

# **Temperaturkänslighet och självvuttorkning i modern betong**

*Slutrapport*

**Hans Hedlund, Skanska Sverige AB  
Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic**

**2020-02-14**



# Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till Pete Metcalf, Skanska Industrial Solutions för hjälp och assistans med tillverkning av provkroppar. Vidare vill projektets arbetsgrupp tacka Mikael Edvall, Polygon AB, för utförda fuktmätningar.

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

Arbetsgruppen, februari 2020

# Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar projektet SBUF 13672. Projektets bakgrund och syfte ger översiktligt. Genomförandet redovisas inkl. avsteg från vad som var tänkt ursprungligen. Därefter presenteras och diskuteras resultaten. En tolkning av dessa utförs genom identifikation av olika mönster i de erhållna data. Slutligen dras slutsatser baserade på tolkningen och ett antal rekommendationer för vidare arbete i PPB:s utveckling föreslås.

# 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 Gjutning .....	4
2.2 Lagring i inomhusmiljö .....	5
2.3 Lagring i utomhusmiljö.....	5
2.4 Mätning av temperaturutveckling i betong .....	6
2.5 Mätning av relativ fuktighet i betong.....	7
2.6 Simulering i PPB samt uppföljning .....	7
3 Resultat.....	8
3.1 Jämförelse uppmätt och predikerat RF.....	8
3.2 Diskussion & slutsatser.....	8
4 Rekommendationer.....	10
Bilageförteckning.....	11

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Projektet SBUF 13672 syftade till att få fram en mer noggrann jämförelse mellan uttorkning hos fyra golvplattor, gjutna med industriellt framställt fabriksbetong, men prediktering för motsvarande fall hos verktyget Produktionsplanering Betong (PPB). Jämförelse mellan uttorkning baserad på hydratation i kallt resp. varmt klimat skulle omfattas av försöken. Resultaten var tänkta att användas som vidare input i det löpande kvalitetssäkringsarbetet kring PPB.

## 1.2 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i fyra delar:

- Inledning
- 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 uppföljningsarbete och förbättringar i PPB.

Denna rapport innehåller även bilagor med tillhörande examensarbetet, som utgör en del av detta projekt, samt protokollsammanställning för RF-mätningar utförda inom projektet, dvs. både under exjobbet och därefter.

# 2 Projektets genomförande

Projektet genomfördes i två delar. Huvuddelen av arbetet utfördes som ett examensarbete av Jimmie Modin och Daniel Lindeskov inom Högskoleingenjörsprogrammet i Byggteknik vid Karlstads Universitet, med handledare Asaad Almsaad och examinator Johan Vessby, under vårterminen 2019. För utförlig dokumentation av genomförandet av denna del hänvisas till rapporten från examensarbetet, se bilaga 1.

Då examensarbetet innehöll endast en mätning av RF, 70 dygn efter gjutning, kompletterades detta med en ytterligare en mätning, 168 dygn efter gjutning, som utgör den andra delen av projektet. Den sista mätningen utfördes efter redovisningen av examensarbetet och därför inte behandlas i dess rapport utan endast i denna rapport till hela SBUF 13672. Då samtliga mätdata var tillgängliga följdes resultaten upp och utvärderades av utvecklare bakom PPB.

## 2.1 Gjutning

Fyra plattor gjöts 2019-03-06 hos Skanska Industrial Solutions, Betong i Trollhättan. Som format användes europapallar med krage. Plattorna var 150 mm tjocka med 100 mm isolering under. Två recept användes med vattencementtal (vct) 0,40 samt 0,55, vilket resulterade i två plattor per vct. Efter gjutning täcktes plattornas ovansida med plast för förseglad härdning under 14 dygn, för att motsvara så bra som möjligt simuleringen i PPB. Projektledningens instruktioner för försegling frångicks dock av examensarbetarna så att platsen inte lades direkt på betongen utan hängdes på ovankanten av omgivande pallkrage. Detta resulterade i en värmeisolerande luftkudde. För utomhusplattorna misstänks dessutom bristfällig tejping av platsen i kombination med solljus och

varierande temperatur mellan dag och natt, resulterat i fuktutbyte med omgivningen, se vidare diskussion i resultatdelen av denna rapport.

## 2.2 Lagring i inomhusmiljö

En platta per vct lagrades sedan i inomhusmiljö, vilket var det varmare klimatalternativet. För en översikt av den omgivande temperaturen och relativa fuktigheten se Fig. 1 och Fig. 2.

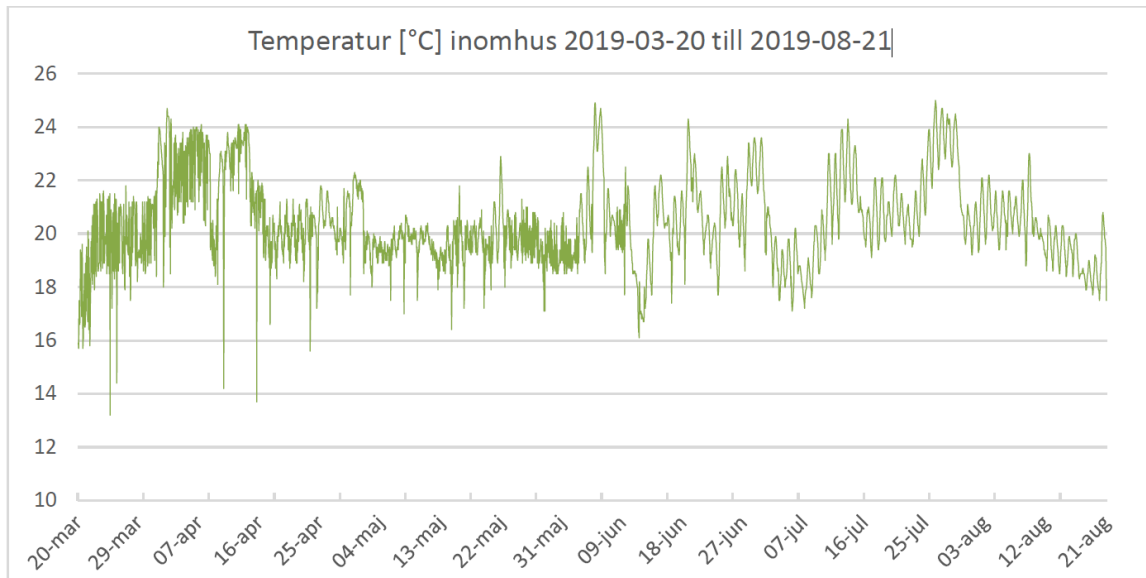


Fig. 1 Temperatur inomhus uppmätt under perioden 2019-03-20 till 2019-08-21

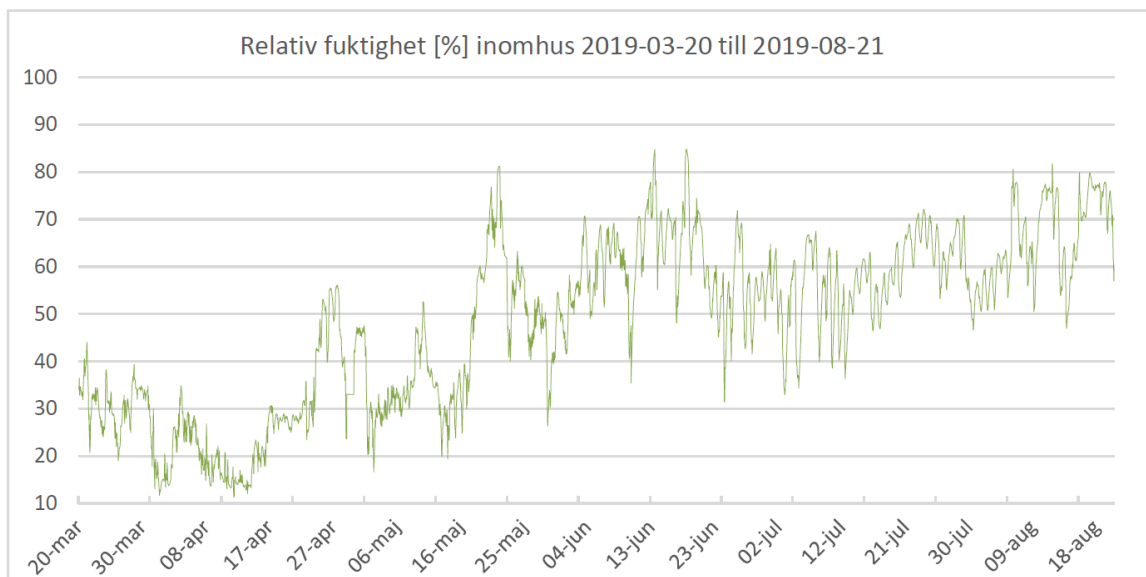


Fig. 2 Relativ fuktighet inomhus under perioden 2019-03-20 till 2019-08-21

## 2.3 Lagring i utomhusmiljö

En platta per vct lagrades även i utomhusmiljö, vilket var det kallare klimatalternativet. Miljön i fråga var under tak och med viss skydd för vind. Plattorna var dock påverkade av instrålning sol. För en

översikt av den omgivande temperaturen och relativa fuktigheten se Fig. 3 och Fig. 4. I samband med mätning av relativ fuktighet i betong togs plattorna in i inomhusmiljö 1 vecka innan mätning för att komma upp i temperatur som krävs för RBK-auktoriserad mätning av RF, vilket motsvaras av ett avbrott i diagrammen för temperatur och RF i luften utomhus. Efter utförd mätning flyttades plattorna utomhus igen.

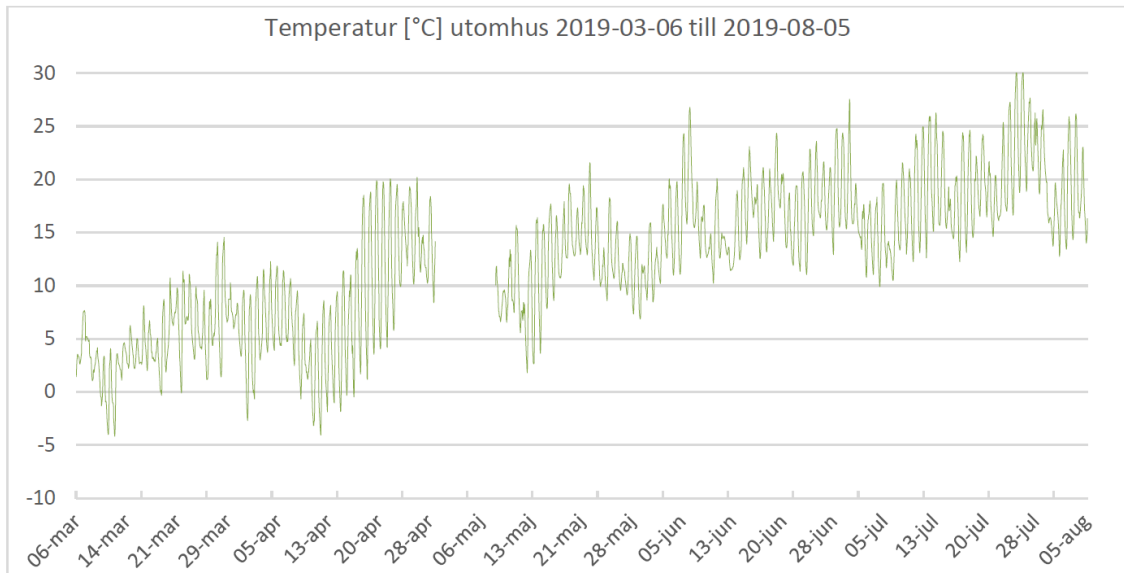


Fig. 3 Uppmätt temperatur utomhus under perioden 2019-03-06 till 2019-08-05

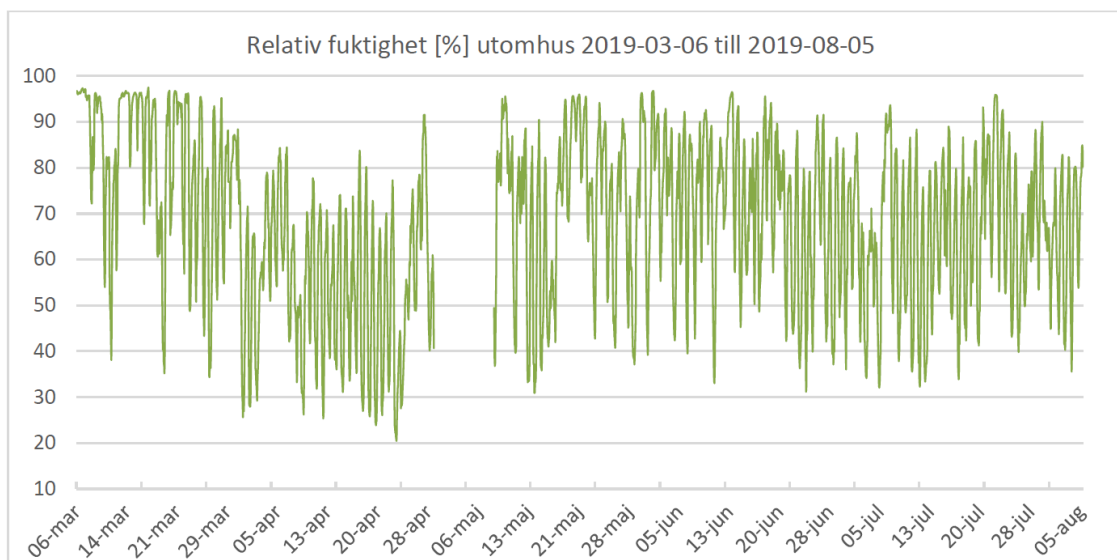


Fig. 4 Relativ fuktighet utomhus under perioden 2019-03-20 till 2019-08-05

## 2.4 Mätning av temperaturutveckling i betong

Betongtemperaturen mättes och loggades i mitten av plattornas tjocklek samt i underkant. Dessa mätningar användes sedan för att se och kompensera för inverkan av den icke från början tilltänkta isolerande luftkudden på ovasidan.



## 2.5 Mätning av relativ fuktighet i betong

Relativ fuktighet mättes vid två tillfällen, 70 resp. 168 dygn efter gjutning. Mätningen utfördes på 40, 75 samt 110 mm djup från plattans ovansida av en RBK-auktoriserad mättekniker.

## 2.6 Simulering i PPB samt uppföljning

Gjutningsfall motsvarande samtliga fyra plattor simulerades i PPB med omgivningsbeskrivning baserad på de registrerade lufttemperaturerna och RF. Inom examensarbetet simulerades utomhusfallen även med användning av klimatdata från PPB, vilket inte redovisas i denna rapport då ev. skillnader i resultat är en effekt i väderleksskillnad mellan årets väder i Trollhättan och PPB:s klimatdata och inte representerar huvudsakligen simuleringarnas noggrannheten hos PPB och Bascementets materialdata.

Efter de inledande simuleringarna, utförda av examensarbetarna, följdes resultaten upp av projektets arbetsgrupp samt PPB:s utvecklare. Då upptäcktes diskrepansen i hur förseglingen hade utförts. Detta resulterade i nya simuleringar med isolering på ovansidan av utomhusplattorna under de första 14 dagarna efter gjutning, så att de predikterade temperaturtoppen i plattorna stämde överens med den uppmätta. Möjligt fuktutbyte med omgivningen konstaterades för utomhusplattorna men detta bedömdes inte vara möjligt att adekvat simulera i PPB. Examensrapporten jämför predikterade värden från dessa två omgångar simuleringar med uppmätta värden vid 70 dygn efter gjutning.

