkan mellan alla 3 projekt då de inmätta materialdata krävdes för modellrevideringen och de färdiga modellerna krävdes vidare för anpassning av materialdata.

2.3 Anpassning av materialdata

Denna del av arbetet faller under SBUF 13198. Arbetet utfördes av The Green Dragon Magic. De planerade anpassningar utfördes till de mätresultat som inte bedömdes som orimliga, se kapitel 2.1.

Det utfördes dessutom anpassningar av transportegenskaper till insvägningsförlopp från sorptionsvåg, vilka inte var planerade från början. Då metoden för denna anpassning var tvungen att utvecklas från början, användes först testdata från en tidigare inmätning i separat forskningsprojekt av både insvägningsförlopp från sorptionsvåg och koppmätningar, för att kalibrera och validera metoden.

Inom ramen för anpassningsarbetet utvecklades två forskningsmjukvaror som användes i anpassningen:

- En för behandling av rådata från termogravimetrisk analys, TGAA, se Fig. 4
- En för simulering av endimensionell isothermisk fuktomfördelning samt endimensionell icke isothermisk fuktomfördelning och uttorkning inkl. simulering av värmeledning och hydratation



Fig. 4 Behandling av vikt förlustkurvor från termogravimetrisk analys i mjukvaran TGAA.

2.4 Implementation i PPB

Denna del av arbetet faller under SBUF 13197. Arbetet utfördes av The Green Dragon Magic med hjälp vid uttestning av Sveriges Byggindustrier, Skanska Sverige AB samt NCC Sverige AB.

Först implementerades fuktberäkning för tvådimensionella fall. Då beräkningstiden för dessa konstruktioner visade sig vara omfattande (0,5 – 2 timmar) beslutades att i första releasen implementera en endimensionell variant med mycket kortare beräkningstider (upp till någon minut). Då majoriteten av konstruktioner kan behandlas endimensionellt bedömdes det som ett måste att kunna utföra de mest fundamentala simuleringar av uttorkning relativt fort. En endimensionell beräkning implementerades inkl. 3 typfall – bjälklag resp. platta på mark med och utan isolering. Denna variant av PPB blev frisläppt 2018-12-20 i version 2.0.12. Därefter har två nya versioner frisläppts med smärre buggkorrigeringar.

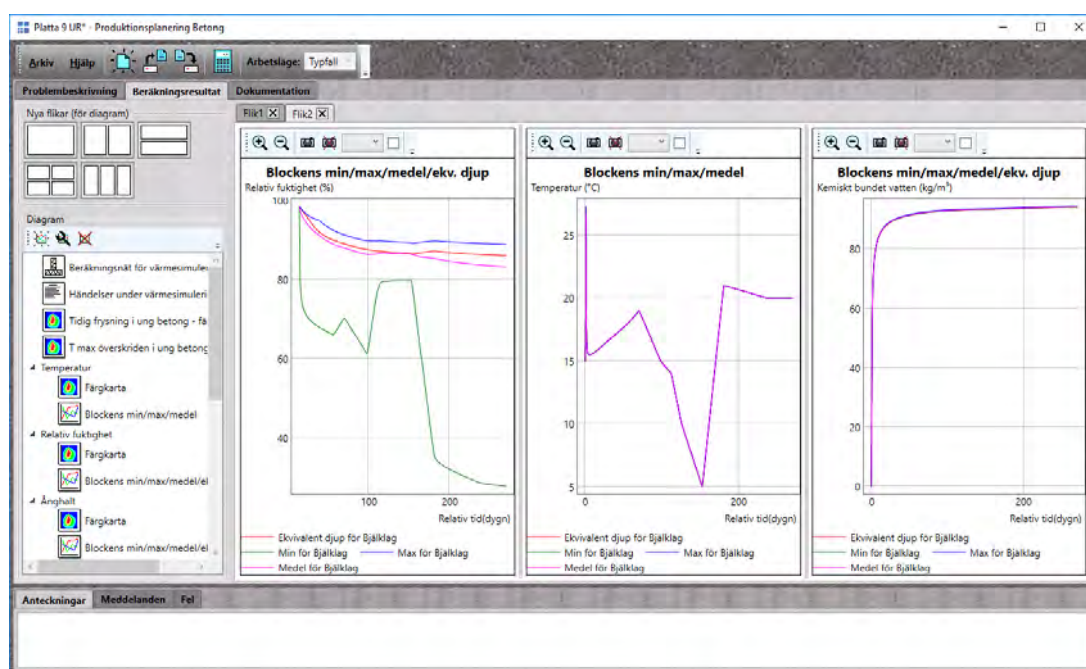


Fig. 5 Exempel på resultat i en fuktberäkning i PPB: relativ fuktighet, temperatur samt kemiskt bundet vatten.

Den tvådimensionella beräkningen testades inte färdigt då projektet fokuserade resurserna på att frisläppa den snabbare och enklare beräkningen till industrin. Det återstår dock relativt litet arbete med färdigställande av den avancerade beräkningen. Det kan blir ett nyttigt komplement för mer avancerade fall, trots lång beräkningstid, nu när det finns en snabbare och enklare variant som alternativ.

2.5 Ändringar i projektorganisationen

Under september 2018 har omorganisation i projekten ägt rum. Arbete från 2018-10-08 till slutet av projekten har utförts utan den akademiska partens medverkan.

3 Resultat

Projektet har levererat av branschen länge efterfrågade resultat. Detta huvudsakligen i form av ny version av beräkningsprogrammet PPB, men även i form av inmätta materialdata, i samverkan med SBUF 13140 reviderade modeller och beräkningsalgoritmer för fukt i betong samt fungerande beräkningar för problemställningar som ännu inte frisläppts. Summan av dessa resultat har:

- bekräftat att betong med Bascement blir så tät avseende fukttransport att diffusionsuttorkning effektivt sätts ur spel
- visat att endast självuttorkning kan användas för att effektivt kunna uppnå uttorkningskrav inom acceptabel tid på byggplatsen
- visat ett tidigare okänt eller åtminstone kraftigt underskattat beroende av självuttorkningen på hur hydratationen sker, dvs. det initiala temperaturförloppet i konstruktionen
- visat att olika initiala temperaturförlopp kan medföra avgörande skillnad för konstruktionens möjlighet att uppfylla ett uttorkningskrav med hjälp av självuttorkning

3.1 PPB 2.0

Den frisläppta versionen av PPB innehåller en ny beräkningskärna med 3 typfall för kombinerad simulering av både temperatur och fuktförlopp. Det är en 1-dimensionell simulering för bjälklag samt platta på mark med resp. utan isolering. Anledningen till att det sker en kombinerad beräkning av både temperatur och fukt är att själva fuktsimuleringen är icke-isoterm och tar hänsyn till fuktförloppets och materialegenskapernas variation med temperatur. Programvaran beräknar:

- Relativ fuktighet
- Ånghalt
- Partiellt ångtryck
- Fysikaliskt bundet vatten
- Kemiskt bundet vatten

Detta kan tillsammans med temperaturen i konstruktionen ge en mycket god förståelse för hur fukttillståndet utvecklas och uttorkning fortskrider, se Fig. 5. Programmet tar hänsyn till fuktrelaterade omständigheter så som väder, väderskydd, uttorkningsmiljö och ev. inomhusmiljö. Det tar även full hänsyn till alla omständigheter som påverkar temperaturutvecklingen från ordinarie simulering av värmeflöde och hållfasthetstillväxt, vilket indirekt påverkar uttorkningen genom:

- Temperatureffekten på kemisk bindning av vatten och självuttorkning
- Förändring av sorptionsegenskaper p.g.a. temperatur
- Förändring av transportegenskaper p.g.a. temperatur

De implementerade materialmodellerna är de mest avancerade hittills inom industriell simulering av fuktförlopp i betong – för detalj se vidare kapitel 3.3. De 7 bifogade betongrecepten baserar sig på Bascement som bindemedel och finns för vattencementtal mellan 0,32 och 0,55.

För närmare presentation av PPB, dess fuktberäkning och exempel på uttorkningsresultat se industriella artiklar i Bilaga 6 samt Bilaga 7.

3.2 Materialegenskaper

Inom projekten har en rad olika s.k. fundamentalegenskaper mätts in för betong med Bascement. I mätningarna har industriella recept med helkross används. Inmätningar har skett för tre recept med resp. vct 0.32, 0.40 samt 0.55, samtliga med konsistensklass S4. De egenskaper som mätts in för varje vct är:

- Hydratationsrelaterade egenskaper
 - Kemisk bindning av vatten
 - Förseglad härdning vid fyra olika temperaturer
 - Härdning vid styrd RF vid två olika temperaturer (ytterligare två försök utfördes vilka misslyckades)
 - Över 1500 analyserade prover
 - Hållfasthet
 - Vattenlagrade kuber vid fyra olika temperaturer
 - Över 200 provtryckta kuber
 - Hydratationsvärme
 - Semi-adiabatisk mätning, se utrustning i Fig. 6
 - Totalt nio semiadiabatiska försök med sammanlagd provtid på ca 200 dagar



Fig. 6 Semi-adiabatisk kalorimeter. Denna användes för mätning av hydratationsvärme.

- Fysikaliskt bundet vatten, s.k. sorption
 - Desorptionskurvor med skanningloopar samt absorptionskurvor
 - Förseglad härdning vid 20° C
 - Mätning utförd vid 6 och 12 månaders ålder
 - Enstaka punkter på desorptionskurvan i det övre hygroskopiska området
 - Förseglad härdning vid 20° C
 - Mätning utförd vid 3, 7, 14 samt 28 dygns ålder
 - Resultaten från dessa mätningar påverkades delvis av felaktigt utförande och fick begränsad precision.
 - Kapillärporositet samt vakuumporositet

- Förseglad härdning vid 20° C
- Mätning utförd vid 3, 7, 14 samt 28 dygns och 6 samt 12 månaders ålder
- Ej komplett
- Sammanlagd provtid i sorptionsvåg över 500 dygn
- Transport av vatten
 - Dynamisk mätning genom anpassning av förändringsförlopp till stabiliseringskurvor från mätning av sorption i sorptionsvåg
 - Samma konditionering av prover och samma åldrar som för sorption
 - Sammanlagd analys av över 400 förändringsförlopp från sorptionsvåg

Utöver inmätning av fundamentalegenskaper har s.k. valideringsmätningar används för att slutjustera nivån i fundamentalegenskaperna mot varandra så att de tillsammans ger en bild som stämmer överens med separat uppmätt uttorkningsförlopp. De använda valideringsmätningarna har dock inte utförts inom projektens regi utan hämtats in från projektens deltagande parter: Sveriges Byggindustrier, Skanska Sverige AB, NCC Sverige AB samt Peab Sverige AB, se exempel i Fig. 7.

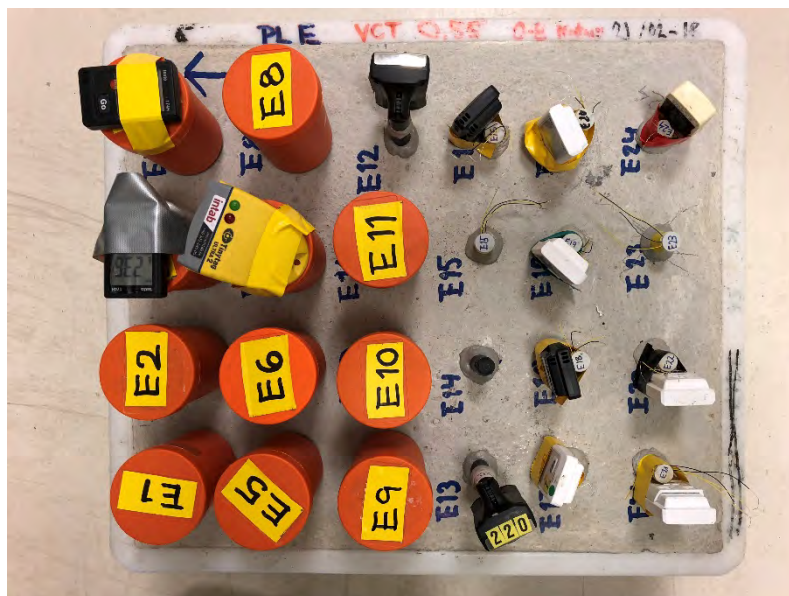


Fig. 7 Exempel på platta gjuten i back med 24 mätpunkter från Sveriges Byggindustrier. Från bl.a. sådana kom mätdata som fick ersätta de läckande valideringshinkarna.

För detaljresultat som ligger till grund för recept i PPB se Bilaga 1.

3.3 Materialmodeller

Revidering av materialmodeller, nödvändiga för simulering av uttorkningsförlopp, har utförts inom doktorandprojektet SBUF 13140 i nära samarbete med SBUF 13197 & 13198. Arbetet har baserat sig på de inmätta materialdata och resulterat i algoritmer som implementerats i PPB 2.0.

Nedan ges en kort och mycket förenklad beskrivning av dessa modeller. För fullständig beskrivning hänvisas till kommande doktorsavhandling från SBUF 13140.

3.3.1 Hydratation och kemisk bindning av vatten

Avseende hydratationen har en ny grundmodell konstruerats. Den tidigare använda mognadsåldern används inte längre som nödvändig mellanparameter. I stället beräknar modellen direkt två olika slags hydratationsgrader:

- En indikerar hur stor del av cementet som har hydratiserat
- En indikerar hur stor mängd vatten som bundits kemiskt

Hydratationsmodellen tar hänsyn till följande parametrar som påverkar hydratationsförloppet:

- Cementets förbrukning inkl. en startförsening på grund av den s.k. dormanta fasen mellan upplösningen av cementet i vatten och hydratationens huvudintensitetstopp
- Temperaturberoende hos reaktionens hastighet
- Temperaturberoende hos mängd vatten som binds per mängd hydratiserat cement
- Vattnets tillgänglighet i porsystemet vid högre hydratationsgrader - detta beroende modelleras endast sent i hydratationen och används som begränsande faktor vid låga vct. Modellen i PPB 2.0.14 har inte detta beroende implementerat, då den delen av modellen utvecklats efter release av programvaran, men kommer att implementeras i nästkommande version.

Den nya hydratationsmodellen används för beräkning av kemiskt bundet vatten, hydratationsvärme samt tryckhållfasthet.

3.3.2 Sorption

För att kunna modellera sorption vid både uttorkning och uppfuktning samt kunna växla däremellan har en helt ny modell konstruerats. Den är baserat på s.k. bi-varierande porstorleksmodeller, där volymen i porsystemet beskrivs som funktion av storleken hos por kroppen resp. dess öppning. Den nya modellen använder dock hydrauliska radier vid tömning/desorption resp. påfyllning/absorption som beroendevariabler och är formulerad på ett kontinuerligt sätt med hjälp av volymsderivator och integraler. Modellen tar hänsyn till ändringar i både fukttillstånd och temperatur, vilket förskjuter den termodynamiska sorptionsbalansen i porsystemet. Eftersom alla tillståndsförändringar baserar sig på detta sätt på både fukt- och temperaturtillstånd, tar modelleringen av hysteres vid växling mellan desorption och absorption automatisk hänsyn till både fukt och temperatur.

3.3.3 Transport

Modellen för transportförmågan bygger på samma princip som modellen för sorption. Detta ger en flexibel modellering av transportkoefficienter för ånghalt vid både desorption, absorption och vid skanning med en hysteres på ett liknande sätt som vid sorption. Sorptionsmodellens sätt att hålla reda på vilka delar av porsystemet som är fyllda och vilka som är tomma, med hänsyn till fukt- och temperaturhistorik, återanvänds här.

Då transporten i det hygroskopiska fuktområdet domineras av förflyttning av kapillärkondenserat vatten drivet av skillnad i porundertryck, blir själva transportkoefficienten för ånghalt kraftigt beroende inte bara av vilka delar av porsystemet som är fyllda utan även av i stunden rådande fukttillstånd och temperatur. Även dessa beroenden modelleras termodynamiskt korrekt av transportmodellen som utöver ånghalt som drivande potential i beräkningen även använder temperatur.

3.4 Kommunikation

Under projektens gång har leverantören av Bascementet flera gånger förmedlat information till branschens aktörer avseende fukt- och uttorkningsegenskaper hos betong med Bascement som inte stämmer överens med erfarenheterna inom projekten. Detta har föranlett att SBUF 13197 och SBUF 13198 i samarbete med SBUF 13140 under 2017, 2018 och 2019 har publicerat totalt 6 industriella artiklar, se exempel i Fig. 8. I dessa har på ett pedagogiskt sett information presenterats om olika mekanismer bakom betongens fukt- och uttorkningsegenskaper. Detta tillsammans med materialdata, i den takt de blivit tillgängliga. I artiklarna har även betongens funktion inom hela golvsystem tillsammans med eventuell avjämning samt limmade ytskikt studerats. För fler detaljer se bilaga 2, 3, 4, 5, 6 och 7.



Fig. 8 En av artiklarna publicerade på PPB:s webbsajt.

Efter frisläppning av PPB har projekten tillsammans med RBK framtagit rekommendationer för prediktering av uttorkning beroende på vilka bindemedel som använts i betongen, se bilaga 8. Dessa har kommunicerats i RBK:s regi.

3.5 Icke frisläppta resultat

Då projekten har tagit fram en rad resultat av mycket fundamental karaktär, så som materialdata, modeller och beräkningsalgoritmer, är det inte förvånansvärt att endast en bråkdel av detta hitintills har kunnat implementeras i PPB. De huvudsakliga områdena där en begränsad insats och ytterligare resurser kan föra den redan framtagna, bakomliggande kunskapen, till fullskalig funktionalitet i PPB är:

- Fuktutbyte med gammal betong inom ramen för uttorkningssimulering (plattbärlag och HD/F), inom hela golvsystem samt med andra delar av anslutande konstruktion i tvådimensionella fall
- Fukttillstånd i golvsystem – simulering av vad som händer efter uttorkning inklusive:
 - Påläggning och uttorkning av avjämning
 - Limning av matta

- o Omfördelning av limfukt
- o Simulering av fuktbelastning och långtidsuttorkning under skarp användning av golvet
- Tvådimensionella fuktberäkningar
 - o Bygger på samma materialmodeller och data som endimensionell simulering
 - o Beräkningskärna är framtagen dock ej intrimmad och validerad

4 Rekommendationer avs. framtida projekt

Det grundläggande arbetet inom SBUF 13197 och SBUF 13198 samt det pågående projektet SBUF 13140 har tagit fram materialdata, materialmodeller, simuleringsmetoder samt beräkningskärnor som ännu inte hunnit implementeras i PPB och således inte ännu kommit byggbranschen till nytta.

Vidare har det framkommit vid design av användargränssnitt samt efter frisläppningen av PPB att det finns signifikanta skillnader i syn på specifikation vid inmatning och presentation av uppgifter mellan användargrupperna med fukt- respektive betongbakgrund. Detta har inte kunnat adresseras inom SBUF 13197 men skulle underlätta användningen av PPB samt hjälpa till att överbrygga gapet mellan dessa två världar. Detta behövs särskilt nu då man i projekten upptäckt betydelsen av hur temperaturförloppet under härdningen påverkar självuttorkningen.

Utöver detta har viss funktionalitet tänkt att ingå i SBUF 13197, helt enkelt inte fått plats inom budget då andra delar av arbetet tagit mer tid än beräknat. Detta omfattar bl.a. samverkan med gammal betong inom typfall som pågjutning på plattbärlag samt komplexa materialblock som HD/F.

Projekten rekommenderar vidare arbete i framtida SBUF-projekt omfattande:

- Implementation av endimensionell simulering av omfördelning av fukt inom sammansatta golvsystem, omfattande även avjämning, lim och ytskikt.
- Komplettering av befintlig simulering av uttorkning med gammal betong (plattbärlag) samt komplexa block (HD/F).
- Utredning och kompletterande omdesign av användargränssnitt för att underlätta för användare med fuktbakgrund.
- Slutlig validering och implementation av den oavslutade tvådimensionella beräkningen som komplement till den existerande och snabba endimensionella.

Bilageförteckning

1. Resultat från inmätning av betong med bascement
2. Industriell artikel, *Betongfunktion: Uttorkning*, publicerad 2017-06-07 på PPB:s webbsajt.
3. Industriell artikel, *Självtorkning av betong*, publicerad 2017-09-28 på PPB:s webbsajt.
4. Industriell artikel, *Diffusionstorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning*, publicerad 2017-11-07 på PPB:s webbsajt.
5. Industriell artikel, *Finns det någon fördel med modern, tät betong?*, publicerad 2018-04-15 på PPB:s webbsajt.
6. Industriell artikel, *Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning*, publicerad 2019-01-18 på PPB:s webbsajt.
7. Industriell artikel, *Självtorkning och temperatur*, publicerad 2019-03-15 på PPB:s webbsajt.
8. Rekommendationer för simulering av uttorkning beroende på vilka bindemedel som används i betong, framtagna tillsammans med och publicerad genom RBK

Materialgenskaper inmätta inom SBUF 13198

Detta dokument beskriver resultat av inmätning av fuktrelaterade fundamentalegenskaper för betong med Bascement, som ligger till grund för materialdata i PPB 2.0.

1 Material

För inmätning användes betong med tre olika vattencementtal med industriella recept med helkross som ballast. Det utfördes totalt 3 olika blandningar för varje recept.

Vct	0,32	0,40	0,55
Bascement (kg/m ³)	560	490	350
Vatten (kg/m ³)	179,2	196	192,5
Sikament Evo26 (% av cementvikt)	1,32	0,65	0,32
Björnstorp 0/2 (% torr vikt av total ballastvikt)	50	50	50
Sandby 8/11 (% torr vikt av total ballastvikt)	50	50	50

Tab. 1, Recept för betong använd under inmätningen.

Vattenmängden är angiven som nominellt värde för torr ballast och i praktiken blev justerad med hänsyn till ballastens fuktinnehåll, som mättes upp genom vägning och uttorkning i 105° C i 24 h för varje blandning.

Flyttillsatsmedlets mängd är angiven som nominellt värde och i praktiken blev justerat tills konsistensklass S4 erhöles i resp. blandning.

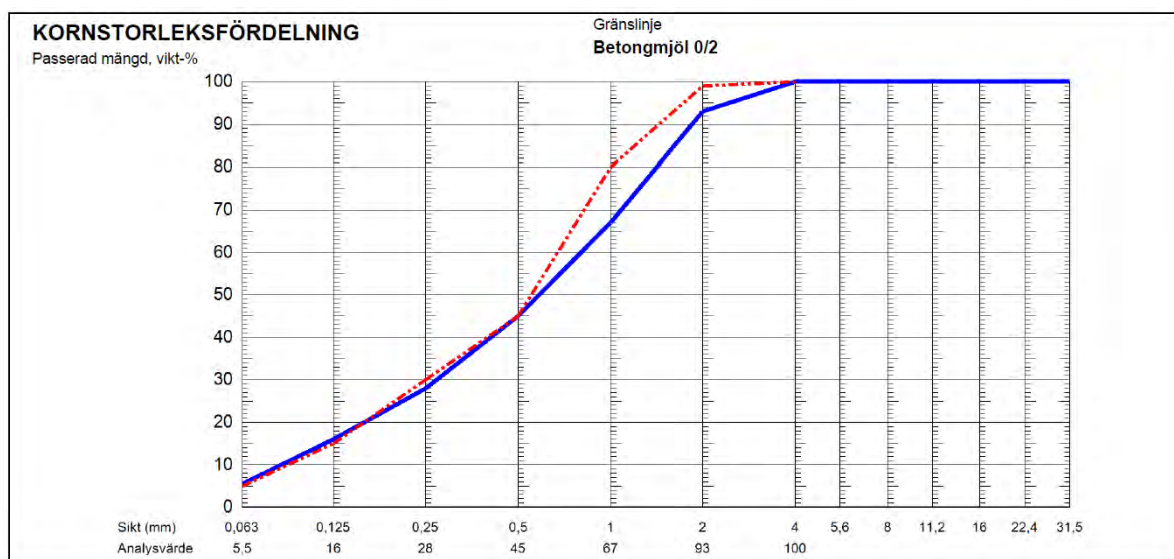


Fig. 1 Siktcurve för ballast Björnstorp 0/2.

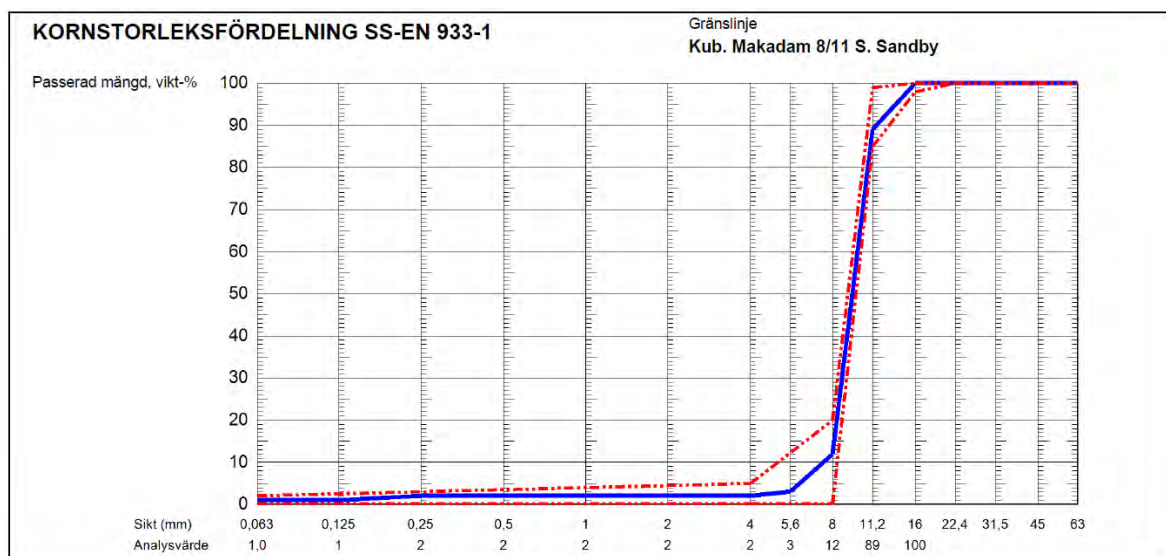


Fig. 2 Siktcurve för ballast Sandby 8/11.

Bascementet som användes vid inmätningen hade en specifik yta på 451 m²/kg och innehöll 3,8% kalksten samt 14,4% flygaska. Cementets kemiska sammansättning ges i tabellen nedan.

Ämne	Mängd
CaO (%)	55,8
SiO ₂ (%)	24,1
Al ₂ O ₃ (%)	6,4
Fe ₂ O ₃ (%)	3,5
MgO (%)	2,7
Na ₂ O (%)	0,38
K ₂ O (%)	1,3
SO ₃ (%)	3,5
Cl (%)	0,07
Vattenlöslig kromat (mg/kg)	< 2

Tab. 2, Kemisk sammansättning av det använda bascementet

2 Hydratationsrelaterade egenskaper

2.1 Kemiskt bundet vatten

Kemiskt bundet vatten har mätts in genom termogravimetrisk analys med efterföljande bestämmande av kalciumhalt i proverna för att koppla mängden uppmätt vatten till cementmängden. Proverna har först härdats i förseglat tillstånd i vattenbad med olika temperaturer. Därefter har de torkats i 11% RF 20 °C i minst 6 veckor, krossats och ca 1,5 gram av krossat material utan större synliga ballastkorn har tagits till analys. Den termogravimetriska analysen har utförts med hjälp av TGA701 (Leco Corporation, USA), i en atmosfär av nitrogen, från rumstemperatur till 1000 °C med temperaturökning av 1 °C/min med stopp för vikstabilisering på 90 min vid 380, 450, 580 och 750 °C. Provet har sedan löst upp i saltsyra och genomgått s.k. ICP-OES analys (Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy) för bestämmande av kalciumhalt, i enlighet med metod

definierad i Linderoth 2018, Paper II. Kalciumhalten har sedan tillsammans med cementets kemiska sammansättning används för att räkna ut proportioner av cement samt ballast i proverna.

Från den registrerade viktkurvan har viktkurvor för emissioner från ohydratiserade råmaterial subtraherats i proportion till innehåll av resp. material. Därefter har vikter vid de stabiliserade temperaturerna tagits fram genom medelvärdesbildning av värden framtagna genom kurvförstoring och optisk inspektion, se exempel i Fig. 3.

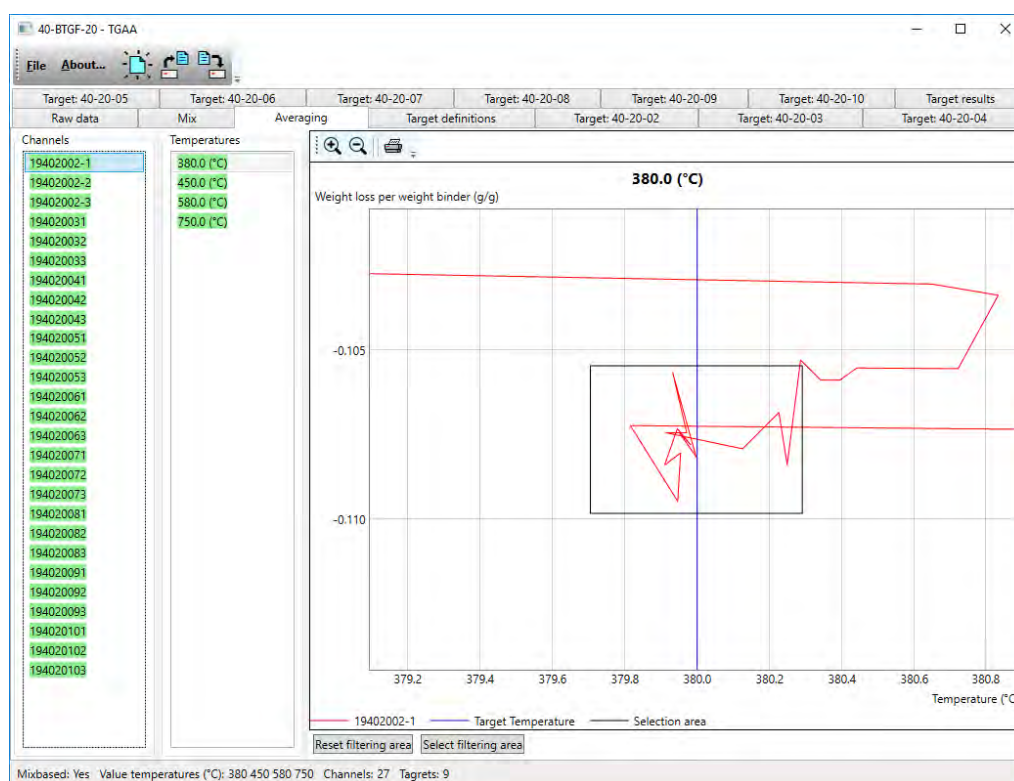


Fig. 3 Förstoring av TGA-kurva inkl. selektion av punkter för medelvärdesbildning av vikt vid 380 °C.

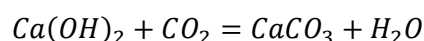
Vikter från tre prover av samma material har sedan bildat ett medelvärde och används för att bestämma mängd kemiskt bundet vatten för åldern i fråga enligt formeln nedan:

$$w_{Ch} = w(1000\text{ °C}) - w(25\text{ °C}) - (1 - f)[w(750\text{ °C}) - w(580\text{ °C})]$$

där

$$f = \frac{2 \cdot 1.008 + 15.999}{12.001 + 2 \cdot 15.999}$$

är en kompensationsfaktor för förhållande mellan molekylvikt av vatten resp. koldioxid då viktneigången mellan 580 och 750 °C anses bero på sönderfall av kalcit, i kalcium resp. koldioxid, och skall räknas om till det vatten som kalcium skulle ha bundit i form av portlandit, men som karbonatiserats i enlighet med:



De erhållna resultaten visas i Fig. 4, Fig. 5 samt Fig. 6.

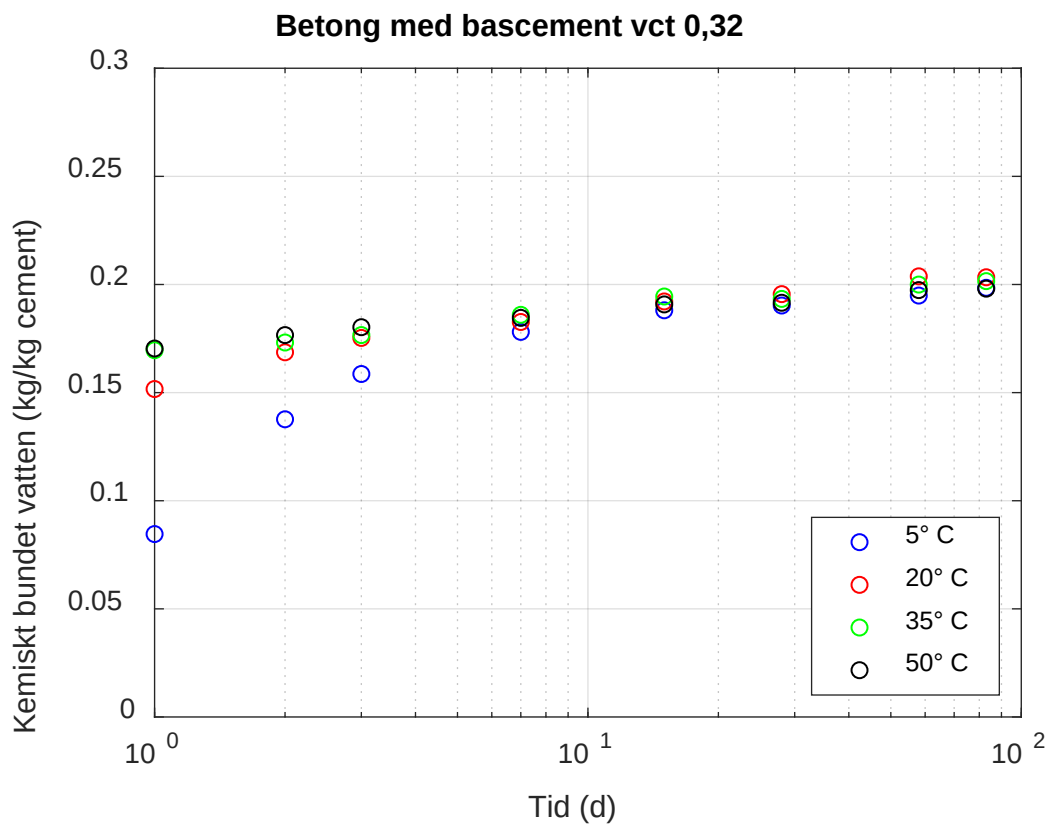
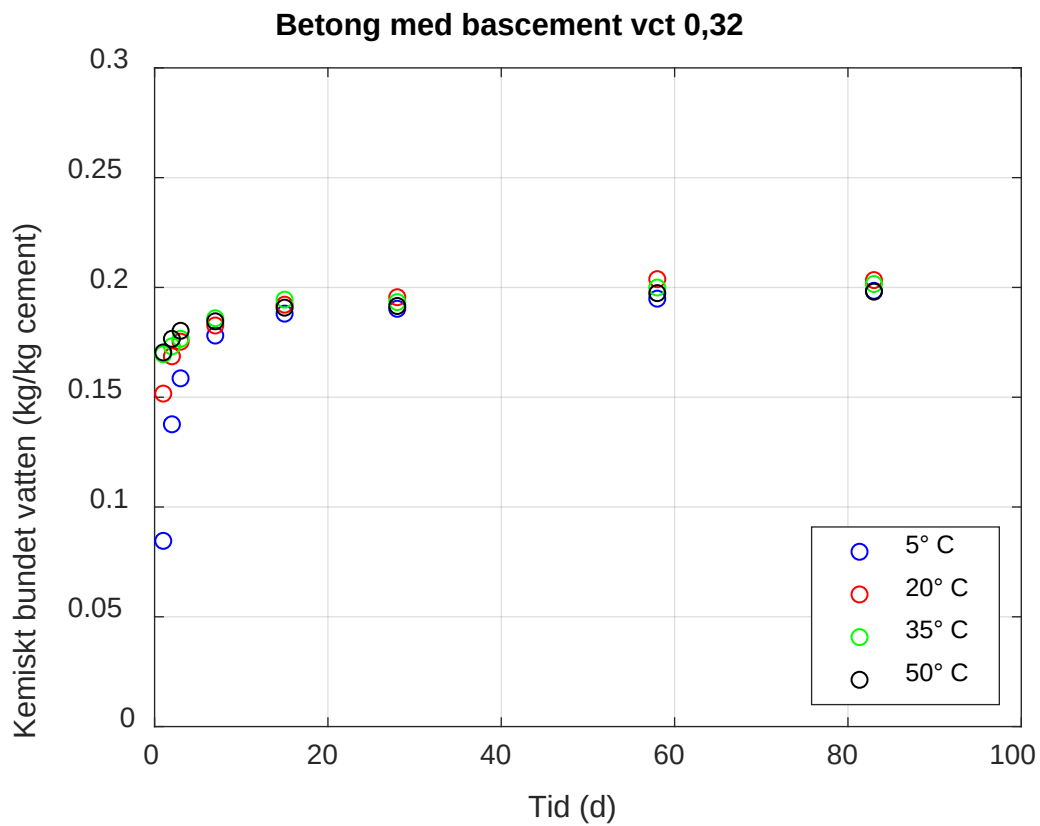


Fig. 4 Kemiskt bundet vatten som funktion av tid vid förseglad härdning vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.32, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

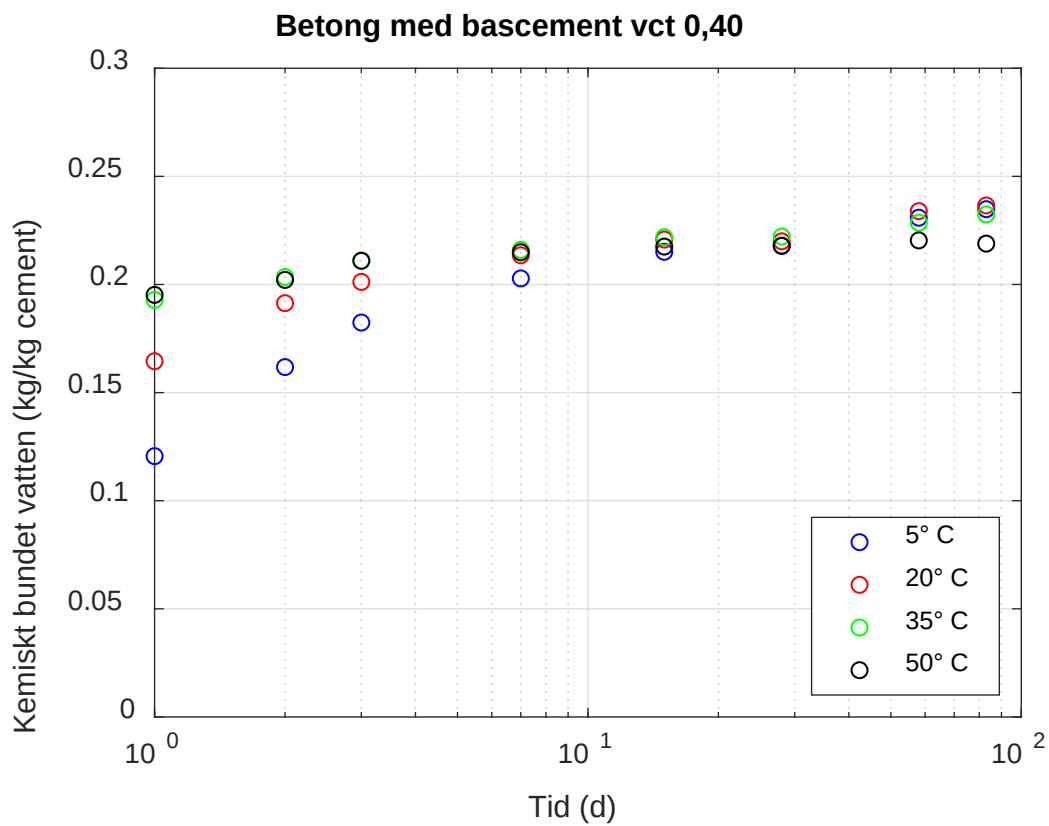
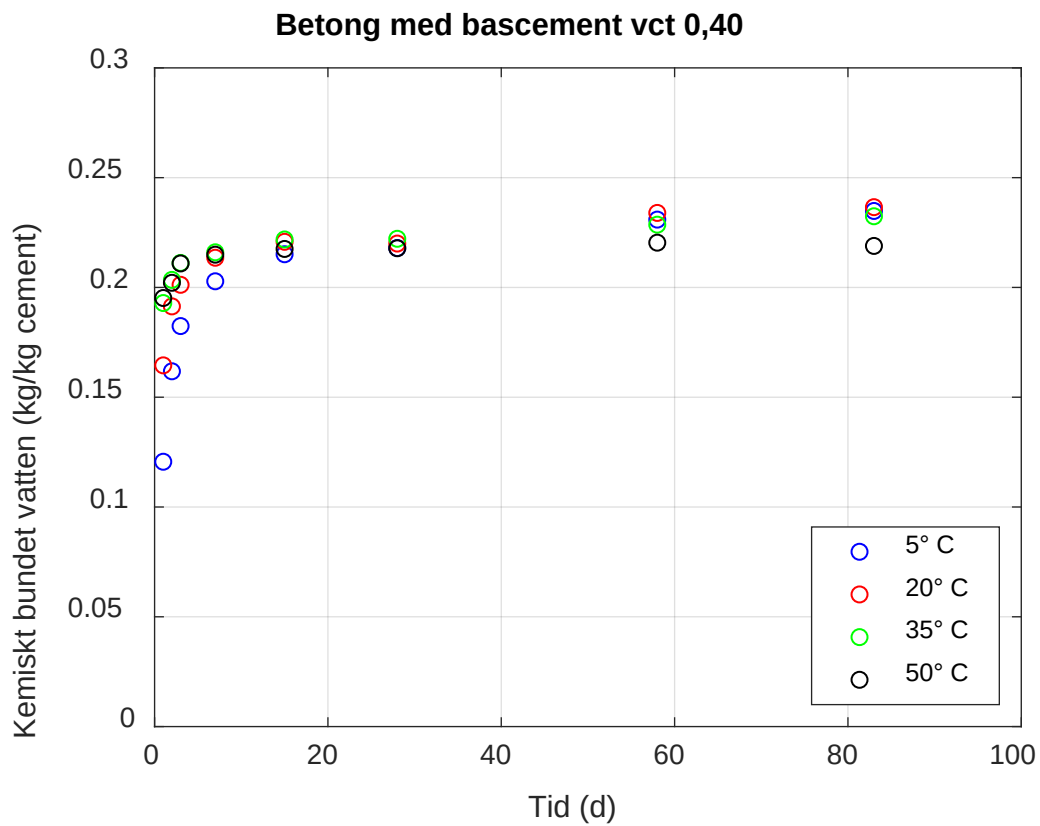


Fig. 5 Kemiskt bundet vatten som funktion av tid vid förseglad härdning vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.40, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

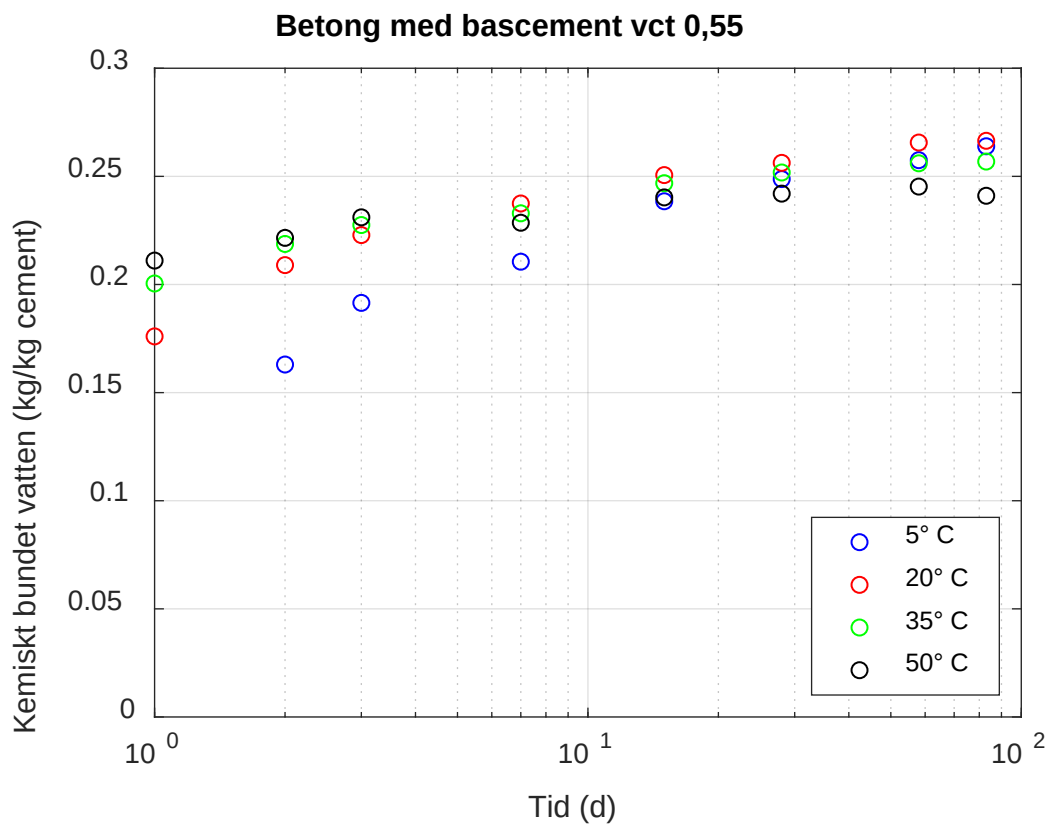
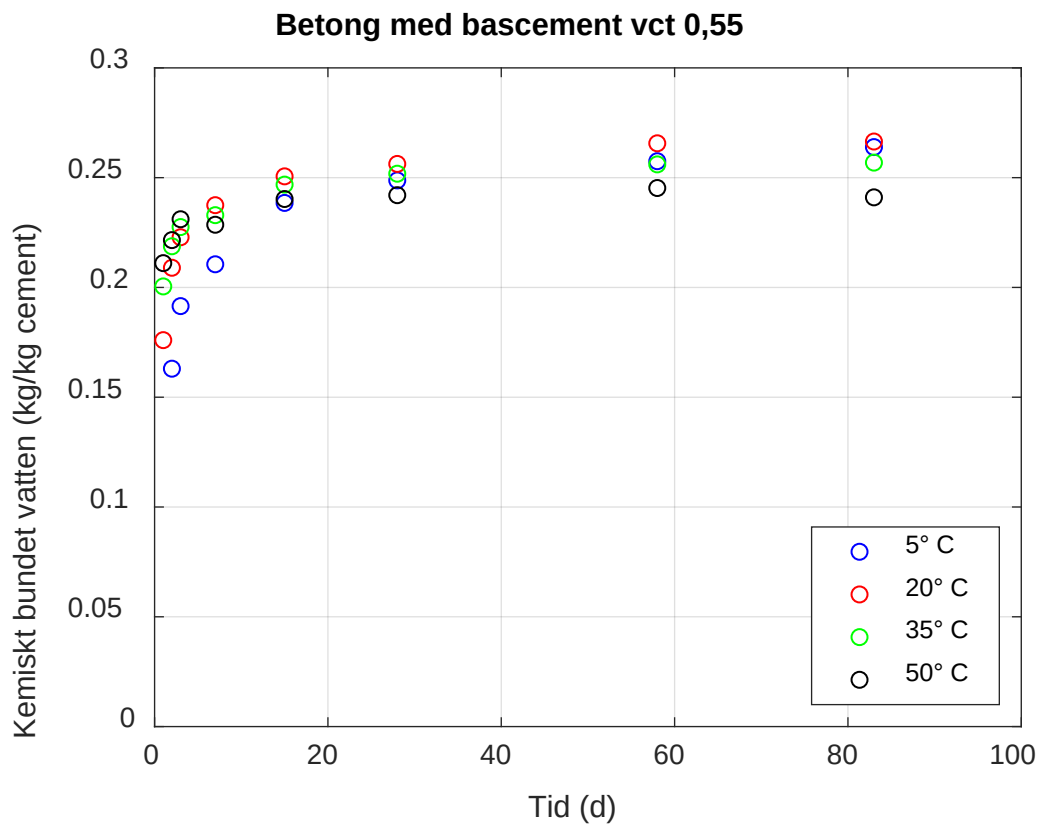


Fig. 6 Kemiskt bundet vatten som funktion av tid vid förseglad härdning vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.55, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

2.2 Hydratationsvärme

Värmeutvecklingen under hydratationen har mätts i s.k. semi-adiabatisk kalorimeter, System HydraHeat från Vema Venturi AB. Proverna har gjutits i ca 5l stora hinkar. Temperaturförlopp har registrerats först för hydratation och sedan för avsvälning från en temperatur lika med eller större än max. temperatur under hydratation. Dessa har sedan räknats om till frisläppt hydratationsvärme. Temperaturutveckling i resp. vct visas i Fig. 7, Fig. 9 och Fig. 11. Hydratationsvärme per kg cement visas i Fig. 8, Fig. 10 och Fig. 12.