Efter den andra mätomgången utfördes simuleringarna på nytt, omfattande även den tillkomna perioden och mätningen. Vid uppföljning av dessa konstaterades att den inmatade beskrivningen av utomhustemperaturen och RF innehåller variationer (värden per tidsenhet) som fuktberäkningen inte var avsedd för att hinna hantera. PPB:s utvecklare tog fram en lämplig metod för hantering av detta som en del av PPB:s kommande underhållsrelease. Simuleringarna utfördes på nytt och resultatet från dessa predikteringar jämförs med mätdata i denna rapport.

## 3 Resultat

### 3.1 Jämförelse uppmätt och predikterat RF

I Tab. 1, nedan summeras jämförelsen mellan de predikterade och uppmätta relativa fuktigheterna i betongplattorna. Observera att predikterade värden anges både för okorrigerad simulering med PPB samt för simulering med en temperaturutveckling med samma max som den uppmätta samt med tidsbaserad s.k. rullande medelvärdesbildning för temperatur samt RF i omgivande luft för att eliminera dygnsvariationerna av dessa.

Vct	0,4						0,55					
Miljö	Inomhus			Utomhus			Inomhus			Utomhus		
Djup (mm)	40	75	110	40	75	110	40	75	110	40	75	110
<b>2019-05-15 (70 dygn)</b>												
Mätning (% RF)	87,2	90,2	91,7	88,8	91,8	92,9	89,0	92,7	94,0	92,7	95,1	96,8
Mätnoggrannhet (+/- %)	2,0	2,1	2,2	2,0	2,2	2,3	2,0	2,3	2,4	2,3	2,5	2,7
PPB okorrigerat	82,6	89,9	92,2	80,2	85,1	86,2	86,9	90,1	91,4	84,6	87,3	88,4
Differans	4,6	0,3	-0,5	8,6	6,7	6,7	2,1	2,6	2,6	8,1	7,8	8,4
PPB korrigerat	83,3	90,5	92,8	84,3	89,8	90,9	87,3	90,5	91,9	85,5	88,6	89,9
Differans	3,9	-0,3	-1,1	4,5	2,0	2,0	1,7	2,2	2,1	7,2	6,5	6,9
<b>2019-08-21 (168 dygn)</b>												
Mätning (% RF)	83,2	87,4	88,1	84,8	88,6	90,4	87,0	90,0	90,9	87,5	90,3	92,1
Mätnoggrannhet (+/- %)	1,9	2,0	2,0	1,9	2,0	2,1	1,9	2,1	2,1	2,0	2,1	2,2
PPB okorrigerat	78,1	85,2	88,4	69,1	69,0	69,2	82,5	86,5	88,1	72,9	72,5	72,7
Differans	5,1	2,2	-0,3	15,7	19,6	21,2	4,5	3,5	2,8	14,6	17,8	19,4
PPB korrigerat	78,7	85,8	89,2	79,8	85,1	87,5	83,2	87,0	88,6	82,7	85,8	87,0
Differans	4,5	1,6	-1,1	5,0	3,5	2,9	3,8	3,0	2,3	4,8	4,5	5,1

Tab. 1, Jämförelse mellan uppmätta och predikterade relativa fuktigheter för 3 olika djup, 2 vct:er samt 2 miljöer, totalt fyra plattor. Röda siffror markerar differens mellan prediktering och mätning som är större än mätnoggrannheten.

Generellt sett överskattar PPB uttorkningen i majoriteten av fallen, även om vissa överskattningar är inom felmarginalen för mätningen. Vct 0,40 inomhus tycks vara undantaget utom för den ytligaste mätpunkter. Ett antal intressanta mönster låter sig observeras i tabellen ovan:

- Stor skillnad mellan korrigerad och okorrigerad simulering i PPB. Vid 70 dygn efter gjutning ger korrigeringen en majoritet av predikterade värden inom mätningens felmarginal. Vid 168 dygn efter gjutning är effekten också påtaglig även om inte lika många värden hamnar inom mätningens felmarginal.
- I den korrigerade beräkningen överskattas de ytliga mätningarna mest.
- Större differenser mellan korrigerad prediktering och mätning utomhus än inomhus.
- Sämre uppmätt uttorkning utomhus än inomhus och tvärt om för den korrigerade predikteringen.

### 3.2 Diskussion & slutsatser

Diskussionen nedan syftar till att tolka de erhållna resultaten, förstå vad som hänt och dra rimliga slutsatser därav. Det försvåras av att det förekommer flera osäkerhetsfaktorer i utförandet:

- Annorlunda hantering av försegling av ovanytan

- En omedelbar konsekvens av detta är en värmeisolering. Den är dock svårbedömd då luften är fri att röra sig i den uppkomna luftkudden, vilket medför att isoleringsgraden kan variera med temperaturförhållandena. Detta försöker den korrigerade predikteringen att kompensera för.
- En annan, mer svårbedömd, effekt av detta har med fuktförhållanderna utomhus att göra. Av bilderna att döma var plasten inte tejpad direkt mot pallkragarna, vilket möjliggör fuktutbyte med omgivningen. De temperaturvariationerna som förekom i utrymmet, inkl. möjlig snabb uppvärmning genom direkt solstrålning samt nedkylning nattetid, kan ha bidragit till att fukten har lämnat betongen likaväl som att fukten kan ha skjutits till. Kondens har observerats på undersidan av den täckande plasten och en fuktig betongyta har observerats under, vilket tyder på att kondenserat vatten har fallit ner på betongytan. Då uttorkning av ytan sker genom diffusion och uppfuktning i detta fall har skett genom direktinsugning, kan ytan fått ett tillskott av vatten från utsidan. Då detta fenomen är beroende av hur temperaturen och RF varierar i omgivande luft men även av hur solen ligger på och om någon stöter till plasten (proverna stod i ett utrymme där maskiner rör sig) är det i princip omöjligt att uppskatta den effekten, vilket medför en påtaglig osäkerhet i bedömningen av utomhusresultaten.
- Varierande sammansättning hos bindemedlet
  - Bascement har en varierande innehåll av flygaska samt malningsgrad hos klinkern. Detta justeras av tillverkaren så att hydrationsprestanda och hållfasthetstillväxt inte ändras nämnvärt. Dock kan detta medföra skillnader i fuktprestanda som PPB inte kan ta hänsyn till.

Först och främst kan ett försök till tolkning av de mer tydliga, identifierade mönstren göras.

- Den stor skillnaden mellan korrigerad och okorrigerad simulering i PPB är ett tydligt bevis för två saker:
  - Temperaturen är viktig för självuttorkningen och får man inte den att stämma med verkligheten så kan detta bidra påtagligt till differens mellan prediktering och verklighet.
  - Drastisk minskning av skillnaderna mellan prediktering och mätning för utomhusplattorna efter införande av medelvärdesbildning för temperatur och RF för omgivande luft och RF är en nödvändighet för numerisk stabilitet i den nuvarande beräkningsalgoritmen. Alternativet är att minska påtagligt på storleken av tidsstegen i beräkningen. Detta skulle göra simuleringarna påtagligt långsammare utan att resultera i en bättre precision.
- I den korrigerade beräkningen överskattas de ytliga mätningarna mest.
  - Detta antyder att diffusionsuttorkningen överskattas. Fenomenet är mest tydligt för vct 0,40 och är en anledning att tidigarelägga förtätningen av denna betong i tidskala efter gjutningen.
- Sämre uppmätt uttorkning utomhus än inomhus och tvärt om för den korrigerade predikteringen.
  - Det uppmätta bilden motsäger erfarenheten att gjutning i lägre temperatur ger bättre självuttorkning. Detta tyder på att något inte är som det skulle i denna jämförelse. En möjlig förklaring är den identifierade möjligheten att

utomhusproverna utsatts för ett fuktillskott under tiden de skulle ha varit förseglade.

- Större differenser mellan korrigerad prediktering och mätning utomhus än inomhus.
  - Detta skulle kunna bero på att PPB överskattar temperatureffekten hos självuttorkningen, dvs. effektivare självuttorkning vid lägre hydratationstemperatur. Skulle den vara så borde utomhusplattorna visat en högre uppmätt nivå av självuttorkning (de lägre mätpunkterna) än inomhusplattorna, men differensen skulle ha varit mindre än i predikteringen. Detta är inte det erhållna resultatet och det går alltså inte att uttala sig med säkerhet om PPB:s korrekthet avseende temperaturberoendet hos självuttorkning endast baserat på dessa mätdata. Skillnaden skulle kunna bero på det misstänkta fuktillskottet i tidigt skede hos utomhusplattorna

Det kan även observeras att då den predikerade relativa fuktigheten djup inne i konstruktionen, där endast självuttorkning förväntas, närmar sig nivåer runt 80% och under bör en inbromsning av självuttorkningen ske med slutligen totalt upphörande p.g.a. den begränsande effekten av vattnets tillgänglighet i betongens porsystem. Det är känt att detta inte modelleras korrekt idag, vilket resulterar i lägre RF i området under 80% än vad det borde.

## 4 Rekommendationer

Med hänsyn till de erhållna resultaten, diskussionen och tolkningen ovan samt de dragna slutsatserna kommer projektet fram till följande när det gäller rekommendationer och framtida arbete:

- Vikten av betydelsen av temperaturen under tidigt hydratationsskede för självuttorkningen är känd. Den har kommunicerats till branschen genom ett flertal artiklar och påtalas och exemplifieras även under utbildningen i PPB Fukt i BUC:s regi. Här behövs det inga vidare åtgärder eller rekommendationer.
- Nyttan med filtrering och medelvärdesbildning av tätt specificerad lufttemperatur och/eller omgivande RF har identifierats i detta projekt huvudsakligen på grund av examensarbetarnas ambition att räkna så noga som möjligt. Det är inte rimligt att förvänta sig att en normal användare matar in manuellt den enorma mängd data som har skett i detta fall. Samtidigt, som ambitionsnivån är för vidareutveckling av PPB:s fuksimulering i pågående SBUF 13710 och 13711 kommer man att kunna inom snar framtid importera uppmätta data som beskrivning av omgivningens egenskaper. Därför rekommenderar projektet att denna filtrering behålls och frisläpps i skarp PPB.
- Misstanke om tidigare förtätning hos vct 0,40 stämmer väl med opublicerade resultat erhållna från försöken i det pågående projektet SBUF 13560. Detta bör medföra en korrigerig av transportegenskaper för betongen i fråga i PPB:s materialdatabas.
- Det finns en misstanke hos PPB:s utvecklare att temperatureffekten hos självuttorkningen i dagens materialdata kan vara något överskattad, då samtliga materialegenskaper inte har mätts in med hänsyn till varierande hydratationstemperatur och teorin pekar ut fenomen som kan begränsa den inmätta effekten. Förhoppningen inför detta projekt var att få en klarare bild och fler skarpa data att justera in PPB modellering efter. Med hänsyn till slutsatsen att detta inte kan avgöras baserat endast på resultat från detta projekt blir

rekommendationen att PPB:s utvecklare tar med dessa resultat in i en summerande utvärdering tillsammans med data från andra industriella mätningar och då tillräckligt fog föreligger, korrigerar därefter PPB:s temperatureffekt på självuttorkningen.

Samtliga dessa rekommendationer har redan kommunicerats till PPB:s utvecklare för implementation/frisläppning i kommande versioner av verktyget.

## **Bilageförteckning**

1. D. Lindeskov & Jimmie Modin, *Uttorkning av betong*, examensarbete, Höskoleingenjörsprogrammet i Byggt teknik, Karlstads Universitet, VT19
2. HumiGuard® Concrete Drilled Hole RH Measurement Report 2019-08-21 14:48



# Uttorkning av betong

Simuleringar i programvaran PPB jämförs med fuktmätningar i betongprover med Bascement

---

Dehydration of concrete

Simulations in the software PPB are compared with moisture measurements in concrete samples with Portland fly ash cement

---

Daniel Lindeskov och Jimmie Modin

Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap

---

Högskoleingenjörsprogrammet i Byggt teknik

---

22,5 hp

---

Handledare: Asaad Almsaad

---

Examinator: Johan Vessby

---

Vt19

---

# Sammanfattning

Cementproduktion står idag för totalt 5 % av koldioxidutsläppen globalt, vilket t.ex. är mer än dubbelt så mycket som den globala flygindustrin. Nya cement- och betongrecept, med nya egenskaper, utvecklas med målet att minska klimatbelastningen. I produkten Bascement ersätts delar av klimatbelastande cementklinker med mineraltillsatsen flygaska, en restprodukt från andra industrier. Detta ska alltså leda till en minskad klimatbelastning. Betong med Bascement har dock orsakat förseningar och extra kostnader i produktion på grund av långa torktider som inte stämt överens med simuleringar i TorkaS 3.2, en programvara baserad på betong med Byggcement. TorkaS ska ersättas av programvaran Produktionsplanering Betong (PPB) som kan simulera uttorkning i betong med Bascement.

Målet med studien är att undersöka hur fuktsimuleringar i PPB skiljer sig jämfört med genomförda fuktmätningar i fyra betongprover med två olika vattencementtal, vct. Genom att förvara proverna i olika miljö är målet att experimentellt mäta hur omgivningen påverkar uttorkningen. Målet är vidare att visa skillnader mellan fuktsimuleringar med inbyggd klimatdata i PPB och med egna uppmätta klimatdata.

Resultaten från de experimentella undersökningarna visar att uttorkningen blev större i betongprover med vct 0,40 än för motsvarande prover med vct 0,55 efter 70 dagar. Prover som hade förvarats i en stabil inomhusmiljö hade torkat mer än prover som hade förvarats i en varierande utomhusmiljö, vilket i denna studie inte stämde överens med simuleringar i PPB.

Resultatet i denna studie visar att simuleringar i PPB tenderar att visa något större uttorkning jämfört med genomförda fuktmätningar. Denna överskattning blir större vid simuleringar med en varierande utomhusmiljö än med en stabil inomhusmiljö. Överskattningen blir större vid simuleringar med inbyggd klimatdata i PPB än med egna uppmätta klimatdata.

Vid justering av betongens maxtemperatur i PPB till verkligt uppmätt maxtemperatur påverkas fuktsimuleringarna positivt så att de närmar sig de experimentellt erhållna resultaten. Betong med låga vct påverkas mer av en sådan justering än höga vct.

Slutsatsen i denna studie är baserad på simuleringar och fuktmätningar i ett fåtal betongprover, vilka kan ha utsatts för störningar. Fler studier behövs för att validera reliabiliteten hos programvaran PPB. Val av härdningsmetod samt maxtemperatur under härdning kan påverka uttorkningen och simuleringar i PPB. Experimenten indikerar att simuleringar med PPB tenderar att avvika om betong med höga vct utsätts för vattentillskott kort efter gjutning. Korrekt maxtemperatur i PPB är viktigt för en mer verklig simulering av uttorkning i betong, särskilt vid låga vct. Simuleringar i PPB tenderar att bli mer korrekta med egna klimatdata än med inbyggd klimatdata.

# Abstract

Cement production currently accounts for a total of 5 % of carbon dioxide emissions globally, which for example is more than twice as much as the global aviation industry. New cement and concrete recipes, with new properties, are being developed with the aim of reducing the climate load. In the Portland fly ash cement, parts of climate-stressing cement clinkers are replaced with the mineral-added fly ash, a residual product from other industries. This should lead to a reduced climate impact. Concrete with Portland fly ash cement, however, has caused delays and extra costs in production due to long drying times that did not match with simulations in the software TorkaS 3.2, which is based on concrete with Portland-limestone cement. TorkaS will be replaced by the software Production Planning Concrete, PPB, which can simulate dehydration in concrete with Portland fly ash cement.