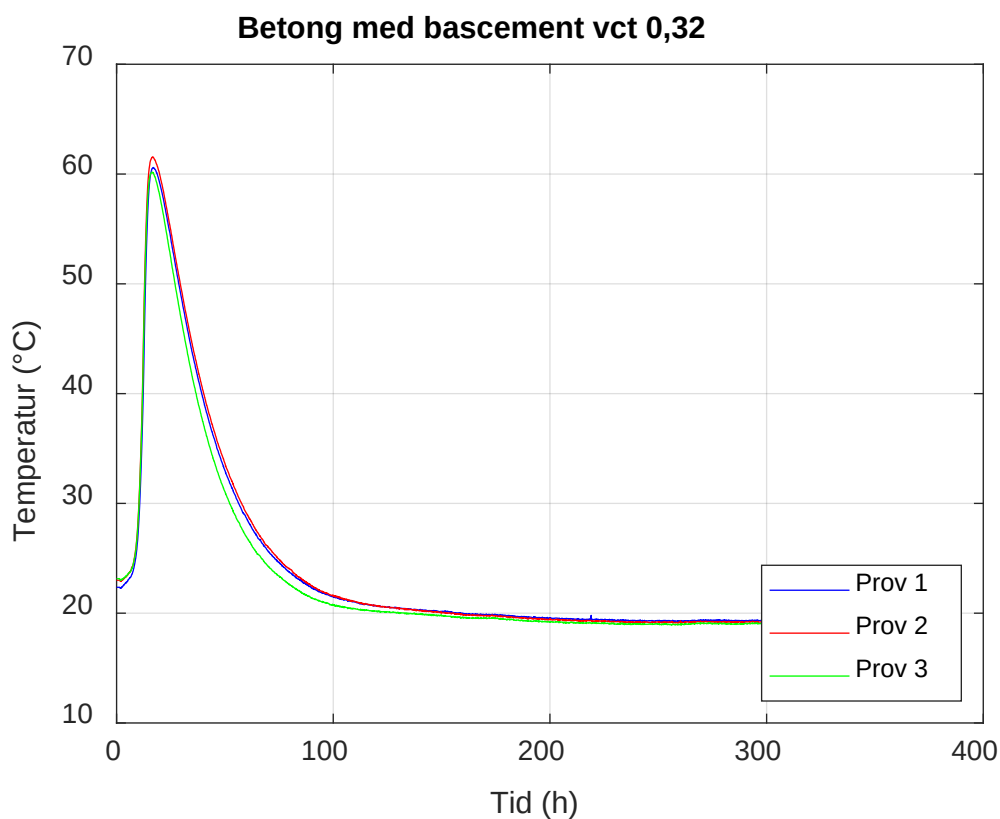


Fig. 7 Temperatur som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.32.

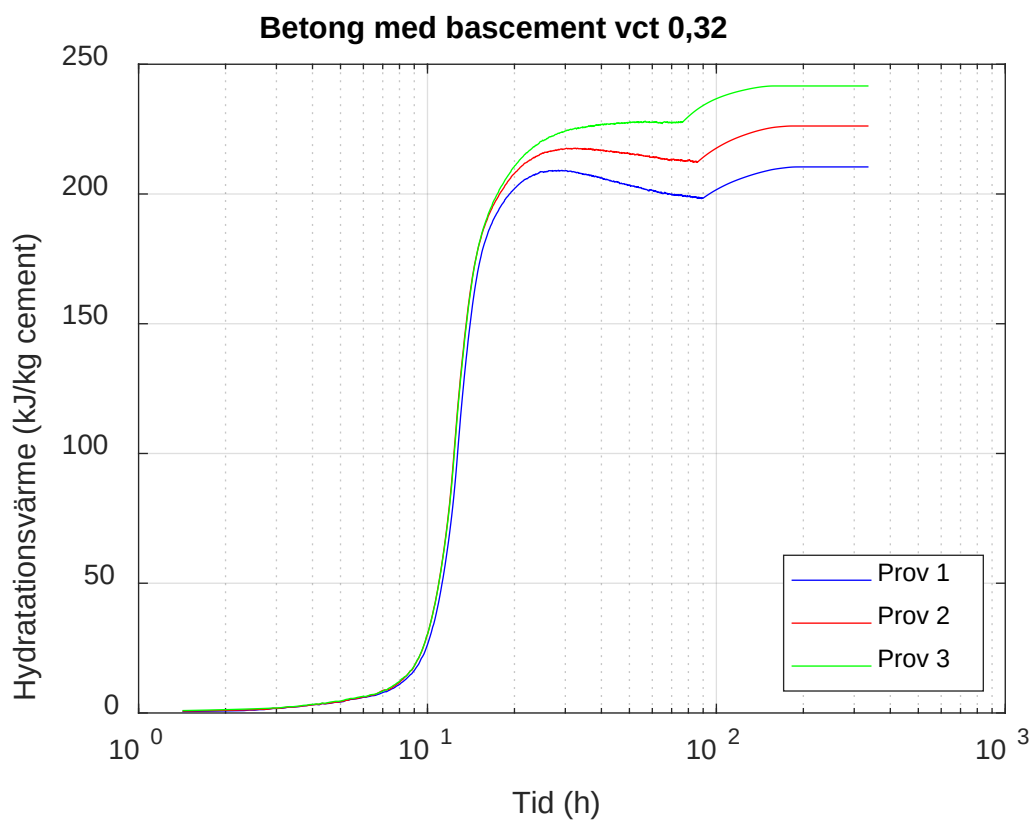
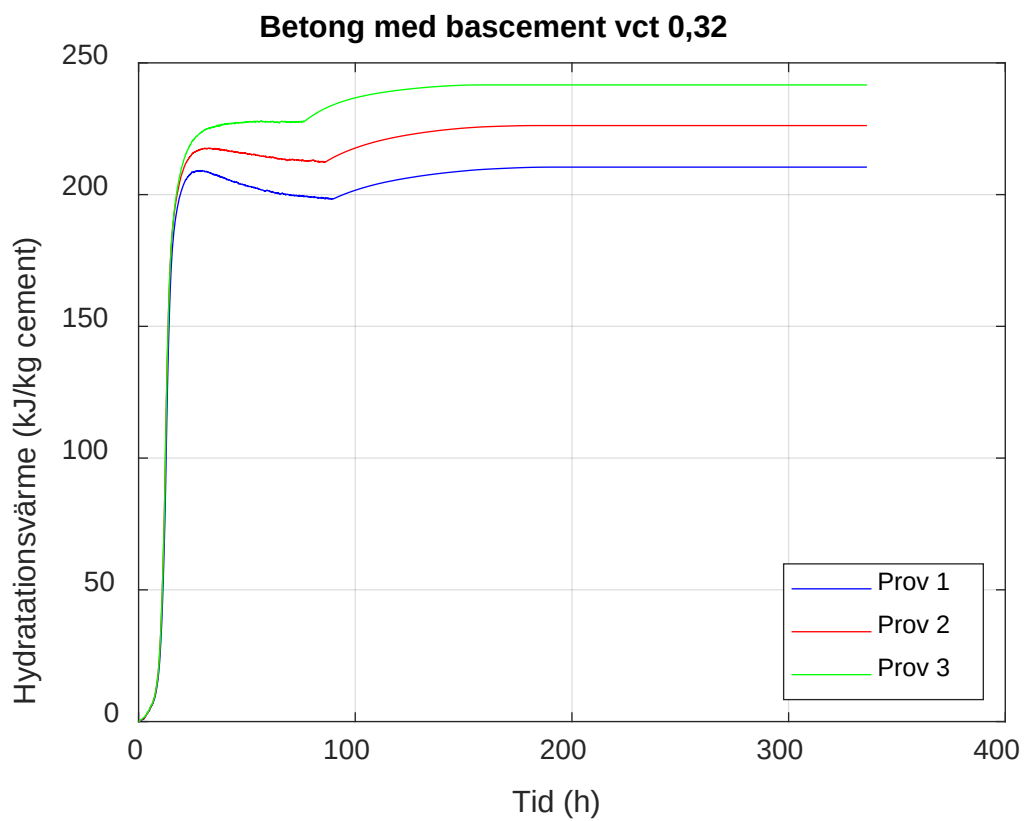


Fig. 8 Hydratationsvärme per kg cement som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.32, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

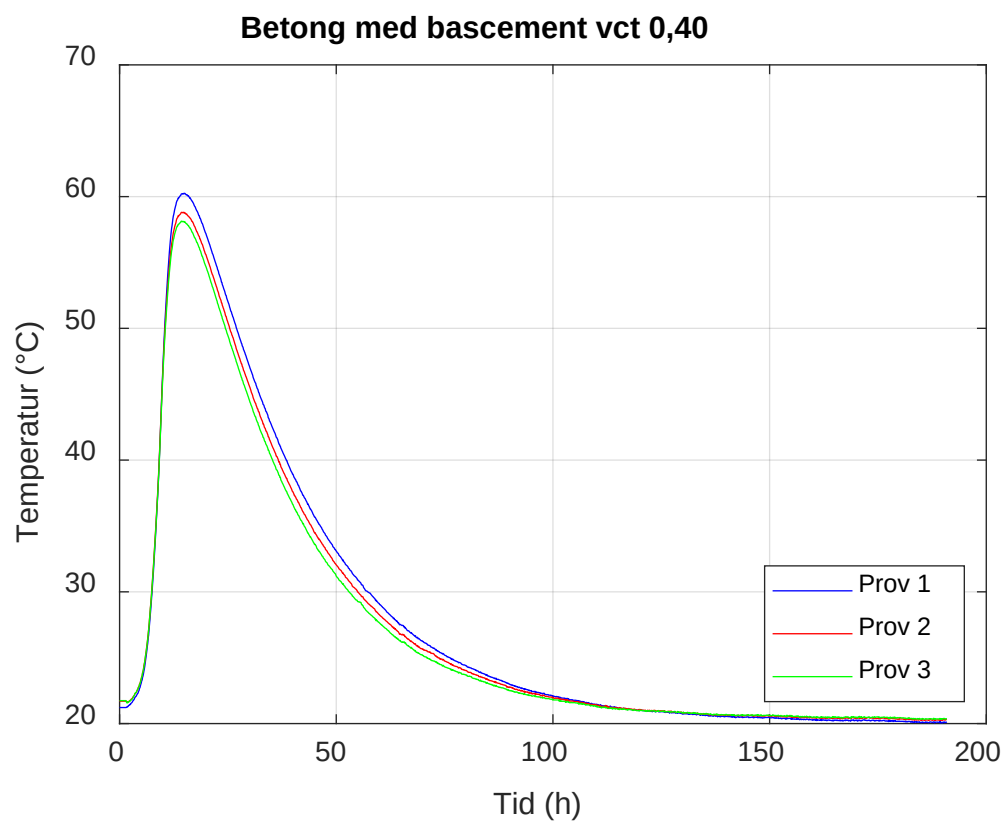


Fig. 9 Temperatur som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.40.

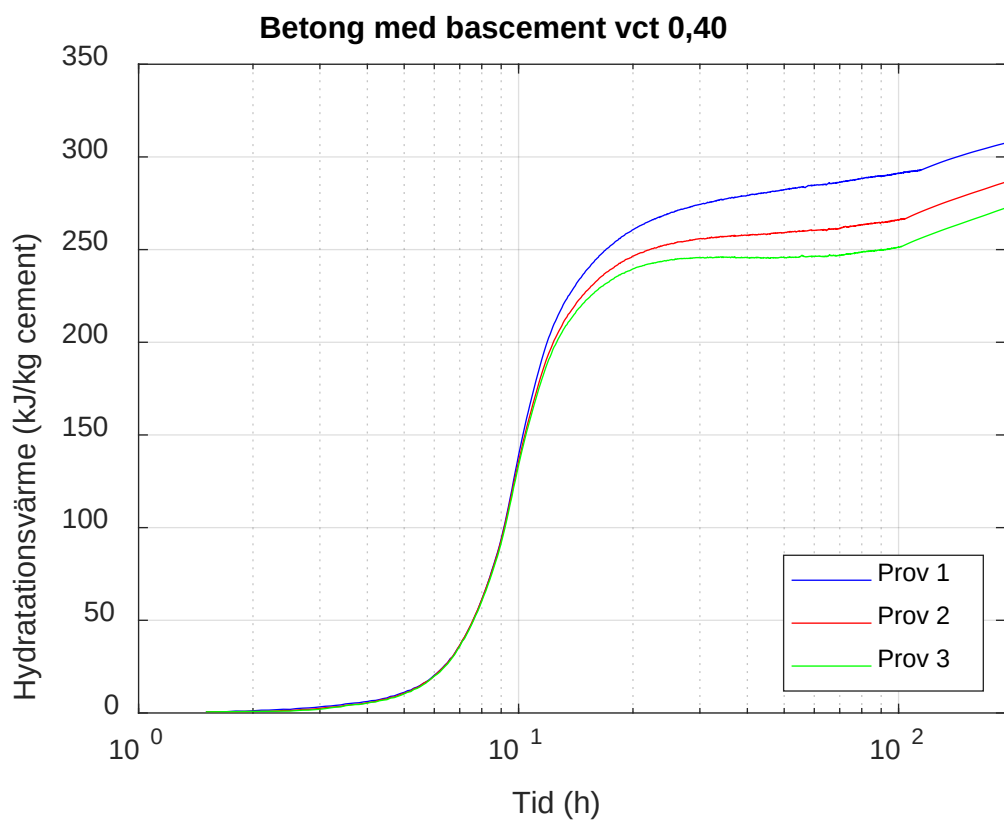
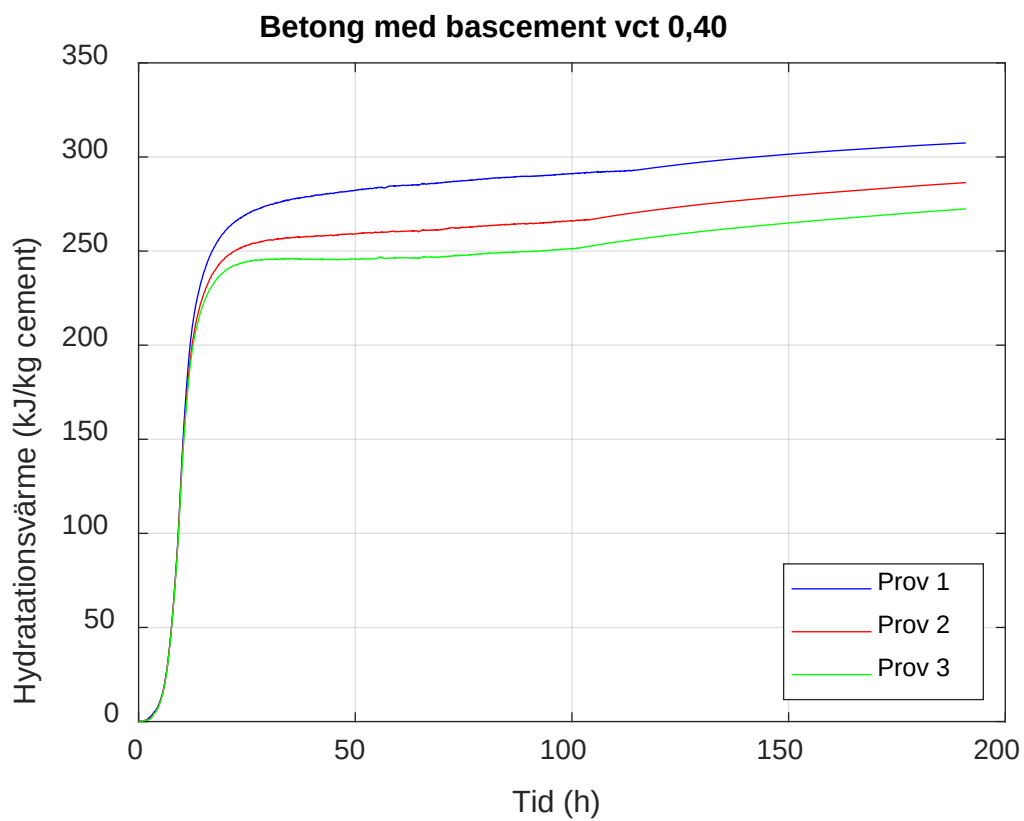


Fig. 10 Hydratationsvärme per kg cement som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.40, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

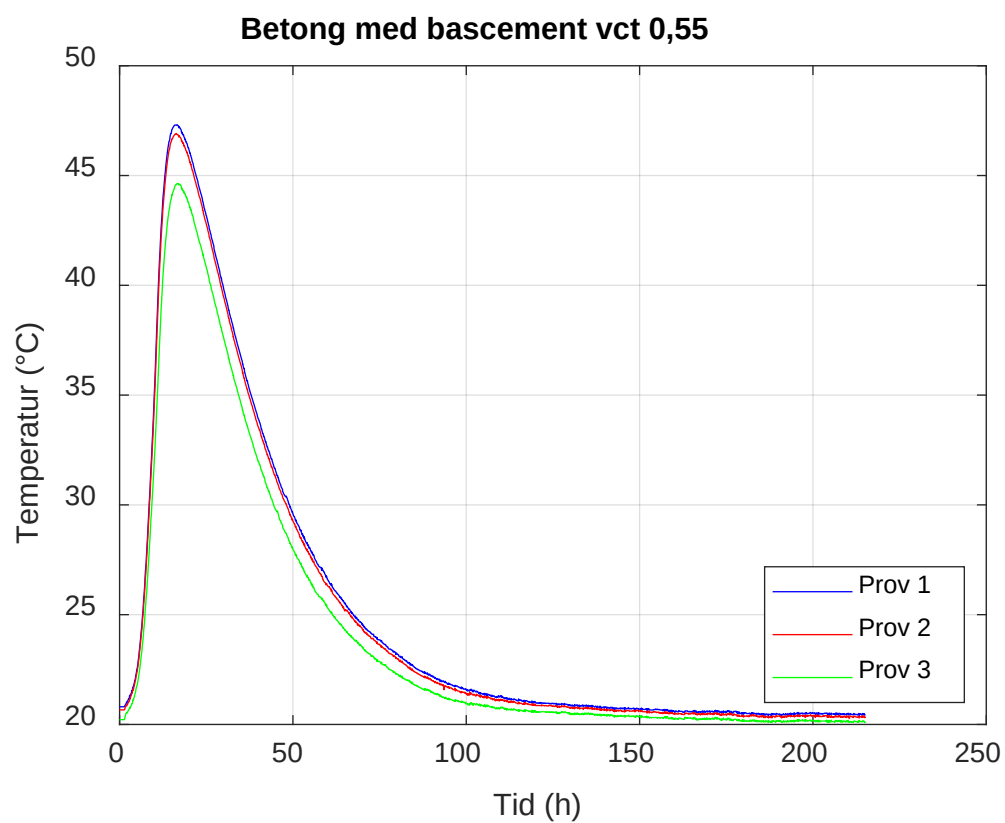


Fig. 11 Temperatur som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.55.

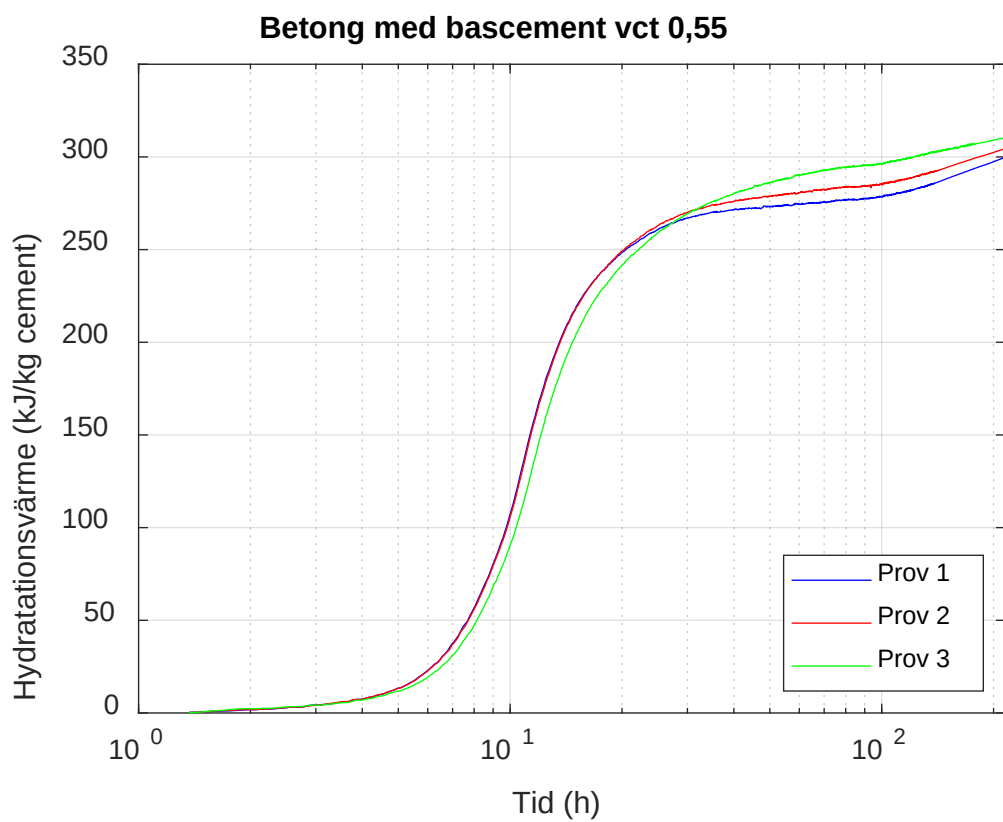
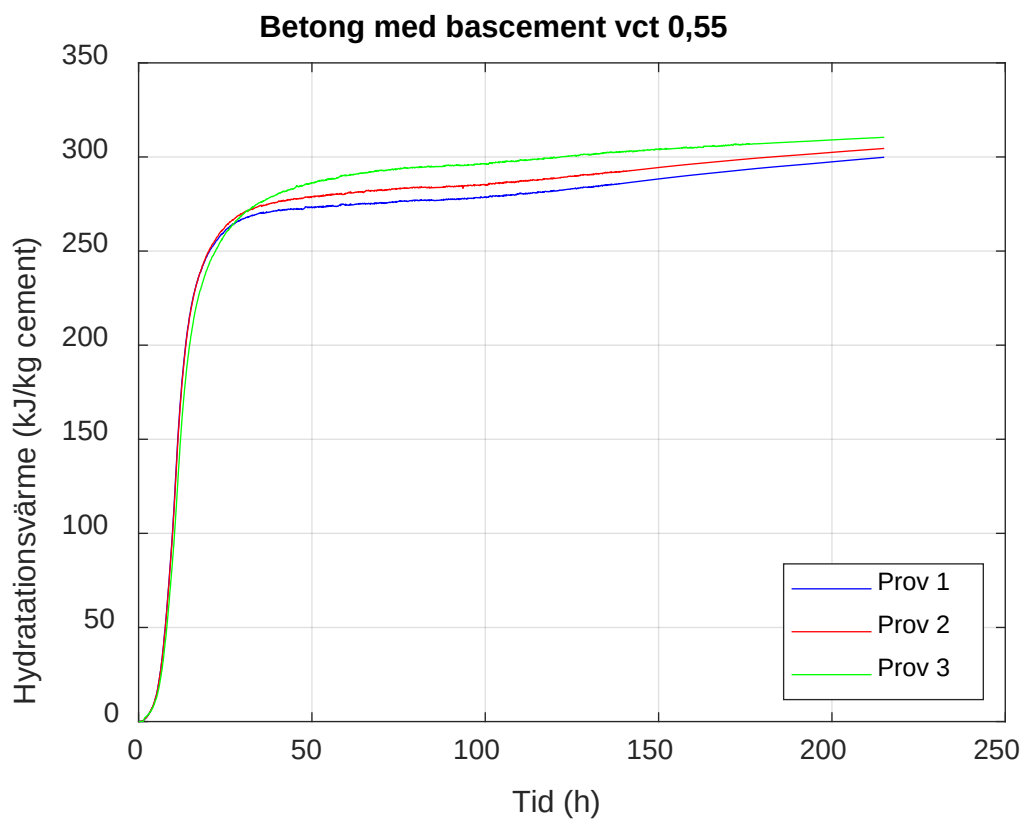


Fig. 12 Hydratationsvärme per kg cement som funktion av tid vid förseglad härdning i semiadiabat för betong med bascement, vct 0.55, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

2.3 Hållfasthet

Hållfasthet har mätts genom tryckprovning av 100mm stora betongkuber som lagrats i temperaturkontrollerade vattenbad, vilket utfördes i en hydraulisk tryckpress från FORM+TEST SEIDNER. Vid varje tillfälle har 3 kuber provtryckts med några undantag där 2 kuber används. Resultaten visas i Fig. 13, Fig. 14 och Fig. 15.

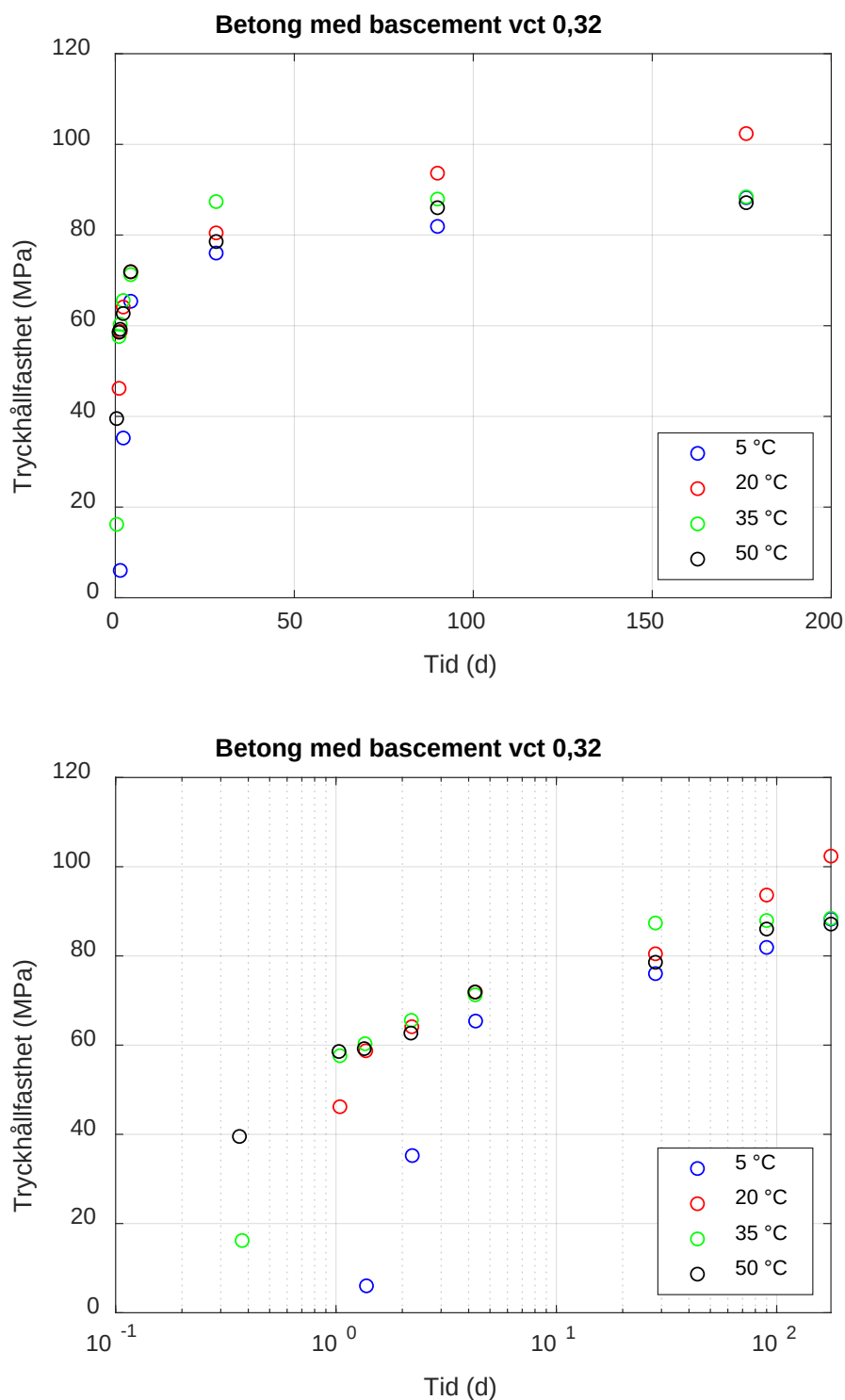


Fig. 13 Hållfasthet som funktion av tid vid härdning i vattenbad vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.32, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

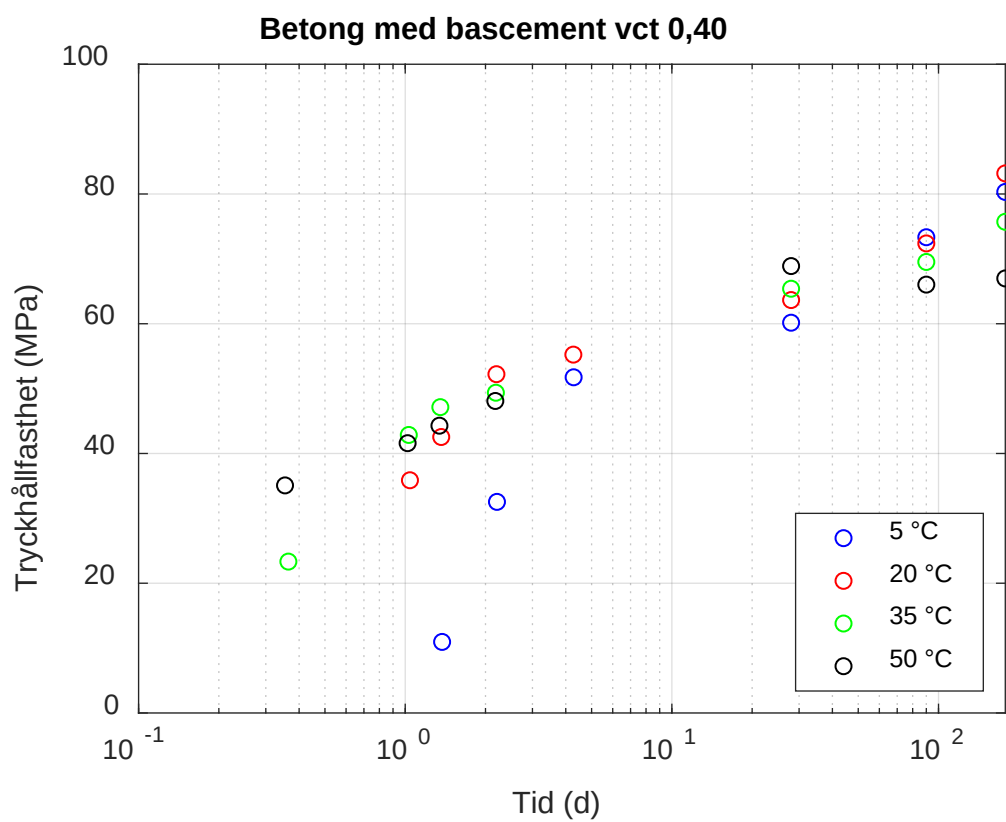
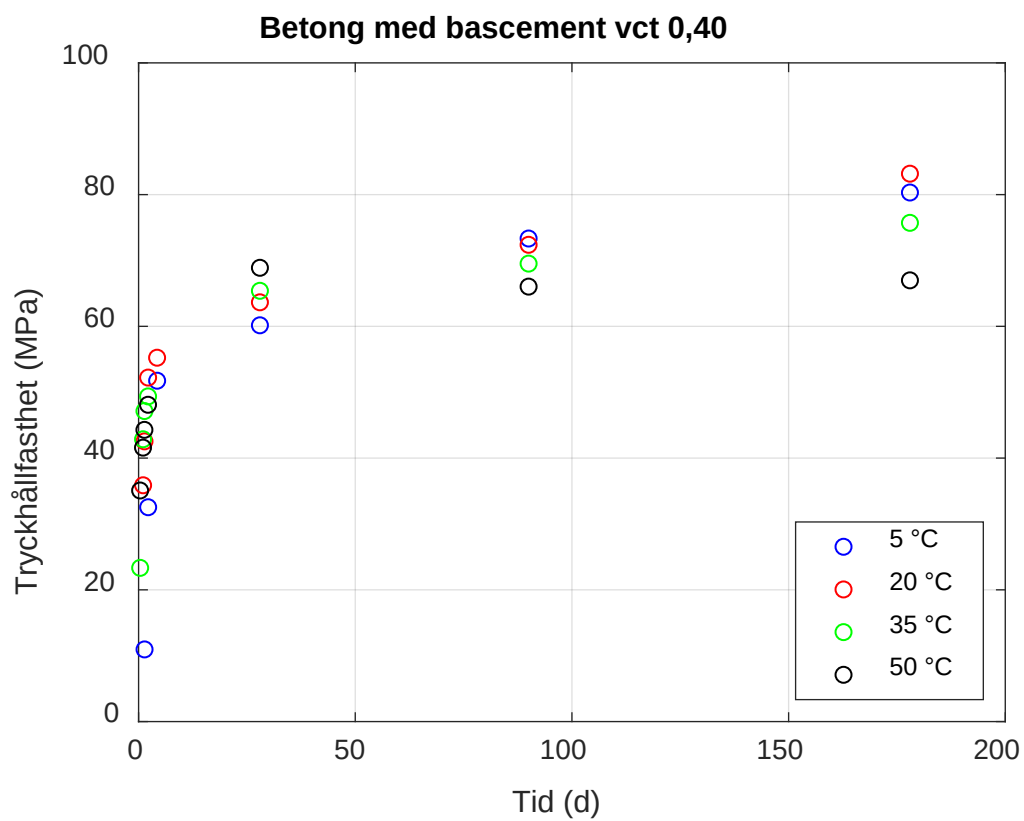


Fig. 14 Hållfasthet som funktion av tid vid härdning i vattenbad vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.40, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

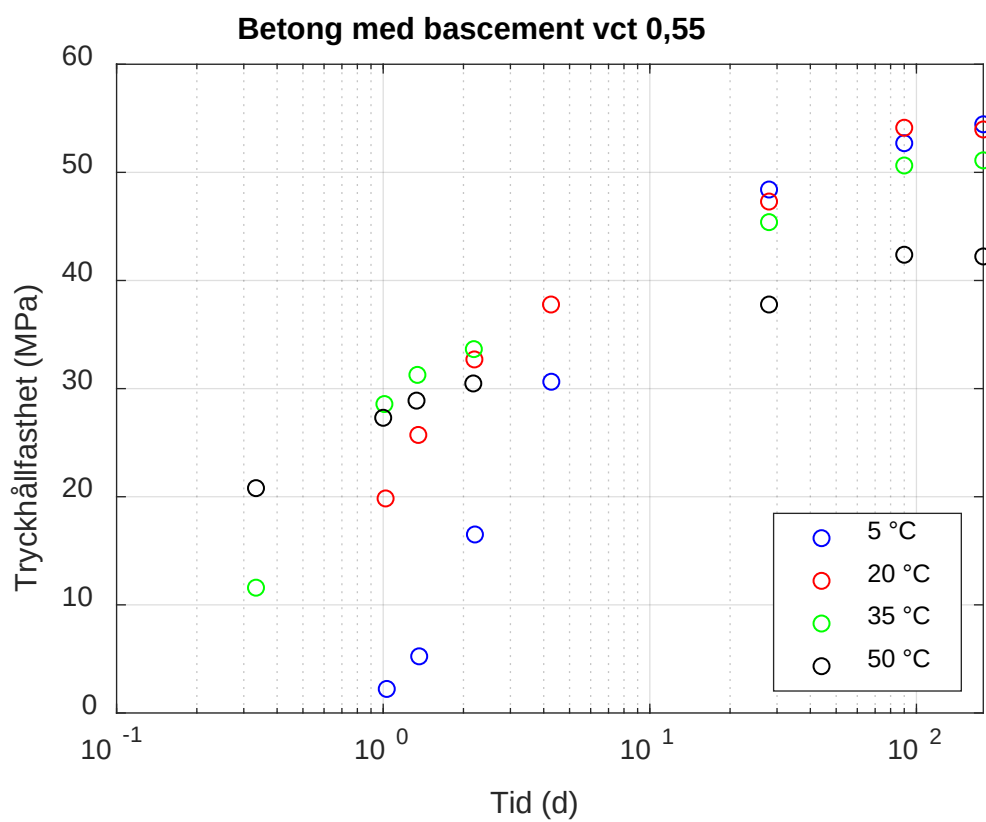
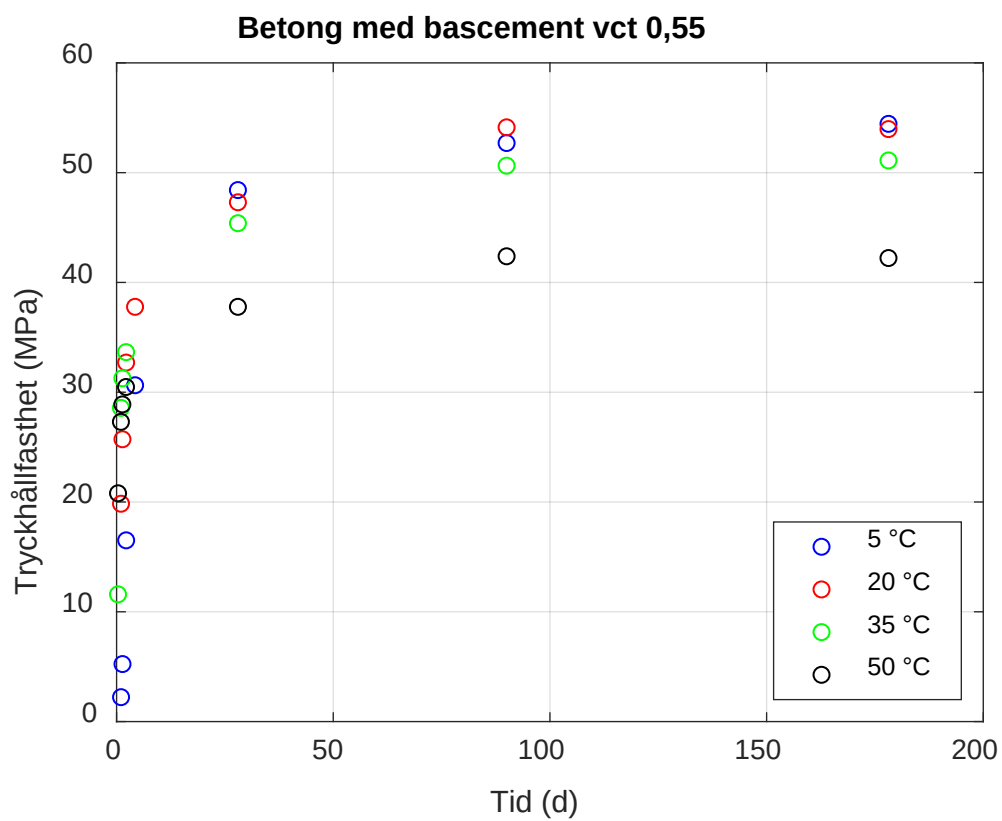


Fig. 15 Hållfasthet som funktion av tid vid härdning i vattenbad vid olika temperaturer för betong med bascement, vct 0.55, i linjär (ovan) samt logaritmisk (nedan) tidsskala.

3 Sorption

För sorption har använts betong, härdad i förseglat tillstånd i vattenbad med temperatur av 20 °C. Proverna har krossats och kapillärmättats. Ca 50 mg av krossat material utan synliga ballastkorn har använts för analys i sorptionsvåg Intrinsic (Surface Measurements Systems, UK). Körscheman för sorptionsvågen har omfattat desorption från 95 till 11% RF i flera steg med en eller två skanningloopar samt efterföljande absorption från 11 till 95 % i flera steg. Stabiliseringstiden för varje steg har valts så att viktkurvan för stabiliseringsförloppet ansågs ha planat ut vid visuell bedömning, varefter en anpassning av exponentiellt förlopp utförts till varje kurva och dess asymptotiska slutvärde tagits som vikt för korresponderande RF. Provernas cementinnehåll har därefter bestäms genom samma metod som för prover från termogravimetrisk analys, se kapitel 2.1.

Resultat av analysen visas i Fig. 16, Fig. 17 samt Fig. 18. Sorptionsnivå vid 100% RF i diagrammen motsvarar kapillär mättnad.

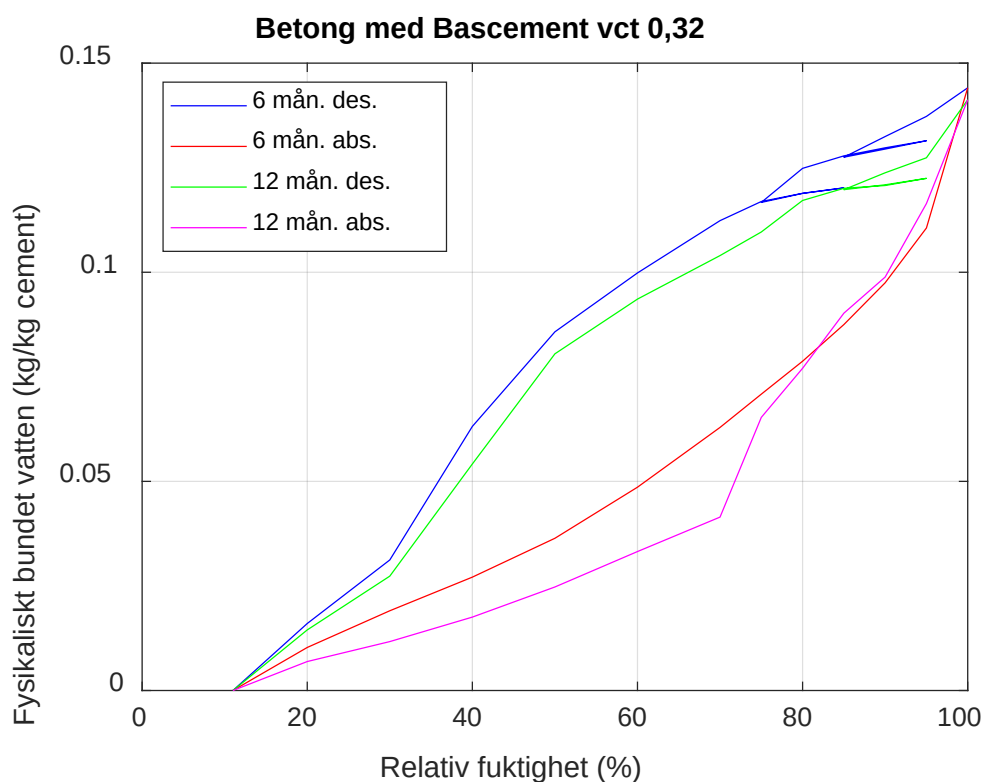


Fig. 16 Kurvor för fysikaliskt bundet vatten i förhållande till cementmängd vid desorption inkl. en resp. två skanningloopar samt absorption för betong med bascement, vct 0.32.

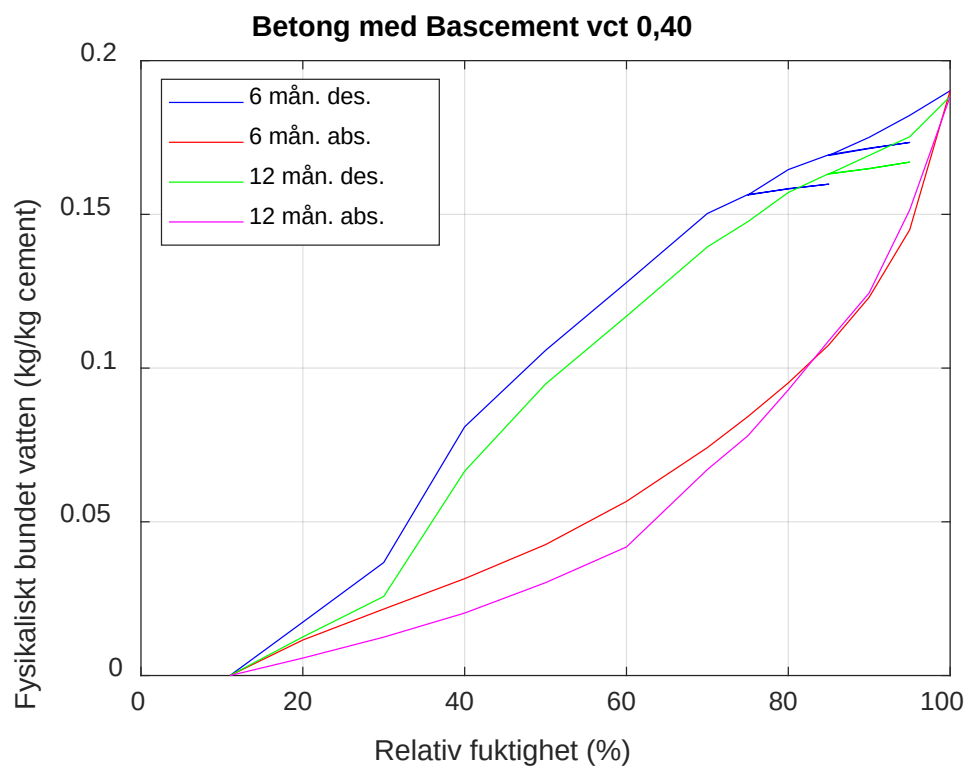


Fig. 17 Kurvor för fysikaliskt bundet vatten i förhållande till cementmängd vid desorption inkl. en resp. två skanningloopar samt absorption för betong med bascement, vct 0.40.

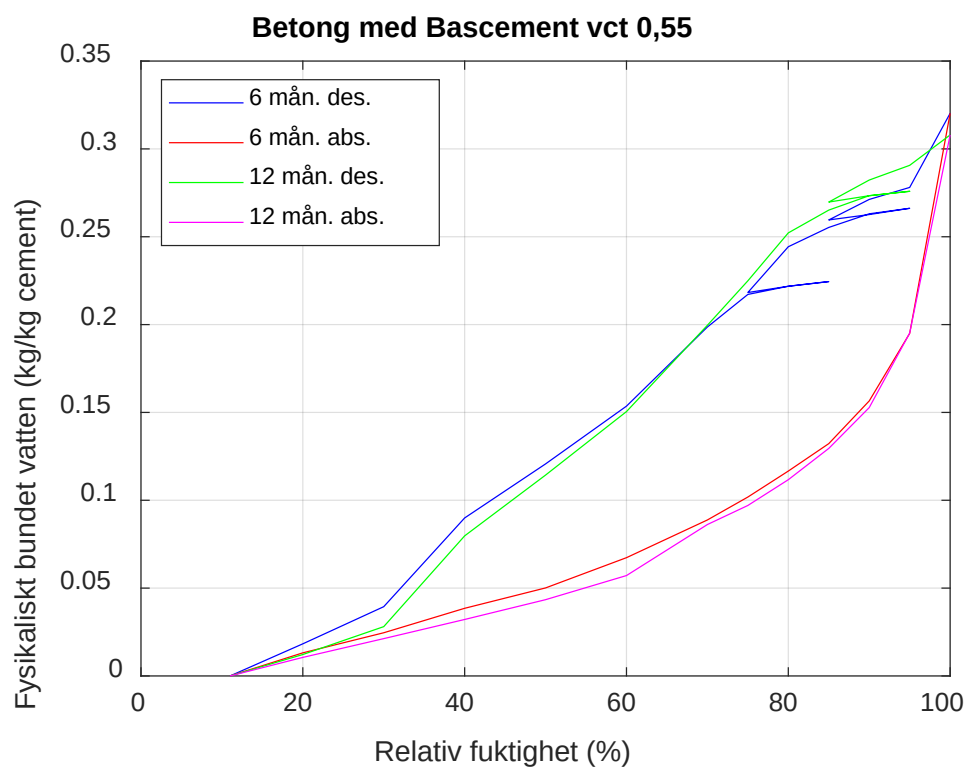


Fig. 18 Kurvor för fysikaliskt bundet vatten i förhållande till cementmängd vid desorption inkl. en resp. två skanningloopar samt absorption för betong med bascement, vct 0.55.

4 Fukttransport

Transportegenskaper anpassades i två steg. Först anpassades transportkoefficienter för resp. RF-intervall som användes som steg i sorptionsmätningarna beskrivna i kapitel 3. Anpassningen baserade sig på approximation av materialet i sorptionsvågen med en uppsättning av sfärer. Sfärernas storleksfördelning uppskattades först från förstörade bilder av materialet. Därefter utfördes en känslighetsanalys med variationer kring dessa uppskattningar som visade på en slutlig variation av erhållen transportkoefficient med <10%. Varje sfärs fuktillstånd modellerades genom analytisk lösning till massflödesekvationen i sfäriska koordinater med konstant startvärde, låst randvärde, och konstant transportkoefficient samt fuktkapacitet på RF-intervallet. Summan av sfärers viktförändringar subtraherades från det uppmätta förloppet och bildade en felfunktion som sedan optimerades m.a.p. transportkoefficienten. På så sätt erhöles transportkoefficienter som inte tog hänsyn till den grova ballasten då den saknades i materialet i sorptionsvågen.

Slutligen anpassades en geometrisk korrektionskoefficient till tidigare erhållna transportkurvor så att ballastens inverkan korrigerades. Detta skedde genom en endimensionell simulering av icke isotermt fuktflöde kombinerat med simulering av värmeflöde för ett antal uttorkningsmätningar, som redovisas senare i kapitel 5. Korrektionsfaktorerna anpassades så att skillnaden mellan simuleringarna och mätningarna minimerades, se resultat i kapitel 5. De sammanlagda resultaten visas i Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 och Fig. 24. Värden vid 100% RF i diagrammen motsvarar transportkoefficient vid kapillär mättnad.

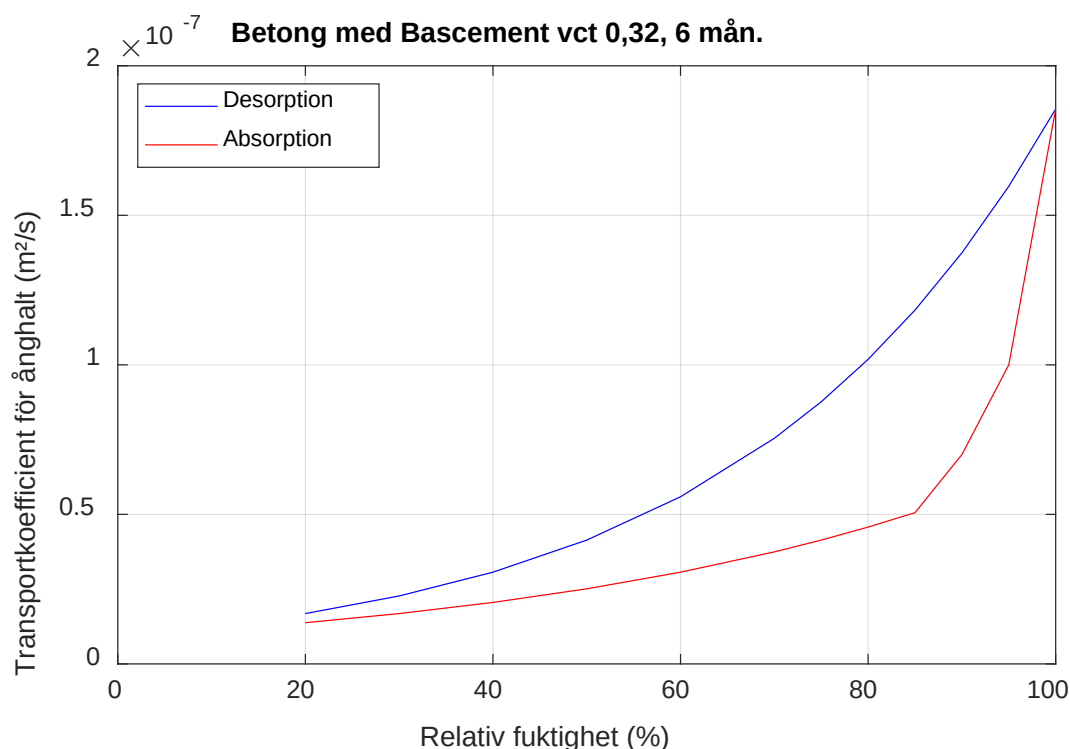


Fig. 19 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Bascement, vct 0,32 vid 6 månaders ålder, vid desorption och absorption.

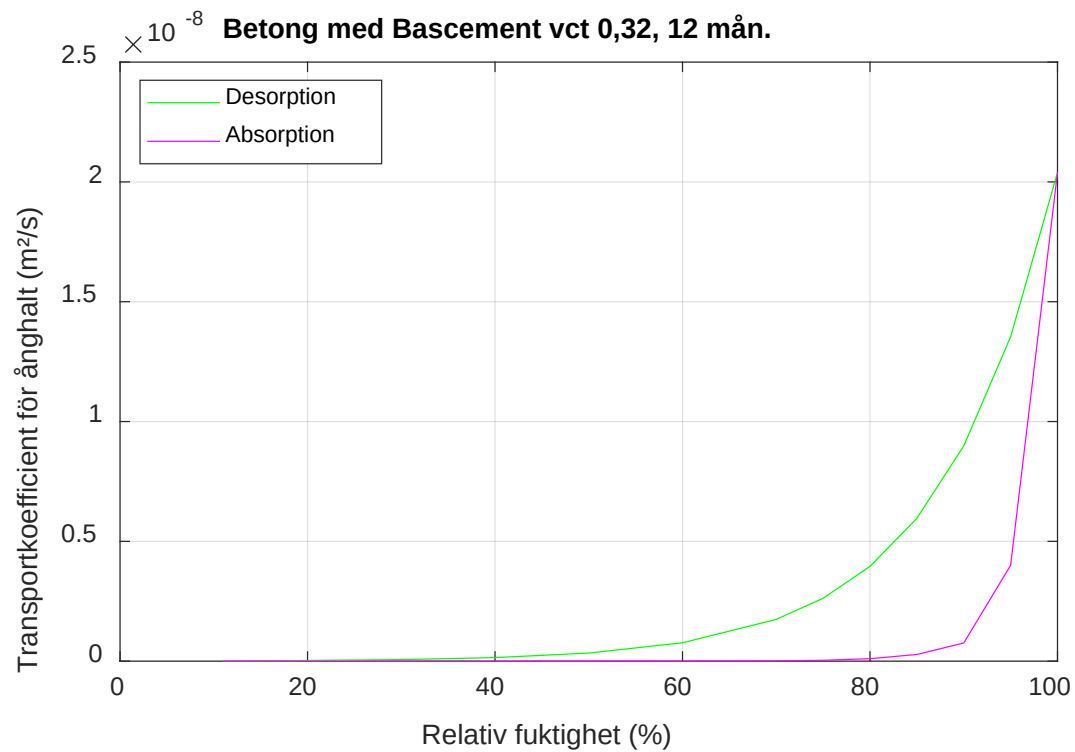


Fig. 20 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Bascement, vct 0,32 vid 12 månaders ålder, vid desorption och absorption.

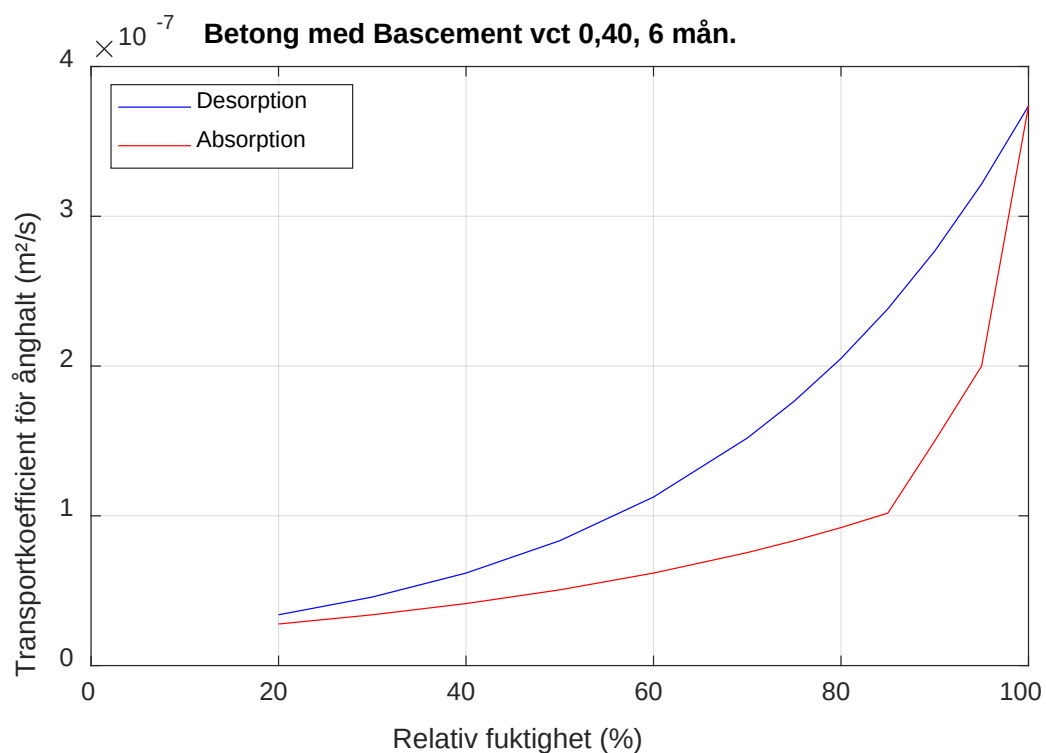


Fig. 21 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Bascement, vct 0,40 vid 6 månaders ålder, vid desorption och absorption.

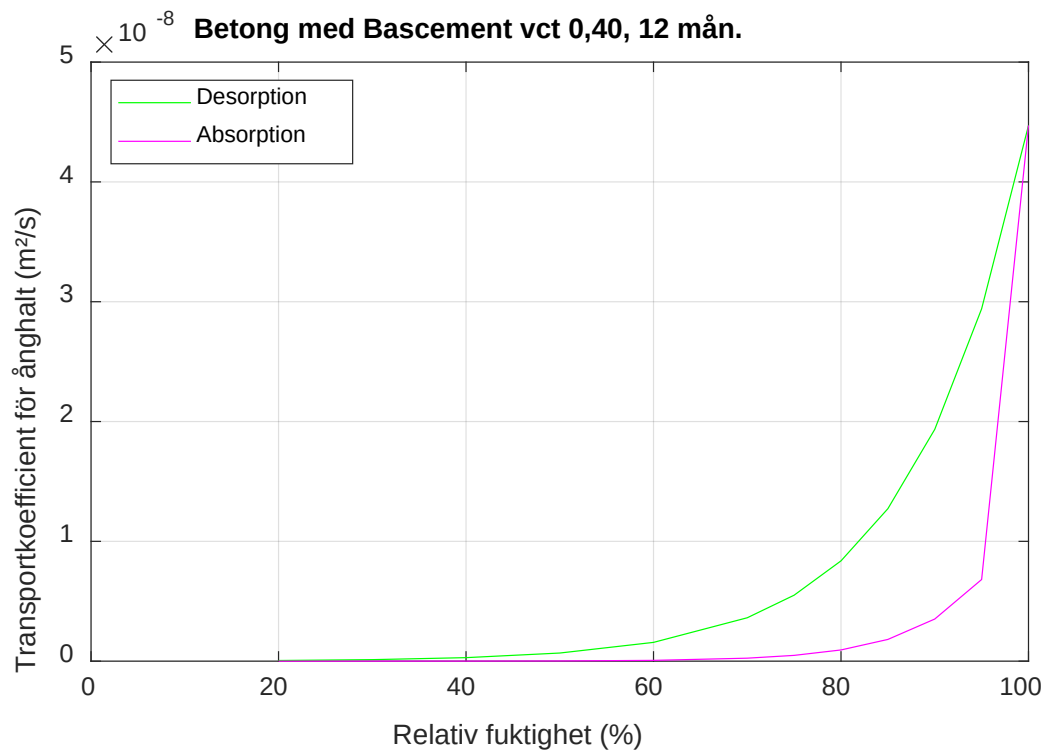


Fig. 22 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Bascement, vct 0,40 vid 12 månaders ålder, vid desorption och absorption.

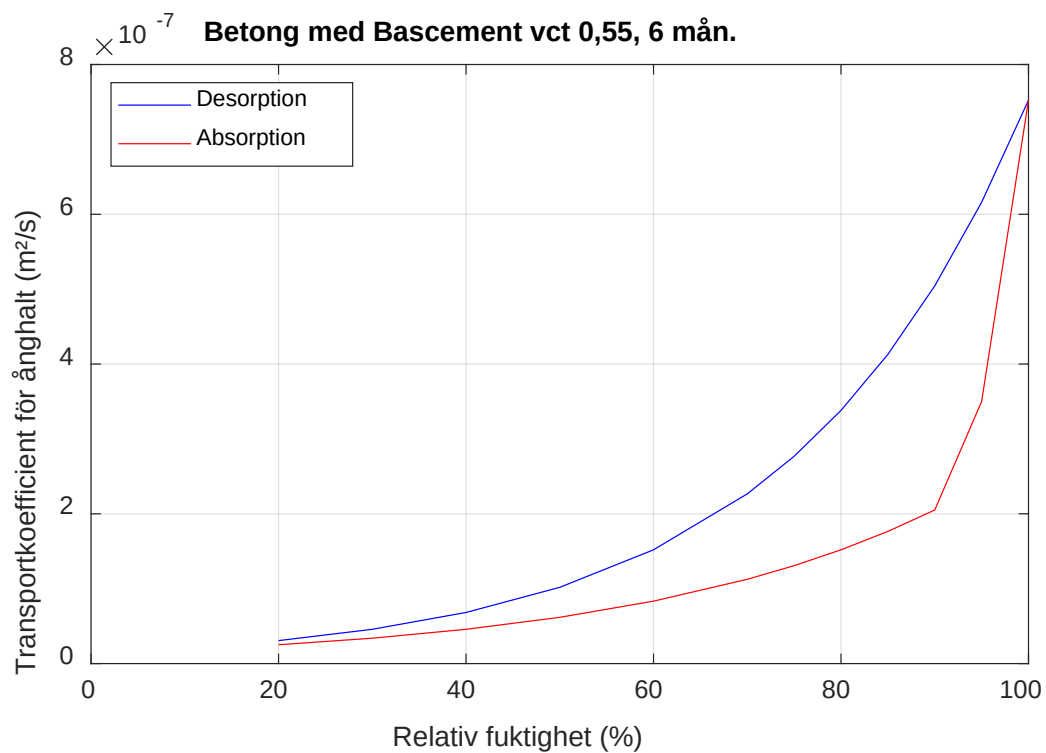


Fig. 23 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Bascement, vct 0,55 vid 6 månaders ålder, vid desorption och absorption.

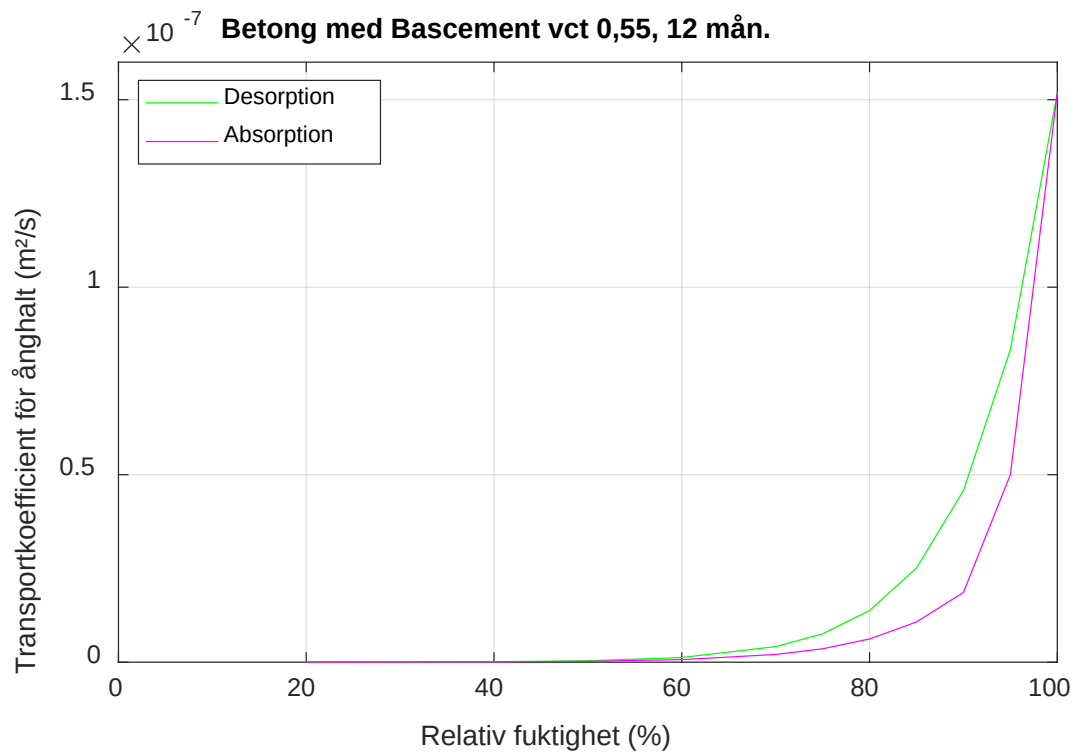


Fig. 24 Transportkoefficienter som funktion av RF för ångtransport vid 20 °C för betong med Basement, vct 0,55 vid 12 månaders ålder, vid desorption och absorption.

5 Uttorkningsmätningar

Mätningar av relativ fuktighet har utförts i betongplattor gjutna i backar, storlek ca 450 x 500 mm eller ca 800 x 1200 mm, se Fig. 25.



Fig. 25 Backar med gjutna betongplattor, ca 800 x 1200 mm till vänster och ca 450 x 500 mm till höger.

Gjutningarna har utförts med olika vct. Betongen följer inte materialbeskrivningen i kapitel 1 utan är levererad av Betongindustri samt Skanska Betong och följer resp. tillverkares recept för berört vct. Mätobjekten har utsatts för olika miljöer (temperatur, RF och försegling). Relativ fuktighet har mätts enligt RBK-systemet på ekvivalent djup, andra djup och i profil. De redovisade mätningarna innehåller inte påslag för mätosäkerhet. För detaljer samt jämförelse av uppmätt RF och simulerat RF se vidare dokumentationen för enskilda mätobjekt nedan.

5.1 Platta 3mB40

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta 3mB40	0,40	110

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	8	9	40	61	77	88	89	116	126	137
Temperatur luft (°C)	18	18	21	20	19	20	19	19	20	20	20
RF luft (%)	70	70	55	40	35	30	35	35	30	30	30
Plast	På	På	På	På	På	På	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkter	RF Mätt	RF PPB	Diff
3	86,3	86,7	-0,4

5.2 Platta 3mB55

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta 3mB55	0,55	110

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	8	9	40	61	77	88	89	116	126	137
Temperatur luft (°C)	18	18	21	20	19	20	19	19	20	20	20
RF luft (%)	70	70	55	40	35	30	35	35	30	30	30
Plast	På	På	På	På	På	På	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkter	RF Mätt	RF PPB	Diff
5	88,1	88,0	0,1

5.3 Platta 7

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta 7	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	14	70	92	124	130	131	134
Temperatur luft (°C)	20	21	21	21	24	24	21	21
RF luft (%)	60	40	50	50	50	50	50	50
Plast	På	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Dagar efter gjutning	Mätpunkter	RF Mätt	RF PPB	Diff
130	9	89	87,5	1,5
134	10	87,6	87,5	0,1

5.4 Platta 8

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta 8	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	14	14	54	98	98	294	294	323
Temperatur luft (°C)	20	20	15	17	17	21	21	19	20
RF luft (%)	60	60	70	70	70	50	50	30	40
Plast	På	På	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkt	Djup [%]	Temp	RF Mätt	RF PPB	Diff
P81	23	19,6	76,1	78,1	-2,0
P82	40	19,6	82,7	82,7	0,0
P83 (HG)	42	19,4	84,6	83,0	1,6
P84	79	19,6	86,1	85,7	0,4

5.5 Platta 9

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta 9	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	56	70	98	112	140	167	195	251	266
Temperatur luft (°C)	15	18	19	15	14	10	5	21	20	20
RF luft (%)	70	65	70	60	80	80	80	30	25	25
Plast	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkter	Djup	RF Mätt	RF PPB	Diff
19	40%	88,0	86,1	1,9

5.6 Platta A

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta A	0,32	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	9	160	194	215
Temperatur luft (°C)	15	20	19	20	20,5
RF luft (%)	60	40	30	40	45
Plast	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Dagar efter gjutning	Mätpunkter	Djup	RF Mätt	RF PPB	Diff
119	14	40%	82,0	82,9	-0,9
194	7	80%	83,7	83,9	-0,2

5.7 Platta B

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta B	0,32	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	9	21	31	47	57	67	76	127	144	151	160	194	215
Temperatur luft (°C)	15	10	8	5	1	5	21	3	-1	-3	-7	19	20	20,5
RF luft (%)	60	70	60	70	80	90	35	85	80	75	70	30	40	45
Plast	På	På	På	På	På	På	Av	På	På	På	På	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkt	Djup [%]	Temp	RF Mätt	RF PPB	Diff
B1	22	19,5	82,1	81	1,1
B2	40	19,6	81,9	83,9	-2
B3 HG	40	19,2	84,9	83,9	1
B4	78	19,6	82,6	84,1	-1,5

5.8 Platta C

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta C	0,55	155

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	3	39	46
Temperatur luft (°C)	23	19,5	20	20
RF luft (%)	60	25	30	30
Plast	På	På	Av	Av

Resultat:

Mätpunkt	Djup [%]	Temp	RF Mätt	RF PPB	Diff
C1	23	19,3	94,6	94,3	0,3
C2	40	19,4	96,1	96,5	-0,4
C3 (HG)	41	19,1	94	96,5	-2,5
C4	79	19,6	96,6	96,9	-0,3

5.9 Platta D

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta D	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	8	9	41	48
Temperatur luft (°C)	20	13	20	20	20
RF luft (%)	60	70	40	30	30
Plast	På	På	På	Av	Av

Resultat:

Mätpunkt	Djup [%]	Temp	RF Mätt	RF PPB	Diff
D1	23,23	19,5	93,1	94	-0,9
D2	41,94	19,4	94,7	95,8	-1,1
D3 (HG)	41,94	19,2	94,3	95,8	-1,5
D4	80,65	19,4	95,1	96,2	-1,1

5.10 Platta E

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta E	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	9	33	68	100	152	170	208
Temperatur luft (°C)	15	19	20	21	22	24	23	23
RF luft (%)	70	30	30	40	40	50	50	50
Plast	På	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkter	Djup	RF Mätt	RF PPB	Diff
20	40%	87,6	86,3	1,3

5.11 Platta F

Namn	Vct	Tjocklek (mm)
Platta F	0,55	160

Uttorkningsmiljö:

Dygn	0	14	15	42	77	135	154	217	270
Temperatur luft (°C)	20	20	22	22	24	21	21	19,5	19
RF luft (%)	50	50	30	40	50	50	45	40	30
Plast	På	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av	Av

Resultat:

Mätpunkter	RF Mätt	RF PPB	Diff
15	84,2	84,7	-0,5

6 Referenser

Linderoth 2018 - O. Linderoth, *Binding of moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar*, Licentiate Thesis, Lund University 2018

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 fuktsamverkan 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.

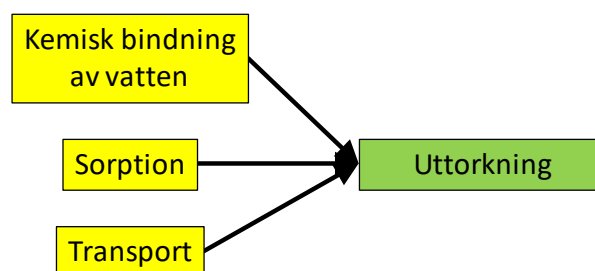


Fig. 1 Förenklad bild av fenomenet bakom uttorkning av betong

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 mineraltillsatser, som t.ex. flygaska eller slagg, dvs. betong baserad på CEM II, blir denna bild dock mer komplicerad. Mineraltillsatserna 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.

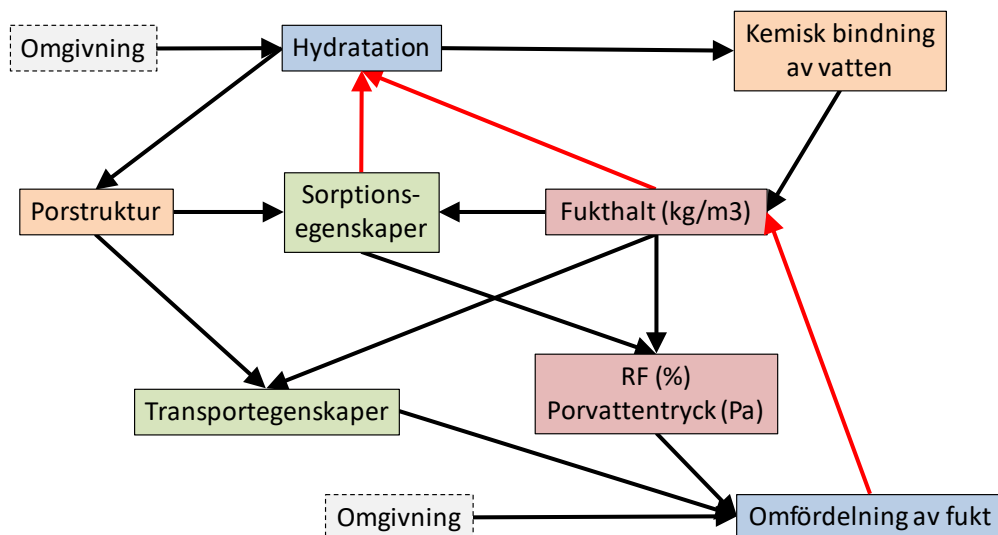


Fig. 2 Fenomen och inbördes beroenden under uttorkning av betong.

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:

- Bascement - 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 korregerats med 10%RF använt för torrsvikt för att bli jämförbara med uppmätningen för Bascementet. Olika vattencementtal visas här som jämförelse för bedömning av skillnaden i porositet mm.)

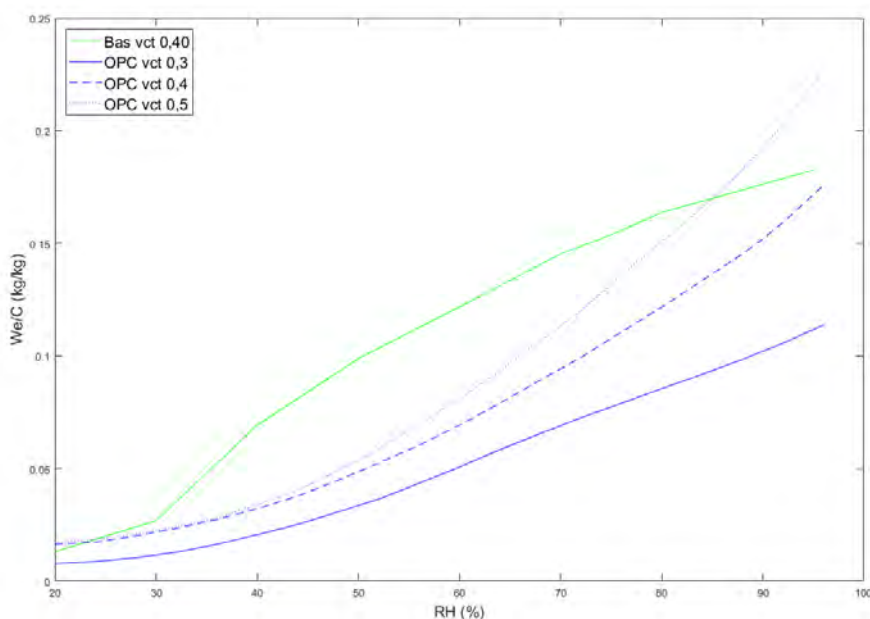


Fig. 3 Jämförelse av desorptionskurvor, bunden fuktmängd per cementmängd (kg vatten per kg cement) som funktion av relativ fuktighet (%). OPC - källa: Betonghandboken, Nilsson 1980. Bascement – källa: opublicerad, pågående inmätning av Stelmarczyk et al. 2018 inom SBUF Projekt 13198 samt 13140.

Porositeten är marginellt högre i Bascementets desorptionsisoterm. Däremot finns huvudsakliga skillnaden i kurvformen. Flackheten i den övre delen av det hygrokopiska området (ca 75–95% RF) är framträdande vilket i praktiken innebär att endast en liten förändring av fukttätheten hos betongen är tillräckligt för att påverka den relativa fuktigheten förhållandevis mycket. Ur uttorkningssynvinkeln 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 fukttätheten 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.

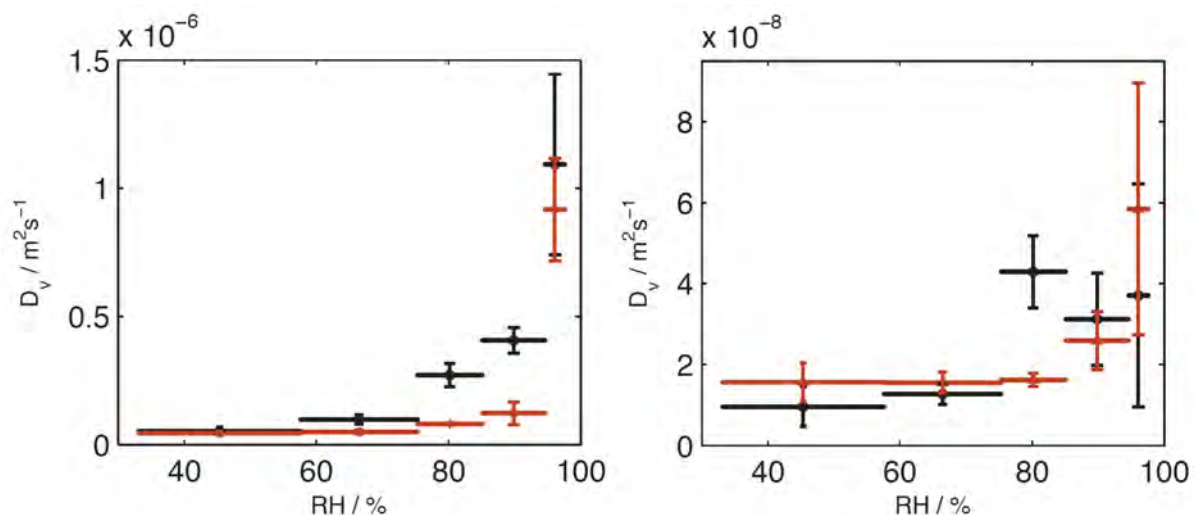


Fig. 4 Jämförelse av transportkoefficient för ånghalt som funktion av relativ fuktighet. Till vänster – CEM I (OPC) vct 0.4, till höger – CEM III B (30% klinker + 70% slagg) vct 0.4, svart – under desorption, röd – under absorption. Källa: Saeidpour, Doctoral Thesis, Paper III, LTH 2015.

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 avs. 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.

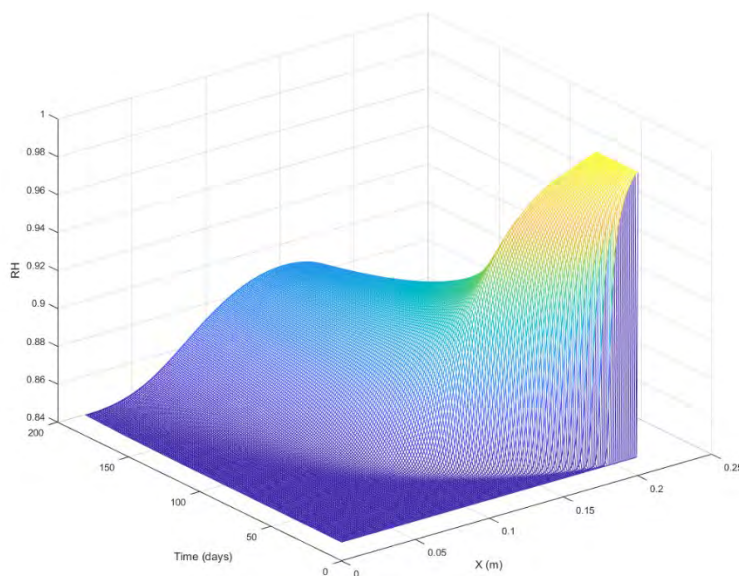


Fig. 5 Exempel på beräkningsresultat från *FEM φ -ca*.

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 golvbeläggningen 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, Fuktsakkunnig, 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.

Självtorkning av betong

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 Fig. 1.

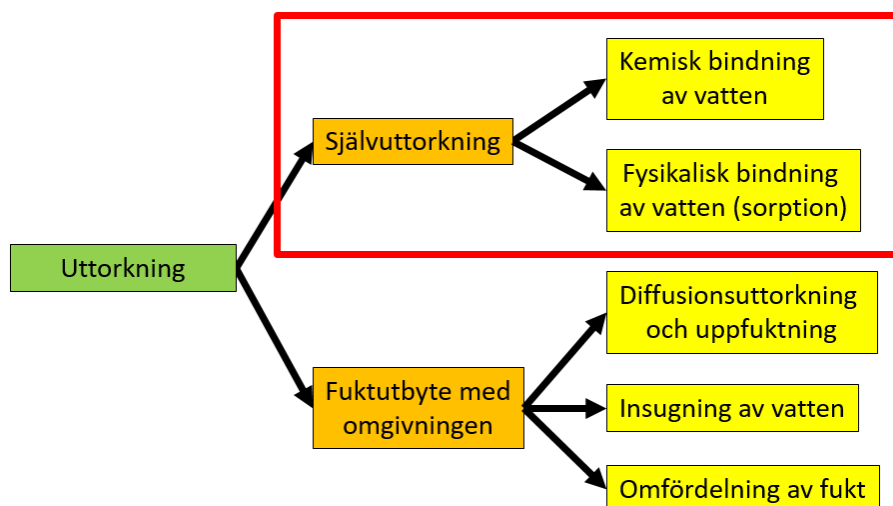


Fig. 1 Funktionell uppdelning av betongens uttorkningsförlopp.

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 självtorkning. 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 uttorkning, särskilt då utbyte av fukt sker med omgivningen. Den spelar dock en väldigt liten roll vid självtorkning. 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 självtorkningen. 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, frigör 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 Fig. 2. Bland reaktionernas slutprodukter hittar man huvudsakligen portlandit och s.k. C-S-H-gel från silikatreaktionerna men även andra föreningar från aluminatreaktionerna.

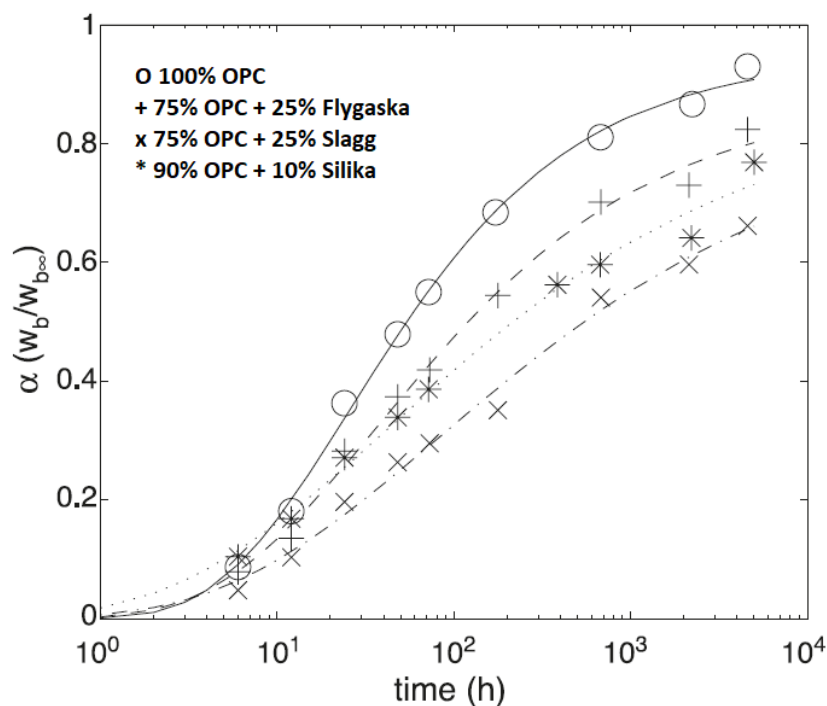


Fig. 2 Hydratationsgrad α , som funktion av tid, uppskattad från mängd kemiskt bundet vatten, för betong baserad på cement med olika bindemedelssammansättningar, härdad vid 23° C, från Pane & Hansen 2005.

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 (calciumhydroxid) 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.

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 Fig. 2. Vid jämförelse av totalreaktionernas reaktionsgrader i Fig. 2 med reaktionsgrader för de specifika tillsatserna i Fig. 3, framgår ytterligare komplikationer. Det cementet som reagerade snabbast bland de med tillsatsmaterial var flygaskementet, 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 slagg 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.

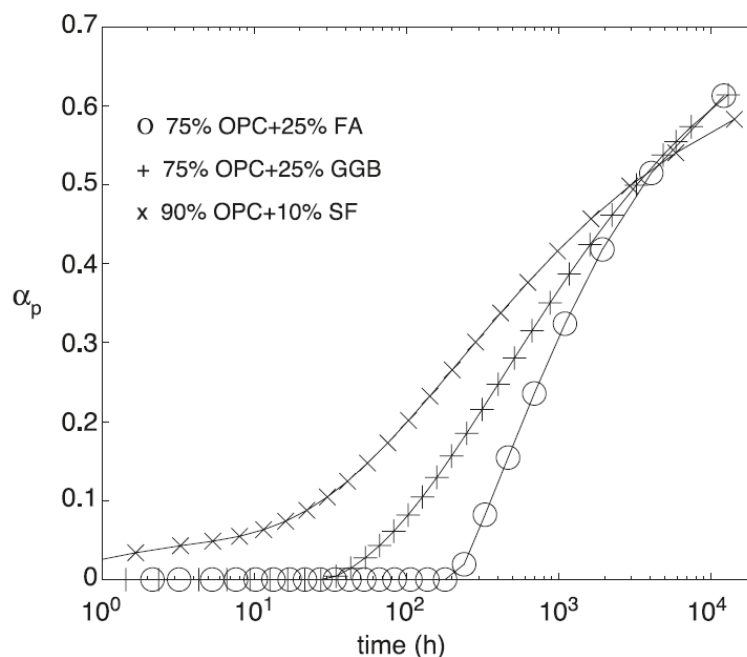


Fig. 3 Reaktionsgrader α_p , som funktioner av tid, för resp. tillsatsmaterial i blandningarna i Fig. 2, från Pane & Hansen 2005.

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 Fig. 4 där reaktionsgraden för flygaskan i tre olika blandningar mäts upp vid tre olika temperaturer.

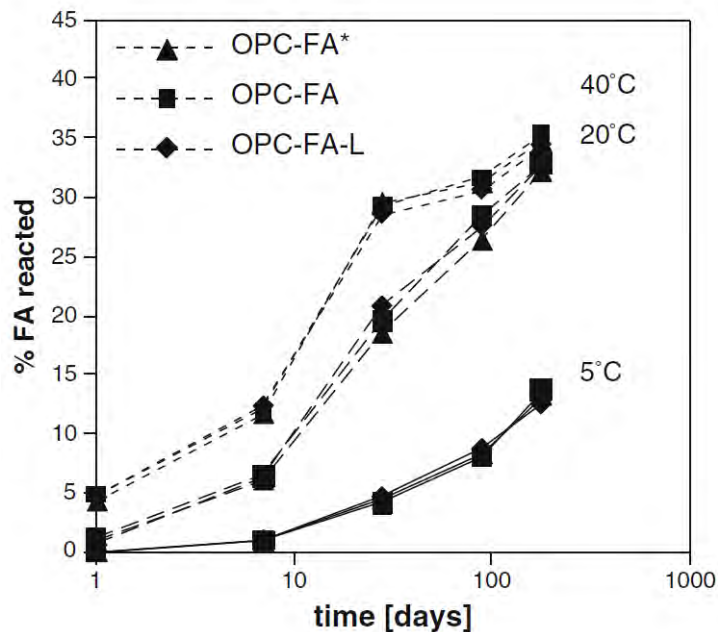


Fig. 4 Reaktionsgrad för flygaska som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC-FA*: 70% OPC +30% FA, OPC-FA: 65% OPC + 35% FA, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

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.

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.

Bascement (CEM II) med sitt innehåll av 15% flygaska skiljer sig alltså avseende hydratationsbeteende 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 självuttorkning.

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 självuttorkning. 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 Fig. 5 där mängd portlandit vid olika temperaturer jämförs för ren OPC och en blandning av OPC, flygaska och kalkstensfiller. En sidoeffekt av detta är minskning av korrosionsskyddet för armeringen, som portlanditen står för.

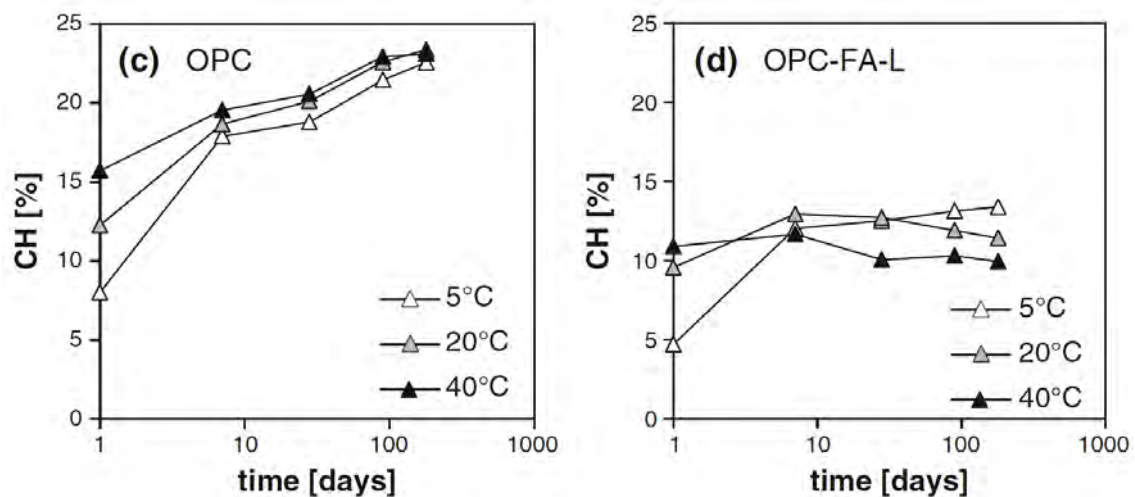


Fig. 5 Mängd bildad portlandit (förhållande till totalvikten av bruk utan vatten) som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC: 100% OPC, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

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 Fig. 6 där just den totala mängden kemiskt bundet vatten jämförs mellan ren OPC och samma blandning av OPC, flygaska och kalkstensfiller som i Fig. 5. En beräkning baserad på slutvärden i Fig. 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.

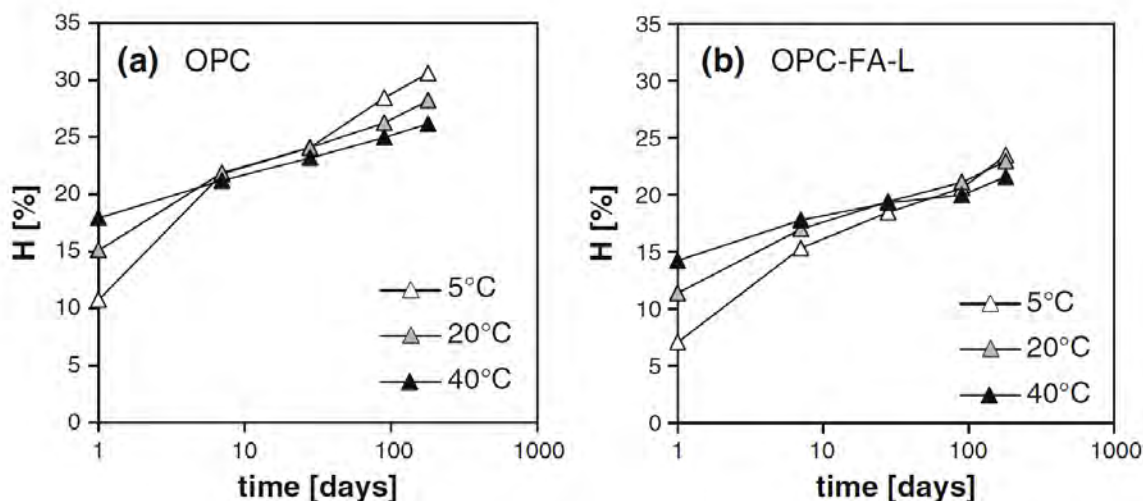


Fig. 6 Mängd kemiskt bundet vatten (förhållande till totalvikten av bruk utan vatten) som funktion av tid vid olika temperaturer, OPC: 100% OPC, OPC-FA-L: 65% OPC + 30% FA + 5% kalkstensfiller, från De Weerd m.fl. 2012.