The aim of the study is to investigate how moisture simulations in PPB differ from executed moisture measurements in four concrete samples with two different w/c ratio. By storing the samples in different environments, the goal is to experimentally measure how the environment affects the dehydration. The goal is also to show differences between moisture simulations with the built-in climate data in PPB and with the own measured climate data.

The results from the experimental studies show that the dehydration became larger in concrete samples with w/c ratio 0.40 than for samples with w/c ratio 0.55 after 70 days. Samples that had been stored in a stable indoor environment had dried more than samples that had been stored in a varying outdoor environment, which in this study did not correspond to simulations in PPB.

The result of this study shows that simulations in PPB tend to show slightly greater dehydration than executed moisture measurements. This overestimation is greater in simulations with a varying outdoor environment than with a stable indoor environment. The overestimation is greater in simulations with the built-in climate data in PPB than with the own measured climate data.

When adjusting the maximum temperature of the concrete in PPB to the actual measured maximum temperature, the moisture simulations is positively affected so that they approach the experimentally obtained results. Concrete with low w/c ratio is more affected by such an adjustment than concrete with high w/c ratio.

The conclusion in this study is based on simulations and moisture measurements in a few concrete samples, which may have been exposed to disturbances. More studies are needed to validate the reliability of the PPB software. Choice of curing method and maximum temperature during curing can affect the drying and simulations in PPB. The experiments indicate that simulations with the PPB software tend to deviate if concrete with a high w/c ratio is exposed to water shortly after casting. Correct



maximum temperature in PPB is important for a more real simulation of dehydration in concrete, especially at high w/c ratio. Simulations in PPB tend to be more accurate when using own climate data than using the built-in climate data.

# Förord

Detta examensarbete är en del av Högscoleingenjörsprogrammet i byggt teknik på Karlstads universitet och utgör 22,5 HP. Idén fick vi från ett tidigare examensarbete där programvaran TorkaS 3.2 jämfördes med genomförda fuktmätningar i betong med Bascement. TorkaS 3.2, som baseras på betong med Byggcement, ska på sikt ersättas av programvaran Produktionsplanering Betong, PPB, som har tagits fram av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF. PPB, baseras på betong med Bascement samt ny fundamentaldata. Vi ville se hur väl PPB simulerar uttorkning i betongprover med Bascement och se hur programvaran simulerar uttorkning i en varierande miljö.

Under detta examensarbete har vi mött både med- och motgångar men lärt oss väldigt mycket om betong och dess egenskaper. Betong är ett mycket spännande material där det finns stor utvecklingspotential trots att det använts sedan länge. I ett samhälle som strävar efter en mer hållbar utveckling behöver även betong utvecklas. Nya, mer hållbara betongrecept framställs med nya egenskaper och kunskapen behöver hänga med i utvecklingen. Med detta examensarbete hoppas vi få vara en del av utvecklingen och öka kunskapen om egenskaperna hos mer hållbar betong och hur man kan hantera den. PPB har en stor potential att bidra till användandet av mer hållbar betong.

Vi vill rikta ett stort tack till Skanska Teknik, Skanska Hus Väst, Skanska Industrial Solutions, SBUF, Polygon Sverige AB och Karlstads universitet som bidragit med finansiering av detta examensarbete. Vi vill rikta ett stort tack till dessa personer som har varit till stor hjälp under arbetets gång med information, kunskap, feedback och inspiration:

**Marcin Stelmarczyk**, The Green Dragon Magic.

**Daniel Landén**, Skanska Hus Väst.

**Pete Metcalfe**, Skanska Industrial Solutions.

**Christer Dahlman**, Skanska Industrial Solutions.

**Hans Hedlund**, Skanska Teknik.

**Asaad Almssad**, Karlstads universitet.

**Kent Bergström**, Polygon Sverige AB.

**Niklas Johansson**, Cements Research.

# Innehåll

1	Inledning .....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte .....	2
1.3	Målsättning .....	2
1.4	Problemformuleringar .....	3
1.5	Avgränsningar .....	3
1.6	Målgrupp .....	3
2	Teori.....	4
2.1	Betongens uppbyggnad.....	4
2.1.1	Cement.....	4
2.1.2	Malfinhet hos cement.....	5
2.1.3	Mineraliska tillsatsmaterial .....	5
2.1.4	Cementtyper .....	6
2.1.5	Byggcement .....	7
2.1.6	Bascement .....	7
2.1.7	Flygaska .....	7
2.2	Fukt .....	8
2.2.1	Fuktkällor .....	8
2.2.2	Relativ fuktighet, RF .....	9
2.3	Uttorkning av betong .....	10
2.3.1	Självuttorkning.....	12
2.3.2	Fuktutbyte med omgivningen .....	15
2.3.3	Temperaturens inverkan på uttorkning .....	19
2.4	Produktionsplanering betong, PPB .....	19
2.4.1	Indata.....	21
2.4.2	Resultat.....	23
2.5	Fuktmätning i betong.....	24
2.5.1	HumiGuard .....	26
2.6	Loggning av omgivande temperatur och fukt.....	26
2.6.1	BetongDatorn 5.0 .....	26
2.6.2	Mitec AT40g .....	27

3	Metod.....	28
3.1	Formbyggnation.....	28
3.2	Gjutning.....	29
3.2.1	Förberedelser.....	29
3.2.2	Utförande.....	30
3.2.3	Förvaring av prover .....	30
3.2.4	Första tiden efter gjutning .....	31
3.3	Loggning av temperatur och fukt .....	32
3.3.1	Kalibrering av fuktgivare.....	33
3.3.2	Temperatur i betong.....	34
3.3.3	Temperatur och fukt i omgivning utomhus.....	35
3.3.4	Temperatur och fukt i omgivning inomhus .....	35
3.4	Fuktmätning i betong enligt RBK-metod .....	36
3.4.1	Förberedelser.....	37
3.4.2	Borrning av mätthål.....	37
3.4.3	Montering av givare .....	38
3.4.4	Avläsning.....	39
3.5	Simuleringar i programvaran PPB .....	40
4	Resultat och analys.....	42
4.1	Omgivande lufttemperaturer - indata till PPB .....	42
4.1.1	Temperatur inomhus .....	42
4.1.2	Temperatur utomhus .....	43
4.2	Temperatur i betongprover – simuleringar i PPB.....	44
4.2.1	Temperatur i betongprover inomhus - simulering i PPB .....	44
4.2.2	Temperatur i betongprover utomhus - simulering i PPB.....	45
4.3	Temperatur i betong - mätningar med BetongDatorn .....	46
4.3.1	Temperatur i betongprover inomhus.....	47
4.3.2	Temperatur i betongprover utomhus .....	48
4.4	Jämförelse: PPB och BetongDatorn - temperatur i betong .....	49
4.4.1	Inomhus.....	49
4.4.2	Utomhus .....	50
4.5	Kalibrering av fuktgivare .....	51
4.5.1	Vaisala HMP60 - utomhus.....	51

4.5.2	Vaisala HMP50 - inomhus .....	51
4.5.3	Kalibreringskurvor och formler för korrigerering av uppmätt RF .....	52
4.6	Omgivande relativa fuktigheter - Indata till PPB .....	53
4.6.1	Relativ fuktighet inomhus.....	53
4.6.2	Relativ fuktighet utomhus.....	54
4.7	Simuleringar i PPB – fukt i betong.....	55
4.7.1	Simulering i PPB – fukt i betongprover i inomhusmiljö .....	55
4.7.2	Simulering i PPB – fukt i betongprover i utomhusmiljö .....	56
4.7.3	Simuleringar i PPB med inbyggda klimatdata.....	57
4.8	Fuktmätning i betong enligt RBK-metod .....	58
4.8.1	Relativ fuktighet i betongprover i inomhusmiljö .....	59
4.8.2	Relativ fuktighet i betongprover i utomhusmiljö .....	59
5	Diskussion .....	60
5.1	Jämförelse: PPB och RBK-fuktmätningar.....	60
5.2	Utvärdering av resultat .....	61
5.2.1	Skillnaden mellan simuleringar i PPB och genomförda mätningar.....	61
5.2.2	PPB och dess reliabilitet.....	64
5.3	Utvärdering av metod .....	64
5.3.1	Kalibrering av mätutrustning .....	64
5.3.2	Formens påverkan.....	65
5.3.3	Ingen löpande fuktmätning under studien.....	65
5.3.4	Avstånd mellan borrhål mindre än 3 gånger borrhål djupet .....	66
5.4	Hållbar utveckling.....	66
5.5	Förslag på vidare studier.....	67
6	Slutsats .....	68
7	Referenser .....	69
8	Bilagor .....	B1.1
8.1	Bilaga 1 - Formbyggnation.....	B1.1
8.2	Bilaga 2 - Gjutningsprocessen .....	B2.1
8.3	Bilaga 3 - Recept vct 0,55.....	B3.1
8.4	Bilaga 4 - Recept vct 0,40 .....	B4.1
8.5	Bilaga 5 - Montering av fuktgivare i betong .....	B5.1
8.6	Bilaga 6 - Beräkning av formler för korrigerering av RF.....	B6.1

8.7	Bilaga 7 - RBK fuktmätning i betong .....	B7.1
-----	---	------

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Cementproduktion står idag för totalt 5 % av koldioxidutsläppen globalt, vilket är mer än dubbelt så mycket som den globala flygindustrin (ATAG 2018; Svensk byggtjänst 2017). Cement tillverkas genom att kalksten hettas upp i en ugn och omvandlas till cementklinker. När kalkstenen hettas upp avges koldioxid, och i ugnen avges även koldioxid från fossila bränslen. På 90-talet gav tillverkningen av 1 ton cement ungefär 1 ton CO<sub>2</sub> och med moderna ugnar kan man idag komma ned till ca 700 kg CO<sub>2</sub> per ton cement. Dagens samhälle ställer högre krav på miljöhållning vid betongtillverkning där koldioxidutsläppen skall minskas och energianvändningen skall minimeras. De senaste decennierna har forskning och utveckling av betongrecept skett progressivt med ett ökat fokus på minskade koldioxidutsläpp. Stort arbete har lagts på att ersätta delar av cementet med andra bindemedel. Flygaska, masugnsslagg och silikastoft är exempel på restprodukter från olika industrigrenar som används som bindemedel och ersätter Portlandcement i olika grad (Svensk byggtjänst 2017). Enligt cementtillverkaren Cementa (u.å.) har en LCA-analys visat att Bascement leder till minskade koldioxidemissioner med ca 8 % jämfört med Byggcement.

Bascement är ett högpresterande cement och uppfyller dagens krav på ett mer hållbart material. Bascement innehåller flygaska och har andra egenskaper än t.ex. ordinarie Portlandcement och Byggcement (Svensk byggtjänst 2017). I en artikel från Byggvärlden (Andersson & Ekman 2017) beskrivs betong med Bascement som svår att hantera eftersom uttorkningstiderna är svåra att förutse. Detta har lett till förseningar och kostsamma nödlösningar i flera fall. Fuktskador har uppkommit i en nybyggd skola när plastmattor lagts för tidigt vilket sedan orsakat ögonbesvär och irriterade luftvägar. Kombinationen av plastmattor på högpresterande betong, programvaran TorKaS och mätinstrumentens mätfelstolerans är några av orsakerna som tros ligga bakom problemen.

Modern betong leder ofta till problem med uttorkning under produktionsskedet. Enligt en enkät från ett SBUF-finansierat projekt riktad till personer med ansvar för husbyggnadsprojekt, uppgav ca 30 % av de tillfrågade att de upplevt problem med uttorkning av bjälklag eller bottenplattor under de senaste tre åren. Detta innebar regelbundna fördröjningar med risk för kostsamma förseningar i tidplan. Enkäten visade även att 29 % av de tillfrågade under senaste tre åren hade haft uttorkningsproblem i platsgjutna bjälklag eller bottenplattor som inte torkat ut i tid enligt prognosberäkning (ex. TorKaS) eller enligt erfarenhet (SBUF 2018b). Enligt en kartläggning av Boverket (2018) är golvsystem med limmad matta på betong ett av de vanligaste problemen i byggbranschen med förekommande fel, brister och skador. Tidsbrist, bristande kompetens och för lite resurser är de dominerande orsakerna till att fel, brister och skador uppstår enligt kartläggningen av Boverket (2018).

Uttorkning av betong kan ta mycket lång tid. I färsk betong finns ett överskott av fukt som avges under uttorkningen. Om en golvbeläggning appliceras för tidigt på fuktig betong finns det en påtaglig risk för att den kritiska fuktnivån överskrider i materialen enligt Åhs (2011). I överskottsfukten finns joner från cementet vilket gör fukten basisk och höjer pH-värdet. Golvlim är särskilt känsligt för detta och ett för högt fuktvärde kan leda till fuktskador och att limmet bryts ned (Åhs 2011). Skador på lim och material kan leda till sämre vidhäftningsegenskaper och skadliga emissioner som i sin tur misstänks kunna leda till huvudvärk, yrsel och andra astmaliknande besvär hos människor (Golvbranschen 2016).

Leverantörer av ytskikt, mattor och lim anger ofta kritiskt fuktillstånd mellan 85–90 % RF på deras produkter. Detta är tumregler som upprättades för ca 20 år sedan, och de flesta ingående material i en golvkonstruktion har under denna tid bytts ut eller fått nya egenskaper vilket påverkar golvsystemets funktion. Modern betong med mineraliska tillsatsmaterial i olika grad har andra egenskaper än tidigare. Den moderna betongen är tätare än traditionell betong med ordinarie Portlandcement, vilket innebär att uttorkningskrav på 85–90 % RF inte längre fyller samma syfte som tidigare. Svenska byggbranschens utvecklingsfond, SBUF, vill därför att byggbranschen ska arbeta för att ta fram specifika beräkningar för att kunna bedöma fuktrisker där alla ingående material i ett golvsystem samspelar med varandra i olika driftklimat (SBUF 2018a).

Produktionsplanering betong, PPB, är en relativt ny programvara framtagen av SBUF som ger prognoser på betongens utveckling. Med PPB kan mognad, värmeutveckling och hållfasthetsutvecklingen följas för betong med de flesta cementsorterna i Sverige och underlätta planering för t.ex. platschefer i byggprojekt (SBUF u.å.). PPB utvecklas kontinuerligt och SBUF har flera pågående projekt för att förbättra programmet. I december 2018 släpptes en modul i programmet som kan beräkna uttorkning i betong med Basement. PPB är ett kostnadsfritt program och tanken är att fuktmodulen i PPB ska ersätta det tidigare verktyget TorkaS 3.2.

## 1.2 Syfte

Studiens syfte är att jämföra simuleringar av uttorkning i programvaran PPB mot genomförda fuktmätningar i betongprover med Basement som förvaras i olika miljö för att utvärdera programvarans reliabilitet.

## 1.3 Målsättning

Målet är att undersöka hur fuktsimuleringar i PPB skiljer sig mot genomförda fuktmätningar i fyra betongprover med två olika vattencementtal, vct. Genom att förvara proverna i olika miljö är målet att experimentellt mäta hur omgivningen påverkar uttorkningen. Målet är vidare att visa skillnader mellan fuktsimuleringar med inbyggd klimatdata i PPB och med egna uppmätta klimatdata.



## 1.4 Problemformuleringar

Programvaran PPB simulerar uttorkning i betong med Bascement i en ny modul.