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 Fig. 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 Fig. 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 Fig. 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 Fig. 7). Dessa porer bidrar till både inlagring av vatten och till transport.
- Porer utan öppningar (se D i Fig. 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.

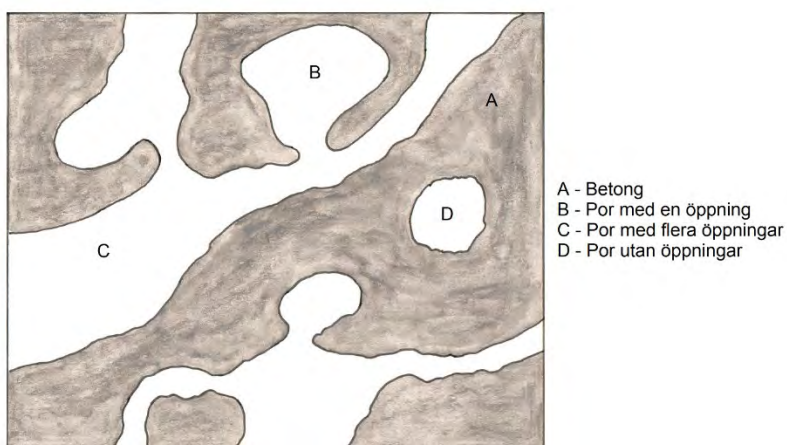


Fig. 7 Ett exempel på porsystem utan vatten.

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

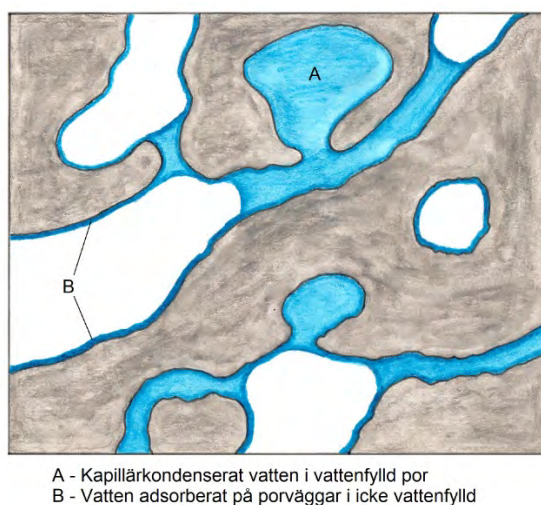


Fig. 8 Ett exempel på porsystem med vatten.

Vad alla dessa mekanismer innebär för självuttorkningen 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 självuttorkning. 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 Fig. 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.

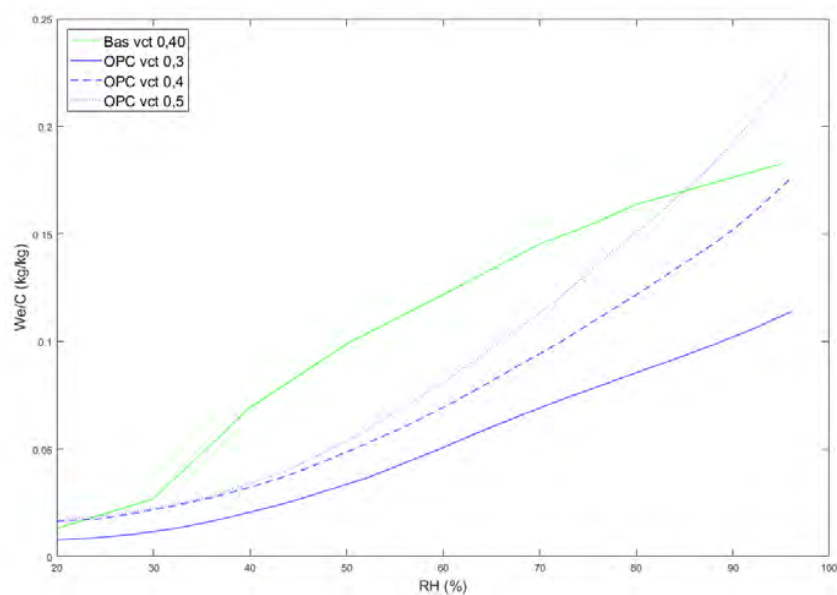


Fig. 9 Fukthalt We/C som funktion av relativ fuktighet vid desorption för betong med Bascement (från Stelmarczyk m.fl. 2017b) resp. OPC (från Nilsson 1980).

Orsaken till skillnaden i flackhet/lutning är fördelningen av storleken bland porerna. Man kan tydligt se i Fig. 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 isotermer att underlätta självuttorkning. Kemisk bindning av en viss mängd vatten kommer att resultera i större minskning i relativ fuktighet än vid en isoterm 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 isoterms mindre lutning kommer att ge någon effekt alls.

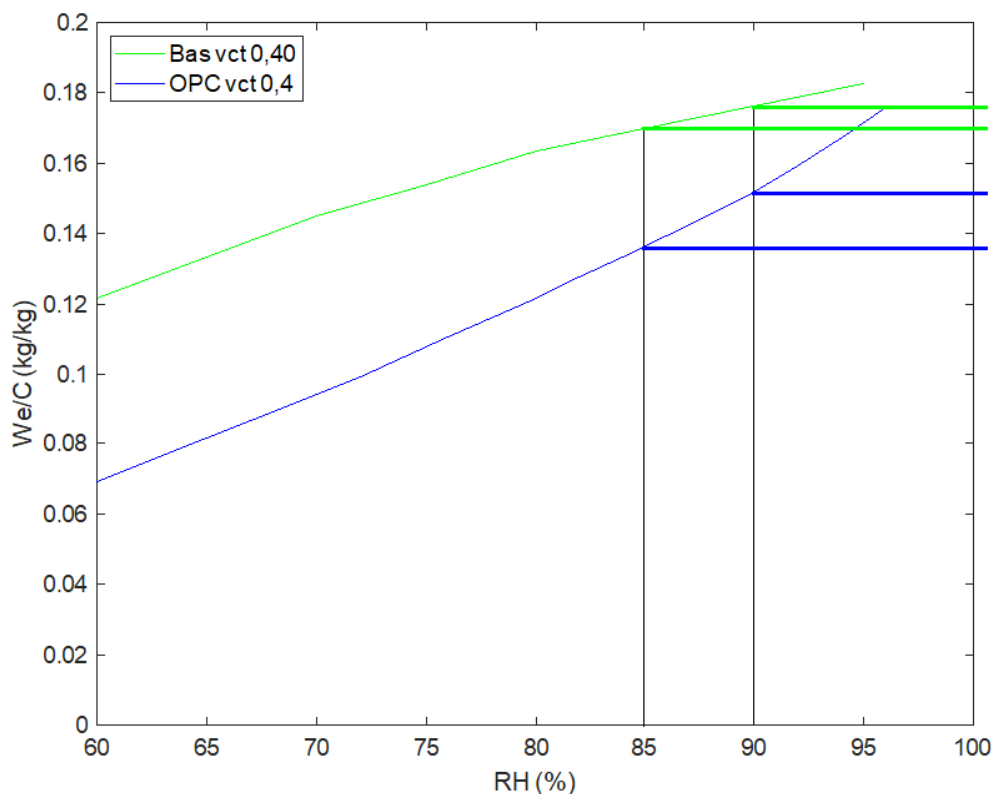


Fig. 10 Fukthalt We/C som funktion av relativ fuktighet vid desorption för betong med Bascement (från Stelmarczyk m.fl. 2017b) resp. OPC (från Nilsson 1980), jämförelse av skillnad i fukthalt för skillnad i relativ fuktighet motsvarande 85% - 90%.

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 mätthål 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 Fig. 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 självuttorkning, 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 självuttorkning, 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 självuttorkningen
- 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 självuttorkning 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., 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 2017-09-28.

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

Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning

I de tidigare artiklarna, **Betongfunktion: Uttorkning** (Stelmarczyk m.fl. 2017a) samt **Självuttorkning av betong** (Stelmarczyk m.fl. 2017b), gavs en generell bild av betongens uttorkning - en översikt av den bakomliggande fenomenologin samt en fördjupning i självuttorkningsförmågan med mer detaljerad insyn i bakomliggande hydratation, kemisk bindning av vatten samt en förenklad bild av fysikalisk bindning av vatten (sorption) under uttorkning. Nu är det dags för en djupare titt på mekanismerna och detaljerna bakom diffusionsuttorkning (uttorkning mot torr luft), annat fuktutbyte mellan betong och dess omgivning samt omfördelning av fukten i betong, se Fig. 1.

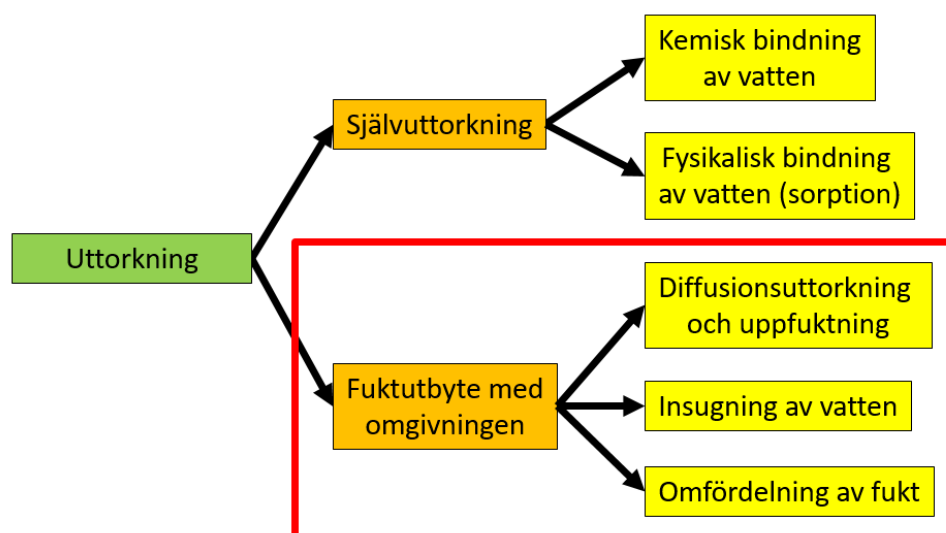


Fig. 1 Funktionell uppdelning av betongens uttorkningsförlopp.

Fokus i denna artikel kommer att ligga på den rödmarkerade rektangeln i figuren. Betongens förmåga att transportera fukt står i centrum för all förändring av betongens fukthalt som inte bygger på självuttorkning. Det kan både handla om uttorkning till och uppfuktning från omgivande luft eller andra material. Det kan också omfatta omfördelning av fukt mellan olika områden i betongen, som självuttorkat olika på grund av olika hydratationsförlopp. En fördjupning i hur betong binder vatten fysikaliskt är även på sin plats. Artikeln **Självuttorkning av betong** (Stelmarczyk m.fl. 2017b) ger en förenklad bild av denna förmåga, och beskriver väl vad som händer under just självuttorkningen. När det kommer till uppfuktning samt blandad uttorkning och uppfuktning blir bilden mer komplicerad och just denna del kommer att belysas initialt i denna artikel. Både sorption och transport utspelar sig i betongens porsystem och beror helt och hållet på porsystemets beskaffenhet samt hur vattnet i porsystemet interagerar fysikaliskt med betongen. En relevant översikt av vetenskapen bakom dessa mekanismer och en diskussion av fenomenologins praktiska effekter kommer att ges. Artikeln kommer också att försöka jämföra egenskaper hos tidigare använd betong, baserad på Ordinarie Portlandcement (OPC) samt naturballast, med mer modernt använd betong, med mineraltillsatser så som flygaska eller slagg samt krossballast.

Observera dock att både betongens porsystem och vattnets interaktion i porsystemet 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 principerna för att kunna dra slutsatser relevanta för betongens fuktutbyte. Som exempel kan nämnas att s.k. hysteres, dvs. en slags fördröjning i sorption, som beskrivs nedan, kan basera sig på fler mekanismer än vad som redovisas i denna artikel. Tanken med denna artikel är att exemplifiera fenomenets mekanismer och diskutera mer ingående dess effekter på fuktutbyte. 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.

Hysteres i porsystemet

I den tidigare artikeln ***Självuttorkning av betong*** (Stelmarczyk m.fl. 2017b) gavs en initial förklaring kring hur vattnet lagras in i porsystemet. Denna förklaring täckte relativt utförligt fenomenologin för självuttorkning. Självuttorkningsprocessen förutsatte att betongens porsystem var initialt fyllt med vatten och att cementet sedan långsamt konsumerade vattnet, dvs band det kemiskt genom hydratationens reaktioner. Denna process resulterar i att det blir mindre och mindre vatten i porsystemet – betongen torkar ut. Vidare konstaterades att det finns ett termodynamiskt jämviktsstillstånd mellan relativ fuktighet (RF) i de tomma porerna och kapillärtrycket i de vätskefyllda. Det resulterar i ett samband mellan porernas storlek och vid vilken relativ fuktighet de töms på vatten. För ett visst porsystem i en viss betong ger det en desorptionskurva som beskriver sambandet genom att visa vilken fukthalt som motsvarar vilken RF vid uttorkning. Denna bild är korrekt. Dock är den endast en del av hela sanningen. Den täcker inte uppfuktning och inte heller växelvis uttorkning och uppfuktning, vilket exempelvis kan uppstå då betongen suger in regnvatten, utbyter fukt med anslutande material, som t.ex. avjämningsmassa, eller helt enkelt har självuttorkat olika mycket i olika delar av konstruktionen – situationer som lätt kan uppstå under betongens uttorkning och vidare användning.

Spontant skulle man kunna tro att man vid uppfuktning bara reverserar uttorkningen, ungefär som när man har kört en bil först framåt en bit och sedan lägger i backen och backar exakt samma väg som man kom. Detta är tyvärr inte fallet vid uppfuktning av betong. Anledningen till detta är s.k. hysteres i porsystemet – att en enskild por av en given storlek fylls på och töms vid olika RF. För att förstå detta fenomen är det viktigt att beakta den termodynamiska jämvikt som alltid råder i porer mellan vattnets vätskefas och ångfas. Den styr när kapillärkondensation uppstår i en por med en given storlek. Kapillärkondenserat vatten i porerna kan dra i en gränsyta mot vattenånga. Detta drag kallar man för kapillärtryck och eftersom det just är ett drag blir värdet av kapillärtrycket negativt. Hur stort kapillärtrycket kan bli är kopplat till porens storlek – ju mindre por desto större tryck. Vid en gränsyta mot vattenånga står kapillärtrycket i kraftjämvikt med trycket på andra sidan gränsytan, vilket blir ångans partialtryck. På detta sätt blir kapillärtrycket kopplat till den relativa fuktigheten. Detta sammantaget ger ett samband mellan relativa fuktigheten och porradien, där kapillärkondensation kan ske vid given RF. Detta samband visas i Fig. 2. Eftersom sambandet är temperaturberoende visas tre olika kurvor för tre olika temperaturer. Ju högre RF är desto större porer kan fyllas med kapillärkondenserat vatten.

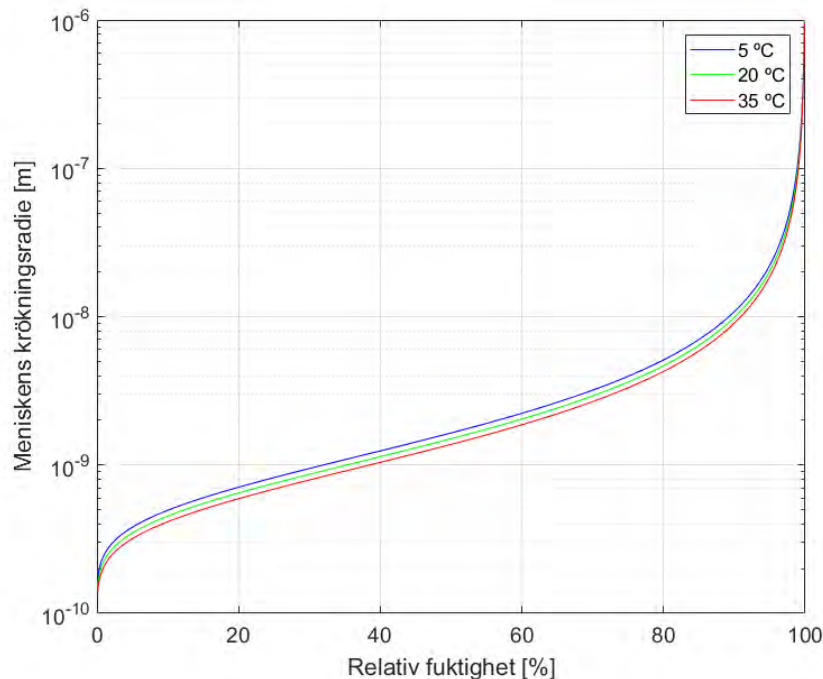


Fig. 2 Termodynamiskt samband mellan relativ fuktighet och krökningsradie hos en vattenmenisk i jämvikt med vattenånga. För cylindriska porer är meniskens krökningsradie lika med porens radie.

Samband i Fig. 2 är en del av förklaringen till hysteres. Resten finns att finna i porernas utseende. Det finns flera förklaringar till detta fenomen för olika form på porerna. Fig. 3 visar ett exempel med s.k. ink-bottle-porer – cylindriska porer med en hals som är smalare än poren själv.

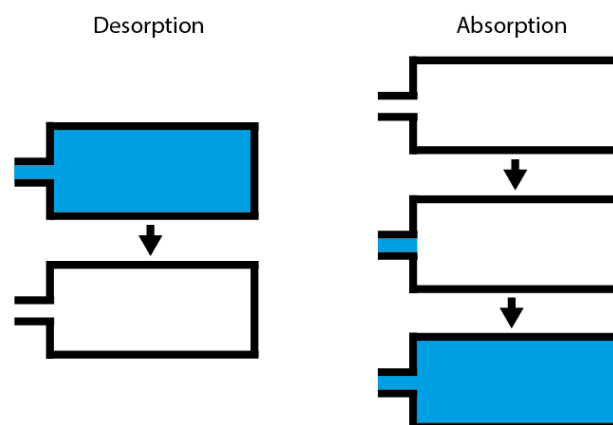


Fig. 3 Desorption och absorption för s.k. ink-bottle-porer, steg för steg.

När en sådan por är vätskefylld befinner sig gränssytan mellan vatten och vattenånga, dvs. själva menisken, i porens hals, se Fig. 3 vänster del. Eftersom det är över denna gränssyta som den termodynamiska jämvikten råder mellan vätska och ånga så spelar det ingen roll hur stor poren är i övrigt – det är halsens storlek som styr när den relativa fuktigheten är låg nog för att poren skall tömmas. Vid uppfuktning, se Fig. 3 höger del, kommer en vattenmenisk först att bildas i själva halsen.

Halsen har dock en volym som är rätt liten jämfört med resten av poren, vilket innebär att mängden absorberat vatten i detta ögonblick blir liten och bidrar till den totala absorptionen endast i begränsad omfattning. Den stora skillnaden uppkommer då den relativa fuktigheten är hög nog för att bilda en vattenmenisk som är lika stor som porens huvudkropp, i enlighet med samband i Fig. 2. Då uppstår kapillärkondensation i poren och den fylls helt med vatten. Det är alltså halsens radie som styr när poren töms och radien hos porens huvudkropp som styr när den fylls på. Eftersom halsens radie är smalare så töms poren vid lägre relativ fuktighet än vid vilken den fylls på. Det uppstår en slags glapp i systemets sätt att reagera på förändring i relativ fuktighet och det är just detta som kallas hysteres. Observeras bör att hysteres uppstår även i andra porformer med vissa skillnader jämfört med ovan. Principen är dock densamma.

Desorption, absorption och skanning

Vad innebär hysteres i praktiken? Den stora konsekvensen är att sorptionsambandet, dvs. sambandet mellan betongens fukthalt och relativ fuktighet, inte kan beskrivas generellt med endast en kurva. Vilka porer som är fyllda och vilka som är tomma bestäms inte endast av vilken relativ fuktighet och temperatur som råder. Det som måste beaktas är vilken väg betongen tog till ett visst fukttillstånd. En betong som genom uttorkning fick en RF på 90% innehåller mer fukt (kg vatten per kg betong) jämfört med en betong som först torkades till 75% RF och sedan fuktades upp till 90% RF. För att beskriva detta använder man sig av två grund samband – ett för desorption (uttorkning från helt vattenmättat tillstånd) och ett för absorption (uppfuktning från helt torrt tillstånd). De två sambanden ger sorptionskurvor som börjar och slutar i samma punkter men som för övrigt har olika utseenden, se Fig. 4 vänster. Vill man byta mellan uttorkning och uppfuktning måste man dessutom ta hänsyn till s.k. skanning, dvs. rörelse mellan desorptionskurvan och absorptionskurvan.

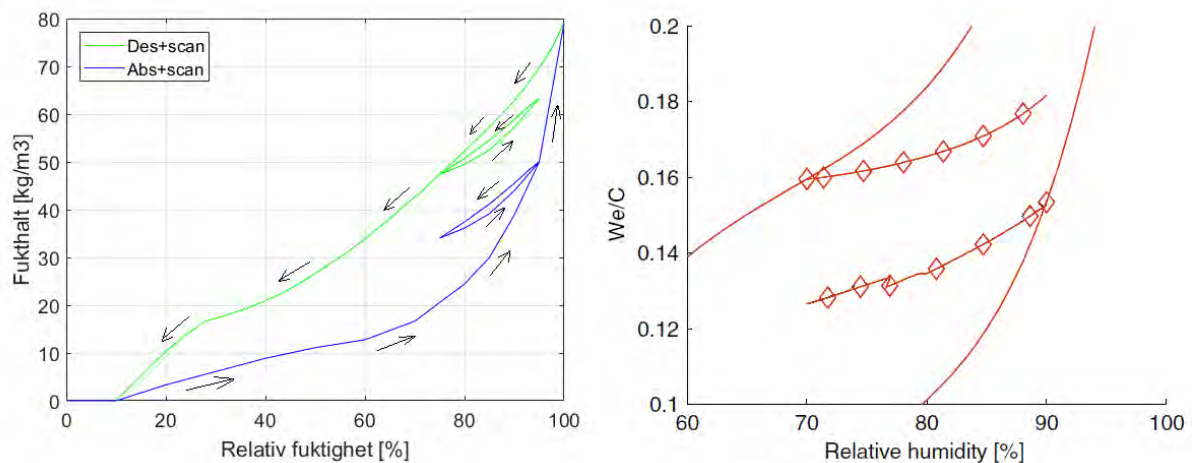


Fig. 4 Desorption, absorption och skanning. Vänster – fukthalt som funktion av relativ fuktighet för en fiktiv exempelbetong, grön kurva visar desorption (från 100% RF till 0% RF) med en skanningloop (från 75% RF till 95% RF och tillbaks till 75%), blå kurva visar absorption (från 0% RF till 100% RF) med en skanningloop (från 95% RF till 75% RF och tillbaks till 95%), pilar visar hur betongens tillstånd rör sig längs med kurvorna. Höger – exempel på uppmätta samband för fukthalt i förhållande till cementhalt som funktion av relativ fuktighet för betong med Byggcement vct 0,65 från Åhs 2008. Kurvan ovanför vänster är desorptions med punktmarkeringar för en

absorptionsskanning och kurvan nedan höger är absorption med punktmarkeringar för en desorptionsskanning.

Komplexiteten för vattnets beteende i porsystemet är som ovan visat rätt stor. Exemplet i Fig. 4 vänster visar att beroende på hur betongen torkats/fuktats upp kan den vid 80% RF innehålla en av 6 olika fukthalter. I verkligheten kan betongen vid en given relativ fuktighet anta alla fukthalter som ligger mellan desorptions- och absorptionskurvan för just denna relativa fuktighet. Dessutom bidrar även temperaturförändringar till hysteres, eftersom jämvikten mellan vatten och ånga är temperaturberoende och det är den som i grunden styr sorption, jämför Fig. 2.

När måste man ta hänsyn till hysteres i sorption? Vid självuttorkning under konstant temperatur är desorptionssambandet tillräckligt för att beskriva förhållandet mellan betongens fuktinnehåll och relativ fuktighet, precis som beskrivet i Stelmarczyk m.fl. 2017b. Vid diffusionsuttorkning (uttorkning mot torrare luft) under konstant temperatur räcker det fortfarande med bara desorptionssambandet. Men så fort någon form av uppfuktning, temperaturvariation och/eller mycket ojämn självuttorkning äger rum, vilket vanligtvis är det normala fallet för en verklig betongkonstruktion, uppstår förutsättningar för att man måste ta hänsyn till hela sorptionens komplexitet enligt ovan. Då räcker det inte med ett desorptionssamband utan även absorption, skanning samt temperaturberoende måste beaktas.

Ett exempel kan vara på sin plats för att belysa inverkan av hysteres vid prediktering av uttorkningsförlopp. Fig. 5 visar resultat från simulering av ett fall med respektive utan modellering av hysteres. Detta exemplifierar en enkelsidig uttorkning av en bottenplatta mot omgivande luft med 60% RF. Uttorkningen störs av en tillfällig höjning av luftens RF till 85% under 70 dygn.

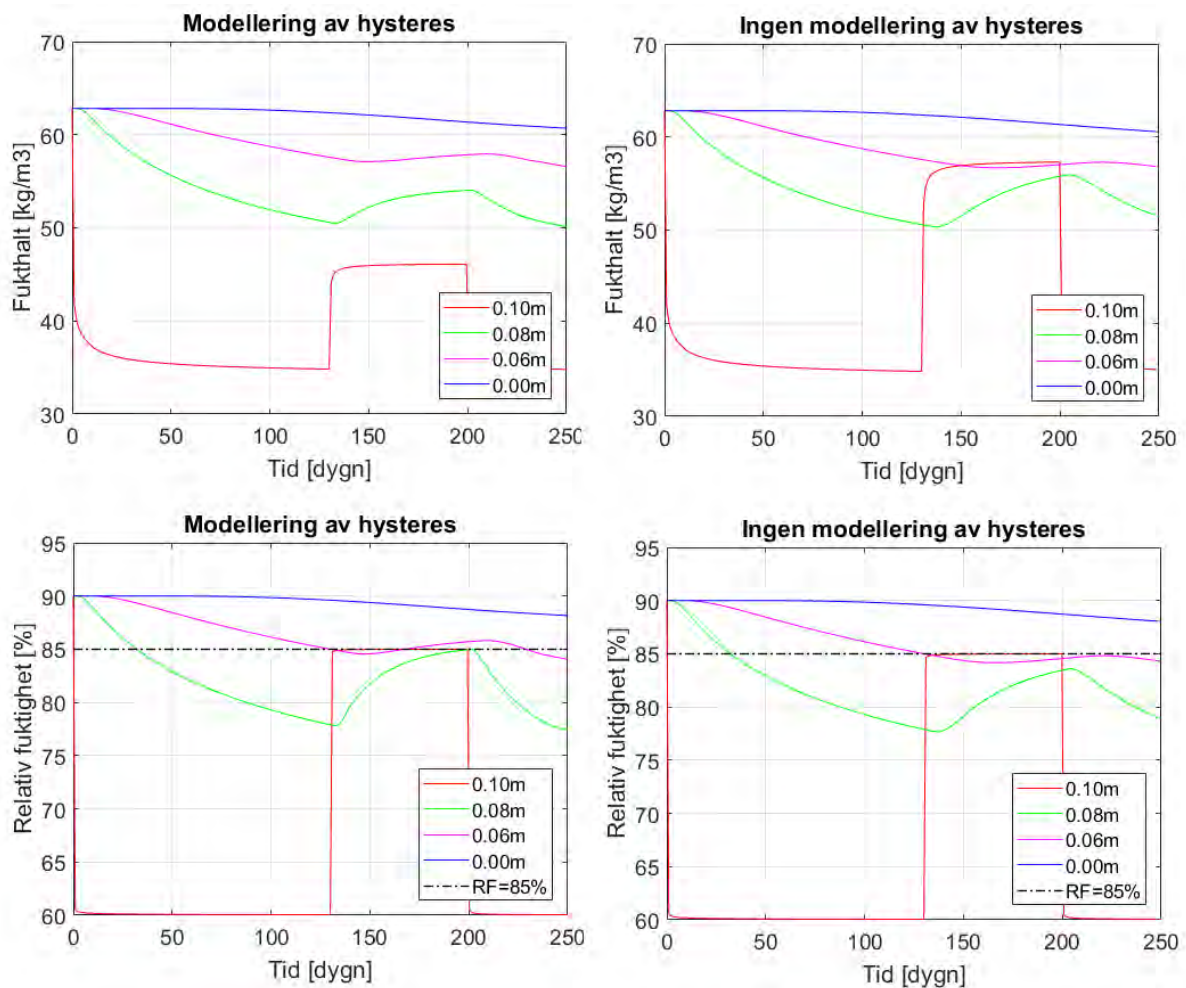


Fig. 5 Fukthalt samt relativ fuktighet som funktion av tid för olika djup i 100m tjockt bottenplatta vid simulering av enkelsidig uttorkning, OPC vct 0,4, materialdata hämtade från Nilsson 1994. Uttorkning sker mot luft 60% RF, med tillfällig höjning av luftens RF till 85% från dag 130 till dag 200. Höjdkoordinat för kurvor: 0.00 m är botten i konstruktionen och 0.10m är toppen.

Diagrammen visar kurvor för olika djup i konstruktionen för både fukthalt samt relativ fuktighet som funktion av tid. Skillnaden syns under och direkt efter störningen i uttorkningen, som resulterade i att betongens övre skikt fuktades upp. Modellering utan hysteres visar på stor höjning av fukthalten och liten höjning av den relativ fuktigheten p.g.a. att sorptionen endast modelleras med hjälp av desorptionskurvan. Modellering med hysteres visar att det faktiskt förhåller sig tvärt om. Det tas inte in lika mycket fukt (kg/m^3), men det mindre fuktintaget resulterar i högre RF. I detta fall höjs relativa fuktigheten på det ekvivalenta djupet i konstruktionen, kurva för 0.06 m enligt RBK 2017, över 85% trots att den var under innan och trots att luften själv inte hade högre RF än just 85%. Detta fall skall ses som ett exempel. Skillnaden kan bli större eller mindre i andra fall och med andra betonger. Detta kan ge en felaktig bild av en verklig uttorkningsprocess med underskattad RF, om den predikteras utan modellering av hysteres.

Sammanfattningsvis kan sägas:

- **Vattnet har ett mycket komplext beteende i betongens porsystem, som inte bara beror på relativ fuktighet utan även på temperatur, fukthistorik samt temperaturhistorik.**

- Två betonger gjutna med samma recept, härdade på samma sätt, med samma relativa fuktighet och temperatur kan mycket väl ha olika fukthalt. Detta beror på hur de har hanterats ur fukt- och temperatursynvinkel hela tidsperioden efter härdning.
- Vill man kunna prediktera betongens fukttillstånd på ett verklighetstroget sätt, inklusive inverkan av fritt vatten på betongytan, t.ex. regnvatten, variation i luftens relativa fuktighet och temperatur samt fuktsamverkan med anslutande material måste man kunna hantera sorptionens hela komplexitet. PPB Fukt kommer att vara det första verktyget för svensk byggindustri som kommer att klara av detta.

Fuktttransport i betong

Som bekant från diskussionen om sorption, förekommer fukt i betongen både som vattenånga och som kondenserat vatten. Detta ger två fundamentalt olika mekanismer för fuktttransport, diffusion för ånga och tryckdriven transport för vatten. Ångdiffusionen är en långsam transport där ångmolekyler rör sig så att de försöker utjämna skillnader i koncentration mellan olika ställen, se Fig. 6 vänster del. Flöden orsakade av ångdiffusion är mycket små, främst för att det är få molekyler som rör sig eftersom vattnet befinner sig i ångfas.

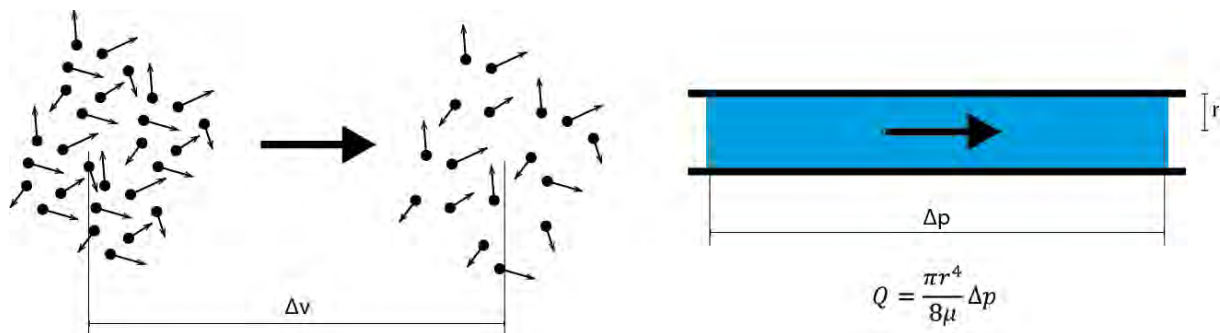


Fig. 6 Olika typer av fuktttransport. Vänster – ångdiffusion som drivs av skillnad i ånghalt (Δv) som är ett mått på antalet vattenmolekyler per volym. Höger – vattenflöde genom rör som drivs av tryckskillnad mellan rörets ändpunkter. Formeln nedanför höger bild är en variant av Darcys lag och ger flöde som funktion av rörets radie (r), tryckskillnad (Δp) samt vätskans viskositet (μ).

När det kommer till kondenserat vatten fungerar transporten på samma sätt som i vattenrör – det krävs en tryckskillnad mellan rörets ändpunkter för att flöde skall uppstå, se Fig. 6 höger. Tryckskillnaden i porsystemet uppkommer genom att en vattenfylld por är i sina bägge ändpunkter i termodynamisk balans med en omgivning med olika relativ fuktighet. Detta resulterar i olika porvattentryck, vilket i sin tur ger en tryckskillnad som driver ett flöde i den vattenfyllda poren. Eftersom fukten flödar i ett sådant fall som kondenserat vatten, med mycket högre densitet än ånga, blir flödet mångdubbelt större än för ångdiffusion. Det är just detta flöde som dominerar fullständigt fuktttransport i betong. Värt att nämnas är att detta flöde inte bara är beroende av tryckskillnaden utan även av porens geometri. För ett rakt rör ges flödet av ekvationen i Fig. 6 höger. Eftersom flödet är proportionellt mot rörets radie upphöjt till fyra blir flödets beroende av rörets grovlek mycket stort. Om radien halveras kommer flödet att minska till en sextondel av det ursprungliga. Redan vid relativt små förtätningar i betongens porsystem, som kan uppstå till följd av fördröjd puzzolanreaktion från tillsatsmaterial, kan detta ge en mycket stor reduktion i betongens fuktttransportförmåga. Detta tas närmare upp med konkreta exempel senare i denna artikel.

Fig. 7 sammanfattar tre olika transportfall som kan uppstå i porsystemet. I en helt tom por äger ångdiffusion rum och flödet är mycket litet. I en helt full por flödar vatten drivet av skillnader i kapillärtryck och detta flöde dominerar fukttransporten i betongen. I fallet där en por är delvis vattenfylld förekommer en kombination av bägge fenomenen. Ångdiffusionen i de delarna som inte är vätskefyllda drar ner flödet kraftigt, jämfört med vad som skulle äga rum i en helt full por. Beaktar man dessutom att porerna är kopplade kors och tvärs med varandra, kompliceras bilden ytterligare då alla former av transport sker delvis parallellt och delvis seriellt med varandra och blir naturligtvis inte bara beroende av hur enskilda porer ser ut utan även hur dessa är ihopkopplade.

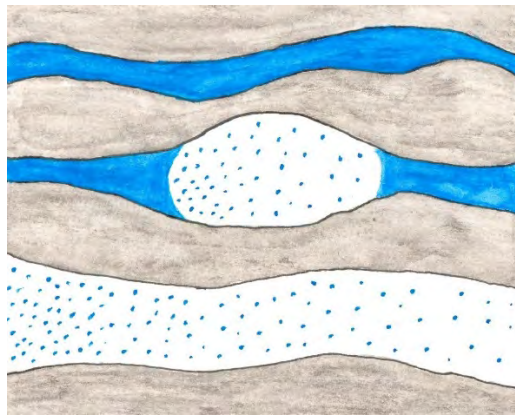


Fig. 7 Tre transportfall för fukt i betong. Ovan – fylld por med vattentransport drivet av skillnad i porvattentryck. Under – tom por med ångdiffusion. Mitt – delvis fylld por där kapillärsug och ångdiffusion samverkar. De blåa prickarna symboliserar ånga och koncentration antyder relativa skillnader i ånghalt. Transporten sker i höger riktning i figuren mittre och undre del.

Sammanfattningsvis kan sägas att det är den tryckdrivna transporten av vatten i de vattenfyllda porerna som dominerar fukttransporten i betong. Detta gör att betongens transportförmåga blir beroende av hur mycket vatten som finns i den - ju större del av porsystemet som är vattenfyllt desto större transportförmåga. Högre relativ fuktighet medför inte bara mer vatten i porsystemet. Den medför även att större porer blir vätskefyllda, vilket ökar transportförmågan ytterligare, jämför formeln i Fig. 6. Sammantaget ger detta betongens transportförmåga ett kraftigt beroende av relativ fuktighet, materialiskt sett fullt jämförbart med ett exponentiellt samband.

Som det tidigare i denna artikel presenterats finns det hysteres i sorptionen. Porsystemet fyllnadsgrad samt hur vattnet är fördelat mellan porer av olika storlek beror inte bara på hur mycket vatten som finns i betongen utan även på temperatur, fukthistorik samt temperaturhistorik. Detta medför att även transportförmågans fuktberoende drabbas av samma typ av hysteres. Fenomenologin bakom dessa beroenden är i grunden densamma, men eftersom hela det öppna porsystemet bidrar till sorption men bara en del av den bidrar till transport, blir transportens hysteres litet annorlunda än sorptionens.

Sammanfattningsvis kan sägas att:

- **Fukttransport sker i betong dels genom ångdiffusion och dels genom vattenflöde drivet av skillnader i porvattentryck. Det är den senare formen av transport som dominerar och den förekommer endast i vattenfyllda porer.**

- Transporten är beroende av hur porsystemet är fyllt med vatten och innehåller liknande typ av hysteres som sorptionen.
- Transporten är mycket känslig för porernas storlekar. En liten tilltäppning i porsystemet kan ge stor reducering av betongens transportförmåga för fukt

Fuktutbyte med omgivningen

Allt fuktutbyte med omgivningen sker också med ångdiffusion och/eller kapillärsug. Ångdiffusion kan ske mot luft och andra material som släpper igenom luft. Vattnet som transporterats till betongens yta hamnar i termodynamisk balans med omgivande luften och dess vattenånga. Om relativa fuktigheten i luften är lägre än i betongen, förångas en del av vattnet och dunstar, se Fig. 8 vänster. Är det tvärt om så kondenseras vatten i porer, som når betongens yta, och sugas in.

För att få till den kraftfullare transporten av fukt som vatten i porer krävs en tryckskillnad. Mot luft blir den alltid negativ, dvs. kapillärporer suger. Detta innebär att fritt vatten på betongens yta, t.ex. regnvatten som ligger kvar, kommer att sugas in i betongen, se Fig. 8 mitt. Detta kan ge en kraftfull transport och resultera i omfattande uppfuktning av betong – mycket snabbare och kraftfullare än vid kontakt med fuktig luft.

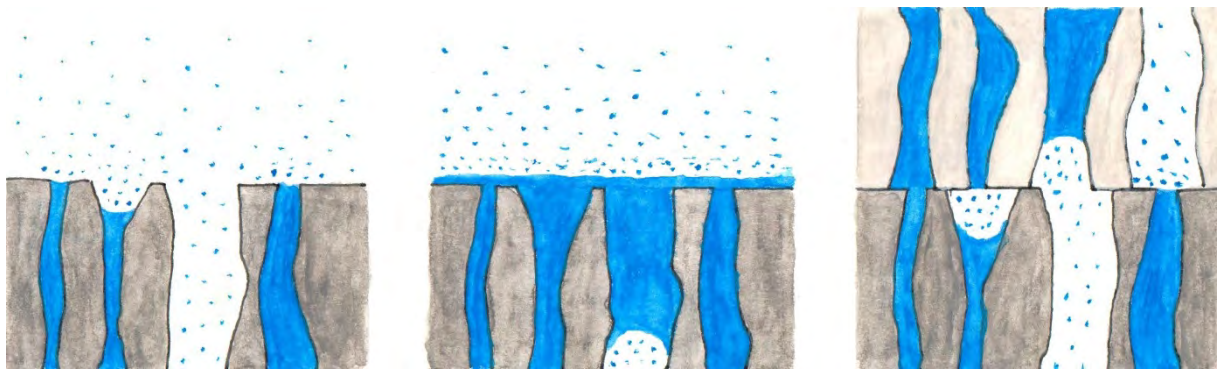


Fig. 8 Utbyte av fukt med omgivningen. Vänster – uttorkning mot luft. Mitt – insugning av vatten från yta. Höger – samverkan med annat poröst material, t.ex. avjämningsmassa. De blåa prickarna symboliserar ånga och koncentration antyder relativa skillnader i ånghalt.

I kontakt med andra porösa material kan betong utbyta fukt både genom ångdiffusion och kapillärsug på samma sätt som transporten sker i betongen. En avjämningsmassa t.ex., innehåller ett eget porsystem där fukttransport och sorption pågår på samma sätt som i betongen, även om porositeten och porstorleksfördelningen kan skilja sig från betongens, se Fig. 8 höger. Kontakten mellan materialen ger en kontakt mellan porerna och säkerställer att kapillärsug kan verka över materialgränsen, vilket möjliggör den kraftfullare varianten av fukttransport. Vill man undvika detta måste man lägga ett ytskikt med kapillärbrytande egenskaper mellan materialen.

Modern, tät betong

Hur ser transportförmågan ut i modern betong med mineraltillsatser? Även här finns det tyvärr väldigt lite mätdata att gå på. Den enda, vid skrivandet av denna artikel, publicerade relevanta mätningen är Saeidpour & Wadsö 2016, varifrån diagram i Fig. 9 är hämtade.

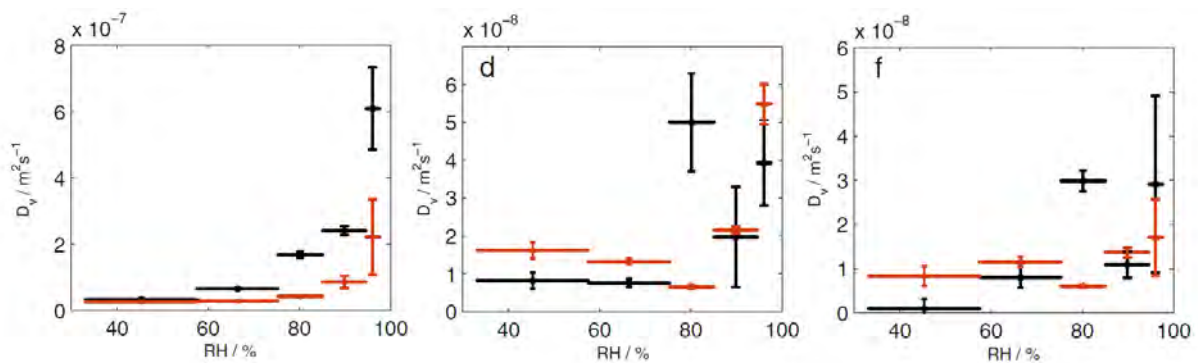


Fig. 9 Jämförelse av transportkoefficient för ånghalt som funktion av relativ fuktighet. Vänster – CEM I (OPC) vct 0.4. Mitten – OPC med 10% silikastoft vct 0.4. Höger – OPC med 70% slagg vct 0.4, svart – under desorption, röd – under absorption. Källa: Saeidpour & Wadsö 2016.

Den klara skillnaden mellan ren OPC och betong med tillsatsmaterial är storleksordningen på transportkoefficienterna (jämför vertikalskalan i diagrammen). Betongen med 70% slagg resp. 10% silikastoft har en transportförmåga som är ca en tiondel av transportförmågan hos betongen med ren OPC. Detta är en drastisk skillnad. En undersökning som precis är på väg att publiceras bekräftar detta. Enligt Olsson 2017 kan samma storleksordning på skillnad i transportförmåga jämfört mot OPC observeras även vid inblandning av 40% slagg resp. 5% silikastoft. **Sammantaget indikerar resultaten att betongens struktur påverkas signifikant av tillsatsmaterialen och att även förhållandevis små inblandningsmängder kan påverka fukttransportförmågan. Resonemanget, att det skulle krävas större inblandning för att ge kännbar struktureffekt, håller helt enkelt inte.**

Hur ser det ut för flygaskans och Bascementets räkning vet vi inte med säkerhet ännu. Flygaskans fördröjda reaktion ger underlag till misstanke om förtätning i porstrukturen, vilket skulle också kunna förklara desorptionskurvan publicerad i Stelmarczyk m.fl. 2017b. Mätningar av transportförmågan pågår inom ramen för Stelmarczyk m.fl. 2017c och resultaten är tidigast att vänta i början av 2018.

Mineraliska tillsatser är inte den enda bidragande faktorn till ökad täthet hos betong. Användning av krossballast med större andel av finmaterial än i naturballast, användning av filler samt en finare malningsgrad på cementet bidrar också till tätare betong. Alla dessa förändringar är direkt eller indirekt kopplade till utvecklingen mot mer miljövänlig betong. Vi kan rimligen konstatera att denna utveckling kommer att fortsätta inom överskådlig framtid. Vi behöver lära oss handskas med betonger, som är tätare än vad som var brukligt tidigare, i alltfler tillämpningar.

För att belysa innebörden av detta visas resultatet av två simuleringar av enkelsidig diffusionsuttorkning av 10 cm tjock betong i Fig. 10. Den ena betongen är en OPC vct 0,4, där sorptions- och transportdata är hämtade ur Nilsson 1994. Den andra är en hypotetisk betong med transportdata hämtade ur Saeidpour & Wadsö 2016 för den inmätta slaggblandningen, och sorptionsdata hämtade ur Stelmarczyk m.fl. 2017 för betong med Bascement. Bägge simuleringar utgår från att betongerna självuttorkar till 90% RF. Därefter simuleras endast enkelsidig diffusionsuttorkning mot luft med 40% RF.

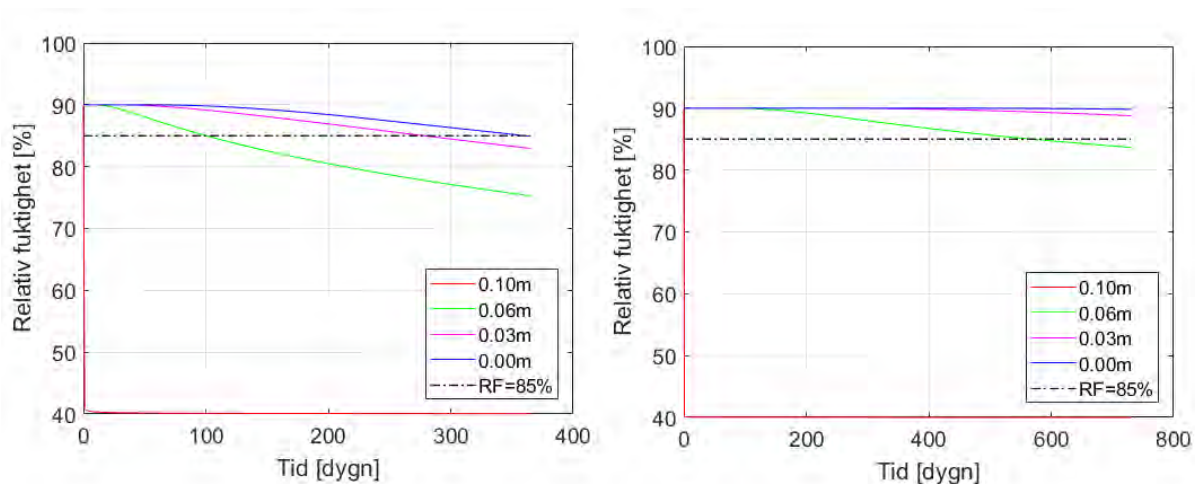


Fig. 10 Simulering av enkelsidig diffusionsuttorkning av 100 mm tjock betong med start vid 95% RF mot luft med 40% RF. Vänster – OPC vct 0.4 med data från Nilsson 1994, höger – hypotetisk betong med transportdata Saeidpour & Wadsö 2016 och sorptionsdata från Stelmarczyk m.fl. 2017. Diagrammet visar relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i konstruktionen där 0.00mm motsvarar den förseglade botten och 0.10mm motsvarar toppen i kontakt med luft.

Uttorkningskravet på 85% RF är markerat i diagrammen. Det ekvivalenta djupet enligt RBK 2017, motsvarande 0,06m räknat från botten av plattan, visas med de gröna kurvorna. Betongen med OPC tar ca 100 dagar att diffusionsuttorka på detta djup. Motsvarande för den hypotetiska betongen är ca 570 dagar. Man bör observera här två saker:

- Även om den hypotetiska betongen bygger på fullt relevanta materialdata, motsvarar den inte exakt någon specifik betong med mineral tillsatser.
- **Storleksordningen av skillnad i uttorkningstid är ändå så grov att man med rimlig säkerhet kan dra slutsatser att den moderna betongen kan bli så tät att den i praktiken inte kommer gå att diffusionsuttorka. Ingen entreprenör kommer sannolikt vara villig att vänta över 1,5 år på uppfyllande av ett idag gällande uttorkningskrav baserat på OPC.**

Är tätheten hos betong med moderna cementsammansättningar bara av ondo i fuktsammanhang? Vi tror inte det. När det gäller att säkerställa att betongen inte släpper ifrån sig fukt, vilket även möjliggör alkalitransport till anslutande material, finns det två sätt att resonera. Man kan tillåta hur öppen eller tät betong som helst och kravställa att den inte får innehålla för mycket fukt. Det är så vi gör idag och det innebär tuffa och mycket hårda krav på uttorkningsnivå. Man skulle kunna göra precis tvärt om, dvs. inte fokusera på hur mycket fukt betongen innehåller så länge den är tillräckligt tät att den ändå inte släpper fukten ifrån sig. Så gör vi inte när vi bygger idag, men vi skulle kunna göra det. Dagens arbetsmetoder inom både konstruktion och produktion är framtagna för en relativt öppen betong. Det är en realitet som vi håller på att lämna bakom oss, om vi inte gjort det redan med dagens betongsammansättningar. Skall vi dels kunna komma till rätta med de nya täta betongerna och dels lära oss utnyttja deras egenskaper till vår fördel måste vi våga tänka nytt och ändra våra arbetssätt. Det pågår redan ett SBUF-projekt 13354 "Utredning av funktionell uttorkningsnivå hos betong med mineraliska tillsatsmaterial" där en första studie utförs av fördelar och nackdelar med de nya betongerna i olika sammanhang där fukt är av betydelse. Vi hoppas inom kort kunna presentera ett axplock av delresultaten på denna webbsajt.

Slutsatser

Byggbranschens verklighet utvecklas mot mer miljövänlig betong där mineraltillsatser, filler, krossballast samt högre malningsgrad hos cementet utnyttjas för att minska betongens miljöpåverkan. Denna utveckling är ett nödvändigt steg i riktning mot mer ansvarsfullt byggande, men den sker inte utan utmaningar. Dessa utmaningar behöver hanteras av branschens aktörer. Det finns många egenskapsskillnader mellan nya betonger och den gamla betongen med OPC som enda bindemedel. Skall vi lära oss att leva med denna förändring måste hela branschens syn på fukt utvecklas:

- **Den ökade tätheten och den mycket lägre förmågan till transport av vatten kan göra det i princip omöjligt att diffusionsuttorka betongen, inom rimlig tid, till de kritiska RF-nivåer som gäller idag.**
- **Samma täthet skulle kunna bli en fördel i andra sammanhang. Dagens metodik, byggnorm och kvalitetskrav inom uttorkning och fuktdimensionering är inte formulerade med hänsyn till detta.**
- **Vill vi någonsin slippa överförenklade uttorkningskrav som begränsar handlingsfriheten måste vi mäta in betongens egenskaper noggrannare än tidigare och använda predikteringsverktyg som klarar av att korrekt simulera betongens samverkan med anslutande material. Detta är precis vad utveckling av PPB Fukt siktar på!**

Vi måste erkänna att skillnaderna finns. Vi måste våga ta tag i dem och utvecklas med dem. Branschens aktörer har mycket att vinna på att samverka kring de moderna betongerna och gemensamt reda ut hur vi skall arbeta med dem. För- och nackdelar av denna utveckling bör fördelas rättvist mellan branschens olika aktörer.

Referenser

Nilsson 1994 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, 1994, Kap. 14.3 samt kap 14.5

Olsson 2017 – privat kommunikation avs. uppmätta diffusionskoefficienter med Nilla Olsson, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH. Materialet i form av en artikel under titeln *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume* av N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, samt V. Baroghel-Bouny, är inskickat för granskning/publicering till Cement and Concrete Research sedan September 2017.

RBK 2017 – RBK, *Fuktmättningsmanual - betong*, version 6, kap 2.3

Saeidpour & Wadsö 2016 – M. Saeidpour, L. Wadsö, *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, Cement and Concrete Research, 2016

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 – M. Stelmarczyk, P. Johansson, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Självtuttorkning av betong*, www.sbuf.se/ppb 2017

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

Åhs 2008 – M. Åhs, *Sorption scanning curves for hardened cementitious materials*, Construction and Building Materials, 2008

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

Ing. Mattias Gunnarsson, Fuksakkunnig, Peab Sverige AB

Finns det någon fördel med modern, tät betong?

Ja, samma som dess primära nackdel – tätheten. I de tidigare artiklarna, **Betongfunktion: Uttorkning** (Stelmarczyk m.fl. 2017a), **Självuttorkning av betong** (Stelmarczyk m.fl. 2017b) samt **Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning** (Stelmarczyk m.fl. 2017c), gavs en generell bild av betongens uttorkning, dess olika delar samt principer för fuktomfördelning mellan betong och omgivande material. Olika mekanismer som bidrar till fukttillståndet i betong presenterades och förklarades samt en jämförelse gjordes hur dessa mekanismer fungerar i vad branschen betraktar som gammaldags betong, dvs. betong med relativt grovmald Ordinarie Portlandcement (OPC) som enda bindemedel och naturballast, resp. en modern, i regel mycket tätare betong med mineraliska tillsatsmaterial och krossballast. En rad grundläggande principiella slutsatser drogs. Nu är det dags att sätta kunskapen i tillämpning och studera hur en modern, tät betong fungerar i en rad typiska tillämpningar där fukttillstånd och fuktsamverkan med golvmaterial är av intresse. Vi kommer att presentera ett urval av resultat ur det pågående SBUF-projektet 13354 *”Utredning av funktionell uttorkningsnivå hos betong med mineraliska tillsatsmaterial”*. Samtliga resultat baserar sig på simulering av fuktomfördelning vid 20° C med hänsyn tagen till hysteres i sorption hos de inblandade materialen. Denna artikel kommer att fokusera på hur den kraftigt ökade tätheten förändrar fuktsamspelet mellan materialen i tillämpning. Denna jämförelse kommer att ställa två typer av betong mot varandra:

- Gammaldags OPC-baserad betong
 - Relativt grovmald OPC som enda bindemedel, naturballast
 - Materialdata Nilsson 1994 (Betonghandboken) för vct 0,40 samt 0,55
- Modern, tät betong
 - OPC med mineraltillsatser (slag, silikastoft eller flygaska), varierande malningsgrad hos klinkern anpassad till mineraltillsatsen i fråga, natur- eller krossballast
 - Materialdata inmätta vid Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH, hämtade från Saeidpour & Wadsö 2016, Olsson m.fl. 2018 samt Stelmarczyk m.fl. 2018 rörande betong med olika vattencementtal samt olika inblandningsgrad av slag och silikastoft resp. en inblandningsgrad av flygaska

För den moderna betongen kommer vi inte att diskutera olika vattencementtal, inblandningsgrader av mineraltillsatser resp. ballastdetaljer. Anledningar till detta är att det finns många sätt att göra betongen väldigt mycket tätare än den gammaldags OPC-baserade. Det väsentliga är inte hur man åstadkommit den höga tätheten utan att betongen har en fukttansportförmåga som är en tiondel till en femtondel av fukttansportförmågan hos den OPC-baserade. Här nöjer vi oss med att använda materialdata för en betong som ses som representativ för denna princip och som inte heller tillhör de tätaste och mest extrema som behandlats i ovan nämnda källor.

Observera dock att all betong som levereras idag inte nödvändigtvis har den tätheten som betongen i simuleringarna nedan. Man kan få betong baserad på grovmald OPC som enda bindemedel – den kommer naturligtvis att uppföra sig huvudsakligen som den gammaldags betongen. Man kan även få betong som kombinerar en rad faktorer, bidragande till förtätningen, som kommer att resultera i en tätare betong än vad som redovisas nedan. Även inblandning av filler, finpartiklar i krossballasten samt olika hydratationsförlopp kan inverka på den uppnådda tätheten i varje enskilt fall.

I princip omöjligt att diffusionsuttorka

Som det redan presenterades i slutet av den föregående artikeln **Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning** (Stelmarczyk m.fl. 2017c), har modern, tät betong en mycket lägre transportförmåga avseende fukt. Detta medför ökade tider för diffusionsuttorkning av konstruktioner. Ett exempel på detta visades redan i den förra artikeln. Här ger vi en sammanställning av tider för diffusionsuttorkning för en rad olika fall. I Tabell 1 redovisas resultat av simuleringar för en 100 mm tjock platta på mark.

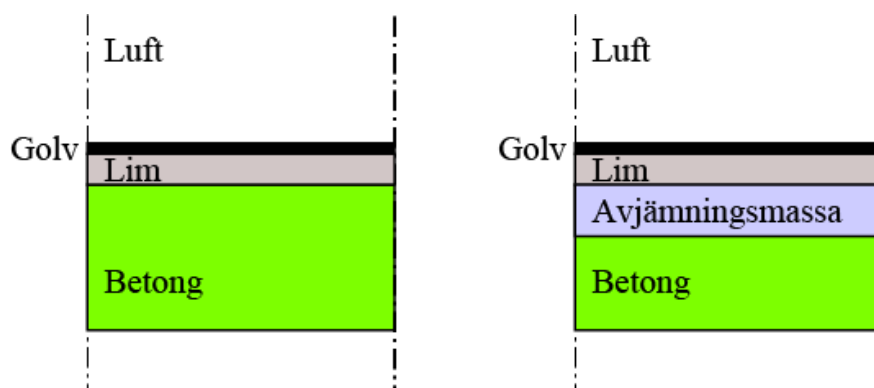
Betong	Självtorkad till	Torktid i luft med 40% RF	Torktid i luft med 60% RF
OPC vct 0,40	90% RF	129 dygn	168 dygn
OPC vct 0,55	95% RF	282 dygn	363 dygn
Modern tät	90% RF	562 dygn	647 dygn
Modern tät	95% RF	850 dygn	1024 dygn

Tabell 1 Tider för diffusionstorkning till 85% RF på ekvivalent mätdjup enligt RBK 2017 för en 100 mm tjock platta på mark. Enkelsidig uttorkning.

Här bör observeras att självuttorkning och diffusionsuttorkning i verkligheten pågår parallellt, åtminstone delvis. Trots det blir jämförelsen något skrämmande inför ett byggprojekt där en konstruktion med modern betong skall diffusionsuttorka. Torktider på flera år är helt enkelt inte hanterbara i verkligheten. Tiderna ovan gäller 100 mm tjocka konstruktioner och kommer att öka med ökande konstruktionstjocklek. **Den generella slutsatsen blir att modern tät betong i princip inte går att diffusionsuttorka på ekvivalent mätdjup enligt RBK 2017.**

Kan matta limmas direkt på betong?

En typisk tillämpning med hög känslighet för fukt är limning av ytskikt direkt på betong, se Figur 1 vänster.



Figur 1 Ytskikt limmat direkt på betong (vänster) och på avjämningsmassa på betong (höger).

Limmets fukt måste då relativt snabbt tas upp av underlaget eller diffundera ut genom ytskiktet så att limmet torkar och fäster ytskiktet på betongen. Samtidigt får den resulterande fuktnivån i underlaget under limmet inte vara för hög för då möjliggörs en alkalitransport som riskerar att orsaka nedbrytning av limskiktet genom hydrolys av limmets polymerer. Låt oss studera limmets förmåga att torka på olika underlag med betong som skilljer i täthet.

Här har vi valt att simulera ett relativt tätt ytskikt, Tarkett iQ Optima, med ett ånggenomgångsmotstånd på ca 2 960 000 s/m. Limfukten, som skall absorberas under denna simulering, ca 90g/m², gäller för ett flertal limmer på marknaden, t.ex. Casco Proff Universal eller Casco Proff Solid, applicerad med 3m²/l. Denna simulering utgår från att betongen torkats ut i enlighet med Tabell 1 innan mattan limmas.

Betong	Torktid för lim. Luft med 40% RF	Torktid för lim. Luft med 60% RF
OPC vct 0,40	2 dygn	2 dygn
OPC vct 0,55	1 dygn	1 dygn
Modern tät	89 dygn	150 dygn
Modern tät + 10mm avjämningsmassa	1 dygn	1 dygn

Tabell 2 Tider för uttorkning av vattenbaserat lim under Tarkett iQ Optima, lagt på betong uttorkad i enlighet med Tabell 1, utan och med Weberfloor 140 Nova som avjämningsmassa.

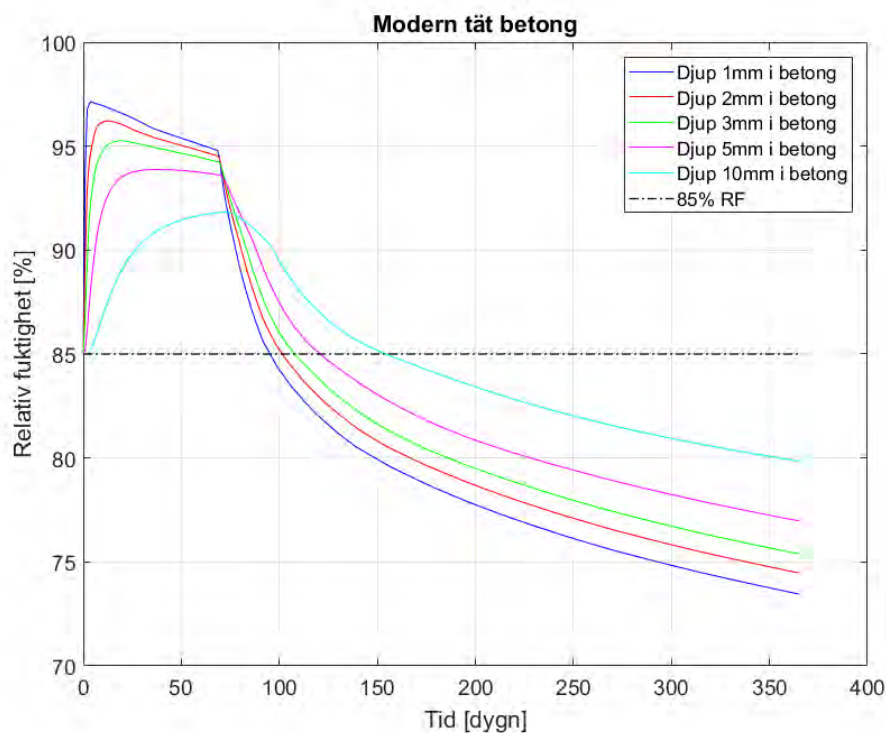
Vad som klart framgår är att modern, tät betong har stora svårigheter med att buffra upp limfukten. Eftersom betongen är så tät tvingas en ansenlig del av limfukten att diffundera genom ytskiktet. Hela denna process tar oacceptabelt lång tid och detta trots att vi i enlighet med Tabell 1 låtit den moderna betongen torka i upp till flera år innan mattan limmas. Att satsa på självuttorkning av betongen i stället för diffusionsuttorkning eller uttorkning till en lägre RF-nivå kommer inte att göra saken bättre, eftersom det är tätheten och inte fuktnivån som är utmaningen. Som en jämförelse har även en simulering utförts med modern, tät betong med ett lager avjämningsmassa. Denna har en relativt öppen porstruktur, dvs. god transport- och buffringsförmåga för fukt. Som framgår av resultaten kan avjämningsmassan hantera problemet med torktiden för limmet. Detta resultat var väntat eftersom vi genom detta lager av avjämningsmassa återställt transport- och buffringsförmågan i skiktet under limmet. Detta är förmågorna som den gammaldags, öppna betongen hade, men som den moderna, täta betongen saknar.

Hur är det med emissioner?

Effekterna av hög relativ fuktighet som möjliggör alkalitransport finns väl dokumenterade i litteraturen. Intressant nog finns även ett fall av mycket tät betong med direktlimmad matta att studera i Wengholt Johnsson 1995. I denna publikation undersöktes samband mellan fuktbelastning i betong, betongkvalitet och emissioner. Golvstycken av olika slags betong torkades till olika höga relativa fuktigheter varpå man limmade en matta på dem och mätte eventuella resulterande emissioner. Detta gjordes för att fastställa ett samband mellan RF på ekvivalent mätdjup och mängden emissioner. Den självtorkande betongen i jämförelsen var baserad på OPC med 5% tillsatt silikastoft, med ett vattenbindemedelstal (vbt) på 0,40. Betongen självtorkade till 85% RF varpå en PVC-matta limmades på betongytan och emissioner mättes vid 43, 116, 170 samt 233 dygn efter limning av matta. Denna försöksuppsättning resulterade i förhöjda emissioner – klar höjning vid 43 dygn, toppvärden vid 116 samt 170 dygn och vidare minskande vid 233 dygn. Den maximala nivån var dock inte lika hög som för emissioner uppmätta för ren OPC vct 0,66, alltså betong med en mycket öppen porstruktur, som torkats endast till 95% RF. Slutsatsen i publikationen var att förhöjda emissioner observerades för betongen med vbt 0,40 trots att betongen hade självtorkat till 85% RF. Förklaringen som angavs var den höga cementhalten som antogs resultera i högt pH. I slutsatsen nämndes inte att i samma publikation redovisas en mätning av alkalihalter på olika djup i de använda

betongerna, där den omnämnda självtorkande blandningen ligger bland de betonger som har lägst alkalihalt, vilket normalt även medför lägst pH.

Undersökningen i Wengholt Johnsson 1995 genomfördes utan att titta närmare på betongens varierande transport- och buffringsförmåga. Detta begränsar kraftigt möjligheten till analys av vad som egentligen hände i betongen samt de bakomliggande mekanismerna och förmågan att dra korrekta slutsatser. Låt oss titta en gång till på denna mätning, fast med ny kunskap om betongens fuktegenskaper. Den i Wengholt Johnsson 1995 använda, självuttorkande betongens sammansättning är fullt jämförbar med några av materialen inmätta i Olsson m.fl. 2018 (OPC + 5%SF, vbt 0,38 resp. 0,53), vilket avslöjar att denna betong var i samma täthetsklass som den moderna, täta betong vi använder i simuleringar i denna artikel. Låt oss då simulera fallet med pålimmad PVC-matta (antagen ånggenomgångsmotstånd på 2 000 000 s/m), ett lim med ca 3/5 limfukt jämfört med simuleringar ovan, samt 40% RF i omgivande luft. Fokus här ligger inte längre på limmets torktid utan på relativ fuktighet i betongen omedelbart under limmet, se Figur 2.



Figur 2 Relativ fuktighet som funktion av tid i olika skikt i betongen under en pålimmad matta, simulering av självtorkande betong (OPC med 5% SF, vbt 0,40) från Wengholt Johnsson 1995.

Eftersom vi saknar exakta sorptionsdata för limmet, ser övergången mellan blött och torrt lim vid ca 70 dygn mer skarpt ut än vad den kommer att vara i praktiken. Däremot bör principen för fuktomfördelning samt den ungefärliga tidsaspekten stämma väl överens med verkligheten. Det vi ser, fram till ca 70 dygn, är limmets uttorkning. Limmet släpper ifrån sig sin fukt som delvis går ut genom mattan (ses inte i diagrammet) och delvis tas upp av betongen. Eftersom betongen har låg transportförmåga tar den upp fukten långsamt. Det byggs upp en stor gradient och vi ser att de översta millimetrarna i princip når upp till full fuktmättnad (100% RF är inte möjligt i betong då det finns joner lösta i porvätskan). Efter att limmet torkat ut vänder flödet och betongen börjar torka

genom den pålimmade mattan. När vi nu jämför denna bild med de uppmätta emissionerna kan följande slutsatser dras:

- Limmet är i kontakt med betong med ett RF långt över 85% i nästan 100 dygn. Detta är fullt tillräckligt för att förklara förekomsten av emissioner.
- Eftersom fuktflödet går in i betongen under limmets torktid, kommer alkalitransporten att initialt vara begränsad, då den endast sker genom diffusion pga. skillnad i alkalikoncentration mellan betong och lim. När flödet vänder bör alkalitransporten öka och ske både genom diffusion och konvektion (jonerna transporteras av vattnet som flödar uppåt i betongen). Tar vi dessutom hänsyn till att det bör finnas en tidsmässig fördröjning mellan limmets nedbrytning och registrering av emissioner i luften ovanför golvet, sammanfaller fukt bilden väl med begränsade emissioner vid 43 dygn, två toppar vid 116 resp. 170 dygn och avtagande emissioner vid 233 dygn, dvs. det som registrerats.
- Eftersom den använda betongen innehåller en inblandning av silikastoft som reagerar med portlandit och reducerar betongens pH, vilket även framgår av undersökningar i publikationen i fråga, måste den publicerade slutsatsen om högt cementhalt och högt pH som orsak till registrerade emissioner anses vara felaktig.
- Tilläggas kan att Wengholt Johnsson 1995 även visar att då samma betong används med 5-10mm avjämningsmassa mellan betongytan och limmet reduceras emissionerna avsevärt.
- Emissioner från golv limmade direkt på betong med lågt vattencementtal samt mineraliska tillsatsmaterial förorsakas huvudsakligen av den ökade tätheten i betongen och dess konsekvenser för fuktsamverkan och inte pga. ett påstått förhöjt pH.

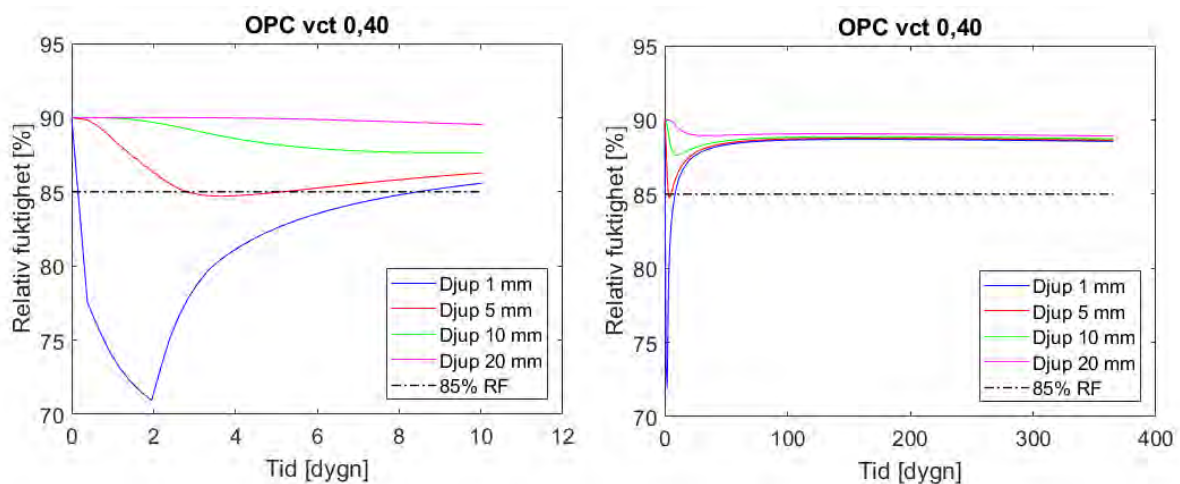
Att limma ytskikt direkt på modern, tät betong är alltså inte att rekommendera. Dels kommer det att resultera i orimliga torktider för limmet. Dels kan man räkna med alkalitransport pga. kraftig uppfuktning av betongens översta skikt, och resulterande nedbrytning av lim med eventuella tillhörande emissioner om man inte använder lågemissionslim.

Var hittar man fördelarna?

Inom den förhärskande arbetsmetodik som är framtagen för en betong med relativt öppen porstruktur är det svårt att se några fördelar med den moderna, täta betongen. Metodiken förutsätter öppenheten i prostrukturen och den resulterande möjligheten till diffusionstorkning inom rimlig tid samt buffringsförmågan vid t.ex. användning av vattenbaserat lim. För att hitta fördelarna måste man "tänka utanför boxen" och utforska nya arbetssätt konstruktivt. Våra simuleringar visar att det kan vara värt besväret.

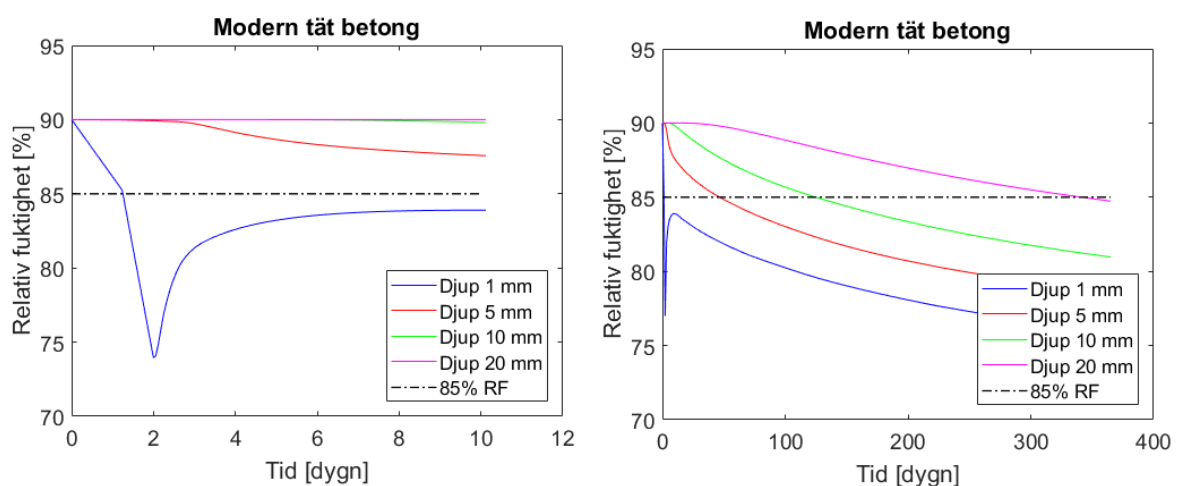
Det första exemplet på fördel i tillämpning kommer att hantera ett fall som inte blivit särskilt vanligt ännu – ytskikt som appliceras med lim som inte är vattenbaserat och som följaktligen inte behöver bli av med fukt. Även om just denna lösning inte används särskilt ofta är exemplet viktigt då det visar på vikten av att modern, tät betong släpper ifrån sig fukten väldigt sakta.

I detta fall simulerar vi ett relativt tätt ytskikt med samma ånggenomgångsmotstånd som Tarkett iQ Optima använd i tidigare simuleringar, som limmas direkt på betong. Vi antar en självuttorkning till 90% och därutöver får betongen diffusionstorka i 2 dygn mot luft med 40% RF, för att initiera en fuktgradient i själva ytan.



Figur 3 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i betong med OPC med vct 0,40 och ytskikt limmat med icke-vattenbaserat lim. Vänster de första 10 dygnen, höger de första 365 dygnen.

Limskiktet i detta fall behöver inte bli av med fukt eftersom limmet inte var vattenbaserat. Vad som däremot är intressant är att vi testar att limma mattan utan att ha uppnått 85% RF på ekvivalent mätdjup i betongen. För OPC-fallet i Figur 3 ser vi klart och tydligt att detta inte kommer att fungera. Vi får först en viss uttorkning någon millimeter in i betongen men så fort ytskiktet läggs på sker en kraftig omfördelning av fukt i betongen. Efter några dagar har hela betongtvärsnittet över 85% RF. Detta sker typiskt när betongen är relativt öppen och ytskiktet är mycket tätare. Ytskiktet blir då flaskhalsen i det totala fuktflödet. Fukten i betongen omfördelas till en jämnare profil och betongen torkar sedan långsamt genom ytskiktet.



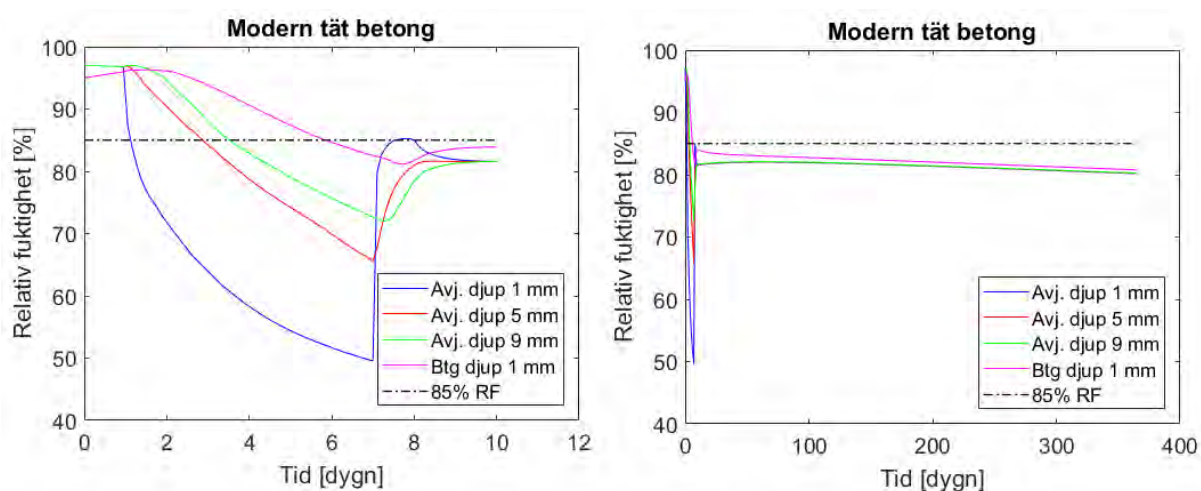
Figur 4 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i modern, tät betong med ytskikt limmat med icke-vattenbaserat lim. Vänster de första 10 dygnen, höger de första 365 dygnen.

När det gäller den moderna, täta betongen, se Figur 4, blir förhållandet annorlunda. Det sker en omfördelning efter påläggning av ytskikt men den blir mycket liten. Detta har att göra med att betongen är mycket tätare än ytskiktet. Betongen blir i detta fall flaskhalsen i det totala fuktflödet.

Den huvudsakliga gradienten i betongens övre del kvarstår. Betongen kommer sedan långsamt att torka och den lilla mängden fukt som den släpper ifrån sig går snabbt ut genom ytskiktet. Omfördelningen i just detta exempel var liten nog för att inte driva upp den övre millimetern av betongen över 85% RF, vilket innebär att **betongen som limmet och ytskiktet kommer i kontakt med kommer att vara torrare än 85% RF. Om kravet på 85% RF kan tolkas lokalt och räcker för att förhindra alkalitransport borde man kunna lägga på ytskiktet mycket tidigare än vad man gör idag. Här kan man spara tid och pengar!**

Flytta uttorkningstid från betong till avjämning

Kan man utnyttja samma täthet i kombination med ytskikt och vattenbaserat lim? Ja, det går, men inte utan ett lager avjämningsmassa. Som vi tidigare visade i simulering av uttorkningstider för vattenbaserat lim, saknar den moderna, täta betongen den buffringsförmåga som utnyttjades i den gammaldags OPC-baserade betongen. Detta måste man kompensera för och avjämningsmassa med en öppen porstruktur gör det alldeles utmärkt. Samtidigt blir man nyfiken på hur fuktbilden ser ut om man lägger avjämningsmassan tidigare än idag, dvs. vid högre RF i betongen. Det är precis vad det sista presenterade fallet handlar om. Här simulerar vi 10mm avjämningsmassa Weberfloor 140 Nova som läggs på en betong som självtorkat till 95% RF. Avjämningsmassan får torka i 7 dagar mot omgivande luft med 40% RF. Därefter läggs Tarkett iQ Optima med vattenbaserat lim.



Figur 5 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i avjämningsmassa och betong med ytskikt limmat med vattenbaserat lim. Vänster de första 13 dygnen, höger de första 365 dygnen.

Den erhållna fuktbilden framgår av Figur 5. Först ser vi en snabb diffusionstorkning av avjämningsmassan. Det övre skiktet kommer ner till 50% RF och det närmast betongen till ca 70% RF. Vi ser även en liten uttorkning av betongens övre skikt genom den öppna avjämnningen. Vid 7 dygn läggs ytskiktet och limmet på. Limfukten tas upp i avjämningsmassan och efter omfördelning, några dygn senare, hamnar hela avjämnningen på ca 80% RF. Nu övergår hela golvsystemet till långsam uttorkning där återigen betongen är den tätaste delen och den fukt som den släpper ut går lätt igenom de andra skikten utan att ackumuleras någonstans. Varken limmet eller ytskiktet kommer i kontakt med betong eller avjämning som håller en högre RF än 85%. Den relativt öppna avjämningsmassan kan lätt buffra upp all limfukt utan att nå högt upp i relativ fuktighet och

separerar väl ytskiktet och limmet från den blöta betongen. **Observera att detta fall i verkligheten kan motsvara avjämnning direkt efter "tätt hus" och mattläggning en vecka senare. Detta skulle kunna bli en enorm besparing i tid och pengar!**

Vilka är de kritiska parametrarna?

Dagens uttorkningskrav och de undersökningar som dessa baserar sig på, bl.a. Wengholt Johnsson 1995, har kopplat en relativ fuktighet på ett visst djup i betongen till förekomsten av emissioner från nedbrytning av lim- och ytskikt. Detta har gjorts i form av en s.k. black-box-undersökning. Man har helt enkelt uppmätt samband mellan parametrarna utan att i detalj studera mekanismerna som binder samman fenomenologin. Resultatet fungerade så länge man använde material med samma egenskaper som i undersökningen. Materialen är idag annorlunda. De ställda klimatmålen har medfört en utveckling av material inom hela golvsystemet och vi har goda skäl att anta att denna hållbarhetsresa har bara börjat. För att hantera denna utmaning måste branschens syn på vad som är de kritiska parametrarna i ett golvsystem utvecklas.

Dagens limmer och ytskikt bryts ner på delvis annorlunda sätt än tidigare. Det förekommer klagomål på illamående kopplat till misstanke om nedbrytning i golv men där man samtidigt inte kan påvisa emissioner av de typiska gamla nedbrytningsprodukterna 1-butanol och 2-etylhexanol. Samtidigt har vi skäl att tro att samma fuktnivåer i den moderna, täta betongen inte medför samma alkalitransport som i den gamla. De ovanstående fallen, där den moderna betongens täthet utnyttjades, simulerar endast fukttillståndet. Hur det förhåller sig med alkalitransport går inte att säga med säkerhet med den kunskap som finns idag. Det finns god anledning till misstanke att alkalitransporten blir mycket begränsad. Eftersom den moderna, täta betongen har mycket låg förmåga att transportera fukt och det är just samma transportvägar som används för alkali, måste tätheten bidra till en begränsning av alkalitransporten. Samtidigt bygger fallen ovan på att det betongskikt som är i kontakt med anslutande material är relativt torrt, vilket ytterligare minskar möjligheten till ett alkaliflöde från betongen in i andra material. Eftersom det kommer att ske ett visst fuktflöde i betongen som långsamt kommer att torka över många år kommer en alkalitransport att ske, men skälen nämnda ovan pekar mot att den huvudsakligen kommer att omfördela jonerna i betongen och omfördelningen till anslutande material kommer att vara begränsad.

För att med säkerhet kunna rekommendera fungerande golvlösningar som utnyttjar den moderna betongens egenskaper krävs det mer forskning och metodutveckling. Det räcker inte med den gamla black-box-undersökningen, som i t.ex. Wengholt Johnsson 1995. Mäts endast sambandet mellan fuktnivå och emission i ett antal fall förblir branschen precis lika känslig mot en förändring i materialegenskaper som den är idag. Vad som krävs för att reda ut förutsättningarna för utnyttjande av den kontinuerliga utvecklingen av nya material är en djupare förståelse av de kritiska parametrarna bakom golvsystemens felfunktion och nedbrytning:

- **Hur sker nedbrytning i dagens lim och ytskikt. Vilka lokala parametrar som t.ex. fukthalt och pH styr nedbrytningsprocessen?**
- **Hur sprider sig nedbrytningsprodukterna vidare i golvmaterialen och i luften? Vilka emissioner handlar det om? Hur skall dessa mätas på ett repeterbart sätt och vilka gränsvärden är det som gäller?**

- Hur sker alkalitransport i modern, tät betong samt andra cementbaserade produkter, som t.ex. avjämningsmassor?
- Hur skall ovanstående kunskap kopplas ihop för att kunna prediktera och verifiera säkra golvlösningar?

Slutsatser

Modern, tät betong skiljer sig fundamentalt från den gammaldags OPC-baserade i sin samverkan med omgivande material. Med dagens arbetsmetodik i konstruktion och produktion resulterar det huvudsakligen i nackdelar:

- Betongen går i princip inte att diffusionsuttorka.
- Betongen saknar buffringsförmåga för fukt, vilket i princip omöjliggör limning av ytskikt med vattenbaserade limmer direkt på betongen, även om man lyckas uppfylla gällande uttorkningskrav.

Samtidigt ger dess täthet enorma möjligheter, förutsatt att man tänker konstruktivt utanför dagens metodik och uttorkningskrav:

- Betongen släpper ifrån sig fukt så långsamt att fukten inte ackumuleras i anslutande material och att uppfuktande omfördelningar, typiska för betong med mer öppen porstruktur, inte äger rum eller är ytterst begränsade.
- Kombinationen av användning av avjämningsmassor för återställande av buffringsförmåga i golvsystemet med möjligheten att arbeta med en tät betong som endast yttorkat skulle kunna åtgärda dagens problem och snabba upp byggprocessen betydligt.

För att säkerställa framtida fungerande golvlösningar och utnyttja den moderna betongens fördelar krävs dock en hel del forskning och utveckling av predikteringsverktyg, arbetsmetodik samt valideringsmetoder för både labbmiljö och fältbruk.

Mot bakgrund av just dessa utmaningar och möjligheter ter det sig oförståeligt att vissa materialtillverkare fortfarande anstränger sig att försöka övertyga branschen att det inte är någon större skillnad ur fuktsynvinkel mellan gammaldags OPC-baserad betong och den moderna, täta. Det är hög tid för branschens samtliga aktörer att erkänna verkligheten, ta tag i utmaningen och lära sig utnyttja de nya miljövänliga materialens förändrade egenskaper!

Referenser

Nilsson 1994 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, 1994, Kap. 14.3 samt kap 14.5

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

Saeidpour & Wadsö 2016 – M. Saeidpour, L. Wadsö, *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, Cement and Concrete Research, 2016

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 – M. Stelmarczyk, P. Johansson, 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 – pågående inmätning av Bascementets egenskaper inom SBUF Projekt 13198 samt 13140

Wengholt Johnsson 1995 – H. Wengholt Johnsson, *Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning*, Chalmers Tekniska Högskola 1995,

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

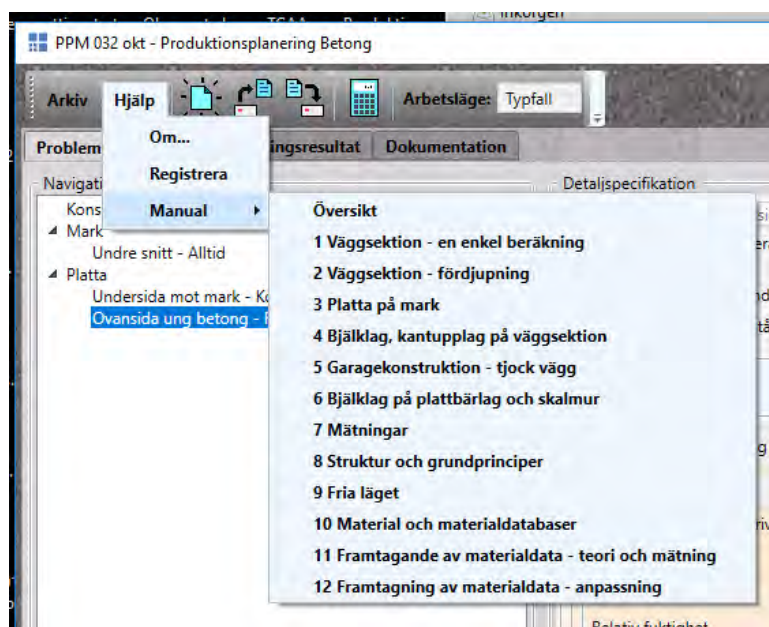
Ing. Mattias Gunnarsson, Fuktsakkunnig, Peab Sverige AB

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

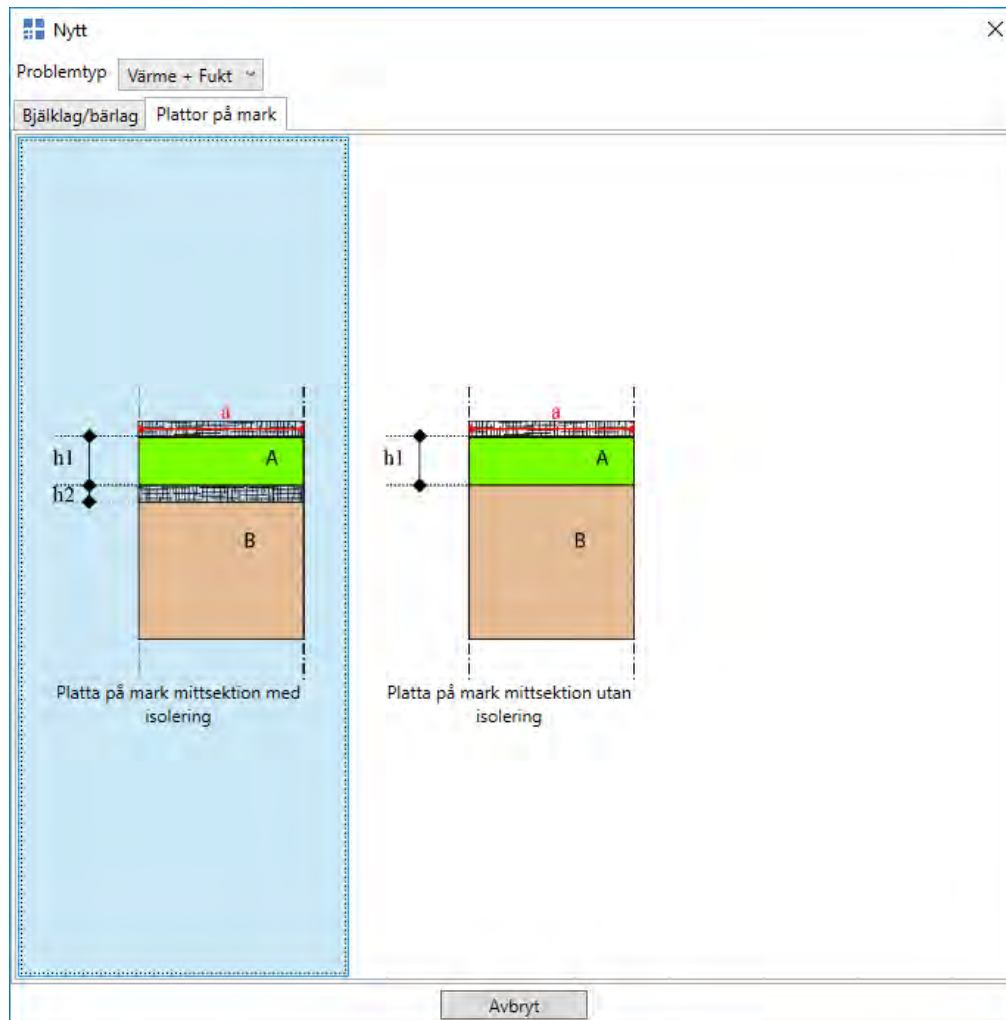
För att komma igång med PPB rekommenderas det i programvaran inbyggda utbildningsmaterialet. I menyn **Hjälp** -> **Manual** -> ... , som visas i Figur 1, finns utbildningsmaterialet i form av PDF-filer, uppdelat i 12 olika kapitel. För att snabbt komma igång med alla grundläggande funktioner rekommenderas 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.