- Hur väl kan PPB simulera uttorkning i betong med vct 0,55 och vct 0,40 i en varierande miljö utomhus jämfört med en kontrollerad miljö inomhus?
- Hur påverkas uttorkningen i betong av omgivande temperatur och relativ fuktighet?
- Hur skiljer sig simuleringar med inbyggda klimatdata i PPB mot simuleringar med egna uppmätta klimatdata?

## 1.5 Avgränsningar

Gjutningarna kommer att få torka i en miljö där temperatur och relativ fuktighet styrs av klimatet utomhus, men de kommer inte utsättas för någon nederbörd eller vind. Gjutningsproverna avgränsas till betong med Bascement. Vattencementtalet avgränsas till 0,40 och 0,55 för att begränsa antalet provkroppar och samtidigt påvisa skillnader mellan höga och låga vct. Proverna utformas för att efterlikna en platta på mark och gjuts på pallar med isolering och diffusionstät plast. Detta innebär att proverna begränsas till enkelsidig uttorkning. Mät djupet på fuktmätningarna avgränsas till 40, 75 och 110 mm i de 150 mm tjocka betongproverna för att få en fuktprofil.

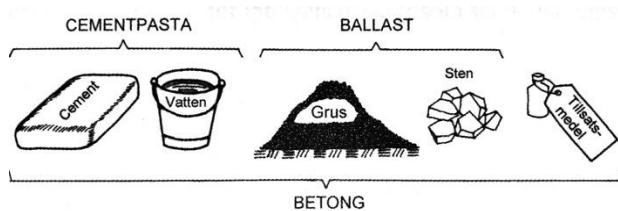
## 1.6 Målgrupp

Studien vänder sig till dem som utvecklar, planerar eller utför betonggjutningar, som specialister inom fukt och betong, projektörer, produktionschefer, arbetsledare och leverantörer. Studien vänder sig även till universitet och högskolor för vidare studier.

## 2 Teori

### 2.1 Betongens uppbyggnad

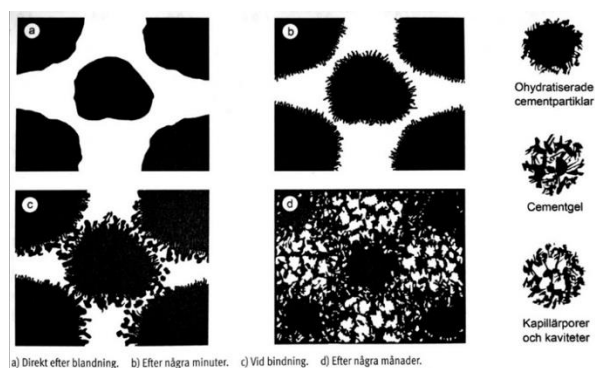
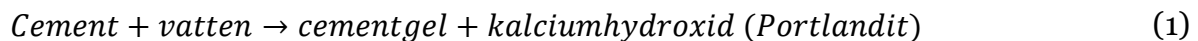
Betong består av cement, vatten, sand, grus, sten och kan även bestå av olika tillsatsmedel för att ge betongen önskade egenskaper vid bearbetning eller vid färdig produkt (Burström 2007). Se Figur 1. Cementet kan till viss del ersättas med andra tillsatsmaterial som till exempel flygaska, granulerad masugnsslagg, silikastoft eller kalkstensfiller (Svensk byggtjänst 2017).



Figur 1. Betongens uppbyggnad (Burström 2007).

#### 2.1.1 Cement

Sammansättningen av cementet påverkar allt från betongens hållfasthet, beständighet och värmeutveckling till betongens fuktegenskaper. Cement, vilket är ett hydrauliskt bindemedel, bildar tillsammans med vatten en hård massa och reaktionen kallas för hydratation. Genom denna reaktion bildas en s.k. cementgel, ett poröst nätverk av kalciumsilikathydrater (CSH) och kalciumhydroxid. När hydratationen är helt färdig kallas produkten för CSH-gel (Svensk byggtjänst 2017). Se Figur 2. Reaktionen kan beskrivas på följande sätt (Svensk byggtjänst 2017):



Figur 2. Strukturutveckling hos cementpasta (Svensk byggtjänst 2017).

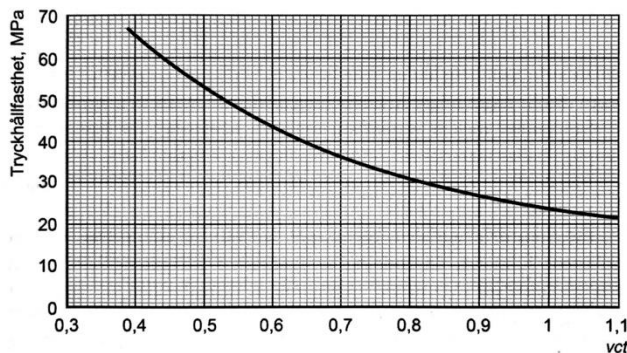
När vatten och cement blandas bildas en så kallad cementpasta och är det som binder samman sand och stenkorn till en homogen massa. Egenskaperna hos cementpasta och den färdiga betongen bestäms till stor del av vattencementtalet, förkortat vct, vilket är proportionen mellan vatten och cement. Se Formel 2. Förhållandet mellan

vattenhalt och bindemedelhalt kallas för ekvivalent vattencementtal och tar hänsyn till tillsatsmaterial och dess inverkan med en s.k. effektivitetsfaktor (Svensk byggtjänst 2017). Se Formel 3.

$$vct = \frac{W}{C} \quad (2)$$

$$vct_{ekv} = \frac{W}{C + k * D} \quad (3)$$

W är mängden vatten och C är mängden cement. När tillsatsmaterial som t.ex. flygaska finns i cementet används D för mängden tillsatsmaterial och k är en effektivitetsfaktor som uttrycker hur mycket portlandcement som kan ersättas av tillsatsmaterialet vid oförändrade egenskaper (Svensk byggtjänst 2017). Exponeringsklass och önskad tryckhållfasthet styr valet av vct. Ett högt vct ger en lägre tryckhållfasthet och ett lågt vct ger en högre (Svensk byggtjänst 2017). Se Figur 3.



Figur 3. Förhållandet mellan vattencementtal och tryckhållfasthet (Svensk byggtjänst 2017)

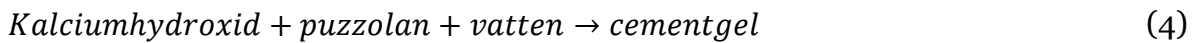
### 2.1.2 Malfinhet hos cement

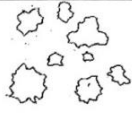
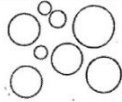

Cementens finhet påverkar reaktionen mellan cementkornen och vattnet. Malfinhet hos cement beskrivs med specifik yta [ $m^2/kg$ ] och ju mer finmald cementen blir, desto större specifik yta fås. Stor specifik yta hos cement innebär en större yta med kontakt mot vatten. Detta leder till en ökad hastighet på reaktionen som uppstår. Den specifika ytan för de flesta cement är normalt mellan 250 och 600  $m^2/kg$  och den specifika ytan hos flygaska är normalt 300 till 500  $m^2/kg$  (Svensk byggtjänst 2017). Enligt Cementa (u.å.) är den specifika ytan för Bascement ca 450  $m^2/kg$ .

### 2.1.3 Mineraliska tillsatsmaterial

Ofta ersätts en del av cementet med mineraliska tillsatsmaterial som t.ex. flygaska och silikastoft som är s.k. puzzolana material. Puzzolana material reagerar med löslig kalciumhydroxid i vatten. Reaktiviteten hos puzzolana material beror bland annat på glashalten, andelen reaktiva oxider samt finheten, baserat på specifik yta eller kornstorlek. Se Figur 4. Flygaska reagerar långsamt och det tar normalt ca 1 till 3 dygn

innan reaktionen av det puzzolana materialet tar fart. När det puzzolana materialet har reagerat bildas en produkt som liknar reaktionsprodukten från portlandcement, en cementgel. Reaktionen kan beskrivas på följande sätt (Svensk byggtjänst 2017):



<u>Hydrauliskt (reagerar spontan med vatten)</u>	
Portlandcement	 1-100 µm
<u>Puzzolanskt (måste aktiveras)</u>	
Flygaska	 1-100 µm
Silikastoft	 0,01-1 µm

Figur 4. Exempel på hydrauliska och puzzolana material och dess storlek (Sveriges byggindustrier 2016).

Puzzolanreaktionen behöver kalciumhydroxid och vatten. Detta leder i sin tur till en naturligt försenad reaktion eftersom portlandcementet måste reagera med vattnet innan det puzzolana materialet kan reagera med kalciumhydroxid och vatten (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

#### 2.1.4 Cementtyper

I Sverige finns främst tre typer av cement och de är alla baserade på portlandklinker. Portlandklinker tillverkas framförallt av kalksten, och vid tillverkning av Portlandcement kan bl.a. lera, flygaska, skiffer och sand tillsättas (Svensk byggtjänst 2017). Egenskaperna hos cementtyperna är i Sverige reglerade enligt Standard SS-EN-197-1:2011. Huvudtyperna är (Svensk byggtjänst 2017):

- CEM I - Portlandcement. Andelen portlandklinker är 95–100 %.
- CEM II - Sammansatta Portlandcement. Andelen portlandklinker är minst 65 %. Andra tillsatser kan vara till exempel masugnsslagg, flygaska eller kalksten.
- CEM III - Slaggcement. Klinkerandelen är mindre än 64 %. Huvudkomponenterna är portlandklinker och masugnsslagg. Klinkerandelen kan vara så låg som 5 %.

### 2.1.5 Byggcement

Byggcement är ett Portlandkalkstencement och betecknas CEM II/A-LL 42,5 R enligt SS-EN 197-1:2011. Cementet får enligt standarden innehålla 80–94 % portlandklinker och 6–20 % kalksten. Mindre beståndsdelar kan uppgå till maximalt 5 %. Kalksten fungerar huvudsakligen som finkornig fyller och leder till en långsammare hållfasthetsutveckling (Svensk byggtjänst 2017).

### 2.1.6 Bascement

Bascement är ett Portlandflygaskecement och betecknas CEM II/A-V 52,5 N enligt SS-EN 197-1:2011 och får enligt standarden innehålla 80–94 % portlandklinker och 6–20 % flygaska. Mindre beståndsdelar, t.ex. kalksten, kan uppgå till maximalt 5 %. Enligt tillverkarens tekniska datablad (Cementa u.å.) sammansätts Bascement normalt av minst 80 % klinker, ca 16 % flygaska och 4 % kalksten. PPB baseras på Bascement med 14,4 % flygaska och materialdata från mätningar utförda vid avdelningen för byggnadsmaterial vid Linköping Tekniska högskola under 2016–2018 enligt Stelmarczyk m.fl. (2019a). I detta arbete användes en Bascement som mest sannolikt innehöll ca 9,5 % flygaska enligt Niklas Johansson<sup>1</sup> på Cementa. Andelen flygaska var enligt honom mellan 8 % och 10 % för tillverkningsperioden av aktuellt Bascement.

### 2.1.7 Flygaska

Flygaska är en restprodukt som kommer från pulvereldade kolkraftverk och i Sverige används askan från stenkol. Flygaska består till största del av aluminiumsilikatglas och innehållet varierar beroende på ursprung. Flygaska har puzzolana egenskaper och består huvudsakligen av sfäriska, glasiga (amorfa) partiklar och olika former av kristallina partiklar. Flygaska visar stor variation sinsemellan, och partikelstorleken, glashalten, restkolhalten, finheten och den specifika ytan är faktorer som styr flygaskans egenskaper och reaktivitet. De runda partiklarna i flygaska har en stor effekt på dess arbetbarhet. Vid oförändrad vattenhalt leder en ökad andel flygaska till ökad arbetbarhet men kvaliteten spelar roll. Porös flygaska eller hög restkolhalt kan leda till minskad arbetbarhet (Svensk byggtjänst 2017).

Flygaskans finhet påverkar värmeutvecklingen vid inblandning i betong. I en studie av Moghaddam m.fl. (2019) jämfördes tre olika finheter hos flygaska för att se hur värmeutvecklingen i den färska betongen påverkades. I studien jämfördes inblandning av flygaska med de specifika ytorna 302, 368 och 495 m<sup>2</sup>/kg mot betong med rent portlandcement. Studien visade att en ökad finhet hos flygaska gav en ökad värmeutveckling i betongproverna och att värmeutvecklingen reducerades vid en ökad andel flygaska i cementet. Studien visade även att inblandning av flygaska med större

---

<sup>1</sup> Niklas Johansson, *gruppchef vid Cementa Research i Slite, personlig kommunikation 2019-03-27.*

finhet leder till en ökad förbrukning av kalciumhydroxid efter 28 dagar, där de första 7 dagarna knappt påverkades.

Flygaska i cement leder till ett minskat vattenbehov med 5–15 % där effekten är störst vid höga vct. Ett minskat vattenbehov innebär att betongen blir mer arbetbar och får en förbättrad konsistens. Ökad finhet hos flygaskan leder till ökad vattenreduktion. Hög restkolhalt och kantiga korn kan dock leda till motsatt effekt där vattenbehovet ökar. Tillstyvnadstiden förlängs för betong med flygaska och effekten kan förstärkas om vattenreducerande tillsatsmedel tillsätts. Dock minskar vattenbehovet och därmed även behovet av flyttillsatsmedel (Svensk byggtjänst 2017).

När flygaska ersätter en viss mängd portlandklinker leder detta till en långsammare hållfasthetstillväxt i tidig ålder jämfört med ordinarie Portlandcement (Cementa u.å.). För att påskynda hållfasttillväxten mals cementet längre tid så att cementkornen blir mindre, vilket ger en accelererande effekt enligt Niklas Johansson på Cementa. Enligt honom anpassas malningen efter andel flygaska. Ju mer flygaska cementet innehåller, desto mer finmals cementet för att anpassa hållfasthetutvecklingen. Enligt Cementa (u.å.) har målet vid utvecklandet av Bascement varit att efterlikna Byggcementets egenskaper när det gäller mekaniska egenskaper och beständighetsegenskaper som cementet ger betongen.

## 2.2 Fukt

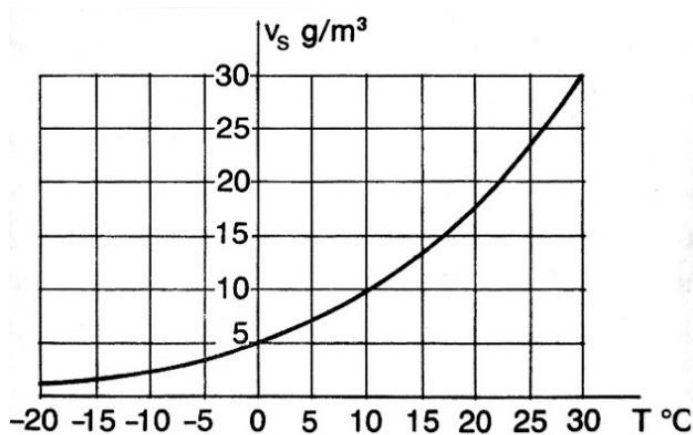
### 2.2.1 Fuktkällor

I atmosfären förekommer vatten i fast form som is, flytande form som vatten och gasform som vattenånga. Luftfuktighet avser vattenånga i luft. I luften finns ca 0–4 % vattenånga som kommer från avdunstning från hav och land (NE u.å.-b). Fukt förekommer naturligt i miljön och i olika material, och betong kan utsättas för många olika fuktkällor. De vanligaste fuktkällorna är enligt Arfvidsson m.fl. (2017):

- Nederbörd
- Luftfukt inomhus
- Luftfukt utomhus
- Markfukt
- Byggfukt
- Limfukt
- Läckage
- Vattenspolning
- Våtstädning

### 2.2.2 Relativ fuktighet, RF

Densitet kan beskrivas som hur tungt något är i en viss volym (massa/volym). Vattenånga är vattenpartiklar i luft och vattenångans densitet i fuktig luft uttrycks som ånghalt,  $v$ . Ånghalten kan beskrivas som massa vatten per volym luft [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Mättnadsånghalten är den maximala mängd vattenånga som luft kan bära och är en funktion av temperaturen. Ju högre temperatur, desto mer fukt klarar luften att bära (Arfvidsson m.fl. 2017). Se Figur 5.