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-

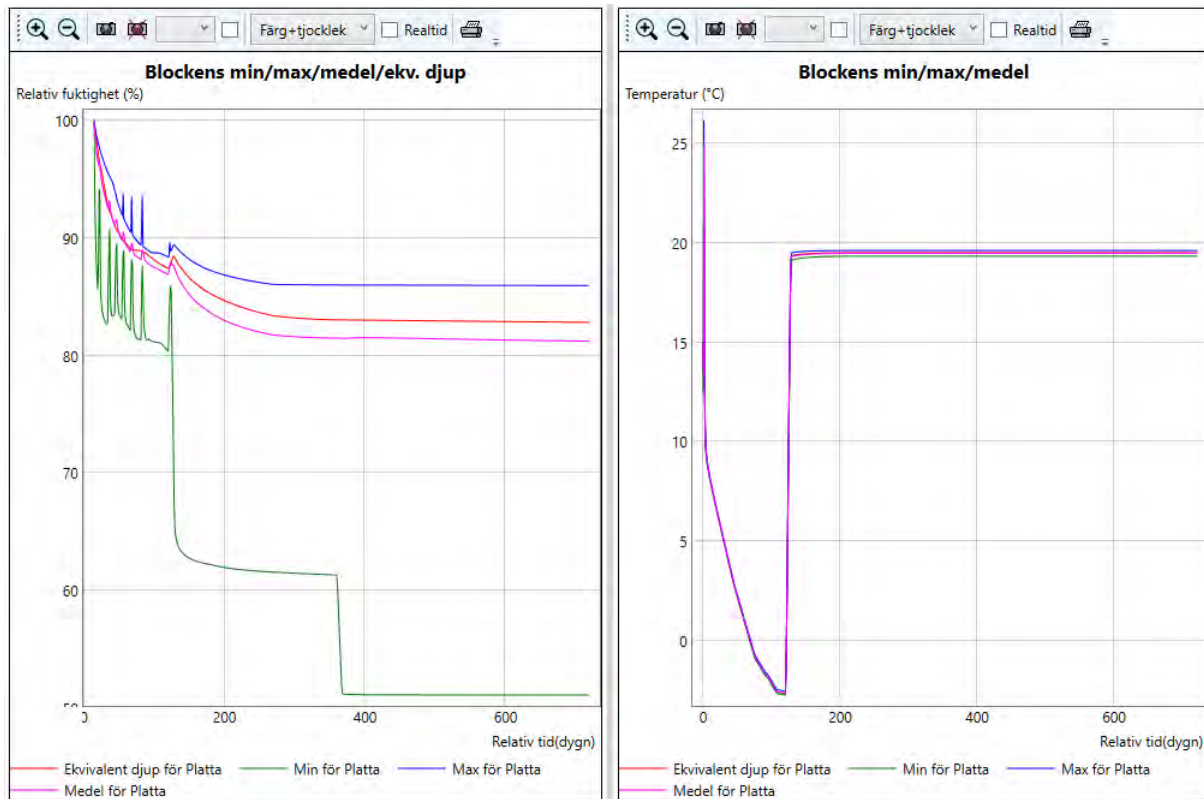
och transportegenskaper ändras mycket snabbt dagarna efter gjutning och vi har helt enkelt inte kunnat mäta upp dem. Av detta skäl simuleras endast kemisk bindning av vatten till följd av hydratationen direkt från start. Simulering av fuktflöde i konstruktionen och fuktutbyte med omgivningen startar 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

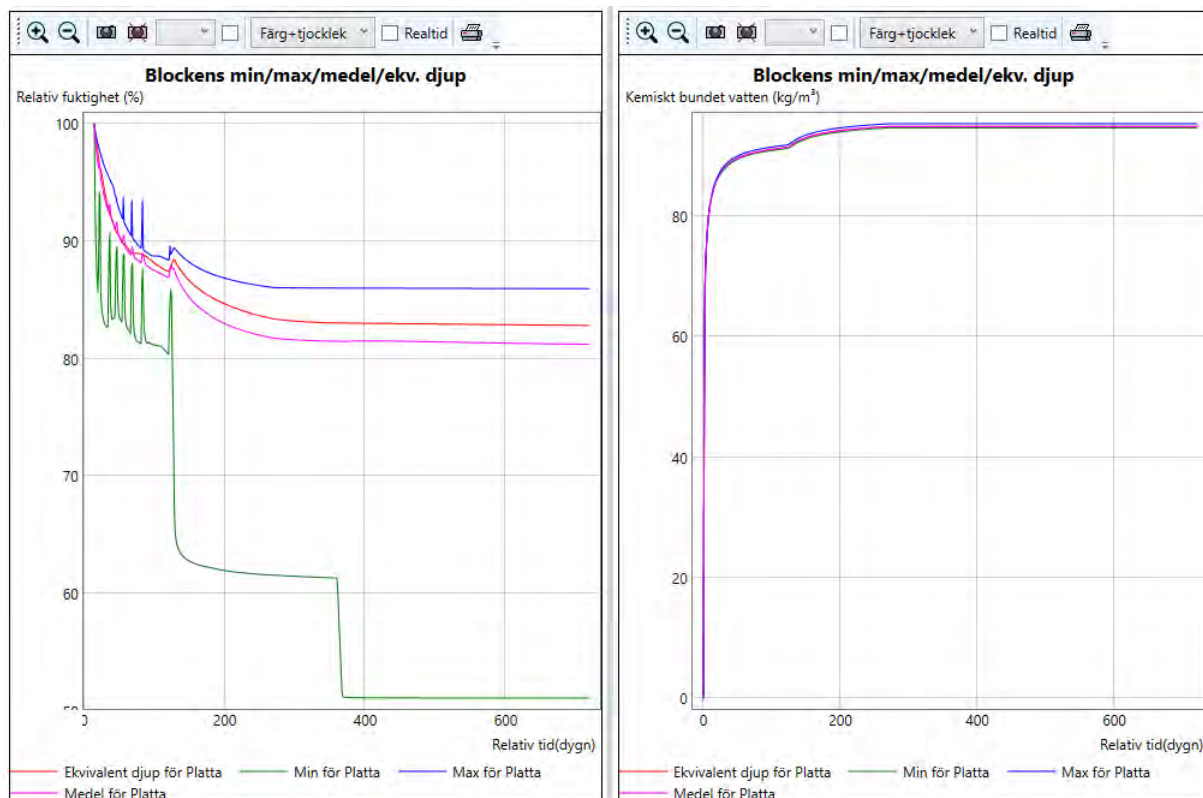
Dessa resultat kan presenteras i form av färgkartor och kurvdiagram. I kurvdiagrammen visas värden för det ekvivalenta djupet samt för min-, max- och medelvärden över konstruktionsblocket i fråga. De tre sistnämnda motsvarar alltså inte något fast djup utan visar verkligen min, max eller medel vid resp. 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

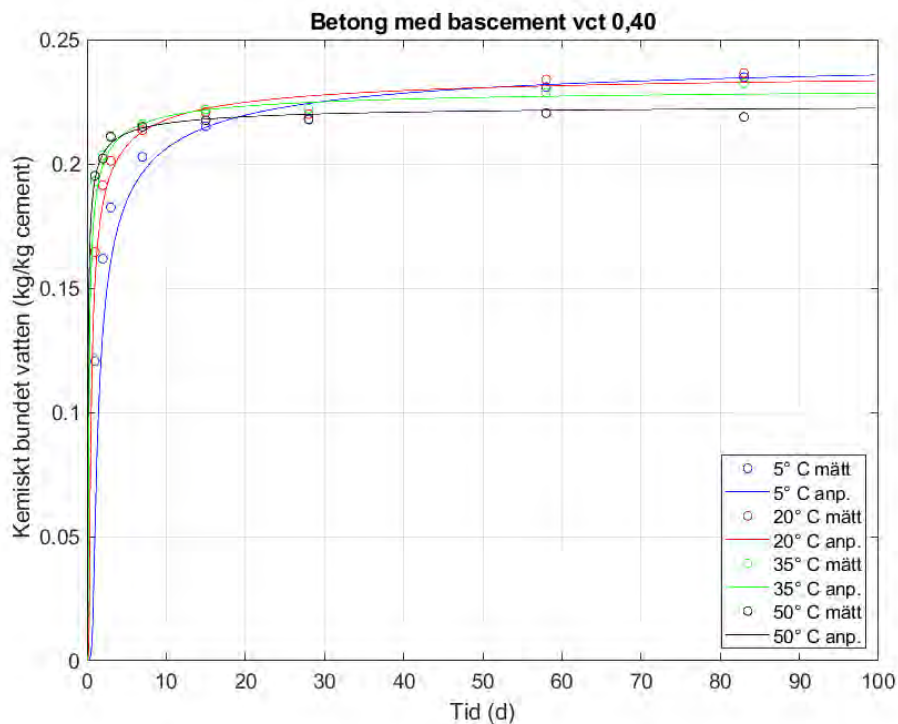
Materialdata för betong med Bascement baserar sig på mätningar, utförda vid avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH under 2016-2018. Först och främst har olika s.k. fundamentalegenskaper mätts in. I dessa mätningar försöker man separera ut en specifik egenskap och mäta upp hur den varierar med olika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

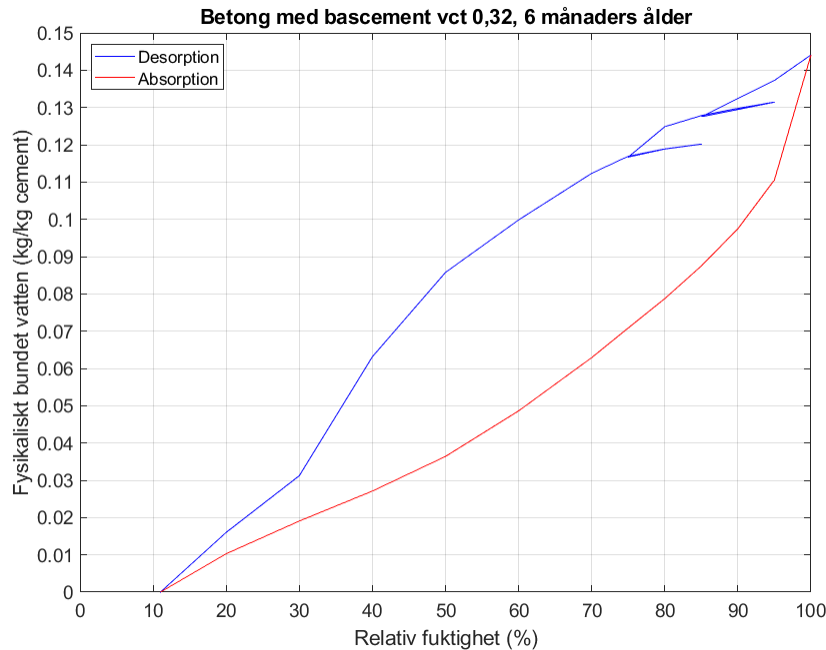
Denna analys har utförts för prover som fått hydratisera i förseglat tillstånd, s.k. membranhärdning, vid olika temperaturer. Ett exempel på erhållna resultat ges av Figur 1 där både uppmätta värden samt anpassade kurvor visas för vct 0.40.



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.



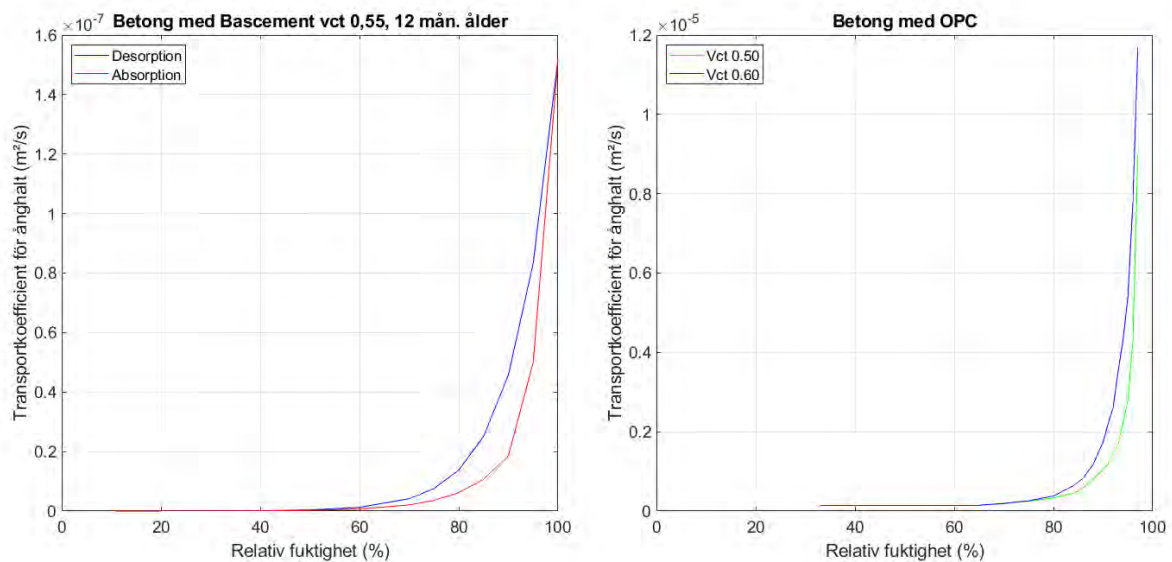
Figur 8 Fysikaliskt bundet vatten, vikt per vikt cement, vid 20 °C som funktion av relativ fuktighet för betong med Bascement vct 0.32 och 6 månaders ålder, vid desorption inkl. två skanningloopar och absorption.

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.

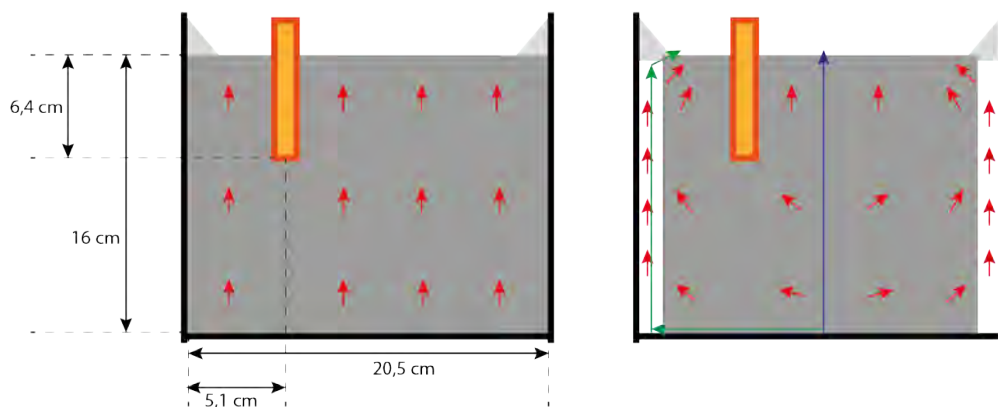
Detta är en direkt bekräftelse på vad vi tidigare skrivit om den ökade tätheten i betong med mineraliska tillsatser där puzzolan reaktion äger rum, Stelmarczyk m.fl. 2017a, b, c samt 2018. Eftersom flygaskan reagerar efter att merparten av klinkern hydratiserat, är det med hög sannolikhet just den som 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 mätåål som borrats 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.

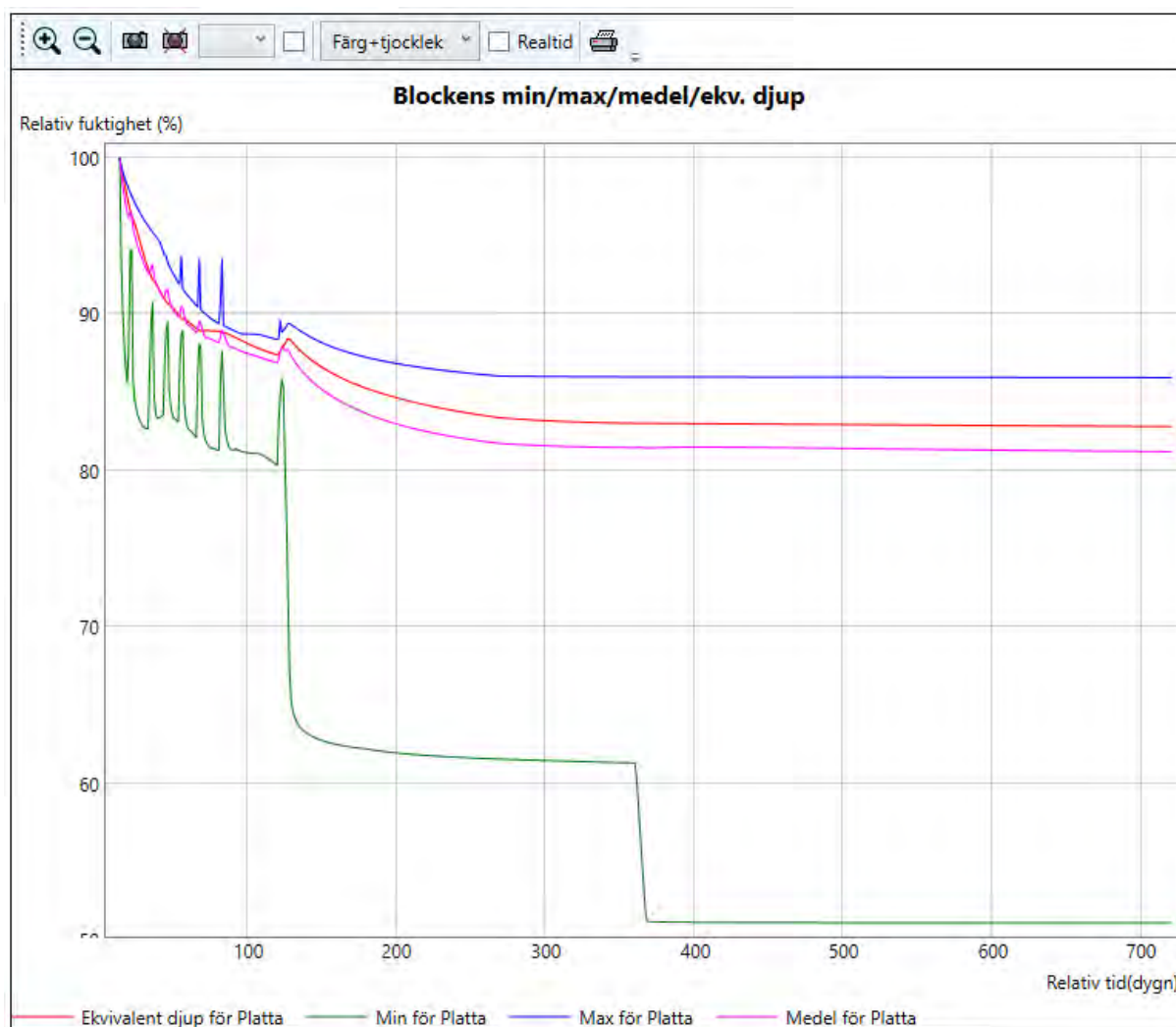
Förklaringen ligger i betongens krympning, som gör att betongen minskar något i diametern efter gjutning så att det uppstår en luftspalt mellan den och hinkens vägg. Denna luftspalt kommer att fungera som en jättelång por och störa fukttransporten i betongen så att den inte motsvarar enkelsidig uttorkning, 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.

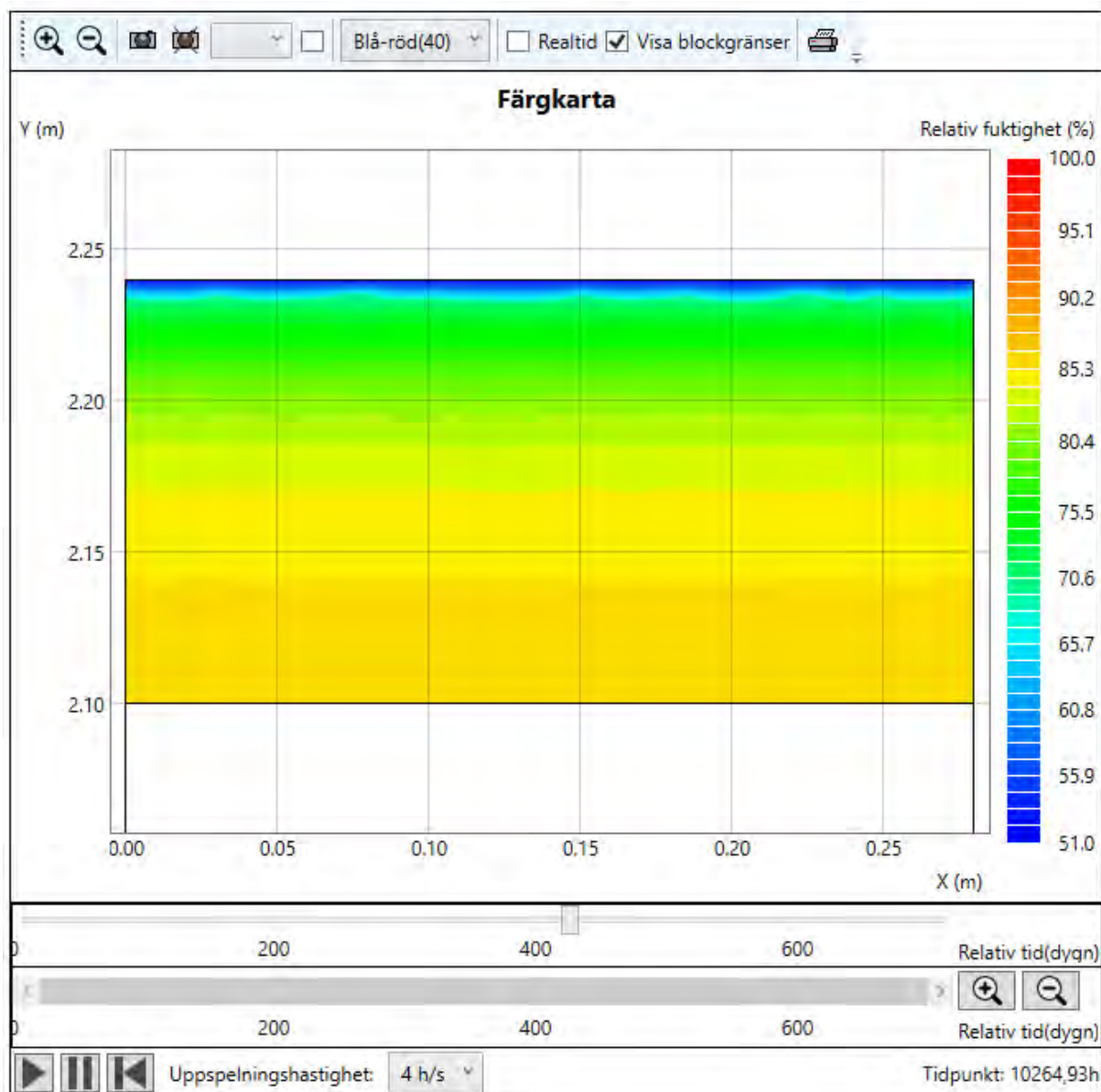


Figur 11 Relativ fuktighet för 0.14m tjock platta på 0.1m cellplast på mark, vct 0.55.

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.

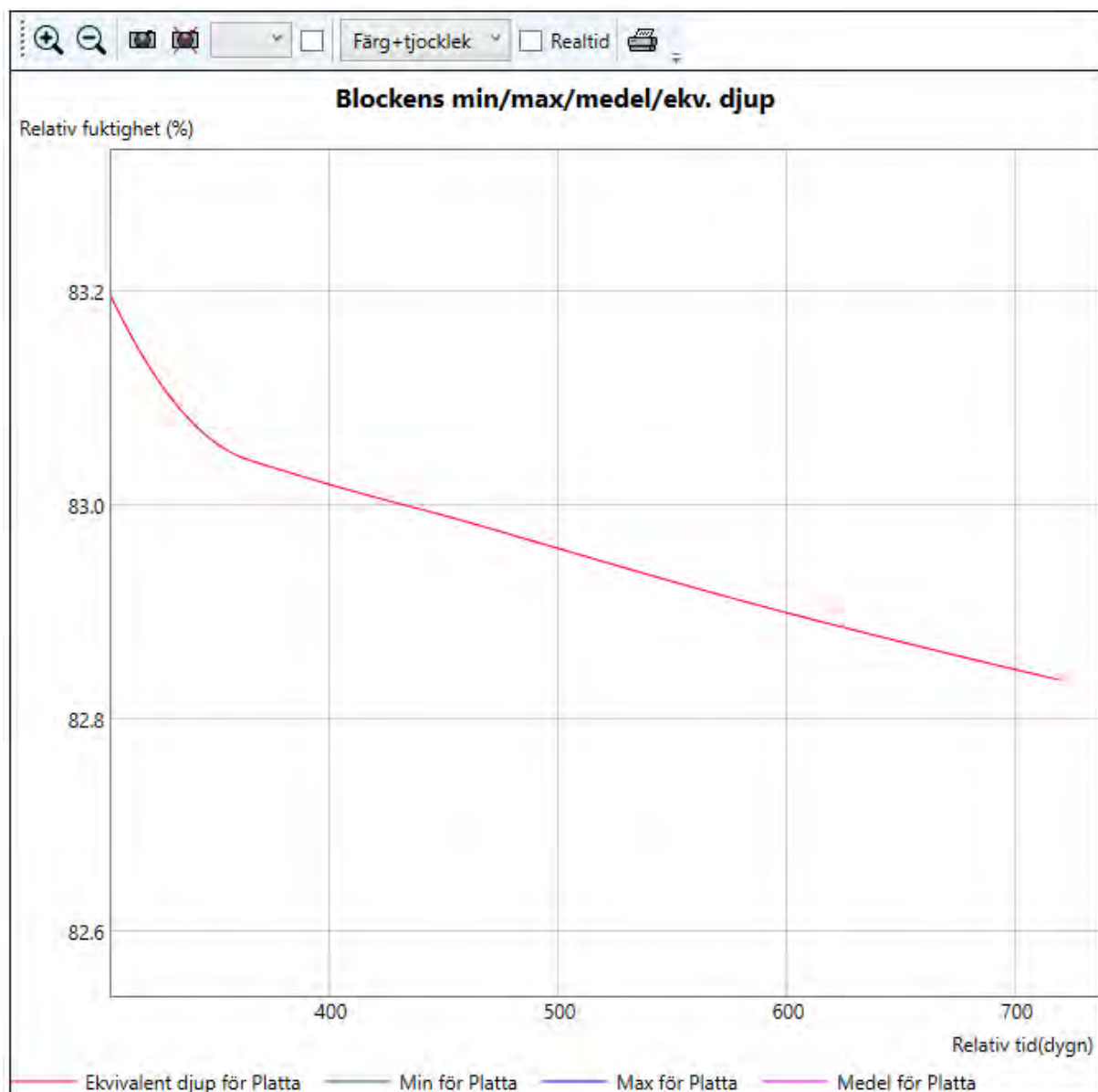
Analyserar man vidare resultaten, förstår man vad som händer i konstruktionen:

- 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 flygaskehalten 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

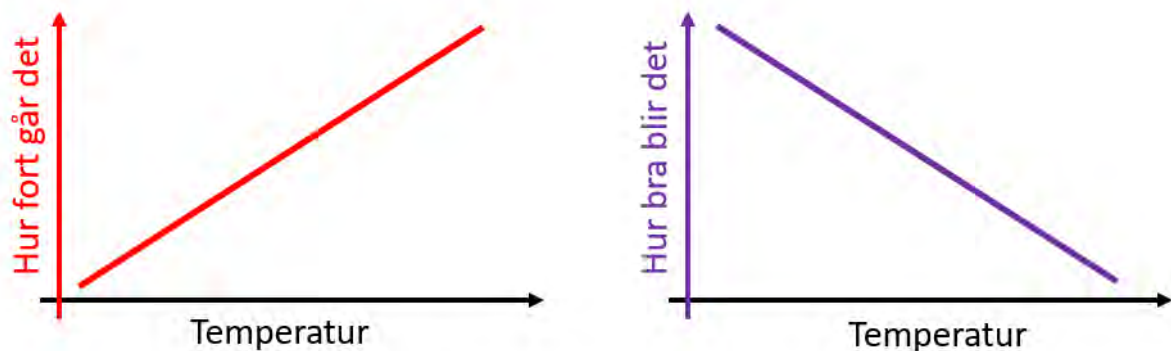
Självuttorkning och temperatur, dvs. hur man får uttorkning att fungera

Självuttorkning 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 självuttorkningen för betong med samma vct. Denna artikel går systematiskt igenom vilka materialtekniska fenomen som ligger bakom temperaturens effekt på självuttorkningen. 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 självuttorkning och diffusionsuttorkning.

Hydratation, temperatur och kemisk bindning av vatten

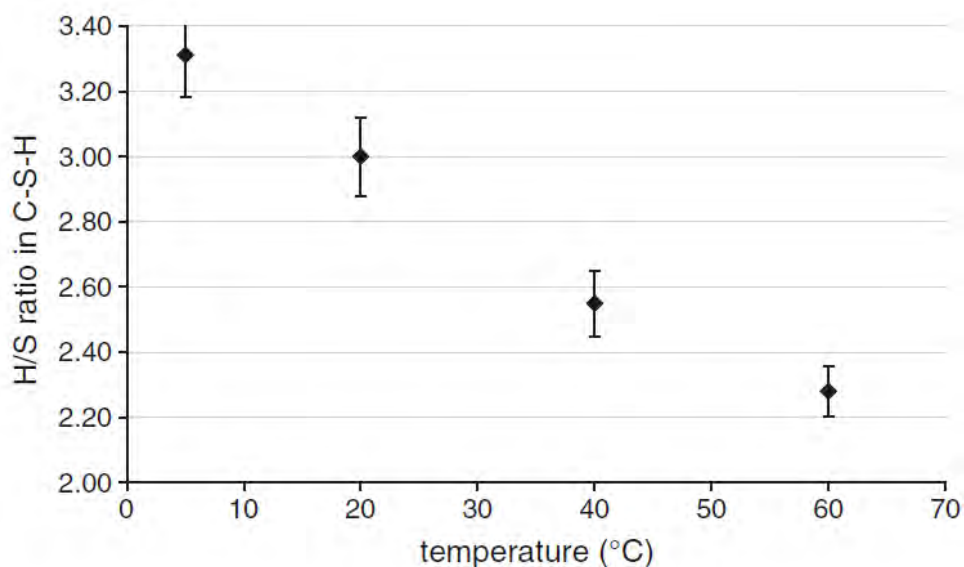
Under många år har den allmänna uppfattningen varit att hydratationens beroende av temperaturen endast har att göra med hastigheten. Resultatet, avseende hållfasthet eller grad av självuttorkning, skulle alltså bli detsamma oberoende av temperaturförloppet. Det enda som skulle skilja var hur fort man kom till en viss hållfasthet eller grad av självuttorkning. 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.



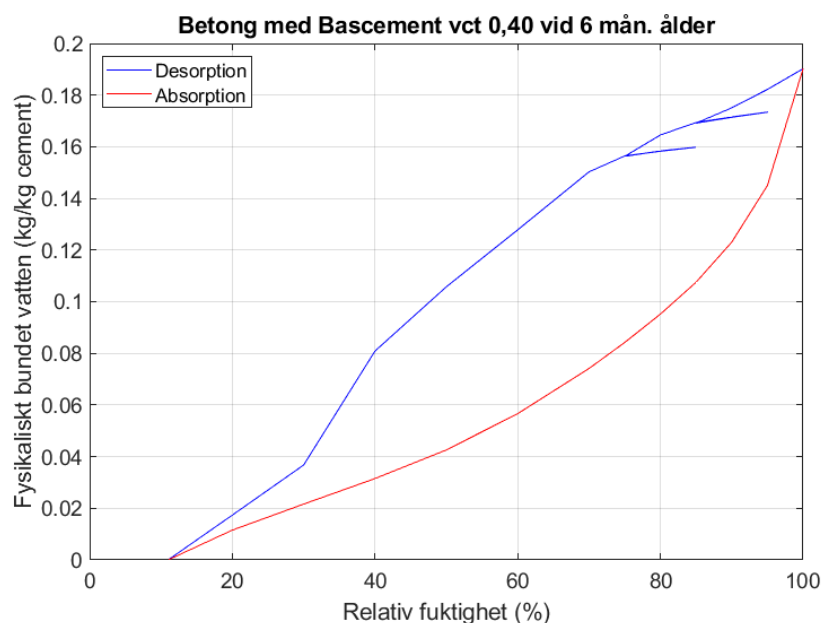
Figur 1 Två principer för temperaturens inverkan på hydratation

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%

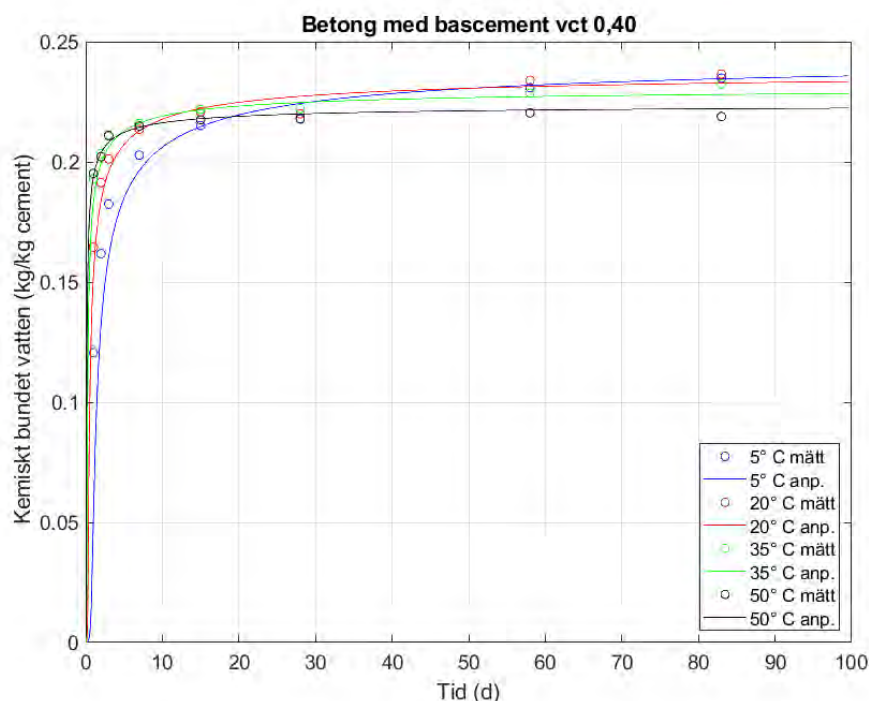
Tabell 1 Jämförelse mellan mängd kemiskt bundet vatten vid självuttorkning till olika relativa fuktigheter med kemiskt bundet vatten vid självuttorkning till 95% RF som referens, för betong med Bascement, vct 0,40 vid 6 månaders ålder.

Skillnaden för självuttorkning 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 uttorkningspotential 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 temperaturtoppen blir under hydratationsförloppet desto sämre utnyttjas cementets förmåga att binda vatten kemiskt
- Snabb hydratation ger sämre självuttorkning – långsam hydratation ger bättre självuttorkning
- Hydratationsförloppet under de första dagarna efter gjutning är av högsta betydelse för hur bra självuttorkning man får
- Det finns inget standardmässigt hydratationsförfarande ur fuktsynvinkel
- Vct är inte allena rådande och bestämmer inte självt graden av slutlig självuttorkning

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.

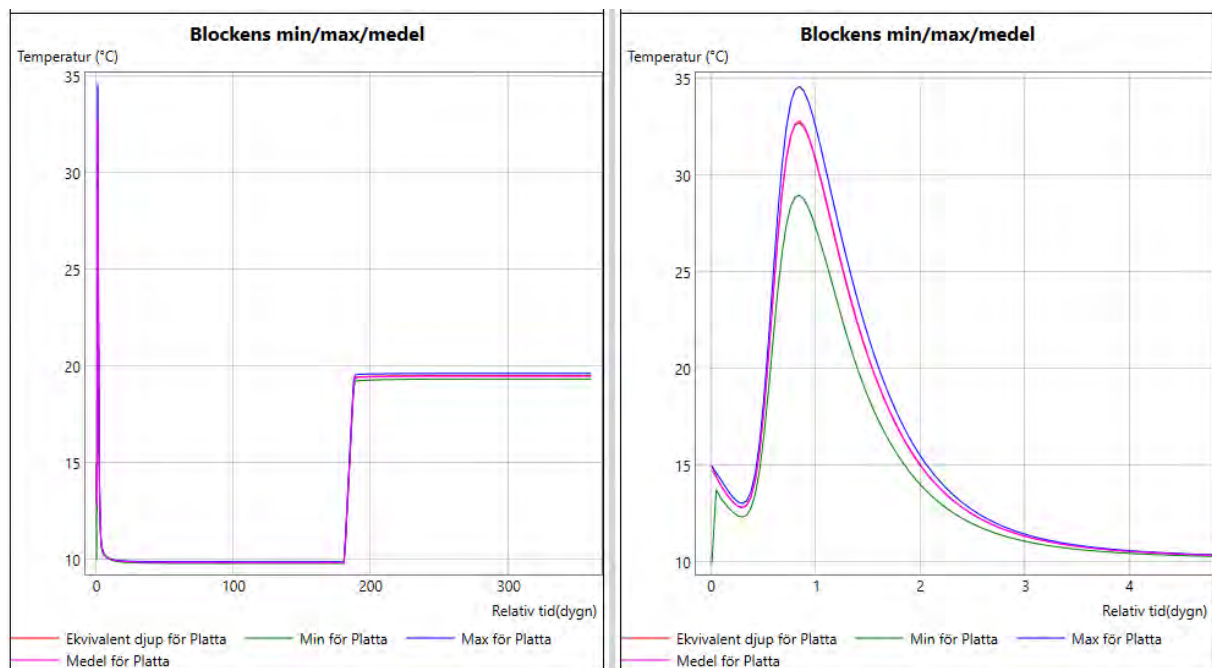
Då Produktionsplanering Betong (PPB) utför en icke isothermisk simulering av fukttillstånd kombinerad med en temperatursimulering, får man bägge temperaturberoendena automatiskt in i uttorkningsberäkningen. Det enda som användaren behöver göra är att noggrant specificera samtliga förutsättningar för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

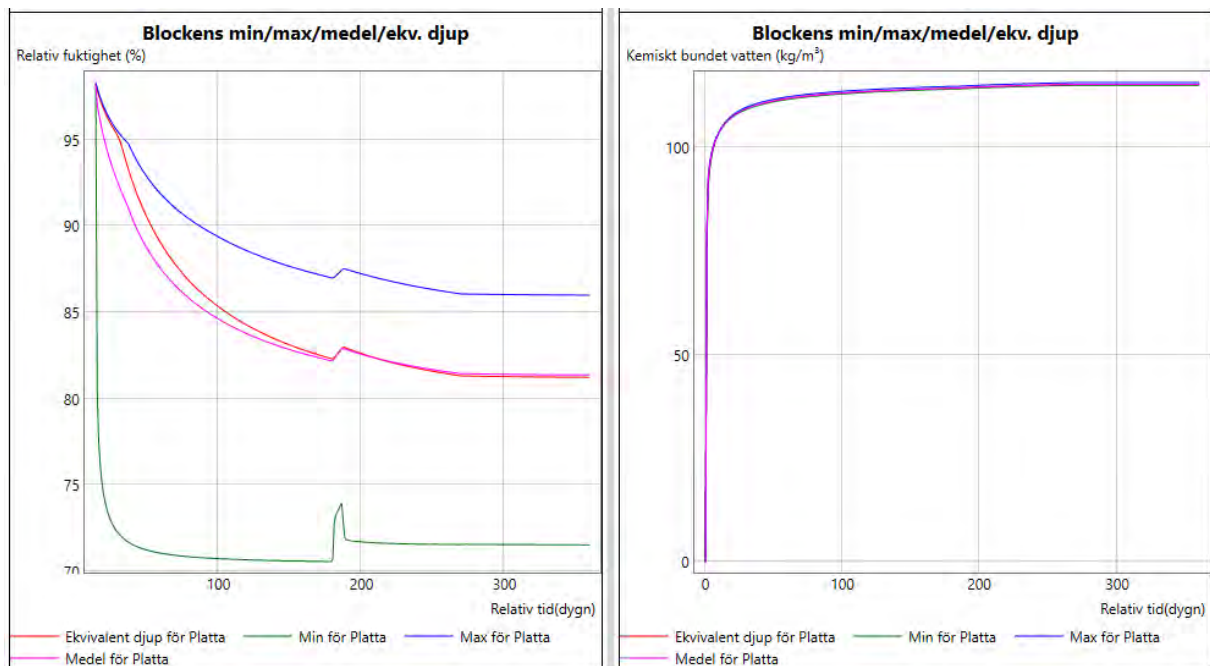
Självuttorkningen är beroende av hydratationstemperaturen

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 lämplig 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.



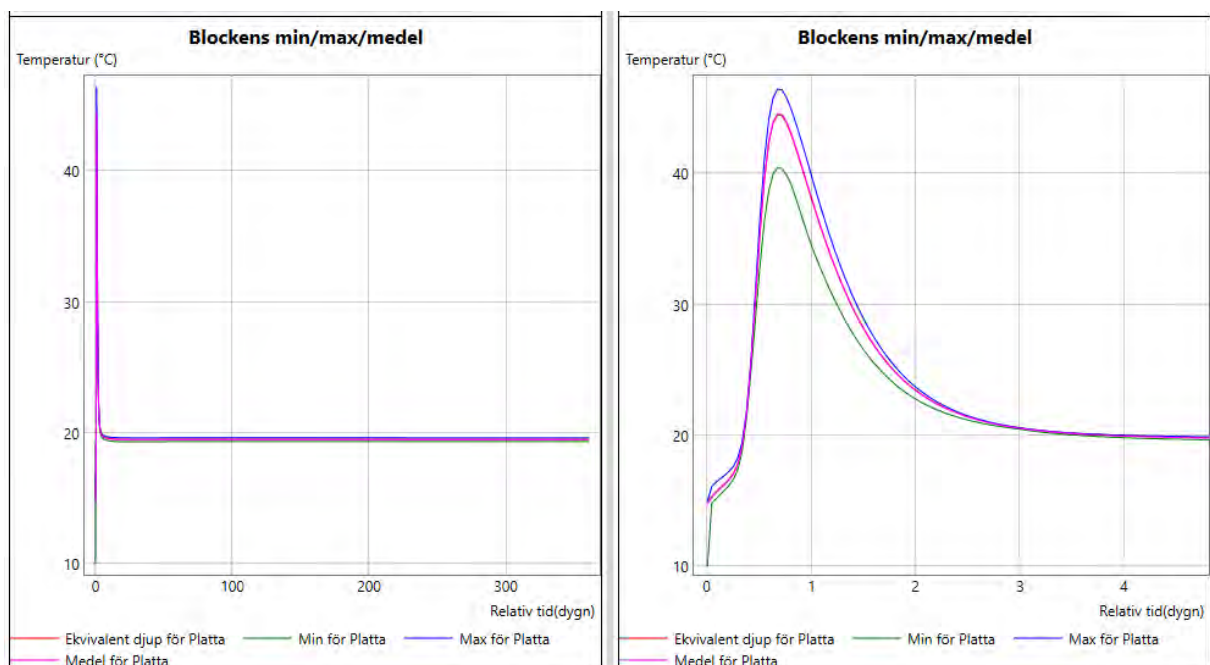
Figur 5 Temperaturutveckling för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 10 °C initialt och 20 °C efter ett halvår, vänster - hela förloppet, höger – de första dygnet.

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.



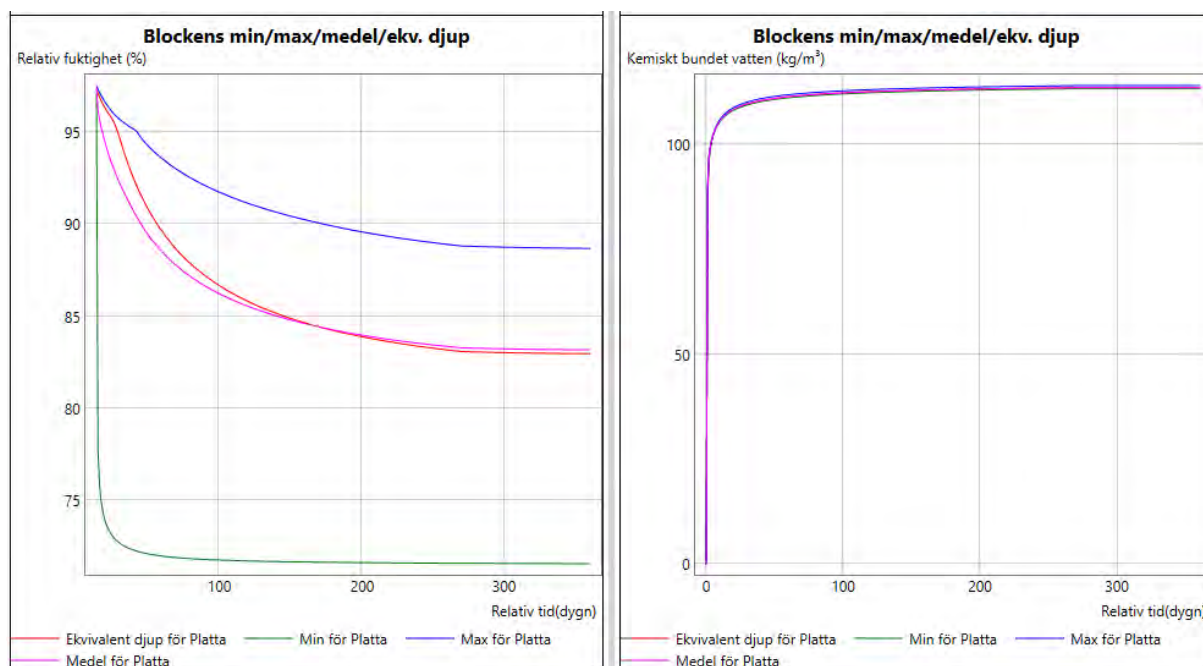
Figur 6 Relativ fuktighet (vänster) och kemiskt bundet vatten (höger) för 140 mm platta på 100 mm isolering på mark, vct 0,40, lufttemperatur 10 °C initialt och 20 °C efter ett halvår.

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 uttorkningen 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 självuttorkning.

Årstidsvariationer

Nu kan det vara läge att knyta ihop den nyvunna kunskapen om temperaturens inverkan på självuttorkning med ytterligare ett par realistiska situationer. Låt oss för detta ändamål återigen titta, fast nu något noggrannare, på sammanställningen av uttorkningsresultat 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 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 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 självuttorkning 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 självuttorkning 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 självuttorkningen inte lika effektiv för samma betong och resp. vct.