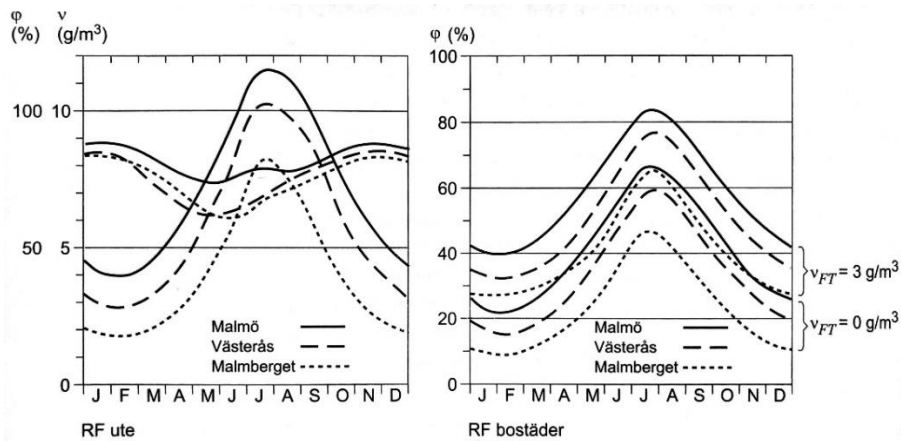
Figur 5. Mättnadsånghalten som funktion av temperaturen (Arfvidsson m.fl. 2017).

Kvoten mellan ånghalten och mättnadsånghalten kallas för relativ fuktighet, RF, och ibland relativ ånghalt. Ånghalten,  $v$ , kan aldrig överstiga mättnadsånghalten,  $v_s$ , och de kan som mest bli lika stora. Blir mättnadsånghalten lika stor som ånghalten blir den relativa fuktigheten 100 % och kondensation uppstår. Kondensation innebär att vattenånga övergår till vätskeform. Eftersom mättnadsånghalten,  $v_s$ , är temperaturstyrd betyder det att om temperaturen sjunker så stiger den relativa fuktigheten om ånghalten förblir oförändrad. Om temperaturen sjunker tillräckligt uppstår kondensation. Formeln för RF uttrycks (Arfvidsson m.fl. 2017):

$$RF = \frac{v}{v_s} \quad (5)$$

Den relativa fuktigheten varierar inomhus och utomhus under ett år. Variationen beror på årstid och ort. Den relativa fuktigheten inomhus styrs av uteklimat, värme- och fuktlaster samt av byggnadens ventilation. Utomhus varierar ånghalten med årstiderna och det skiljer sig från ort till ort (Arfvidsson m.fl. 2017). Figur 6 visar hur den relativa fuktigheten utomhus och inomhus skiljer sig under vinter och sommar. Figuren visar att ånghalten utomhus är låg på vintern och att den relativa fuktigheten är hög. Under sommaren ökar ånghalten och den relativa fuktigheten sjunker något. I samma figur visas hur den relativa fuktigheten styrs av ånghalten utomhus. Detta beror

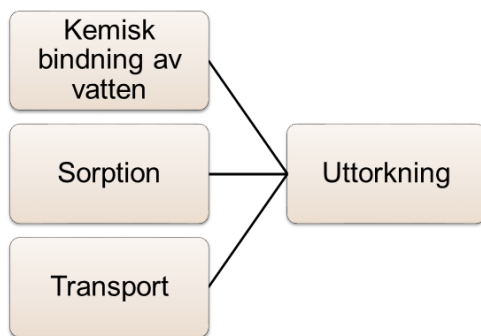
på att temperaturen inomhus oftast är konstant, d.v.s. mätnadsånghalten förändras inte.



Figur 6. Variation av relativ fuktighet och ånghalt i Malmö, Västerås och Malmberget under ett år. Utomhus t.v. och inomhus t.h. (Arfvidsson m.fl. 2017).

## 2.3 Uttorkning av betong

Hydratation är den process där vatten och bindemedel reagerar och övergår från flytande till fast form. Cementet och vattnet binds kemiskt under hydratationen vilket leder till att en porstruktur uppstår i betongen. I porstrukturen binds sedan vattnet fysikaliskt och detta kallas för sorption. I porstrukturen transporteras kvarvarande vatten. Dessa är de huvudsakliga områdena som påverkar uttorkningsprocessen i betong (Stelmarczyk m.fl. 2017a). Se Figur 7.

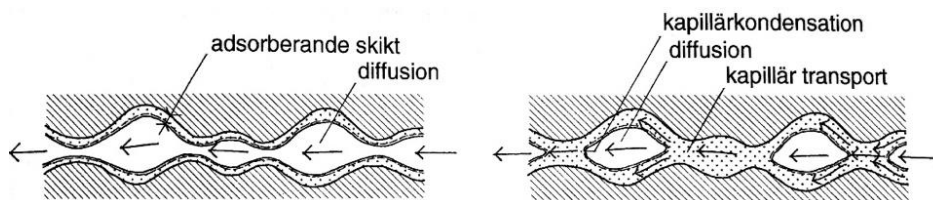


Figur 7. Områden som påverkar uttorkningsprocessen (Stelmarczyk m.fl. 2017a).

Under hydratationsprocessen bildas en porstruktur där sorption och transport av fukt sker. Se Figur 8. I porsystemet binds fukt till dess väggar och håligheter och detta kallas för sorption. Denna bindning sker genom mekanismerna adsorption och kapillärkondensation som beskrivs närmare i kap. 2.3.1. Ånga och vatten förflyttas i porsystemet genom ångdiffusion i de luftfyllda porerna och genom kapillärugning i de vattenfyllda. Processen kallas för transport. Porstorleksfördelningen och mängden



fukt i porsystemet samverkar på ett komplext sätt och temperaturen är en viktig faktor som påverkar transporten (Stelmarczyk m.fl. 2017a).



Figur 8. Sorption och transport i porsystem (Arfvidsson m.fl. 2017)

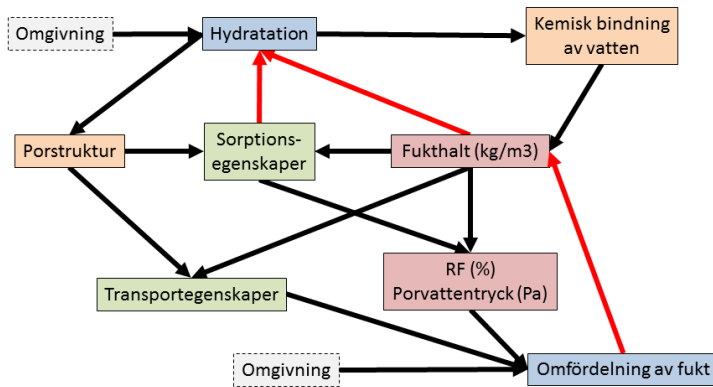
Vattencementtalet, vct, har stor påverkan på uttorkningen i betong. Vattencementtalet och cementshalten påverkar mängden byggfukt som skall torkas ut. Figur 9 beskriver hur mycket byggfukt som måste torka för att nå 90 % RF för olika vct. Betongens vct påverkar även uttorkningshastigheten där betong med låga vct har ett större motstånd, dvs långsammare fukttransport. Betong med höga vct ger snabbare fukttransport men en större mängd byggfukt vilket innebär att torktiden blir längre (Nilsson 2012).

vct: 0.80	0.65	0.5	0.35
58	30	10	0
80	93	98	100
40	57	71	80

Fysikaliskt bundet vatten för att få RF < 90 %  
 Kemiskt bundet vatten

Figur 9. Den mängd byggfukt som behöver torkas för att nå 90 % RF visas i vita rutor, för betong med olika vct och 180 l/m<sup>3</sup> blandningsvatten (Nilsson 2012).

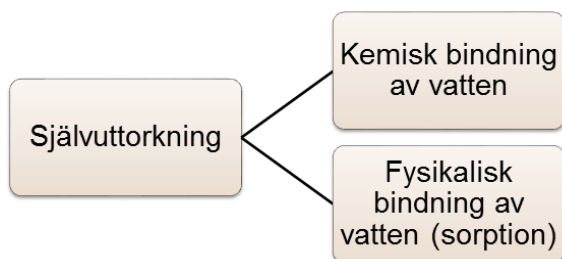
Uttorkning av betong med cement som innehåller flygaska är mer komplext än betong med ordinarie Portlandcement. Som tidigare beskrivits sker reaktionen av mineraltillsatsen flygaska med en fördröjning. Flygaska binder mindre vatten än portlandklinker per kilo bindemedel och detta leder till att hydratationsprocessen lämnar mer vatten kvar i betongen, vilket påverkar uttorkningen (Stelmarczyk m.fl. 2017a). I Figur 10 visar Stelmarczyk m.fl. (2017a) en förenklad bild av vilka samband och beroenden som finns i den mycket komplexa uttorkningsprocessen.



Figur 10. Förenklad bild av uttorkningsprocessen i betong (Stelmarczyk m.fl. 2017a).

### 2.3.1 Självuttorkning

Självuttorkning innefattar kemisk bindning av cement och vatten, samt fysikalisk bindning av vatten (sorption) i betong. Se Figur 11. Den kemiska bindningen av vatten är det som kallas för hydrataation, vilket har stor betydelse för uttorkningen. Fysikalisk bindning av vatten i porstrukturen sker till följd av hydrataation (Stelmarczyk m.fl. 2017b).



Figur 11. Självuttorkning (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

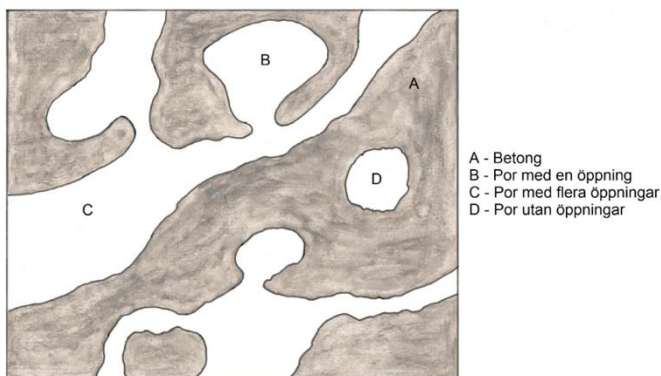
Värme utvecklas när cement löses upp och reagerar med vatten. Kemiska reaktioner uppstår mellan vattnet och cementet, och leder till betongens fasta struktur. Portlandcement innehåller olika bindemedel i form av kalciumsilikaterna alit och belit samt kalciumaluminat och kalciumferroaluminat som reagerar olika snabbt. Kalciumaluminat reagerar fortare än de andra och behöver ibland regleras med hjälp av gips för att undvika tidig sättning av betongen (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

När puzzolana mineraliska tillsatsmaterial som flygaska tillsätts som bindemedel i cementblandningen blir det mer komplicerat. Att det puzzolana materialet behöver kalciumhydroxid (portlandit) löst i vatten för att kunna reagera leder till en försenad reaktion, eftersom portlandcementet måste reagera före det puzzolana materialet. Detta får effekter på cementets reaktionshastighet. En annan viktig faktor är temperaturen eftersom de kemiska reaktionerna sker långsammare vid låg temperatur. Detta leder till att betong hårdnar långsammare. Flygaska i cement är

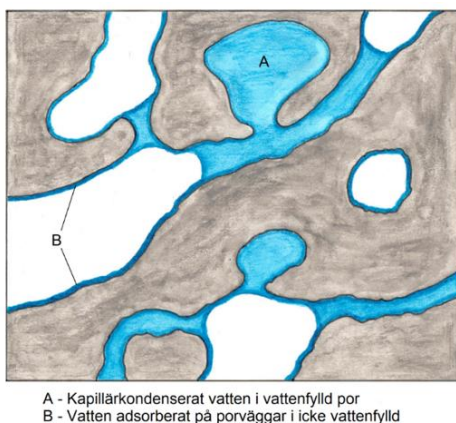
känslig för temperaturer och reagerar mycket långsamt eftersom det även tar längre tid för kalciumhydroxid att bildas i reaktionen mellan vatten och portlandklinker i låga temperaturer (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

Vattnet som binds med cementet under hydratationen kallas för kemiskt bundet vatten. En del av vattnet binds kemiskt med portlandklinkern och frisläpps sedan för att bindas på nytt med kalciumhydroxid och flygaska. Flygaska binder vatten i mindre omfattning än klinker, ca 46 % mindre än ordinarie Portlandcement (CEM I). Detta innebär att när flygaska ersätter klinker i ett cement kommer det leda till att mindre vatten binds kemiskt och att mer vatten finns kvar i betongen (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

Fysikalisk bindning av vatten är ett fenomen som kallas för sorption. Mängden fysikaliskt bundet vatten uttrycks ofta som fukthalt (kg vatten/kg cement eller kg vatten/m<sup>3</sup> betong). Under hydratationen sker en volymförändring i betongen. En krympning sker och lämnar håligheter i betongen. Håligheterna bildar ett porsystem med både stängda och öppna porer. Se Figur 12. I porsystemet kan transport och inlagring av vatten ske (Stelmarczyk m.fl. 2017b). Se Figur 13.

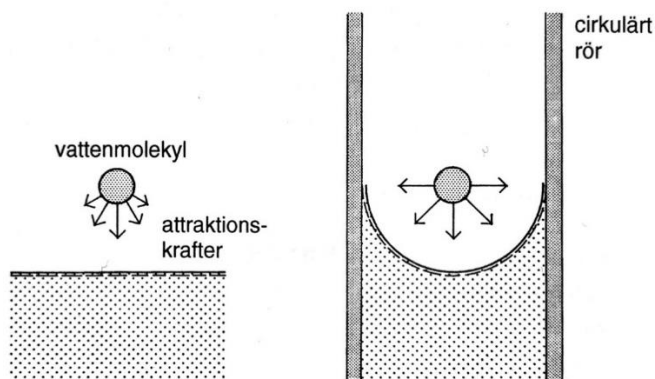


Figur 12. Porsystem utan vatten (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

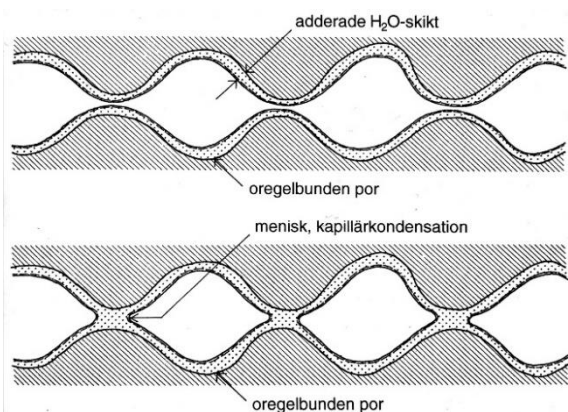


Figur 13. Porsystem med vatten (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

Fysikalisk bindning av vatten domineras av två mekanismer och det är adsorption och kapillärkondensation. Adsorption sker genom så kallade van der Waals-krafter. De svaga attraktionskrafterna får vattenmolekyler att binda till betongens ytor där drivkraften är materialets specifika yta och omgivningens relativa fuktighet. Se Figur 14. Ett material som betong har mycket specifik yta kan därför binda mycket vatten genom adsorption. Vattnet binds till betongens yta i porsystemet och bildar tunna skikt (Arfvidsson m.fl. 2017). Se Figur 15.



Figur 14. Adsorption t.v. och kapillärkondensation t.h. (Arfvidsson m.fl. 2017).

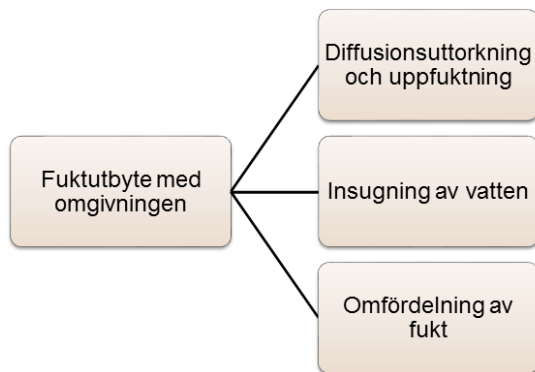


Figur 15. Kapillärkondensation i ett porsystem (Arfvidsson m.fl. 2017).

Genom kapillära krafter, vilket är attraktionskrafter mellan vattenmolekyler och material, bildas konkava menisker i betongens porsystem. Se Figur 15. Till sådana menisker dras vattenmolekyler starkare än vid plana ytor. Detta innebär i praktiken att vattenmolekyler kan kondensera vid lägre relativa fuktigheter än 100 %. Se Figur 14. Denna s.k. kapillärkondensation kan uppstå genom ett samband mellan porradien och den relativa fuktigheten. Generellt kan man säga att ju mindre porradien, desto lägre relativ fuktighet krävs för att kapillärkondensation ska kunna uppstå (Arfvidsson m.fl. 2017).

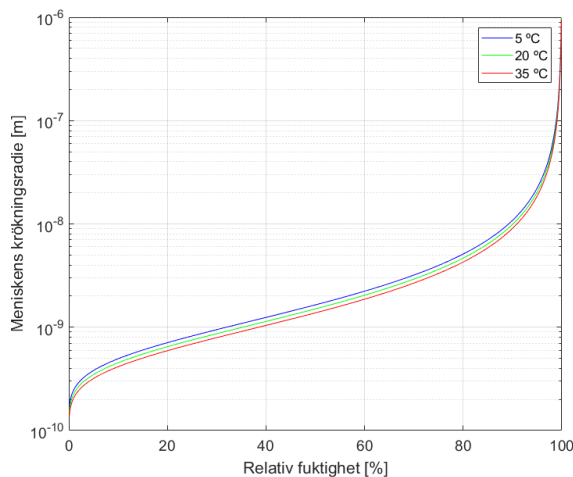
### 2.3.2 Fuktutbyte med omgivningen

Fuktutbyte med omgivningen innefattar diffusionsuttorkning och uppfuktning (absorption), insugning av vatten och omfördelning av fukt i betong (Stelmarczyk m.fl. 2017c). Se Figur 16.



Figur 16. Fuktutbyte med omgivningen (Stelmarczyk m.fl. 2017c).

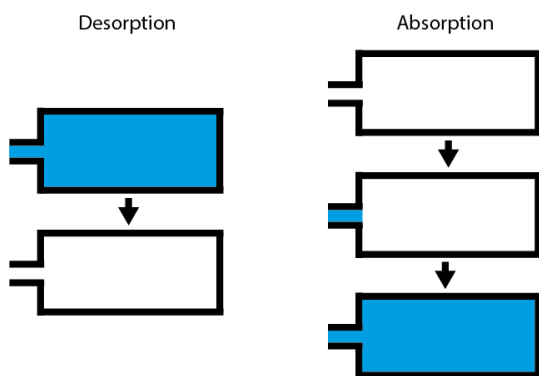
Hysteres i porsystemet är en process där en por fylls på och töms vid olika RF. Enligt Stelmarczyk m.fl. (2017c) råder termodynamisk jämvikt i porerna mellan vattnets vätskefas och ångfas och styr när kapillärkondensation uppstår i en por med en viss storlek. Fukt som har kapillärkondenserat i porerna kan dra i en gränsyta mot vattenånga och detta kallas för kapillärtryck. Kapillärtrycket är negativt eftersom det drar och en liten por har större tryck än en stor por. Kraftjämvikt råder vid gränsytan mot vattenånga och därför blir kapillärtrycket kopplat till den relativa fuktigheten. Detta innebär att större porer kan fyllas vid högre RF (Stelmarczyk 2017c). Se Figur 17.



Figur 17. Förhållandet mellan relativ fuktighet och krökningsradie hos en vattenmenisk (Stelmarczyk 2017c).

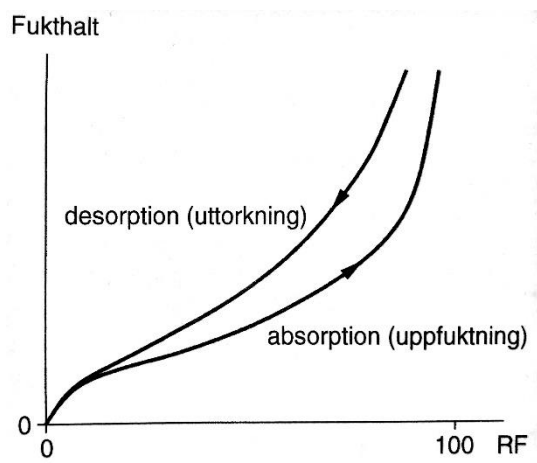
Desorption betyder att vattenmolekylerna som bundits fysikaliskt avlägsnas t.ex. genom temperaturhöjning. De kan även avlägsnas genom en förbiströmmande vätska

eller gas. (NE u.å.-a). Absorption är en process som inte skall förväxlas med adsorption. Absorption kan enklast beskrivas som uppfuktning. I Figur 18 beskrivs processen desorption och absorption illustrativt av Stelmarczyk m.fl. (2017c). Vid desorption befinner sig gränssytan mellan vatten och vattenånga i flaskhalsen och avgränsas i form av en menisk. Det är flaskhalsens storlek som styr när den relativa fuktigheten är låg nog för att poren ska tömmas vid desorption och storleken på poren har ingen betydelse. Vid absorption bildas en vattenmenisk först i flaskhalsen. När den relativa fuktigheten är tillräckligt hög uppstår kapillärkondensation i porens huvudkropp som fylls med vatten. Det är alltså flaskhalsens radie som styr när poren töms (desorption) och porens huvudkropp som styr när poren fylls på (absorption). Halsen är smalare än kroppen och detta betyder att porerna töms vid lägre RF än de fylls på. Hysteres är det glapp som uppstår i systemet vid förändring i relativ fuktighet (Stelmarczyk 2017c).

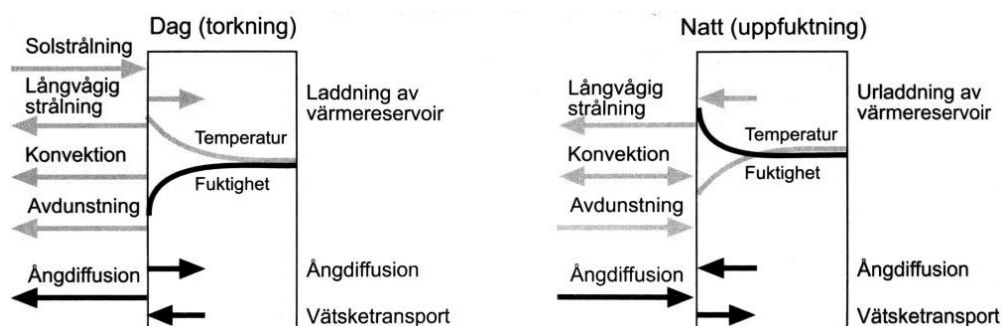


Figur 18. Desorption och absorption, steg för steg (Stelmarczyk 2017c).

Hysteres innebär i praktiken att betong som torkats från 100 % till 90 % RF innehåller en högre fukthalt jämfört med en betong som fuktats upp från 80 % RF till 90 % RF (Stelmarczyk 2017c). Detta kan beskrivas med en s.k. sorptionskurva. Se Figur 19. Fukthalten i ett material strävar efter att komma i jämvikt med omgivande fukthalt. I verkliga klimat varierar fuktigheten, och betong kan befinna sig i både uttorkning och under uppfuktning. Det är flera processer som styr uttorkning och uppfuktning över tid. I Figur 20 beskrivs några av de processer som påverkar uttorkning och uppfuktning. Effekter som detta kan skapa osäkerheter vid fältmätning av fuktigheter i betong. Detta innebär att man bör känna till om betongen har befunnit sig i uppfuktning eller uttorkning för att kunna öka säkerheten när man mäter fuktigheter i betong (Arfvidsson m.fl. 2017).



Figur 19. Sorptionskurva (Arfvidsson m.fl. 2017).



Figur 20. Processer som påverkar uttorkning och uppfuktning över tid (Arfvidsson m.fl. 2017).

Desorptionskurvor visar sambandet mellan mängden fysikaliskt bundet vatten i porsystemet och den relativa fuktigheten i luften i porsystemet. Desorptionskurvor för betong med Bascement (CEM II) har visat sig vara annorlunda mot betong med ordinarie portlandcement (CEM I). Desorption hos betong med Bascement har visat sig vara särskilt annorlunda vid högre RF och beror på fördelningen av storleken bland porerna. I betong med Bascement finns brist på porer i det övre hygroskopiska området. Det betyder att det finns färre antal porer som töms vid uttorkning, särskilt i det relevanta fuktområdet 85–95 % RF. Detta innebär att vattnet stannar i betongen vilket betyder att självuttorkning hos betong med Bascement kan förväntas vara sämre än betong med ordinarie Portlandcement. Betong med Bascement har genom desorptionskurvor visat sig vara 3 gånger känsligare för påverkan från fuktsensorer och detta kan ställa till problem vid mätning av den relativa fuktigheten (Stelmarczyk m.fl. 2017b).

Enligt Rådet för byggkompetens, RBK (2019), som utför fuktmätningar i betong, kan hysteres uppstå i material och i mätutrustningens givare. Fel i mätningar är oftast större på grund av hysteres i materialet än i givarna. Enligt RBK:s (2019) manual om fuktmätning i betong skall temperaturvariationer under mätning därför undvikas.

Temperaturvariationer kan undvikas genom att välja lämplig plats för borrhål, skydda givarna och anpassa mätperioden. Temperaturskillnaden mellan RF-sensor och betong får heller inte förekomma.

Diffusionsuttorkning är uttorkning mot torrare luft. Vid diffusionsuttorkning måste hänsyn tas till hysteres om betong inte befinner sig i konstant temperatur med lägre omgivande RF än betongen där endast desorption sker. När omgivande miljö som temperatur och relativ fuktighet varierar kring betongen måste även hänsyn tas till absorption. Modellering av hysteres i betong har visat att själva fukthalten i betong (OPC CEM I) inte ökar så mycket när den relativa fuktigheten ökar i omgivande luft, men att den relativa fuktigheten i betongen däremot ökar desto mer (Stelmarczyk 2017c).

Transport av fukt sker främst genom ångdiffusion och tryckdriven transport. Ångdiffusion baserar sig på att skillnader i koncentration av ånghalt jämnas ut från en punkt till en annan. I betong sker detta mycket begränsat. Den mest dominerande transporten i betong är tryckdriven transport av vatten. Tryckskillnader i porsystemet uppkommer på grund av olika relativa fuktigheter i ändpunkterna i en vattenfylld por. Detta kallas för porvattentryck och leder till ett flöde av vatten. Tryckskillnaden mellan kapillärporer och omgivande luft är negativ och om ytan på betong täcks med vatten kommer det sugas in i betongen. I tomma porer sker ångdiffusion med ett mycket litet flöde och om en por är fylld med vatten ökar transportförmågan. Störst flöde har helt vattenfyllda porer och ju större porer desto större flöden kan uppstå. När porerna är delvis fyllda sker transporten genom både ångdiffusion och kapillära krafter. Detta leder till att flödet minskar kraftigt. Eftersom porerna fylls och töms vid olika relativa fuktigheter uppstår även ett slags hysteres i transport av vatten (Stelmarczyk 2017c).

Undersökningar visar att betong med mineraltillsatser ökar tätheten i porstrukturen, men även att användningen av krossballast med större andel finmaterial, användning av filler och av finare malningsgrad på cementet är bidragande faktorer till ökad täthet i betong (Stelmarczyk 2017c). Modern betong kan enligt Stelmarczyk m.fl. (2017c) i praktiken bli så tät att den inte går att diffusionsuttorka. Blir betong för tät blir det svårare att buffra fukt vilket kan ställa till problem när lim ska appliceras på betongen. Detta innebär att en avjämningsmassa kan behövas för att skapa ett lager ovanför betongen där fukt kan buffras och limmet får en chans att torka ut. Dagens uttorkningskrav i betong baseras på kopplingen mellan RF på ett visst djup och emissioner från lim- och ytskikt som bryts ned (Stelmarczyk m.fl. 2018). Detta innebär att om tät modern betong används bör uttorkningskraven för lim- och ytskikt ses över eller bör avjämningsmassa användas.



### 2.3.3 Temperaturen inverkan på uttorkning

Temperatur har stor inverkan på självuttorkningen hos betong, och faktorer som påverkar temperaturen kan enligt Stelmarczyk m.fl. (2019b) vara:

- Väderlek
- Årstid
- Grad av isolering
- Täckning
- Konstruktionstjocklek
- Gjuttemperatur

Betong med Bascement som får hydratisera snabbt får lägre sluthållfasthet och ju varmare det är, desto fortare går det. Betong som får hydratisera vid lägre temperatur binder mer vatten i C-S-H-gelen. En låg temperatur leder till att vattnet och cementet binds långsammare efter gjutning men leder med tid till ökad kemisk bindning (Stelmarczyk m.fl. 2019b). I Tabell 1 visar Stelmarczyk m.fl. (2019b) beräkningar på temperaturens inverkan på uttorkningen i betong med Bascement. Tabellen visar uttorkningen i betong som fått härda i olika temperaturer under det första halvåret och i 20 °C under det andra halvåret. Tabellen visar att betongen som härdat i en lägre temperatur första halvåret får en bättre uttorkning än betong som härdat i en varmare temperatur efter ett år.

Tabell 1. Temperaturen inverkan på den kemiska bindningen och den relativa fuktigheten i betong med Bascement efter 1 år vid olika temperaturer det första halvåret och sedan 20 °C (Stelmarczyk m.fl. 2019b).