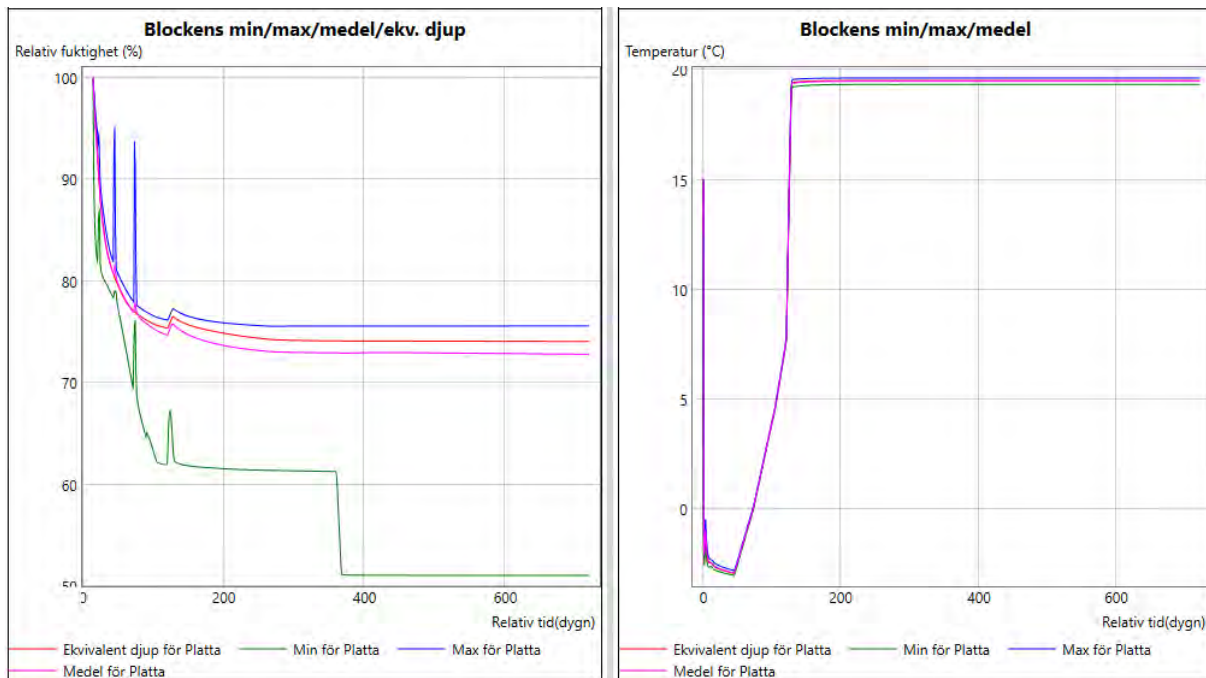
Här är värt att notera att:

- även ett mycket lågt vct (0,32) inte medför en självuttorkning 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

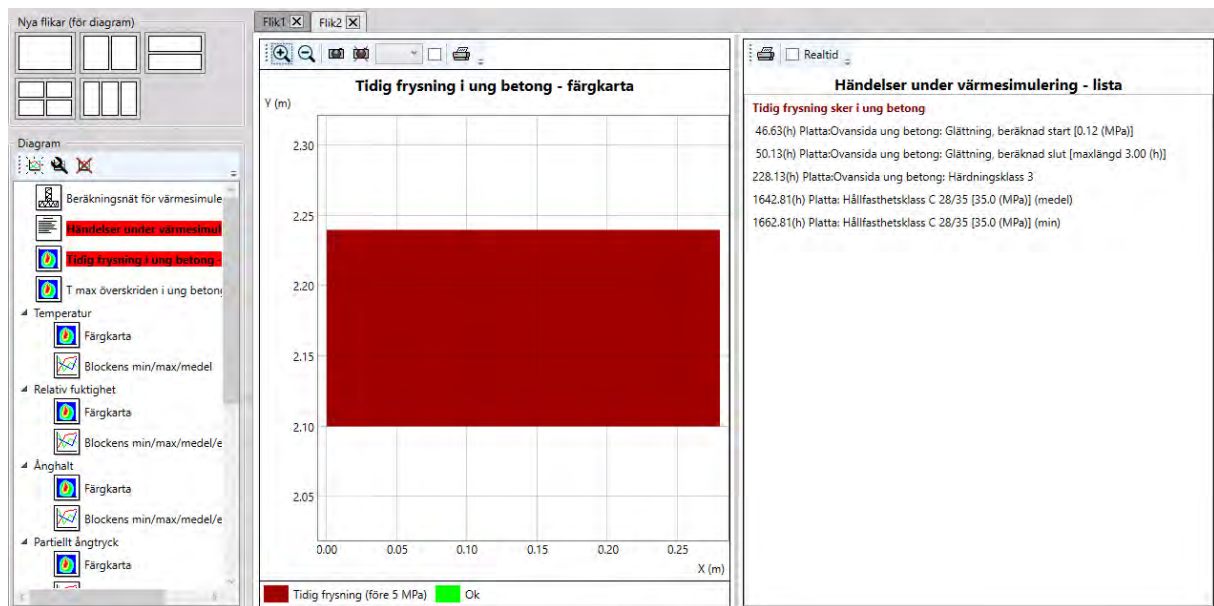
Kylan inte endast av godo

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.



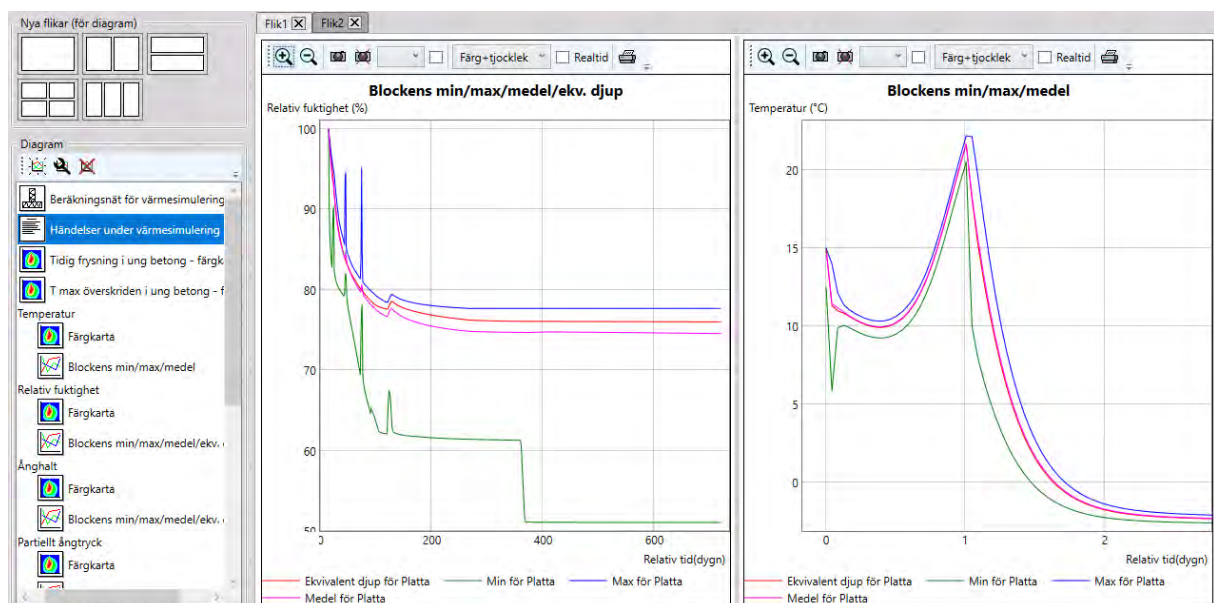
Figur 9 Relativ fuktighet och temperatur för en 140 mm platta på 100 mm isolering på mark i Stockholm i början av januari med -3 °C och blåst första veckan, vct 0,55.

Figur 9 visar ett drömscenario för självtorkningen då en betong med vct 0,55 nästan dyker ner under 80% RF. Mycket riktigt kan man förvänta sig en effektiv självtorkning. Ett så högt vct vid högre temperaturer är inte i närheten av den kemiska bindning av vatten som skulle krävas för att uppfylla uttorkningskravet. Vid så låg temperatur bildas dock en C-S-H-gel som innehåller mycket mer vatten. Cementet används mycket mer effektivt och uttorkningen 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.



Figur 10 Varningar för och färgkarta med omfattningen av tidig frysnings 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.

Denna gjutning kommer att resultera i s.k. tidig frysnings. 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 frysnings 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. 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 veckan, med 20 mm isolermatta som täckning under första dygnet, vct 0,55.

Sammanfattningsvis kan sägas att låg hydratationstemperatur är bra för självuttorkning och vi rekommenderar att läsaren försöker utnyttja detta faktum som verktyg för planering och styrning av uttorkningsförlopp. Diffusionsuttorkningen är i princip satt ur spel av den låga transportförmågan hos betong med Bascement. Skickligt utnyttjande av temperatureffekten för självuttorkning 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 fryssning 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 självuttorkning.**
- **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 självuttorkning) hinner slå in, vilket medför att detta krav inte heller bör krocka med självuttorkningen.**

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 kontakter 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:

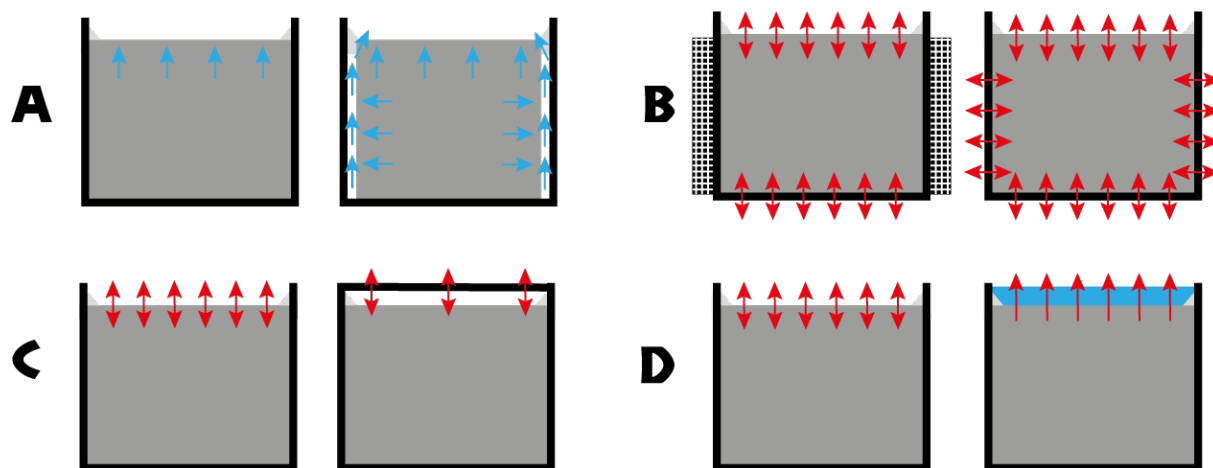
- Back – pall med krage eller motsvarande med en yta på ca 1m
- Hink – som oftast 5 liters målarhink med nästan cylindrisk form, andra volymer kan förekomma

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 predikerade 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 predikerade värden.



Figur 12 Störningar av fukt- och/eller värmetillstånd 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 självuttorkning, 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 självuttorkningen. 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 självuttorkning 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 självuttorkning. 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 självuttorkning 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 självuttorkningen – 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 hydratationsförhållanden.
- 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 självuttorkningen 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 självuttorkning. Skillnader i omgivande väder och grad av isolering och täckning kan inverka högst kännbart på självuttorkningen. 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 självuttorkning och hållfasthetstillväxt. Programvaran kan användas för effektiv planering av självuttorkning 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 självuttorkning 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 – Laboratoriestudien 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

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

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

Från: rbk.nu <info@rbk.nu>
Skickat: den 5 mars 2019 12:47
Till: Info (RBK)
Ämne: E-post från RBK



Meddelande från Rådet för ByggKompetens

Hej!

Här kommer ett klagörande vad gäller hjälpmedel för prognostisering av uttorkningstid avseende betong.

BETONG MED BASCEMENT

Använd PPB för fuktprognostisering. Beräkningsverktyget baseras på inmätta fuktegenskaper avseende betong med Bascement. Till resultatet som erhålls vid beräkning i PPB ska mätosäkerheten som gäller för den mätmetod som ska användas för verifiering läggas till, innan beräknat värde jämförs med uppmätt RF-värde.

BETONG MED BYGGCEMENT (utan mineraliska tillsatser av flygaska eller slagg)

TorkaS 3.2 baseras på RF-mätningar i betong med Byggcement. Det måste dock påpekas att:

- Mätningarna som ligger till grund för version 3.2 av TorkaS är utförda med mätmetoden "Uttaget prov". Metoden är numera ej godkänd enligt RBK. Anledningen är att för låg RF erhålls med metoden, på grund av fuktavgång vid provtagningen.
- Ovanstående är anledningen till att en korrektionsfaktor ska adderas till resultatet som beräknats med TorkaS när vct understiger 0,55. Beakta att denna korrektionsfaktor är baserad på en begränsad mängd RF-mätningar.
- TorkaS 3.2, inklusive korrektionsfaktorn, tar i mycket begränsad omfattning hänsyn till självuttorkningens beroende av hydratationsförloppets hastighet och temperatur. Sammantaget innebär detta att en stor skillnad kan erhållas mellan teoretisk beräkning i TorkaS 3.2 och uppmätt RF-värde.

BETONG MED RENT PORTLANDCEMENT, OPC, MED TILLSATS AV SLAGG

Det finns för närvarande inget beräkningsverktyg för tillförlitlig prediktering avseende uttorkning av betong med rent Portlandcement med inblandning av slagg. Det finns däremot belägg för att:

- Betong med slagginblandning kan ha en transportförmåga, som är nästan lika låg som den för betong med Bascement
- Betong med slagginblandning självuttorkar bättre än betong med Bascement beroende på att slagg binder vatten bättre än flygaska

Mot bakgrund av ovanstående skulle PPB kunna användas för prediktering av uttorkning för betong innehållandes OPC med slagg, men med beaktande av en obekant säkerhetsmarginal. Eftersom dessa effekter kan variera beroende av kemisk sammansättning för både cementets klinker och för slagg, samt med graden av inblandning, kan man inte lita blint på att PPB i dagsläget alltid kommer att ge ett resultat på den säkra sidan. Innan PPB används vid sådana fall rekommenderas att man begär ett utlåtande av betongleverantören där denne redovisar någon form av dokumenterad jämförelse mellan uppmätt uttorkning hos betongen i fråga och en betong med Bascement.

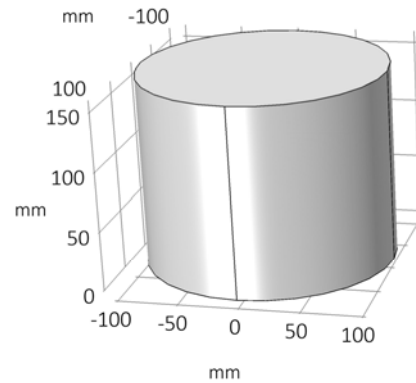
Hälsningar
Ted

Rådet för ByggKompetens, Box 34027, 100 26 Stockholm, [mail till RBK](#)

Simulering av uttorkning i betong med COMSOL Multiphysics

Förutsättningar

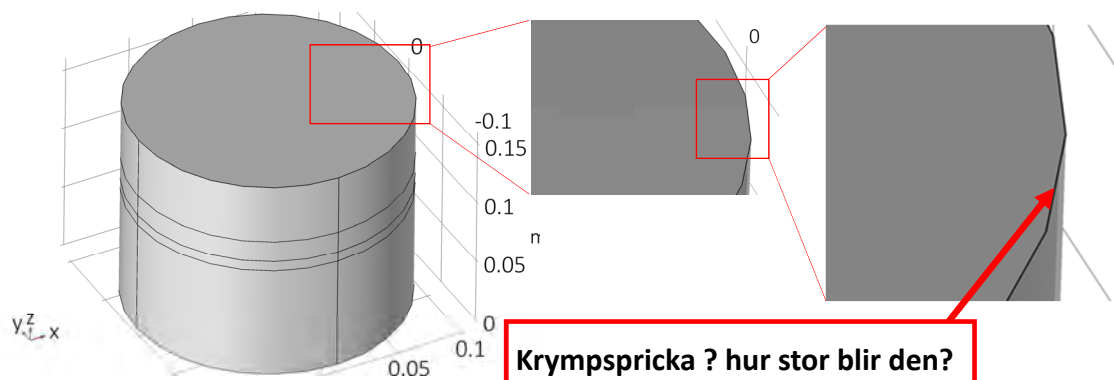
- Vct 0.36
- Recept enligt Peter Johansson
- Modell K. Mjörnell samt J.-E. Jonasson
 - Partiellt ångtryck som drivande potential
 - Tidsberoende egenskaper
 - Sorptionsisoterm, enligt K. Mjörnell
 - Transportkoefficient, enligt Betonghandbok högpressterande betong (RF beroende och Temperaturberoende)
- Krympspricka mellan plåtburk och betong på grund av uttorkning
- Uttorkning i plåtburk



2019-05-14

Magnus Åhs

3D Geometri (inkl krympspricka)



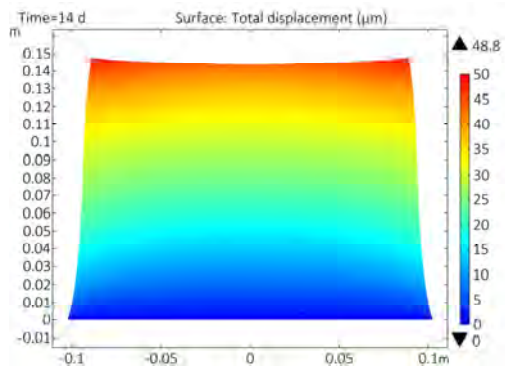
H=160 mm, D=205 mm

2019-05-14

Magnus Åhs

Hur mycket krymper betongcylindern?

- Beräkning bygger på Betonghandbokens framställning.
 - Förändring av fukthalt leder till krympning.
 - Temperaturförändringar leder till kontraktion respektive expansion.
- Krympningen är **50 μm**
- **Handberäkning ger** .045% från vattenmättnad till 50%
 $RF = >.2m * 0.045 / 100 = 90 \mu m$
 på $20 \text{ cm} / 2 = \mathbf{45 \mu m}$.

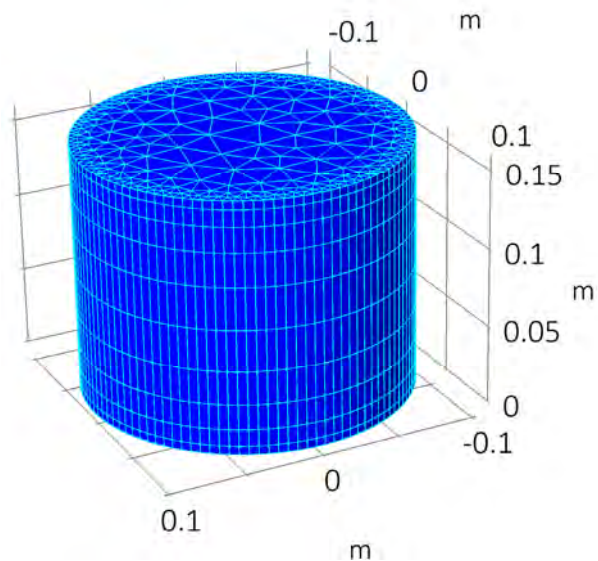


2019-05-14

Magnus Åhs

Elementnät

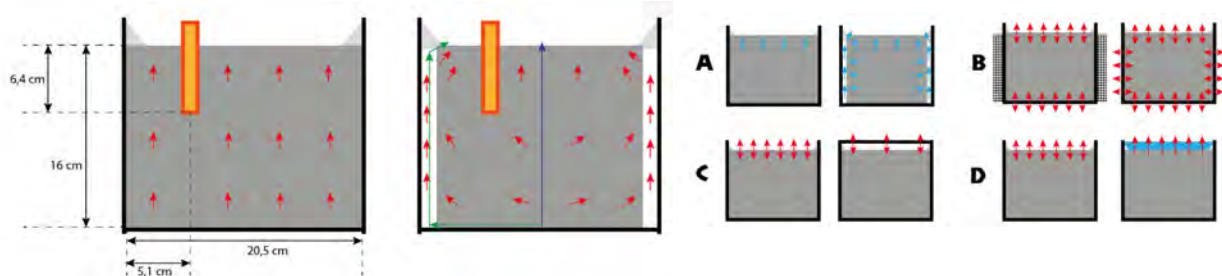
- Elementnät tätare vid krympspricka
- 150 k frihetsgrader
- Beräkningstid 7 minuter



2019-05-14

Magnus Åhs

Kritik av försök – inte enkelsidig uttorkning



Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning
18 JANUARI 2019 (industriell artikel SBUFs hemsida)

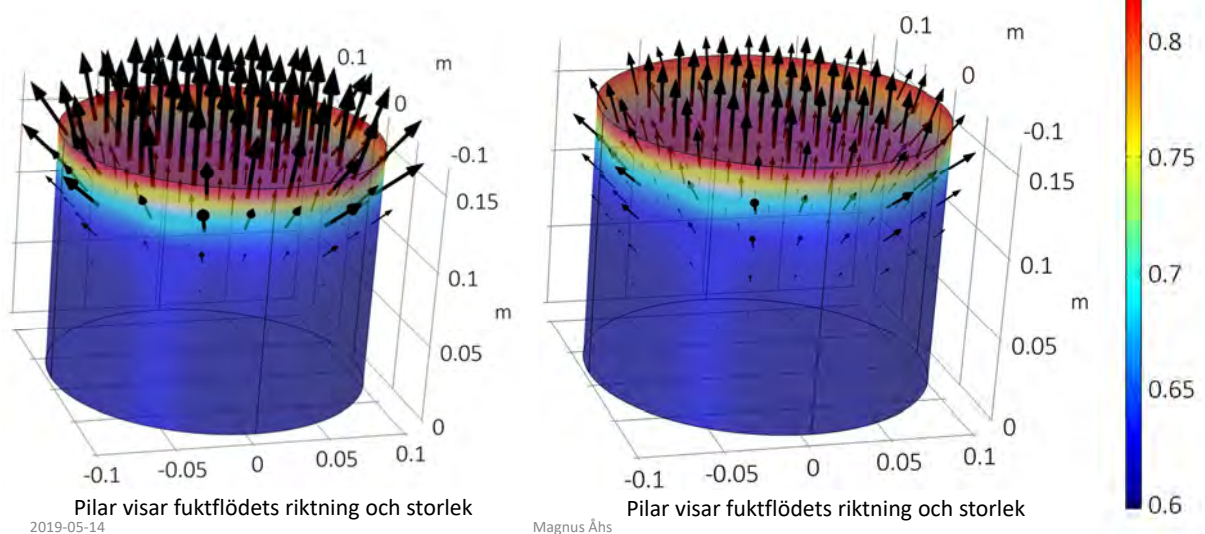
Självtuttorkning och temperatur
15 MARS 2019 (industriell artikel SBUFs hemsida)

Pilar visar fuktflödets riktning och storlek
2019-05-14

Magnus Åhs

Pilar visar fuktflödets riktning och storlek

Kritik av försök – inte enkelsidig uttorkning

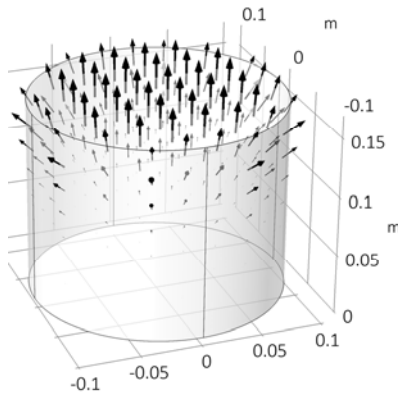


Pilar visar fuktflödets riktning och storlek
2019-05-14

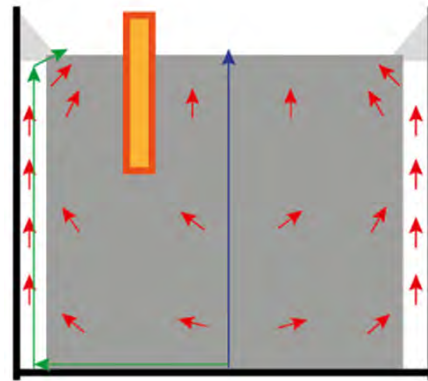
Magnus Åhs

Pilar visar fuktflödets riktning och storlek

Kritik av försök – inte enkelsidig uttorkning



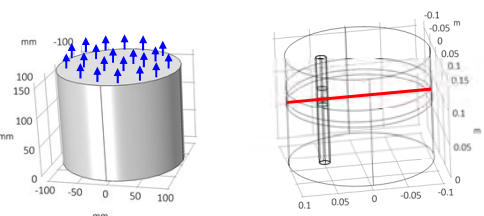
Tätning i form av fogmassa är inte med i 3D beräkningen



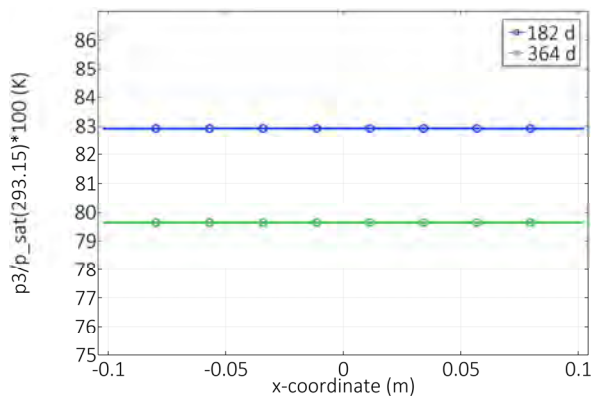
2019-05-14

Magnus Åhs

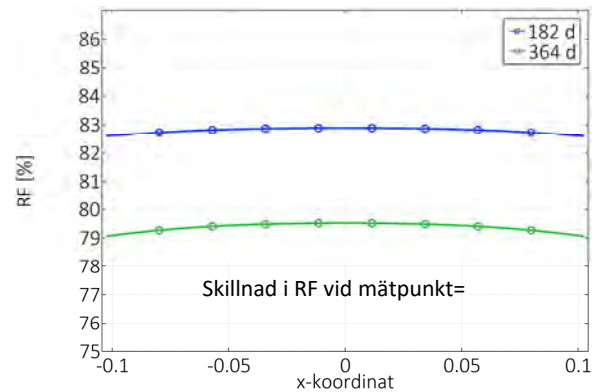
Oisolerat prov i plåtburk (utan och med krympspricka)



Uttorkning (utan krympspricka)



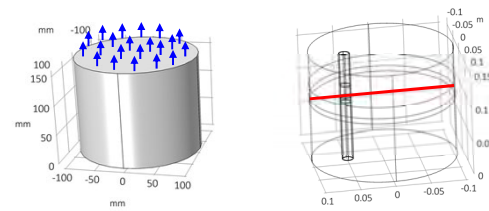
Uttorkning (med krympspricka)



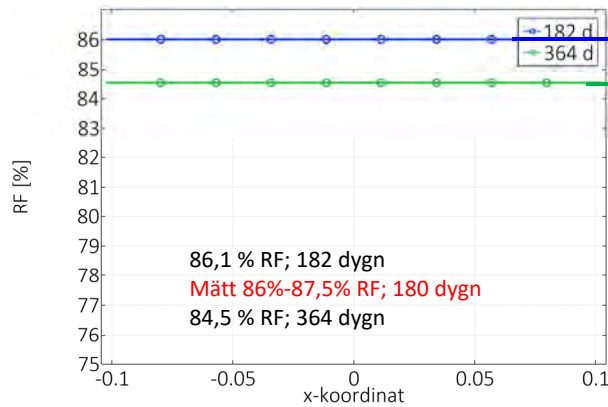
2019-05-14

Magnus Åhs

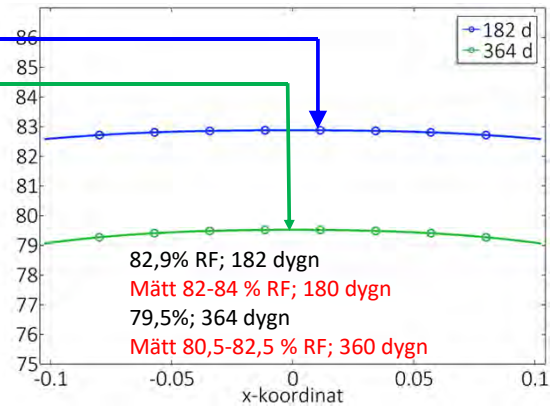
Oisolerat prov i plåtburk
Jämförelse mellan beräknade och
mätta RF-nivåer



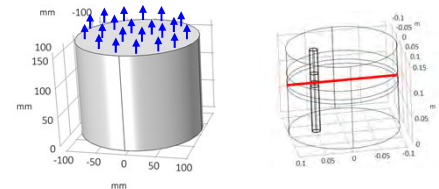
Självuttorkning (förseglat prov)



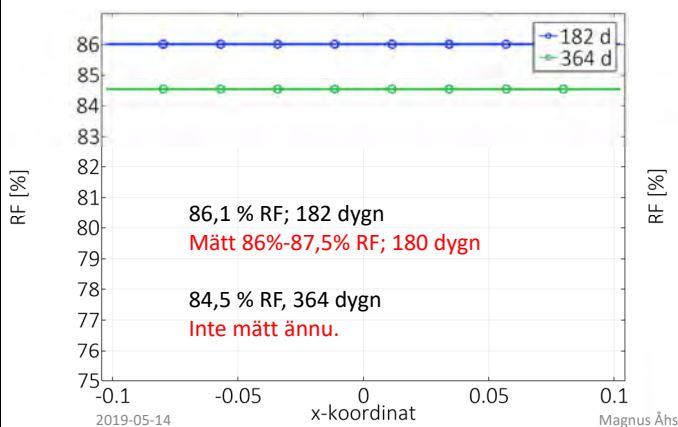
Uttorkning



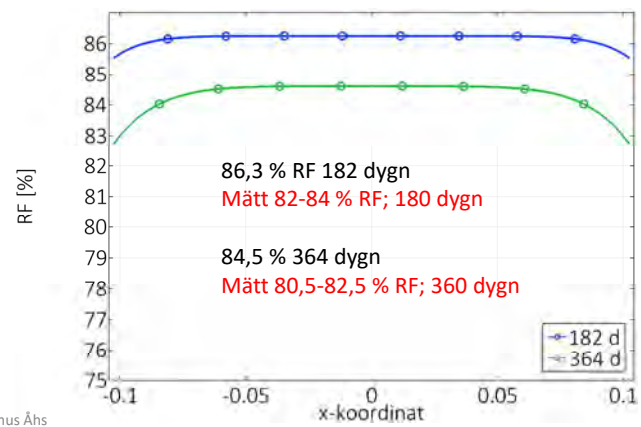
Oisolerat prov i plåtburk
Fukttransportkoefficient 1/10



Självuttorkning



Uttorkning

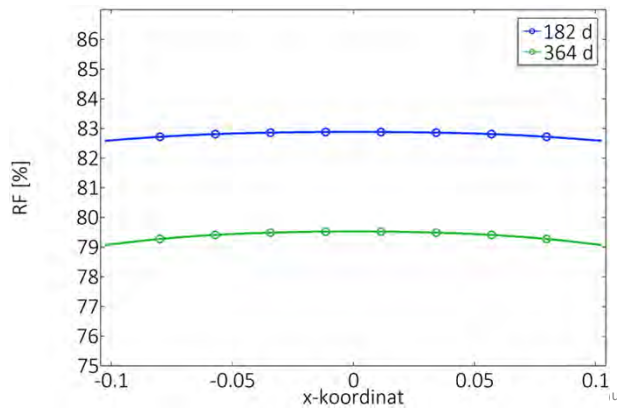


Oisolerad plåtburk vs 50 mm cellplast

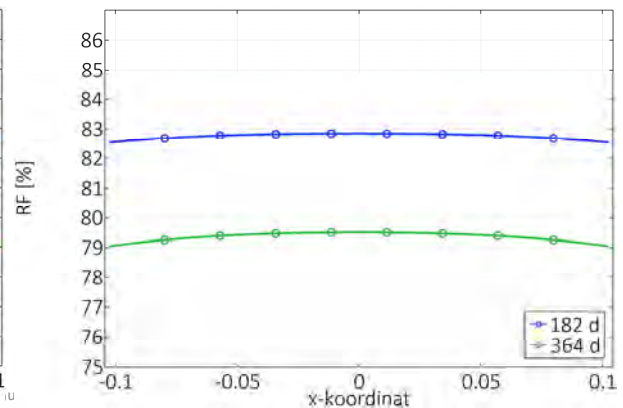
20 °C, 50% (0-30 dygn) -> 60% RF

Ingen fukt/värmetransport på kanter 50 mm cellplast

Uttorkning, plåtburk

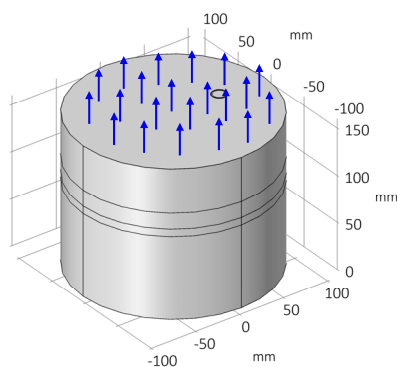


Uttorkning, plåtburk + 50 mm cellplast

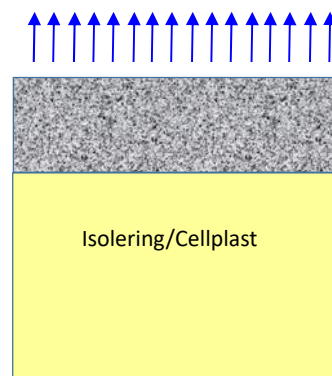


Två fall (vct 0.36) 20 °C, 50% RF (0-30 dygn) -> 60% RF

1. Oisolerad prov (krympspricka)



2. 160 mm platta på mark + 300 mm cellplast



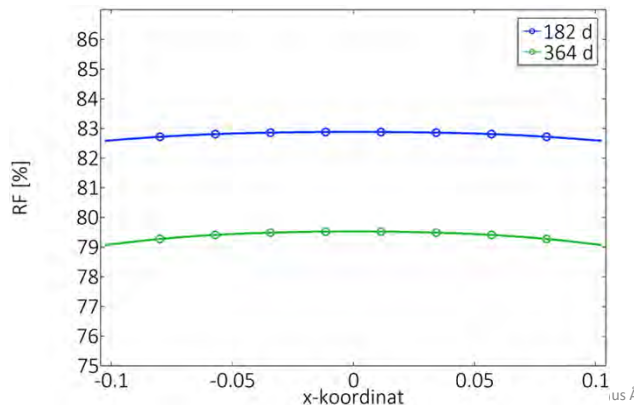
Platta på mark i 20 °C, 50% (0-30 dygn) -> 60% RF

Ingen fukt/värmetransport på kanter

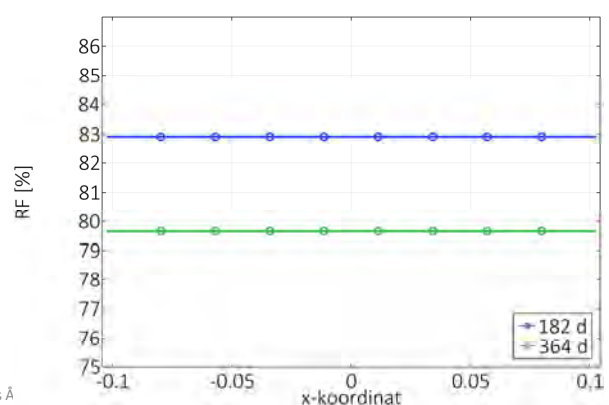
300 mm cellplast, 8 grader i marken



Uttorkning, plåtburk



Uttorkning, platta på mark



Slutsatser

- Simuleringarna visar att krympsprickan har en obetydlig inverkan på uttorkningen.
- Detta gäller även om vi antar att betongen krympsprickan uppstår vid tidpunkt=0 och samtidigt att den inte tätas med fogmassa.
- Vid reducering av transportkoefficienten till 1/10 av den för betong med Portlandcement (hämtad från Betonghandbok Högpresterande betong) underskattas uttorkningen i simuleringen markant jämfört med mätresultaten.
- Simuleringarna tillsammans med mätresultaten antyder att transportkoefficienten i de tre provade betongsammansättningar är av samma storleksordning.
- Simuleringarna visar att värmeisoleringen runt proven har en obetydlig inverkan på uttorkningen.
- Simuleringarna överensstämmer väl med mätresultaten från både förseglade och uttorkande prov av alla tre betongsammansättningar.

BURKMETODEN – för bestämning av fukttransportegenskaper hos betong

Uppdragsgivare: Polygon AK

2019-10-03

Lars-Olof Nilsson

Förord

I byggbranschen görs idag sofistikerade fuktberäkningar av hur byggfukt i betong omfördelas efter applicering av avjämning och olika typer av golvmaterial. För detta krävs tillgång till detaljerade fuktegenskaper hos ingående material. För särskilt betong med nya bindemedel saknas i stort sett data för fukttransportegenskaper helt.

På uppdrag av Polygon AK, genom Kent Bergström, har undertecknad undersökt om "burkmetoden" kan användas för att kvantifiera fukttransportegenskaper hos betong och vilka begränsningar metoden har. Metoden har också verifierats genom att göra jämförande mätningar på samma betonger med den klassiska koppmetoden.

Ett Excel-verktyg för utvärderingen har skapats. Detta finns tillgängligt hos Polygon AK.

Lars-Olof Nilsson

Innehållsförteckning

Förord	1
Bakgrund	3
Teori	4
Utvärdering.....	6
Användning.....	7
Utvärderingsexempel	7
Kontrollberäkning	8
Utvärderingsverktyg	9
Karbonatisering	10
Verifiering	11
Provkroppar	11
Viktändringar	11
Utvärdering.....	13
Kommentar.....	14
Slutsatser	16
Referenser	17
Bilaga 1 Betongskivor	18

Bakgrund

Att bestämma fukttransportegenskaper för betong är tidsödande. Traditionella metoder baseras på att man når stationärt fuktflöde genom provkroppar. För betong måste provkropparna vara relativt tjocka eftersom betong innehåller grov ballast. Hedenblad (1993) ansågs sig behöva tre till fem år för att säkert uppnå stationärt flöde genom sina 6-15 cm tjocka provkroppar. De flesta mätningar av fukttransportegenskaper är därför gjorda på cementpasta eller bruk, för att korta mättiden. De få data vi har för betong tyder på att skillnaden inte är så stor mellan bruk och betong men för säkrare kvantifiering borde vi mäta på betong.

Ett enkelt sätt att kvantifiera fukttransportegenskaper hos material är att använda en icke-stationär metod, dvs att göra mätningar på provkroppar som torkar eller uppfuktas, antingen genom att följa genomsnittliga fukthaltsändringar genom vägningar eller genom att bestämma fuktprofiler vid olika tidpunkter. Sådana metoder är svåra att få tillförlitliga för material som har fuktberoende fukttransportegenskaper. De är också problematiska att använda för ett material som härdande betong som ändras med tiden. Under vissa förutsättningar borde det ändå vara möjligt att använda en icke-stationär metod för betong. Sådana förutsättningar är bl a att mätningar inte görs på alltför ung betong och inte på betong som har stort fuktberoende hos fukttransportegenskaperna. I praktiken innebär detta att en sådan metod borde kunna användas för betong med lågt vattencementtal, vct < 0.5, som härdats åtminstone några månader.

En enkel metod, "burkmetoden", är att gjuta betong i en stålburk, sätta på locket och härda betongen förseglat under en viss tid för att därefter öppna locket och väga burken då betongen torkar i ett givet klimat. Viktändringen med tiden kan användas för att kvantifiera fukttransportkoefficienten under vissa förutsättningar.

På uppdrag av Polygon AK, genom Kent Bergström, har undertecknad undersökt om en sådan metod kan användas och vilka begränsningarna är. Metoden har också verifierats genom att göra jämförande mätningar på samma betong med en klassisk, stationär metod: koppmetoden.

I rapporten beskrivs först den teoretiska bakgrunden och hur nödvändiga parametrar kan kvantifieras. Några utvärderingsexempel visas och en numerisk verifiering görs med en uttorkningsberäkning. Inverkan av karbonatisering diskuteras. Slutligen genomförs en serie koppförsök under en femmånadersperiod för att verifiera att burkmetoden ger tillförlitliga resultat.

Teori

Utvärderingen av viktändringarna av en burk med betong som torkar baseras på ekvation (3.15) i Crank (1973). För ett halvoändligt fall ges mängden "diffunderande ämne" (dvs fuktavgång) $M(t)$ av

$$M(t) = 2C_0\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (1)$$

där

$M(t)$ är mängden som lämnar materialet, dvs som transporteras ut ur materialytan (kg/m^2),

C_0 är den konstanta initialkoncentrationen (dvs fukthalten) på alla djup (kg/m^3),

D är diffusiviteten (m^2/s),

t är tiden (s).

Förutsättningen för ekvation (1) är att ytkoncentrationen $C(x=0) = 0$. För fallet att ytkoncentrationen är > 0 , t ex $C(x=0, t=0) = C_1$ blir ekvationen

$$M(t) = 2(C_0 - C_1)\sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 2(C_0 - C_1)\sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot \sqrt{t} = k \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Genom att plotta burkens viktändring $M(t)$ som funktion av kvadratroten ur tiden ska en rät linje erhållas om, och så länge, ovanstående förutsättningar är uppfyllda. En av dessa förutsättningar är att fallet är "halvoändligt", dvs att koncentrationen C (fukthalten) inte ändrats på stort djup, dvs i botten av burken. När en sådan ändring börjar ske ändras tidsförloppet så att plottningen inte längre ger en rät linje.

En annan förutsättning är att diffusiviteten D är konstant. För fukt innebär det att fukttransportkoefficienten δ_{RF} (eller δ_v) och fuktkapaciteten dw/dRF är konstanta.

Ur lutningen k hos den räta linjen kan materialets diffusivitet D bestämmas, om koncentrationerna (fukthalterna) C_0 och C_1 är kända

$$k = \frac{M(t)}{\sqrt{t}} = 2(C_0 - C_1)\sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{s}})) \quad (3)$$

Diffusiviteten D fås då ur

$$D = \frac{\pi k^2}{4(C_0 - C_1)^2} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

Den fukttransportegenskap som normalt används i beräkningar är dock inte diffusiviteten D utan fukttransportkoefficienten δ eller my-värdet μ .

Diffusiviteten D för fukt, vid en viss fuktnivå, definieras av

$$D = \frac{\delta_{RF}}{\frac{dw}{dRF}} \quad \text{eller} \quad D = \frac{\delta_v}{\frac{dw}{dRF}} \cdot v_s(T) \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (5)$$

där dw/dRF är fuktkapaciteten (kg/m^3)

$v_s(T)$ är mättnadsånghalten vid temperaturen T .

Med hjälp av diffusiviteten D kan man alltså bestämma fukttransportkoefficienten om sorptionskurvan är känd.

Svårigheten med ekvation (4) är att fukthalterna C_0 och C_1 måste vara kända. C_0 är fukthalten då uttorkningen startar och C_1 är fukthalten då uttorkningen har gett jämviktsfukthalten på alla djup, dvs efter väldigt lång tid.

För betong har vi här en unik möjlighet, som inte är tillgänglig för andra material. Om betongen har fått härda under förseglade förhållanden har självuttorkningen gett samma sänkning av fukthalten på alla djup, dvs en konstant fukthaltsfördelning, som teorin kräver. För andra material skulle detta kräva mycket lång tid.

En svårighet kvarstår: att "slippa" bestämma fukthalterna C_0 och C_1 . Teorin kräver inte att vi vet dessa båda fukthalter, "bara" skillnaden mellan dem, C_0 och C_1 ! Ett sätt att kvantifiera denna är att mäta motsvarande RF och utnyttja att vi känner fuktkapaciteten.

Om man antar att sorptionskurvan är en rät linje, mellan fukthalterna C_0 och C_1 , här kallade w_1 och w_2 , kan man enkelt uttrycka fuktkapaciteten mellan RF_1 och RF_2

$$\frac{dw}{dRF} = \frac{w_1 - w_2}{RF_1 - RF_2} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (6)$$

Detta antagande är rimligt för en betong med lågt vct.

Fukthaltsdifferensen $C_0 - C_1$ i ekvation (2)-(4) kan då uttryckas som

$$w_1 - w_2 = \frac{dw}{dRF} (RF_1 - RF_2) \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (7)$$

Insatt i ekvation (4)

$$D = \frac{\pi k^2}{\left(2 \frac{dw}{dRF} (RF_1 - RF_2)\right)^2} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (8)$$

Fukttransportkoefficienten δ_v fås då genom insättning i ekvation (5)

$$\frac{\delta_v}{\frac{dw}{dRF}} \cdot v_s(T) = \frac{\pi k^2}{\left(2 \frac{dw}{dRF} (RF_1 - RF_2)\right)^2} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (9)$$

vilket blir

$$\delta_v = \frac{\frac{dw}{dRF} \cdot \pi \cdot k^2}{v_s(T) \left(2 \frac{dw}{dRF} (RF_1 - RF_2) \right)^2} = \frac{\pi k^2}{4 \cdot v_s(T) \cdot \frac{dw}{dRF} (RF_1 - RF_2)^2} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (10)$$

Ekvation (10) är den ekvation ska användas för att utvärdera mätningar med burkmetoden.

Utvärdering

Parametrarna i ekvation (10) kan erhållas på följande sätt:

1. Parametern k utvärderas ut viktändringarna hos en burk; viktändringen plottas mot kvadratroten ur tiden och lutningen bestäms och uttrycks i $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$,
2. $v_s(T)$ är mättnadsånghalten vid den aktuella temperaturen,
3. dw/dRF är fuktkapaciteten mellan RF_1 och RF_2 som erhålls ur desorptionsisotermen, om den är känd, eller uppskattas ur nedanstående diagram och cementhalten.
4. RF_1 är RF vid uttorkningens start, dvs efter självuttorkning,
5. RF_2 är RF i omgivningen under uttorkningen av burken.

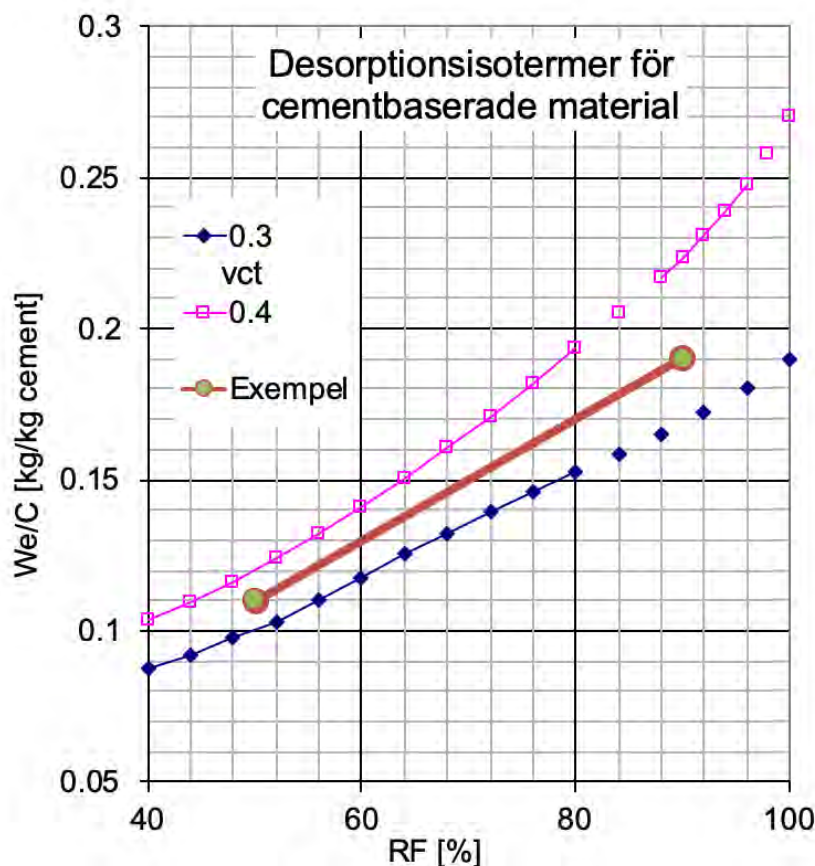


Diagram för uppskattning av fuktkapaciteten; data från Nilsson (1980)

1. Interpolera mellan kurvorna för aktuellt vbt; se exemplet för vbt 0.35.
2. Välj start $RF = RF_1$; i exemplet 90 % RF , dvs 0.90.

3. Välj slut-RF, dvs torkklimat RF_2 ; i exemplet 50 % RF, dvs 0.50.
4. Avläs w_1/C och w_2/C för RF_1 respektive RF_2 ; i exemplet 0.19 och 0.11 kg/kg cement.
5. Beräkna lutningen: $(w_1/C - w_2/C)$ dividerat med $(RF_1 - RF_2)$; här $(0.19-0.11)/(0.90-0.50) = 0.08/0.4 = 0.20$ (i samma RF-intervall fås 0.26 för vct 0.40 och 0.18 för vct 0.30).
6. Multiplicera med cementhalten; för t ex $C = 450 \text{ kg/m}^3$ i exemplet fås $dw/dRF = 0.20 \cdot 450 = 90 \text{ kg/m}^3$.