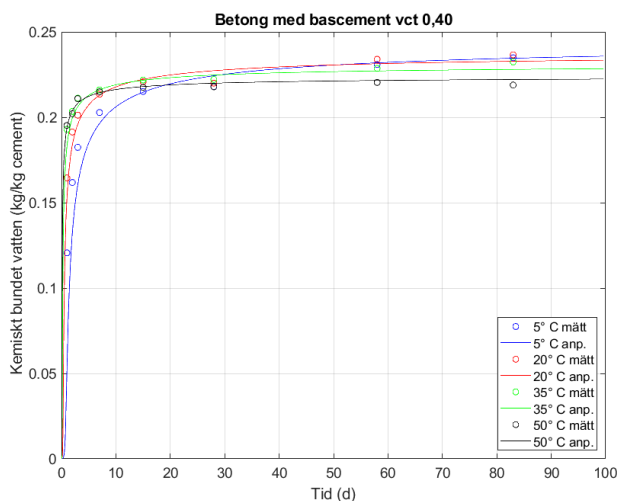
Lufttemperatur under första halvåret (°C)	Max temperatur för ekvivalent djup (°C)	Uppnådd relativ fuktighet för ekvivalent djup (%)	Uppnådd kemisk bindning av vatten för ekvivalent djup (kg/m <sup>3</sup> )
5	25,5	78	118,7
10	32,7	81,3	115,3
20	44,5	83	113,5
25	49,4	83,8	112,7

### 2.4 Produktionsplanering betong, PPB

Fuktmodulen i programvaran PPB släpptes i december 2018 med ambitionen att ersätta det tidigare fuktsimuleringsprogrammet TorcaS. Fuktmodulen i PPB är uppbyggd på fullständigt reviderade materialmodeller och fundamentalegenskaper för betong med Bascement. Materialmodellerna i PPB är fullständigt reviderade och uppbyggda på Bascementets fundamentalegenskaper. Temperatur- och fuktförlopp simuleras samtidigt och gör att fuktillståndet tar hänsyn till varierad temperatur. Programmet möjliggör en kombinerad simulering av både temperatur- och fuktförlopp vilket bidrar till att fukten påverkas av en varierande temperatur. Fuktsimulering i PPB tar hänsyn till att cementet binder olika mängd vatten beroende på temperatur under

hydratationen vilket påverkar självuttorkningen. Under hydratationen så kan cement binda olika mängd vatten beroende på dess temperatur och simuleringar i PPB tar hänsyn till detta. För att ge ett korrekt materialbeteende vid uttorkning, omfördelning och uppfuktning tar programvaran PPB även hänsyn till hysteres i både sorption och transport. Enligt utvecklarna baseras fuktmodulen i PPB på valideringsdata baserade på skarpa gjutningar och väldokumenterade mätningar från Sveriges Byggindustrier, Skanska, NCC och Peab (Stelmarczyk m.fl. 2019a).

Hydratation som sker i betong har ett dubbelt beroende av temperaturen, och hastigheten på de kemiska reaktionerna kan härledas till varierande temperatur. Högre omgivande temperatur leder till en snabbare inledande hydratation men det resulterar i en sämre uttorkning över tid. I Figur 21 visas ett diagram över Basement med vct 0,40 och dess förmåga att binda vatten i olika temperaturer som funktion av tid. I diagrammet visas tydligt att höga temperaturer binder mer vatten under de inledande dagarna men efter ca 50 dygn har en så kallad cross-over-effekt skett och det är istället vid de lägre temperaturerna som mest vatten bundits. Detta ger en bättre uttorkning för betong som härdats i lägre temperatur (Stelmarczyk m.fl. 2019b).



Figur 21. Basement med vct 0,40 och dess förmåga att binda vatten i olika temperaturer beroende av tid (Stelmarczyk m.fl. 2019b)

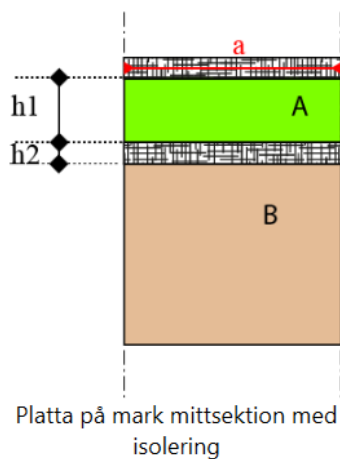
I simuleringar i PPB räknas samtliga temperaturberoenden in automatiskt då programmet utför en icke isotermisk simulering som är kombinerad med en temperatursimulering. Det enda som behöver göras är en noggrann inmatning av gjutningens förutsättningar gällande (Stelmarczyk m.fl. 2019b):

- Material
- Omgivande material
- Väderlek
- Hantering av gjutningen

- Hantering av uttorkningen

### 2.4.1 Indata

För att utföra simuleringar i PPB väljs en av problemtyperna “värme + hållfasthet” eller “värme + fukt” beroende på om hållfasthets- eller fuktsimuleringar skall utföras. Temperatursimuleringar utförs i båda fallen. Med en problemtyp vald kan ett typfall väljas. För fuktsimuleringar finns det endast möjlighet att välja typfallen “mellanbjälklag” och “platta på mark” med eller utan isolering. Se Figur 22. Med ett typfall valt kan data för materialet, konstruktionen och den omgivande miljön matas in.



Figur 22. Typfall för platta på mark med isolering, där A är betong och B är mark.

Detaljspecifika data för tid och konstruktionsgeometri matas in i PPB. Med tid menas ett startdatum för gjutningen samt längden för simuleringen. Startdatumet för gjutningen är mycket viktigt eftersom uttorkningen kommer variera beroende på under vilken årstid som gjutningen sker (Stelmarczyk m.fl. 2019a). Konstruktionsgeometri innebär den tjocklek på platta/bjälklag som skall simuleras. Se Figur 23.

Tid	
Simuleringslängd (d)	<input type="text" value="14"/>
Start (åååå-mm-dd hh.mm.ss)	<input type="text" value="2019-03-06 11:00:00"/>
Konstruktionsgeometri	
h1 (m)	<input type="text" value="0.150"/>

Figur 23. Inmatning av simuleringslängd, startdatum samt konstruktionens geometri.

I information om materialet bestäms vilket sorts betongtyp som skall gjutas. Här specificeras cementhalten, den hållfasthet som skall uppnås efter 28 dagar och betongens gjutningstemperatur. Här kan information kring gjutningsprocessen matas

in med antingen ett start- och slutdatum (momentan) eller med en gjutningshastighet (m/h). Se Figur 24.

The screenshot shows a software interface for defining concrete material and casting conditions. It is divided into three main sections:

- Blocktyp:** Ung betong (dropdown menu)
- Material:** Cements Bascement (fukt), C 28/35, vctekv=0.55, CEM II/A-V, S4, Dma. Below this are input fields for Cementhalt (kg/m<sup>3</sup>) with value 366.0 and Fcc28d (MPa) with value 35.0. A button 'Sätt till original' and a status '(Ändrade)' are also present.
- Färska betongmassans temperatur i formen:** Temperatur (°C) with value 19.
- Gjutning:** A section with radio buttons for 'Momentan' (selected) and 'm/h'. It includes input fields for Starttid (h) with value 0.00, Hastighet (m/h) with value 0.5, and Sluttid (h) with value 0.00.

Figur 24. Materialinformation och förutsättningar för gjutning

För inmatning av väderlek finns tre olika utföranden (Stelmarczyk m.fl. 2019a):

- Initial beskrivning: Här finns möjlighet att göra egna specificeringar kring omgivningens temperatur, relativa fuktighet samt vindförhållanden. Dessa kan anges i form av konstanta värden eller som en funktion av tid.
- Klimatdata: Här finns möjlighet att välja klimat utifrån olika orter som baseras på genomsnittsdata från SMHI.
- Kombinerad beskrivning: Det går att kombinera de två utfallen ovan genom att börja med en initial beskrivning för att sedan övergå till klimatdata efter ett antal dagar.

För uttorkning finns tre olika förutsättningar som kan väljas eller kombineras (Stelmarczyk m.fl. 2019a):

- Tätt hus: Här försvinner påverkan från vind och regn vilket innebär att relativ fuktighet och temperatur är det enda som påverkar. Här försvinner även kvarvarande formar och täckning.
- Torkningsklimat: Här försvinner påverkan av vind och regn. Den relativa fuktigheten och lufttemperaturen kan bestämmas genom ett fast värde eller genom en skillnad mot väderlek.
- Inomhusklimat: Här försvinner påverkan från vind och regn. Temperaturen bestäms av ett fast värde och den relativa fuktigheten bestäms antingen av ett fast värde eller genom en skillnad mot ånghalt i väderlek.

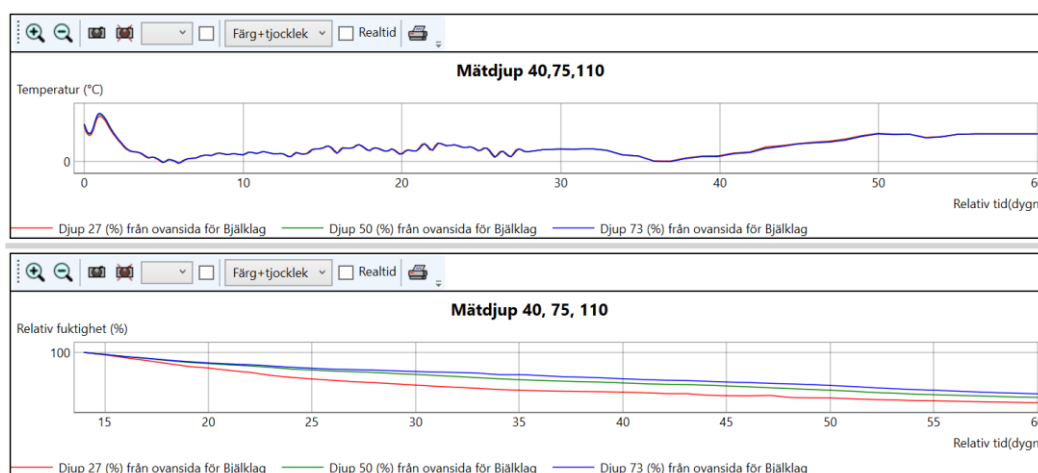
Vid simulering av ett mellanbjälklag matas data in för konstruktionens ovan- och undersida. För undersidan bestäms vilken typ av form som kommer omsluta gjutningen samt vid vilken tidpunkt som formen kommer att rivas. Det går att välja en

automatisk formrivning som innebär att formen rivs när betongen nått en bestämd hållfasthet. Att simulera en manuell formrivning innebär att formen tas bort vid en bestämd tidpunkt. Det finns möjlighet att simulera en kvarsittande form. Se Figur 25. För ovansidan av konstruktionen kan glättning, täckning och infravärme väljas om det skulle vara en förutsättning för betongkonstruktionen. Vid simuleringar av platta på mark måste randvillkor för marken bestämmas samt indata för isolering.

Figur 25. Indata för form.

## 2.4.2 Resultat

Styrkorna med PPB är att det redovisar en stor variation av olika resultat som kan ställas upp och jämföras mot varandra. Se Figur 26. Beräkningar på fukt- och värmeutveckling ger inte enbart resultat på temperaturer och relativa fuktigheter utan redovisar också andra hydratationsrelaterade parametrar. För fuktsimuleringar är resultaten fördröjda med 14 dagar i PPB. Under den tiden ändras betongens sorption- och transportegenskaper mycket snabbt vilket gör det svårt för programmet att redovisa resultat. På grund av detta är det endast den kemiska bindningen som kan redovisas från start. Samtliga resultat med startdatum i en fuktsimulering listas i Tabell 2 (Stelmarczyk m.fl. 2019a).



Figur 26. Exempel på jämförelse mellan resultat i PPB för olika djup.

Tabell 2. Resultat med startdatum som redovisas vid fukt och värmesimulering i PPB.

Resultat	Start
Temperatur	Vid gjutning
Mognadsålder	Vid Gjutning
Tryckhållfasthet	Vid Gjutning
Relativ fuktighet	14 dagar efter gjutning
Ånghalt	14 dagar efter gjutning
Ångans Partialtryck	14 dagar efter gjutning
Fysikaliskt bundet vatten	14 dagar efter gjutning
Kemiskt bundet vatten	Vid gjutning

Resultaten för varje del kan redovisas i form av ett diagram eller en färgkarta. I diagrammen visas min-, max- och medelvärden samt värden för det ekvivalenta djupet i bjälklaget/plattan som funktion av tid. Det finns även möjlighet att skapa egna diagram och få ut resultat för egna mätdjup. Resultaten går att exportera till txt-filer som enkelt kan överföras till Excel (Stelmarczyk m.fl. 2019a).

Händelser i form av varningar kan uppkomma vid simuleringar i PPB. Utförs simuleringar i temperaturer som understiger 0 °C, innan konstruktionen har nått en tryckhållfasthet om 5 MPa, innebär det risk för tidig frysning och en varning uppkommer i programvaran. Tidig frysning innebär att vattnet i betongens porsystem fryser och expanderar innan betongen hunnit erhålla ett erforderligt utrymme i porerna. Expansionen av det frusna vattnet innebär att betongen förstörs och förlorar stor del av sin hållfasthet (Stelmarczyk m.fl. 2019a).

## 2.5 Fuktmätning i betong

För att ett ytskikt inte skall utsättas för en högre fuktbelastning än vad det tål är det viktigt att utföra fuktmätningar som säkerställer den relativa fuktigheten i betongen. Syftet med att utföra fuktmätningar i betong är att erhålla resultat som visar vilken relativ fuktighet som råder i materialet. Rådet för byggkompetens, RBK, har tagit fram mätmetoder och certifieringar som säkerställer korrekt utförda fuktmätningar som ger tillförlitliga resultat (RBK 2019).

I betongens tvärsnitt varierar de relativa fuktigheterna under uttorkningstiden vilket innebär att betongens yta har en helt annan relativ fuktighet än djupare in i betongen. De relativa fuktigheterna på ytan av betongen hamnar ofta i fuktjämvikt med den omgivande miljön. Längre in i betongen är den relativa fuktigheten högre än vid ytan. Detta innebär att en fuktmätning precis vid ytan av betongen inte ger en rättvis bild av den fuktbelastning som ett ytskikt kommer utsättas för. Innan ett ytskikt appliceras måste betongytan tätas vilket förhindrar ytterligare uttorkning. Det kommer med tiden ske en fuktjämvikt i betongen som innebär att fukten inne i betongen fördelar sig till den torrare ytan och fuktbelastningen på ytskiktet ökar. För att göra en korrekt

bedömning av fuktbelastningen behöver den relativa fuktigheten mätas på ett ekvivalent mätdjup. På detta djup skall fuktillståndet under uttorkningen stämma överens med det maximala fuktillstånd som får uppkomma under ytskiktet efter att fukten omfördelats. Det ekvivalenta mätdjupet bestäms efter konstruktionens utformning och betongens uttorkningsförmåga (RBK 2019).

För att mäta fukt inuti betong kan två metoder användas. Den ena är borrhålmätning och den andra är uttag av betongprov. Borrhålmätning innebär att ett hål borraras med en diameter som är anpassad efter en utvald fuktgivare. Ett borrhål får inte borraras grundare än bestämt men en felmarginal på 2 mm accepteras för djupet. Skulle felmarginalen överskridas innebär det att borrhålet är förbrukat och ett nytt måste borraras. Hålen skall inte borraras för tätt och det krävs ett avstånd på minst tre gånger borrhålets djup mellan centrumavståndet för borrhålen. Efter borrning monteras den RF-givare som skall utföra fuktmätningen. Avläsning sker efter att RF-givaren och borrhålet nått jämvikt gällande fukt och temperatur. Efter utförd mätning är borrhålet förbrukat och bör inte längre användas för ytterligare mätningar (RBK 2019).