Användning

Burkmetoden lämpar sig särskilt väl för (låg-vct-)betong eftersom en förutsättning är en känd, konstant fuktfördelning då uttorkningen börjar och vägningarna påbörjas. I betong ger cementreaktioner självuttorkning på alla djup som i normala fall (utan extrema temperaturförhållanden) ger upphov till en sänkning av fukthalten och därmed en sänkning av RF. Denna RF bör mätas eftersom den är en viktig parameter i utvärderingen.

Teorin förutsätter att materialegenskaperna är konstanta i tiden. Det innebär att uttorkningen, och vägningarna, inte får påbörjas för tidigt. Lämpligen låter man betongen härda minst en månad.

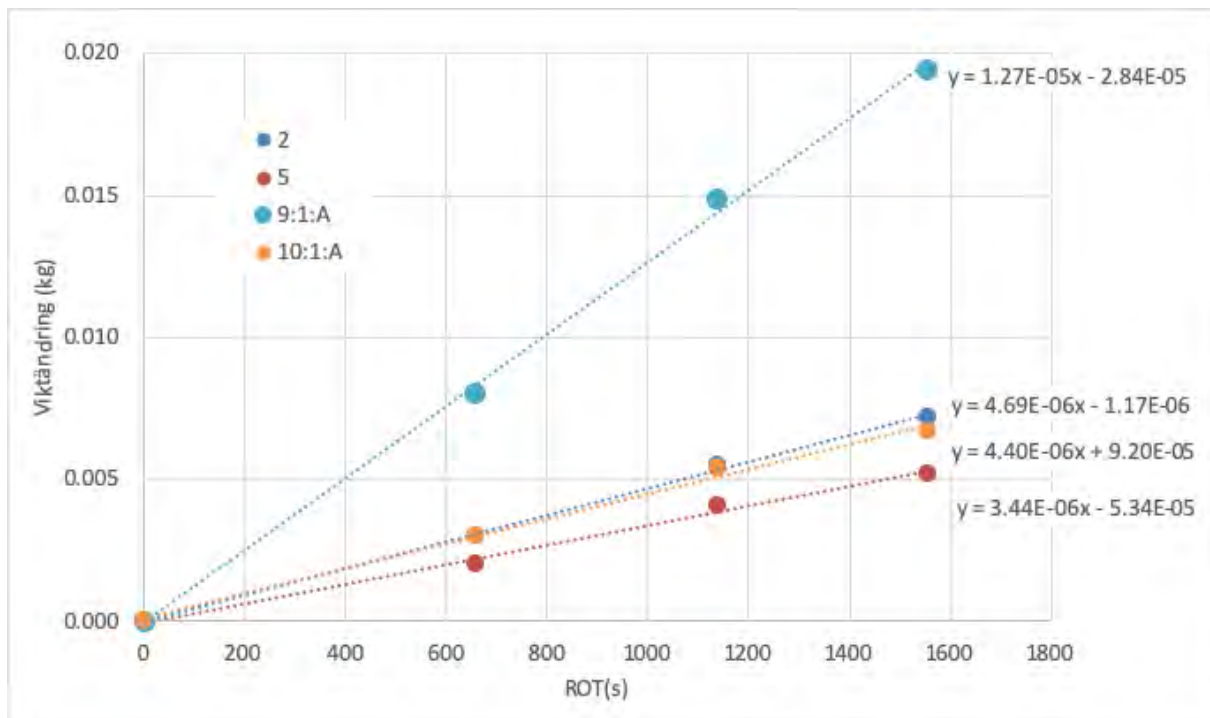
Teorin förutsätter också att materialegenskaperna är konstant med djupet. Så blir det tyvärr inte när man gjuter betong och jämnar till överytan på något sätt. I betong blir det då en högre cementhalt än genomsnittet ju högre upp mot överytan man kommer eftersom de största ballastkornen inte får plats högst upp. Detta kan spela en viss roll eftersom det är den första delen av uttorkningsprocessen som ingår i Burkmetoden och denna del av uttorkningen sker till stor del i den övre delen av betongen i burken.

Utvärderingsexempel

Burkvägningar genomförda av Kent Bergström, Polygon AK, för fyra Bascementbetonger tillverkade av Cementa AB har plottats mot kvadratroten ur tiden (i sekunder), se diagrammet nedan.

TABELL I De fyra (Bascement)betongerna

Betong	vct	C (kg/m ³)
5	0.32	545
2	0.40	470
9.1A	0.50	375
10.1A	0.36	510



Alla datapunkter ligger snyggt på en rät linje, helt enligt teorin (så länge det är "halvoändligt", dvs RF har inte sjunkit i botten än).

Utvärderingen enligt Metoden ger:

Betong	vct	kg cement	lutning kg/ROT(s)	lutning kg/m ² ROT(s)	dw/dRF per kg C	dw/dRF	RF1	RF2	Delta (m ² /s)
5	0.32	545	3.44E-06	1.21E-04	0.20	109	0.88	0.5	4.25E-08
2	0.4	470	4.69E-06	1.65E-04	0.26	122	0.92	0.5	5.76E-08
9.1A	0.5	375	1.27E-05	4.48E-04	0.33	124	0.96	0.5	3.48E-07
10.1A	0.36	510	4.40E-06	1.55E-04	0.22	112	0.91	0.5	5.80E-08

Dessa värden på fukttransportkoefficienten är av rimlig storleksordning! Om det är korrekt bör verifieras genom mätning med koppmetoden på precis samma betonger.

Kontrollberäkning

Kontrollberäkningar har gjorts med beräkningsverktyget KFX för konstant fukttransportkoefficient $\delta_v = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ och konstant fuktkapacitet $dw/dRF = 100 \text{ kg/m}^3$. Beräknad minskning av medelfukthalten med tiden omvandlades till viktändring (kg). Värdet vid 25 dygn sattes in i ekvation (10) varvid erhöles $\delta_v = 0.97 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket får anses vara tillräcklig noggrannhet.

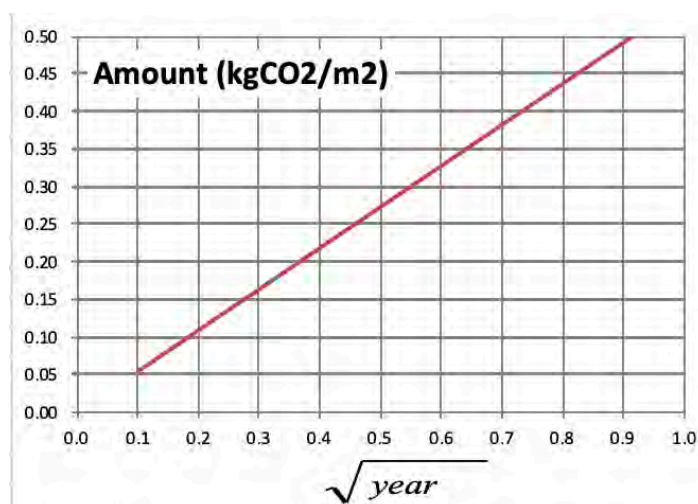
Slutsats: Burkmetoden verkar ge tillförlitligt resultat.

Resultatet av den numeriska beräkningen är väldigt beroende av hur man gör cellindelningen närmast den torkande ytan. Här har en cellindelning gjorts med tio celler med storlekar på 1, 1, 2, 2, 4, 10, 10, 20, 20, 30 respektive 40 mm. Cellindelning med tio lika stora celler gav ett helt annat resultat.

Karbonatisering

Om burken varit helt försluten med ett lock har betongytan inte karbonatiserats. När uttorkningen sedan startar, och burken tappar vikt pga uttorkning, börjar den också ta upp koldioxid vilken ökar vikten, dvs minskar viktändringen. Karbonatiseringen har också den effekten att vatten frigörs, en vattenmolekyl per koldioxidmolekyl, vilket motsvarar 18/44 av viktökningen pga koldioxidupptag. Detta vatten ökar fukthalten något i det karbonatiserade skiktet. Det karbonatiserade skiktet får samtidigt något ändrade fuktfixerings- och fukttransportegenskaper, Kropp (1983). Sammantaget innebär karbonatisering samtidigt som uttorkning att den uppmätta viktändringen underskattar fuktagvången något. Burkmetoden skulle därför ge en fukttransportkoefficient som är något mindre än den verkliga.

En uppskattning av effekten av karbonatisering har gjorts med hjälp av en modell för absorption av koldioxid pga. karbonatisering, Nilsson (2011). I den modellen har data för betongen ovan med vct 0.5 lagts in (vct 0.5, cementshalt 375 kg/m³, andel Portlandcementklinker i cementet 80 %, RF = 50 %). Den erhållna absorptionen av koldioxid under det första året visas i nedanstående diagram.



Beräknad koldioxidabsorption pga. karbonatisering av bascementbetong med vct 0.5 under det första året, enligt modell enligt Nilsson (2011).

I utvärderingsexemplet ovan bestämdes viktändringen under 28 dygn, vilket motsvarar $28/365=0.077$ år eller $0.28 \sqrt{\text{år}}$. I diagrammet ovan ger det en viktökning pga koldioxidabsorption på ca 0.15 kg/m². Den uppmätta viktminskningen var $0.019/0.028=0.68$ kg/m². Koldioxidabsorptionen har alltså minskat viktändringen med ca 20 %, dvs fukttransportkoefficienten borde vara ca 20 % större än i exemplet ovan.

Verifiering

Teorin ovan är klar, men bör verifieras med direkt bestämning av fukttransportkoefficienten med en traditionell metod: koppmetoden!

Sådana mätningar har påbörjats på skivor utsågade ur borrhärnor från de aktuella burkarna enligt ovan.

Provkroppar

Fyra burkar har använts för att genomföra mätningar med koppmetoden på samma betonger som använts i burkmetoden samt ytterligare en Bascementbetong, nr 10, med vct 0.36. Ur burkarna borrades först ut en 95 mm borrhärna, med vattenkylning. Därefter sågades ca 30 mm tjocka skivor ur denna borrhärna. Eftersom betongburken också innehåll horisontella rör för RF-mätningar kunde inte alla skivor användas; 3-4 skivor per betong var användbara.

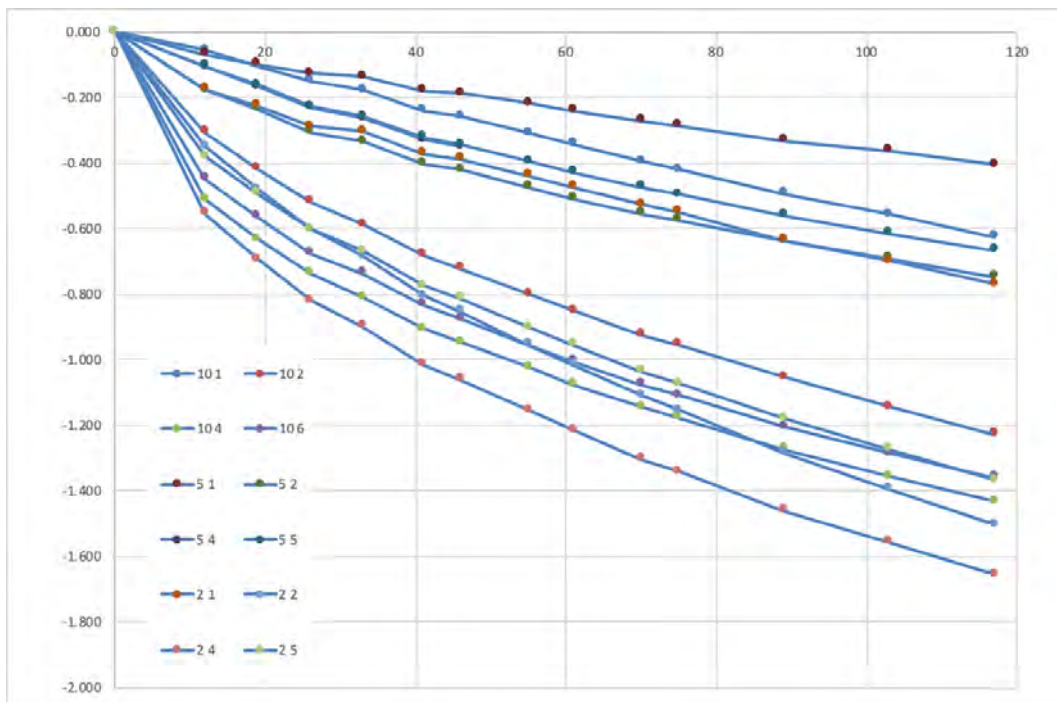
Betongskivorna dokumenterades genom att tjockleken bestämdes med skjutmått på ett antal ställen. Den översta skivan i respektive borrhärna har en ojämn överyta efter att ha varit i kontakt med burkens plåtlock under härdningen, se foton. Skivorna fotograferades och vägdes, se Bilaga 1.

Betongskivorna kantförseglades med Platon Tätband och placerades på en glaskopp innehållande en mättad lösning av kaliumklorid, KCl, som ger en RF av 85 % inuti koppen. Kopparna placerades i ett klimatrum på LTH med klimatet +20°C och 60 % RF och vägdes en gång per vecka till att börja med och sedan en gång per två veckor.

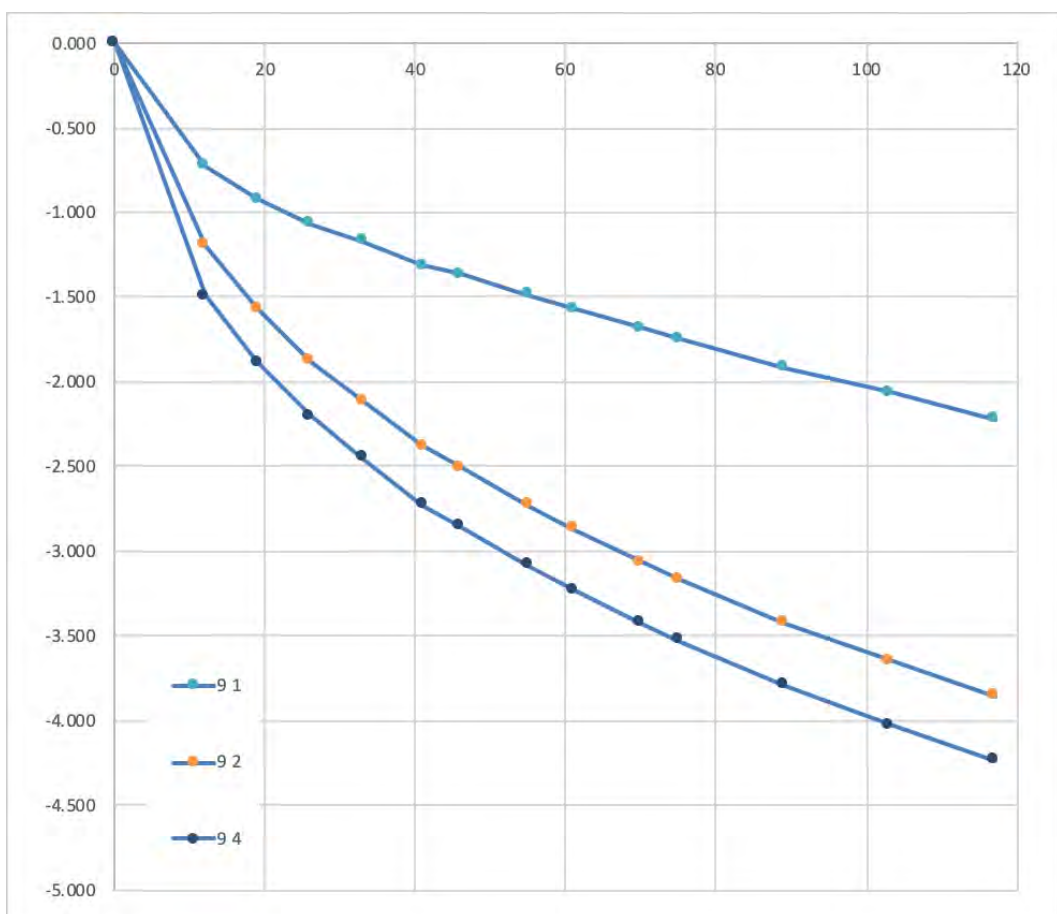
Viktändringar

Betongskivorna blev något uppfuktade i samband med utbörning och sågning och tappade mest vikt vid de första vägningarna. Viktändringarna blev sedan mindre och mindre i takt med att fuktprofilen genom betongskivan succesivt närmar sig en stationär fuktprofil. Hittills har vägningar gjorts under ca fem månader och de tre-fyra senaste vikterna har använts för en preliminär utvärdering. Kopparna kommer att vägas fortsättningsvis för att klargöra hur nära stationära förhållanden uppnåtts vid denna tidpunkt.

Viktändringarna redovisas i diagramform på nästa sida.



Viktändring (gram) hos koppar med betonger nr 2, 5 och 10 (vct 0.4, 0.32 respektive 0.36) under ca fyra månader



Viktändring (gram) hos koppar med betong nr 9 (vct 0.5) under ca fyra månader

Utvärdering

Ur de tre-fyra senaste vikterna har lutningen utvärderats, se tabell I. Efter vägningarna i ovanstående diagram har ytterligare vägningar gjorts. Dessa har bekräftat att stationära flöden har erhållits. Korrelationskoefficienten är mycket nära 1.0.

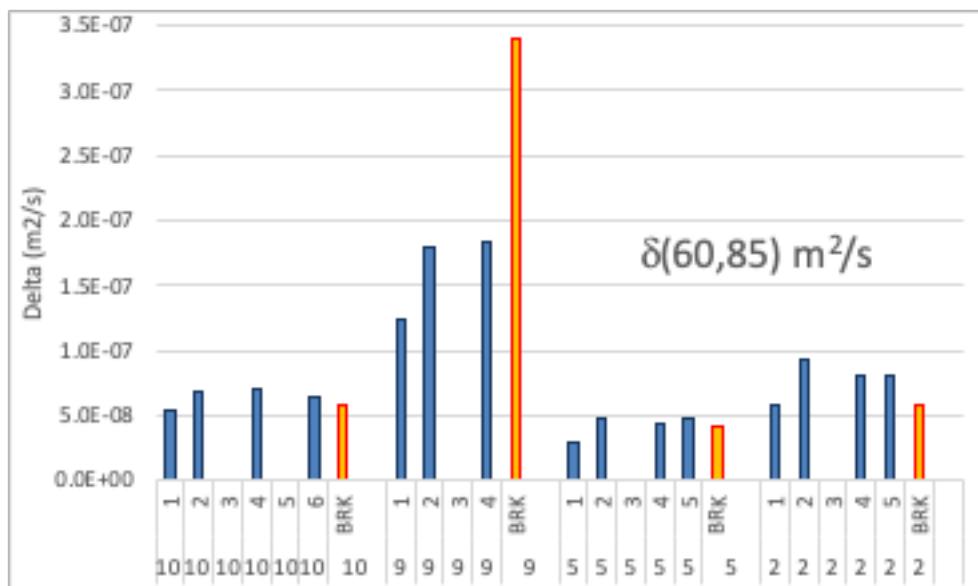
Lutningen hos den sista delen av viktändringskurvorna har omräknats till fuktflöden i gram per m² och sekund; diametern är 95 mm. Med respektive tjocklek och klimatet på ömse sidor om betongskivan kan sedan fukttransportkoefficienten δ utvärderas. Resultatet redovisas i Tabell I.

Luftskiktet mellan den mättade saltlösningen och betongskivans underkant har ett visst fuktmotstånd som medför att RF på undersidan av betongskivan är något lägre än vad saltlösningen ger. Med de små fuktflöden som är aktuella här är emellertid denna effekt helt försumbar; RF kan vara högst 0.2 % RF lägre än 85 % RF.

Tabell I Kopparnas viktändring per tidsenhet under den senaste månaden och utvärderade fukttransportkoefficienter

Prov	Lutning	R ²	Fuktflöde	Tjocklek	δ
	gram/dygn		g/(m ² s)	mm	(m ² /s)
10.1	0.0049	0.9994	8.00E-06	29.6	5.5E-08
10.2	0.0065	0.9985	1.06E-05	28	6.9E-08
10.4	0.0061	0.9971	9.96E-06	30.2	7.0E-08
10.6	0.0056	0.9995	9.14E-06	30	6.3E-08
9.1	0.0120	0.9985	1.96E-05	27.5	1.2E-07
9.2	0.0155	0.9996	2.53E-05	30.5	1.8E-07
9.4	0.0159	0.9995	2.60E-05	30.5	1.8E-07
5.1	0.0026	0.9895	4.25E-06	30	2.9E-08
5.2	0.0041	0.9988	6.70E-06	30.4	4.7E-08
5.4	0.0038	1.0000	6.21E-06	31	4.4E-08
5.5	0.0040	0.9977	6.53E-06	31	4.7E-08
2.1	0.0051	0.9964	8.32E-06	30.1	5.8E-08
2.2	0.0083	0.9987	1.36E-05	29.5	9.2E-08
2.4	0.0070	1.0000	1.14E-05	30.3	8.0E-08
2.5	0.0069	0.9988	1.13E-05	31	8.1E-08

Fukttransportkoefficienterna för respektive betongskiva visas i nedanstående diagram. I detta har också fukttransportkoefficienterna från mätningarna med burkmetoden för de fyra betongerna lagts in. Observera att burkmetoden för betong 9, vct 0.5, har ett helt annat RF-intervall än övriga betonger.



Fuktkoefficienten δ (m²/s) för de olika betongskivorna 1-6, i RF-intervallet (60,85) samt för betongen med burkmetoden (BRK), i olika RF-intervall, se texten.

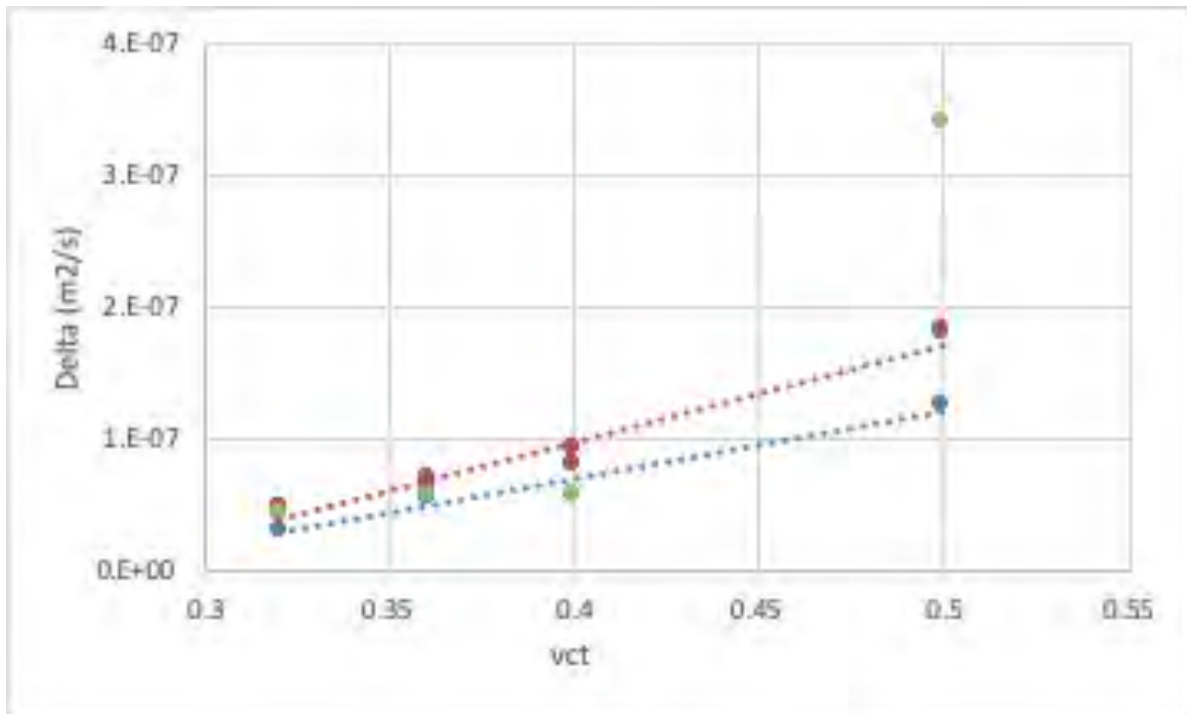
Kommentar

De bestämda fuktkoefficienterna verkar vara av en rimlig storleksordning. Resultaten från koppmätningarna överensstämmer förvånansvärt väl med resultat från burkmetoden; för betongerna med de lägre vct stämmer det mycket bra trots att RF-intervallen inte är desamma. Olsson et al (2018) och Hedenblad (1993) visade att fuktberoendet är mycket litet då vct är cirka 0.4 eller lägre. Detta indikerar att burkmetoden kan vara en metod att snabbt få en uppfattning om en ny betongs fuktkoefficienter.

För vct 0.5 (betong 9) erhöles $3.4 \cdot 10^{-7}$ m²/s med burkmetoden och $1.2-1.8 \cdot 10^{-7}$ m²/s med koppmetoden. Med burkmetoden var RF-intervallet dock annorlunda, 50-96 % RF, vilket naturligtvis ska ge ett högre värde på fuktkoefficienten. Hedenblad (1993) fick ca $3 \cdot 10^{-7}$ m²/s i intervallet 60-85 % RF. För betonger med vct lägre än 0.4 har vi inga tillförlitliga data att jämföra med.

Resultaten från koppmätningarna visar att betongernas ytskikt, ca 3 cm, är tätare än på större djup. Detta gäller för alla fyra betongerna. Det är förmodligen fuktkoefficient i detta ytskikt som mest påverkar resultatet från en kortvarig mätning med burkmetoden.

Resultaten från koppmätningarna visas också i nedanstående diagram, här som funktion av vct för de fyra betongerna.



Bestämda fukttransportkoefficienter δ (m^2/s) för de fyra betongerna

- för det 30 mm tjocka ytskiktet (blå), i RF-intervallet (60, 85)
- för de 30 mm tjocka skikten på 30-150 mm djup (röda), i RF-intervallet (60, 85)
- från burkmätningarna, dvs för ytskikten (grön), i olika RF-intervall från 50 % RF till det som självuttorkningen gett, dvs ca 95 % RF för $v_{ct} 0.5$ och < 90 % RF för $v_{ct} \leq 0.4$.

Slutsatser

1. Burkmeteren verkar vara ett snabbt och enkelt sätt att bestämma fukttransportegenskaperna hos betong.
2. Metoden har verifierats mot koppmätningar och gett god överensstämmelse.
3. Metoden lämpar sig bäst för betong med låga vct eftersom den bara ger ett medelvärde i ett visst RF-intervall. Den kan inte ge ett RF-beroende utan att en serie mätningar genomförs.
4. Metoden mäter egenskaperna hos betongens ytskikt; denna är något tätare mot fukttransport än betong på större djup. Tjockleken hos ytskiktet beror på maximal stenstorlek.
5. Metoden lämpar sig inte för ung betong. Metoden kräver ett antal veckors mättid och ger ett medelvärde under mättiden. Betongen bör därför ha härdat minst en månad innan mätning påbörjas.
6. Utvärderingen kräver att RF efter självuttorkning bestäms strax innan mätning påbörjas. Det bör göras på en separat provkropp och inte i rör i burkmätningen. Att använda borrhålsmetoden enligt RBK kan ifrågasättas.
7. Betong i burken ska jämnas till och inte komma i direkt kontakt med locket, för att betongytan ska bli väl definierad. "Tjockleken" hos betongskiktet bestäms. Eventuellt kompakteras betongen med burken vänd med locket nedåt.
8. Burkbetongen ska härdas i konstant temperatur och torkning ska ske i ett konstant klimat med känd T & RF.
9. Första vägning sker direkt efter att locket avlägsnats. Vägningar därefter görs en eller två gånger per vecka; datum och klockslag noteras.
10. Metoden ger fukttransportegenskaperna i RF-intervallet mellan självuttorkning och det torkklimat som används. För låg-vct-betong kan extrapolering ske utanför detta RF-intervall.
11. Metoden ger fukttransportegenskaperna hos betongens ytskikt, < 30 mm.
12. Karbonatisering minskar viktändringen pga. fuktavgång, vilket medför att fukttransportkoefficienten underskattas, ett systematiskt fel; den kan vara ca 20 % större än vad metoden ger. En noggrannare bestämning kräver att man beaktar karbonatisering, t ex enligt Nilsson (2011).
13. Metoden innehåller ett antal felkällor som bidrar till mätosäkerheten. De största felkällorna bedöms vara RF-mätningen och uppskattning av fuktkapaciteten. Att betongen krymper något och en tunn spricka bildas mellan plåt och betong har försumbar effekt på uttorkningen, Åhs (2019).

Referenser

Crank, J. (1973) *The Mathematics of Diffusion*. Second edition, Oxford University Press

Hedenblad, G. (1993) Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste'. Rapport TVBM-1014, LTH-Byggnadsmaterial, Lund, 1993

Kropp, J. (1983) *Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein*. Dissertation Universität Karlsruhe.

Nilsson, L-O (1980) *Hygroscopic moisture in concrete. Drying, measurements and related material properties*. Rapport TVBM-1003, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola

Nilsson, L.-O. (2011) *CO₂-cycle in cement and concrete: Part 7: Models for CO₂-absorption. A new model for CO₂-absorption of concrete structures*. Rapport TVBM-3158, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Olsson, N., Nilsson, L.-O., Åhs, M., Baroghel-Bouny, V. (2018) *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*. Cement and Concrete Research, 106 (2018) pp. 23–32.

Åhs, M. (2019) *Simulering av uttorkning i betong med COMSOL Multiphysics*. Presentation vid Fuktcentrums Informationsdag Göteborg 2019-03-27.

Bilaga 1 Betongskivor



Dimension och vikt hos betongskivorna

Betong	Skiva	Tjocklekar					medel	Anm.	Vikt (g)
10	1	31	29	29	490	30	29.6		490
	2	27.5	28.5		475		28		475
	3	9							
	4	30.2	30.2	30.2	520		30.2		520
	5	31							
	6	30	30	30	523		30	3 mm djup grop	523
	Totalt	158.7							
9	1	20	30	30	497		27.5		497
	2	31	30	31	522		30.5		522
	3	17							
	4	31	30	30.5	517	30	30.5		517
	5	17							
	6	32	31	32	559		31.5		559
	Totalt	148							
5	1	30	29.5	30.5	494		30	3 mm djupa gropar	494
	2	30	31	30.5	517		30.4		517
	3	25							
	4	31	31	31	517		31		517
	5	31	31	31	511		31		511
	6	14						botten	
	Totalt	161							
2	1	30.5	30	30	484		30.1	4 mm djupa gropar	484
	2	30	29	30	494		29.5		494
	3	30							
	4	30	30	31	506		30.3	3 mm djup grop	506
	5	30	31	32	519		31	kantflisa av	519
	6	8						botten	
	Totalt	158.5							

FUKTTRANSPORTEGENSKAPER HOS BETONG MED OLIKA
BINDEMEDEL
– Koppmätningar för betonger med vbt 0.36

Uppdragsgivare: Polygon AK

2019-12-03

Lars-Olof Nilsson

Förord

I byggbranschen görs idag sofistikerade fuktberäkningar av hur byggfukt i betong omfördelas efter applicering av avjämning och olika typer av golvmaterial. För detta krävs tillgång till detaljerade fuktegenskaper hos ingående material. För särskilt betong med nya bindemedel saknas i stort sett data för fukttransportegenskaper helt.

På uppdrag av Polygon AK, genom Kent Bergström, har undertecknad tidigare undersökt om "burkmetoden" kan användas för att kvantifiera fukttransportegenskaper hos betong och vilka begränsningar metoden har. Metoden verifierades då också genom att göra jämförande mätningar på samma betonger med den klassiska koppmetoden.

De tidigare mätningarna gjordes på betonger med Bascement och olika vct. Nu har nya koppmätningar gjorts för två betonger med andra bindemedel och vct 0.36.

Lars-Olof Nilsson

Innehållsförteckning

Förord	1
Bakgrund	3
Material	3
Provkroppar	3
Viktändringar	4
Utvärdering	5
Kommentarer	6
Referenser	7
Bilaga 1 Betongskivor och koppar	8

Bakgrund

I en tidigare undersökning av Burkmetoden, som beskrivs i Rapport 1923, gjordes verifierande koppmätningar för fyra Bascementbetonger med olika vct. Nu har koppmätningar gjorts för två nya betonger med andra bindemedel, "Floridacement" (OPC) och "Byggcement" (OPC med kalkstensfiller). De två nya betongerna har vct 0.36. En av de fyra Bascementbetongerna har samma vct varför resultaten jämförs med denna.

Material

Kent Bergström, Polygon AK, har tillhandahållit burkar med två nya betonger med andra bindemedel än de tidigare testade Bascementbetongerna. Betongerna är alla tillverkade av Cementa AB, härdade i förseglade plåtburkar cirka ett år och testade med Burkmetoden under cirka en månad. De tre betonger som redovisas i denna rapport beskrivs i nedanstående tabell.

TABELL I De tre betongerna

Betong	vct	C (kg/m ³)	Bindemedel	Tillsatsmaterial
11	0.36	510	CEM II/A-LL 42,5 R ("Byggcement")	Kalkstensfiller, ca 5-10 %
18	0.36	510	CEM I 52,5 R OPC ("Floridacement")	
10	0.36	510	CEM II/A-V 52,5 N. ("Bascement")	Flygaska, ca 10-15 %

Provkroppar

Ur betongen i plåtburkarna borrades först ut en 95 mm borrhäna, med vattenkylning. Därefter sågades ca 30 mm tjocka skivor ur denna borrhäna. Eftersom betongburken också innehöll horisontella rör för RF-mätningar kunde inte alla skivor användas; Fyra skivor per betong var användbara.

Betongskivorna dokumenterades genom att tjockleken bestämdes med skjutmått på ett antal ställen. Den översta skivan i respektive borrhäna har en ojämn överyta efter att ha varit i kontakt med burkens plåtlock under härdningen, se foton i Bilaga 1.

Betongskivorna kantförseglades med Platon Tätband och placerades på en glaskopp innehållande en mättad lösning av kaliumklorid, KCl, som ger en RF av 85 % inuti koppen.

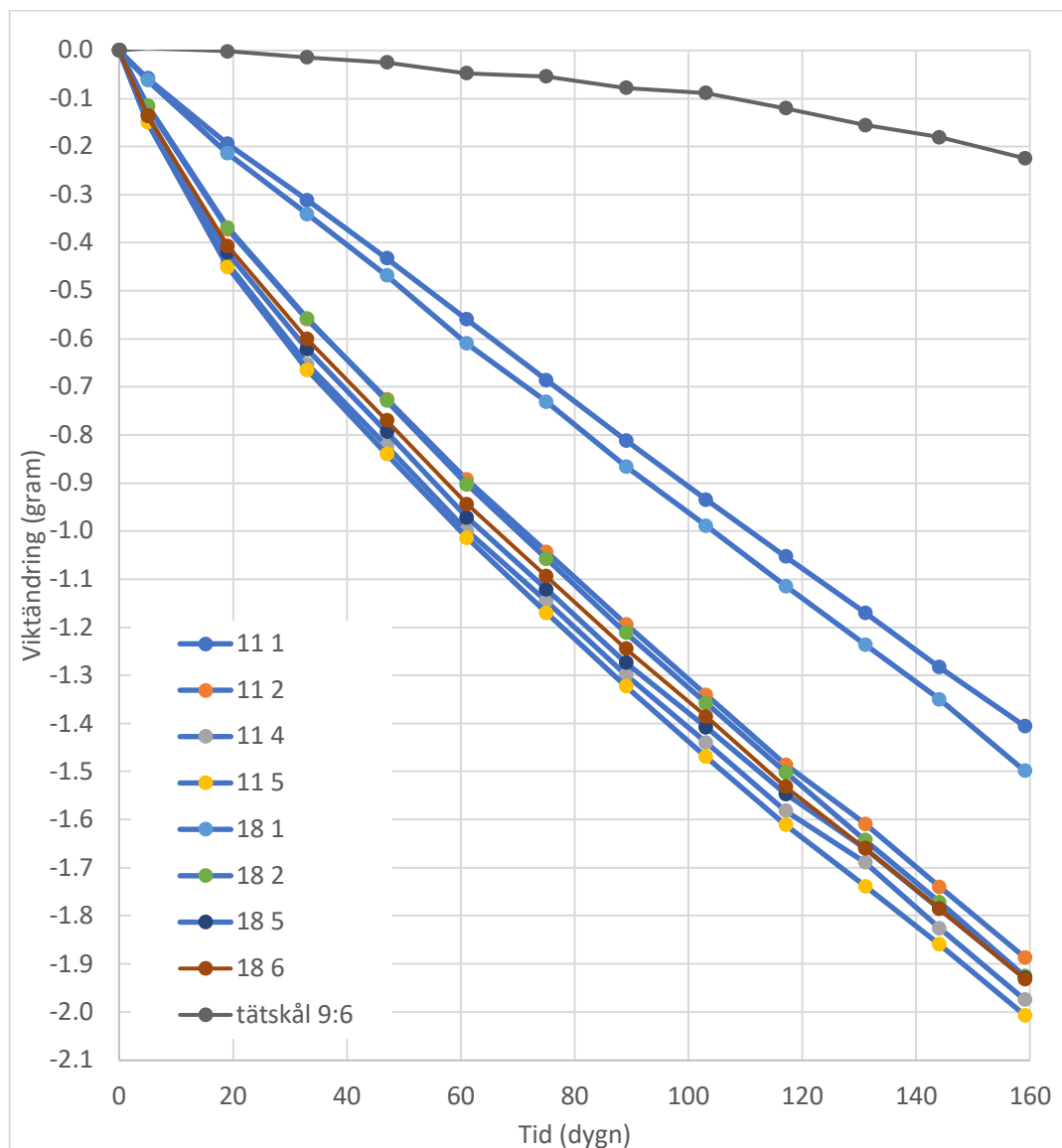
En tidigare provad betongskiva 9:6 användes nu för att testa hur stort läckaget är hos tätningssystemet. Betongskivan placerades på en likadan glaskopp som tidigare men med vatten inuti koppen, som alltså ger 100 % RF inuti koppen. En annan glaskopp placerades ovanpå betongskivan och förseglades mot den undre koppen med samma typ av tätband, se foto i Bilaga 1.

De sammanlagt nio kopparna placerades i ett klimatrum på LTH med klimatet +20°C och 60 % RF och vägdes en gång per vecka till att börja med och sedan en gång per två veckor.

Viktändringar

Betongskivorna blev något uppfuktade i samband med utborrning och sågning och tappade mest vikt vid de första vägningarna. Viktändringarna blev sedan mindre och mindre i takt med att fuktprofilen genom betongskivan succesivt närmar sig en stationär fuktprofil. Hittills har vägningar gjorts under ca fem månader och de sju senaste vikterna har använts för utvärderingen. Den tidigare mätserien med betong nr 10, med Bascement, har nu vägts under nästan åtta månader.

Viktändringarna redovisas i diagramform nedan.



Viktändring (gram) hos koppar med de två nya betongerna nr 11 och 18 ("Byggcement") respektive "(Floridacement)", samt den förseglade koppen, under ca fem månader.

Utvärdering

Ur de senaste vikterna har lutningen utvärderats, se tabell I, först efter tre månader och sedan efter allt längre tid. Detta har bekräftat att nära stationära flöden har erhållits. Korrelationskoefficienten är mycket nära 1.0. Vägningarna fortsätter dock för att kvantifiera hur nära stationärt flöde nedanstående utvärdering varit.

Lutningen hos den sista delen av viktändringskurvorna har omräknats till fuktflöden i gram per m² och sekund; diametern är 95 mm. Med respektive tjocklek och klimatet på ömse sidor om betongskivan kan sedan fukttransportkoefficienten δ utvärderas. Resultatet redovisas i Tabell II.

Luftskiktet mellan den mättade saltlösningen och betongskivans underkant har ett visst fuktmotstånd som medför att RF på undersidan av betongskivan är något lägre än vad saltlösningen ger. Med de små fuktflöden som är aktuella här är emellertid denna effekt helt försumbar; RF kan vara högst 0.2 % RF lägre än 85 % RF.

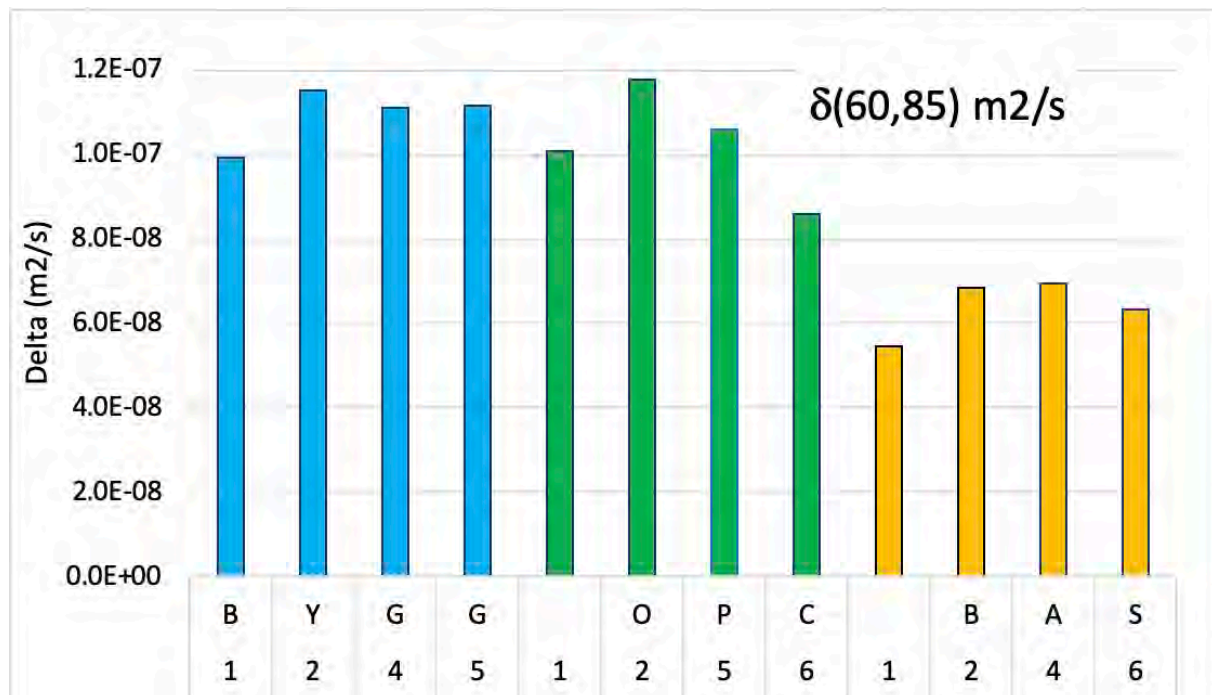
Tabell II Kopparnas viktändring per tidsenhet under de senaste månaderna.

Provkropp	Lutning (gram/dygn)				R ²
	2019-10-08	2019-10-22	2019-11-05	2019-12-03	
11.1	0.0089	0.0087	0.0086	0.0086	0.9998
11.2	0.0106	0.0105	0.0102	0.0100	0.9993
11.4	0.0105	0.0104	0.0098	0.0097	0.9986
11.5	0.0107	0.0105	0.0102	0.0099	0.9990
Provkropp					
18.1	0.0092	0.0091	0.0090	0.0090	0.9997
18.2	0.0107	0.0106	0.0104	0.0103	0.9998
18.5	0.0103	0.0101	0.0096	0.0095	0.9989
18.6	0.0104	0.0104	0.0101	0.0099	0.9995

Tabell III Utvärderade fukttransportkoefficienter

Provkropp	Fuktflöde J		Tjocklek dx mm	Delta=J*dx/dv	
	g/dygn	g/(m ² s)		δ (m ² /s)	Medel
11.1	0.0086	1.404E-05	30.6	9.9E-08	1.1E-07
11.2	0.0100	1.633E-05	30.5	1.2E-07	
11.4	0.0097	1.584E-05	30.3	1.1E-07	
11.5	0.0099	1.617E-05	29.8	1.1E-07	
18.1	0.0090	1.470E-05	29.75	1.0E-07	1.0E-07
18.2	0.0103	1.682E-05	30.25	1.2E-07	
18.5	0.0095	1.551E-05	29.5	1.1E-07	
18.6	0.0099	1.617E-05	23	8.6E-08	

Fukttransportkoefficienterna för respektive betongskiva visas i nedanstående diagram. I detta har också fukttransportkoefficienterna från de tidigare koppmätningarna på Bascementbetong med vct 0.36 lagts in.



Fukttransportkoefficienten δ (m²/s) för de olika betongskivorna 1-6, i RF-intervallet (60,85).

Kommentarer

De bestämda fukttransportkoefficienterna verkar vara av en rimlig storleksordning. Betongerna med Byggcement och Floridacement har fukttransportkoefficienter som är väldigt lika, omkring $1 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Observera att detta gäller i RF-intervallet 60 – 85 % RF. Detta är något lägre än vad Hedenblad (1993) fann för vct 0.40.

Bascementbetongen har något lägre fukttransportkoefficient än de andra två betongerna, omkring $0.6 \cdot 10^{-7}$ m²/s, dvs ca 60 % lägre. Denna skillnad mellan betong med och utan ca 15 % flygaska är av precis samma storleksordning som Linderoth & Johansson (2019) fann för bruk med vct 0.45.

Resultaten från koppmätningarna visar, på samma sätt som tidigare, att betongernas ytskikt, ca 3 cm, är tätare än på större djup. Detta gäller för alla tre betongerna. Det är förmodligen fukttransport i detta ytskikt som mest påverkar resultatet från en kortvarig mätning med burkmetoden.

Av tabell II framgår att provkropp 1 i respektive serie verkar ha nått stationära förhållanden, flödena ändras inte längre med tiden, medan övriga provkroppar har en tendens med ett något minskande flöde med tiden. Framtiden får utvisa var detta slutar.

Läckaget i tätningssystemet har kvantifierats i en enda kopp, se övre kurvan i figuren på sidan 4. Läckaget har mätts i en kopp med 100 % RF inuti koppen, dvs med en RF-skillnad på $100 - 60 = 40$ % RF. Övriga koppar har en RF-skillnad på $85 - 60 = 25$ % RF. Uppmätt läckage ska alltså reduceras med ca 40 %. Det systematiska felet på grund av läckage är därför av storleksordningen 10-15 %.

Referenser

Hedenblad, G. (1993) Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste'. Rapport TVBM-1014, LTH-Byggnadsmaterial, Lund, 1993.

Linderöth, O. & Johansson, P. (2019) Fuktegenskaper hos cementbundet material med flygaskainblandning. Bygg & Teknik 7/19, sid 8-11.

Nilsson, L.-O. (2019) BURKMETODEN – för bestämning av fukttransportegenskaper hos betong. Rapport 1922, Moistenginst AB, Trelleborg,
<http://moistenginst.se/hem/svenska/berakningsverktyg-och-hjalpmedel/>

Bilaga 1 Betongskivor och koppar



Dimension hos betongskivorna

Skiva		diameter 94 mm				Tjl-medel
		Tjocklek				
11	1	33	30	30	30	30.6
	2	30.5	30.5			30.5
	3	30				
	4	30.5	30.2	30.2	30.2	30.3
	5	30	30	29.5		29.8
	6	6				
	summa	160				
18	1	29	29.5			29.75
	2	30	30.5	30	30.5	30.25
	3	29				
	4	13				
	5	29.5	30	29		29.5
	6	24	22			23
	summa	154.5				