För att läsa av fukt i borrhål enligt korrekt RBK-metod finns det tre olika givare att välja mellan. Fuktmätning kan utföras med givarna HumiGuard, Vaisala HMP40S och Testo 605-H1 som är godkända av RBK (RBK 2019). I en rapport från SBUF (2014) visades att den givare som ger bäst resultat i borrhålmätningar är HumiGuard. Detta beror på att uppmätta värden med HumiGuard stämde bäst överens med den aktuella relativa fuktigheten i betongprovet (visar låg fuktkapacitet) och att den är reaktionssnabb (SBUF 2014). För att korrekta mätningar skall kunna erhållas enligt RBK måste följande krav uppfyllas (RBK 2019):

- Det skall råda fukt- och temperaturjämvikt mellan givare och betong.
- Det måste vara en stabil temperatur vid mättillfället.
- Mätutrustningen måste vara kalibrerad.

Uppfylls inte dessa krav skall inte mätningar utföras eftersom det riskerar att ge felaktiga resultat (RBK 2019).

Ett alternativ till borrhålmätning är att bilda loss ett betongprov som skickas på analys i laboratorium. I rapporten från SBUF (2014) redovisas beräkningar/simuleringar av fukt i betong (vct 0.38) utförda med olika RBK-godkända mätmetoder. Resultaten från rapporten visade att den mest tillförlitliga mätmetoden är borrhålmätning framför ett uttaget betongprov. Nackdelarna med att använda ett uttaget betongprov är att fuktmagasinet som finns i en hel platta/bjälklag endast kan utvinnas i en begränsad mängd och att det finns stor risk att uttorkning sker under förflyttningen från utvinning till provrör (SBUF 2014).

### 2.5.1 HumiGuard

HumiGuard är ett mätinstrument framtaget av Nordisk Industrifysik AB och används för att mäta relativ fuktighet i betong. Det som skiljer HumiGuard från de andra RBK-certifierade givarna är att det endast kan brukas vid ett tillfälle och under en begränsad användningstid. Givaren kan installeras vid endast en mätpunkt, sedan är den förbrukad. En HumiGuard-givare har en total hållbarhet på 6 månader. Vid beställning av ett flertal HumiGuard-givare levereras samtliga i en försluten plastburk, som kommer från samma tillverkningsbatch, med ett bestämt lot-nummer. Montering sker i ett mätrör i samband med borrhning av mät hålet och de kan mäta fukt på djup mellan 35–300 mm. Avläsning måste ske mellan 6 till 10 dygn efter montering. Avläsning sker med ett avläsningsinstrument (Figur 27) och redovisar värden i mikrosiemens,  $\mu\text{S}$ . Dessa värden omvandlas till RF och temperatur genom ett omvandlingsverktyg på Nordisk Industrifysiks hemsida. Till skillnad från andra givare behöver inte HumiGuard-givaren skickas iväg för extern kalibrering, istället monteras två givare med samma lot-nummer i ett referensblock där det sker en stickprovsmässig kalibrering. När avläsning från givare i ett borrhål utförs skall även givarna i referensblocket läsas av, dessa värden måste finnas för att eventuella korrigeringar av RF och temperatur skall kunna beräknas (RBK 2019).



Figur 27. Mätinstrument och givare för HumiGuard (SBUF 2014)

## 2.6 Loggning av omgivande temperatur och fukt

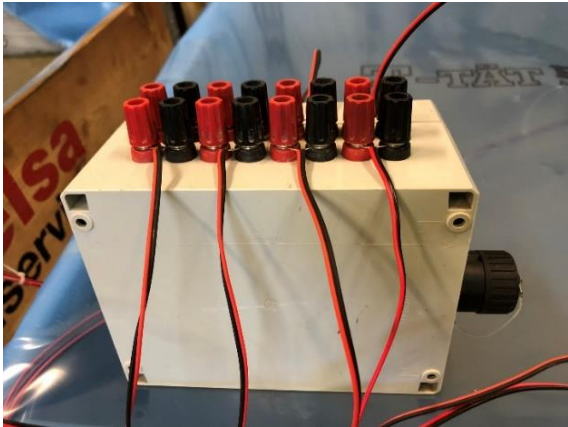
Loggning av temperatur och fukt kan utföras med flertalet olika verktyg. I detta projekt har loggning skett med Skanskas BetongDatorn 5.0 och med Mitec AT40g.

### 2.6.1 BetongDatorn 5.0

BetongDatorn 5.0 är ett mätinstrument framtaget av Skanska AB för loggning av temperatur och för att följa hållfasthetsutvecklingen i betongkonstruktioner. Se Figur 28. Med BetongDatorn kan temperaturer och hållfasthetsvärden kontrolleras och



möjligheten finns att se när betongen når en viss hållfasthet. Under vintertid är BetongDatorn fördelaktig gällande temperaturer eftersom det går att se om betongen är på väg att understiga fryspunkten. BetongDatorn lagrar mätdata i separata filer och resultaten går att få ut i diagram som visar betongens temperatur och hållfasthetsutveckling (Skanska AB 2000). BetongDatorn använder sig av slingor som antingen installeras via borrhål eller som gjuts in i betongen.



Figur 28. BetongDatorn med inkopplade temperaturslingor.

### 2.6.2 Mitec AT40g

Mitec AT40g är en portabel datalogger som kan anslutas till över 700 olika sorters givare. Se Figur 29. Minnet kan lagra upp till 55 000 mätvärden och registreringsintervallet kan varieras från 1 sekund till 1 dygn. Loggern kan drivas på ström eller på ett 9V batteri. Loggade mätdata överförs enkelt till dator via en serieport där resultaten sparas i form av txt-filer som kan överföras till Excel. Mitec AT40g har totalt 8 universella ingångar som möjliggör anslutning av många olika mätinstrument (Mitec 2002). För att mäta temperatur och relativ fuktighet i omgivande luft kan en Vaisala HMP60 kopplas till Mitec AT40g.



Figur 29. Mitec AT40g med fukt- och temperaturgivare Vaisala HMP60 och HMP50

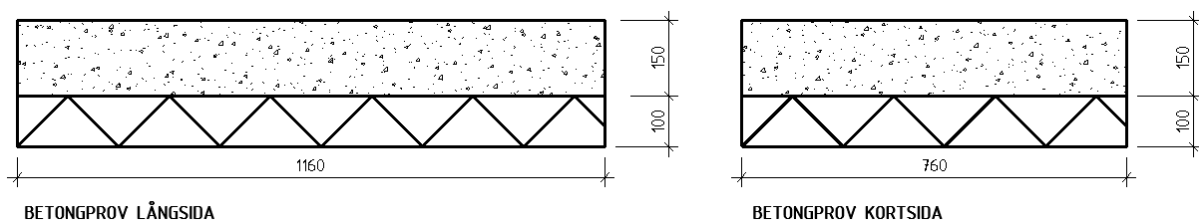
### 3 Metod

Metoden baseras på en litteraturstudie samt experimentella studier på gjutna betongprover. Den experimentella studien utförs i fyra etapper. Den första etappen är formbyggnation som övergår i den andra etappen, gjutning. Under tiden som betongen torkar utförs den tredje etappen som är loggning av temperatur och relativ fuktighet i omgivande luft samt loggning av temperatur i betongen. Den fjärde och avslutande etappen är fuktmätning i betongproverna.

#### 3.1 Formbyggnation

Formbyggnationen genomfördes i samarbete med Skanska Hus Väst på en av deras byggarbetsplatser i Karlstad och dokumenterades med bilder, se Bilaga 1. Skanska Hus Väst bidrog med material till formar, nödvändiga maskiner för formbyggnation och ett släp som gjorde det möjligt att frakta formarna till den plats där gjutningen utfördes. Formarna till gjutningsproverna byggdes upp på fyra helpallar med måtten 1200 x 800 mm. På varje pall monterades två pallkragar á 200 mm höga som omslöt gjutningsytan. Detta gav en höjd på totalt 400 mm vilket klarade av provkropparnas höjd på 250 mm. För att skapa stabilitet och för att öka hållbarheten på formarna förankrades pallkragarna i pallen med hjälp av brädor och skruv.

Cellplast med en tjocklek på 100 mm sågades till och placerades i botten på varje pall och kläddes sedan in i byggfolie med hjälp av häftpistol och tejp. Det var viktigt att byggfolien blev tät för att säkerställa en enkelsidig uttorkning och för att eliminera risken för läckage. Från botten av formen upp till 150 mm gjordes markeringar för att det tydligt skulle synas hur mycket betong som skulle fyllas i formarna. I Figur 30 visas en bild av hur betongkonstruktionen såg ut i genomskärning.

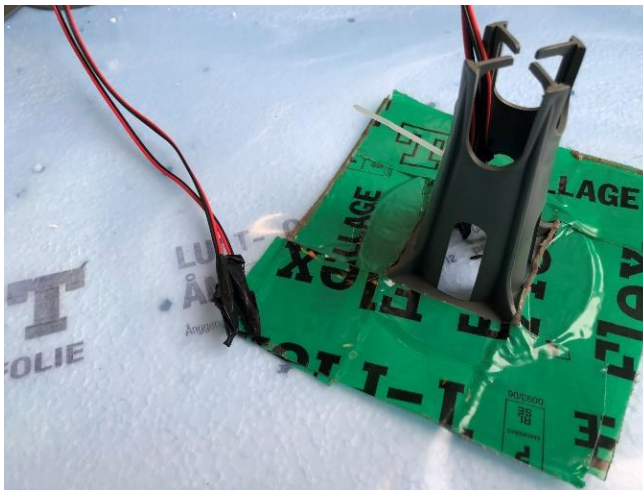


Figur 30. Betongprov i genomskärning.

Markdistansklossar med dimensionen 70/80 mm monterades i centrum på varje pall med hjälp av åldersbeständig tätningstejp. Markdistansklossarna användes för att placera temperaturslingor i botten och på höjden 75 mm i betongproverna. I Figur 31 visas färdig form och i Figur 32 visas mätslingor monterade med buntband i distansklossar.



Figur 31. Färdig form.



Figur 32. Distansklossar och slingor kopplas samman i botten på form.

## 3.2 Gjutning

Gjutning av betongprover dokumenterades med bilder i Bilaga 2.

### 3.2.1 Förberedelser

Samtliga formar fraktades till Skanska Asfalt & Betong AB i Trollhättan där gjutningarna utfördes under mars 2019. På betongfabriken erhöles hjälp och kunskap vid utförande samt förvaring av betongprover. Totalt fyra betongprover framställdes, varav två med vct 0,55 och två med vct 0,40. Ett prov av vardera vct placerades i ett skjul som symboliserade den okontrollerade miljön med en varierande temperatur och relativ fuktighet. Ett prov av vardera vct placerades i anslutning till ett labb som symboliserade den kontrollerade miljön med en konstant temperatur och relativ fuktighet.

### 3.2.2 Utförande

Gjutningarna utfördes 2019-03-06 i två omgångar, ett vct per omgång. Den första betongen som blandades var den med ett önskat vct på 0,55 som fick ett uppmätt vct på 0,52 och en cementhalt på 366 kg/m<sup>3</sup>. Se recept i Bilaga 3. I betongen tillsattes flyttillsatsmedel för att nå konsistensklass S3. Det blandades totalt två kubikmeter betong per vct, för att säkerställa rätt kvalitet. Betongen överfördes till en betongbil som började med att gjuta proverna i anslutning till labbet. Bearbetningsmetoden som användes under gjutningen var handbearbetning med hjälp av skyffel. Detta innebar att betongen hela tiden knackades och vibrerades med handkraft ner i formens tomrum. Den vanligaste metoden för att bearbeta betong är med en stavvibrator, men denna metod valdes bort eftersom storleken och kraften från den tillgängliga vibratören hade kunnat skada formen. Gjutningen slutfördes när betongen nådde upp till de markeringar på 150 mm som fanns i formen. Betongprovet flyttades senare in i kontrollerad labbmiljö. Se Tabell 3.

Nästa betong som blandades var den med ett önskat vct på 0,40 som fick ett uppmätt vct på 0,39 och en cementhalt på 429 kg/m<sup>3</sup>. Betong med ett lågt vct kan bli trögflytande och svårarbetad. Flyttillsatsmedel tillsattes därför för att få konsistensklass S4. Se recept i Bilaga 4. Gjutningarna utfördes på samma sätt som föregående betong. Skillnaden mellan de båda betongsorterna var att vct 0,40 hade en mycket lösare konsistens som gjorde att den knappt behövde bearbetas. Hela gjutningsarbetet pågick under ungefär 2 timmar och tidslinjen beskrivs i Tabell 3.

Tabell 3. Tidslinje under gjutning 2019-03-06.

Tid	Händelse	Temperatur och RF
10:47	Betongprover med vct 0.55 gjuts	1,1°C och 90 % RF
11.30	Betongprover med vct 0.4 gjuts	1,1°C och 90 % RF
13.00	Ett betongprov av vardera vct tas in till labb	23,6°C och 30 % RF
13.23	Betongprover utomhus plastas in	1,1°C och 90 % RF
13.55	Betongprover inomhus plastas in	23,6°C och 30 % RF

### 3.2.3 Förvaring av prover

Betongproverna som skulle utsättas för ett varierande utomhusklimat förvarades i ett skjul där relativ fuktighet och temperatur liknade den miljö som rådde utomhus. Se Figur 33. Betongprover som skulle utsättas för ett stabilt inomhusklimat förvarades i betongfabrikens laboratorium. Se Figur 34.



Figur 33. Prover i okontrollerad miljö.



Figur 34. Prover i kontrollerad miljö.

### 3.2.4 Första tiden efter gjutning

Ytan på den nyligen gjutna betongen täcktes för att erhålla en bättre hydratation och för att undvika plastiska krympsprickor. Valet av täckmaterial var en åldersbeständig byggfolie som var helt diffusionstät och hade en ljus nyans. Se Figur 35. Samtliga prover omslöts med en extra presenning för att ge ett extra skydd.



Figur 35. Prover täckta med tätskikt.

Två veckor efter gjutning togs presenning och plast bort från proverna, eftersom PPB inte beräknar fuktutbyte med omgivningen tidigare än 14 dagar. Hos proverna i den okontrollerade miljön hade kondens bildats på insidan av plasten. Vid avtäckning hamnade den kondenserade fukten på betongytan vilket innebar att proverna fick torkas med pappershanddukar för att undvika uppsugning. Se Figur 36.



Figur 36. Kondensbildning under plasten.

### 3.3 Loggning av temperatur och fukt

För loggning av temperatur och luftfuktighet utomhus och inomhus användes 2 portabla dataloggers av fabrikat Mitec AT40g. Figur 29 visar en Mitec AT40g med tillhörande mätverktyg. Fukt- och temperaturmätningar utomhus utfördes med givare av fabrikat Vaisala HMP60 och inomhus med en Vaisala HMP50. Skillnaden mellan givarna var att Vaisala HMP60 krävde kontinuerlig strömtillförsel och att Vaisala HMP50 fungerade på dataloggers batteri. Skanskas egenutvecklade Betongdatorn 5.0 loggade temperaturer i betongen och luften utanför proverna, både inomhus och utomhus. I betongproverna loggades temperaturen i mitten vid 75 mm djup och i botten av vid 150 mm djup. Fuktgivarna placerades i närheten av betongproverna. Figur 37 visar fuktgivare Vaisala HMP60 placerad ovanför betongprover i utomhusmiljö.



Figur 37. Temperatur- och fuktgivare ovanför betongprover i utomhusmiljö.

### 3.3.1 Kalibrering av fuktgivare

Ett mätkit från Testo (Testo humidity control and calibration set) införskaffades för att utreda en eventuell mätosäkerhet av relativa fuktigheter i fukt- och temperaturgivarna. Mätkitet bestod av två fuktburkar innehållande saltlösning med bestämda RF: 11,3% och 75,3%. Se Figur 38. Ytterligare en burk införskaffades med 95 % RF för att kontrollera RF mellan 75,3 och 95 %.



Figur 38. Kontroll- och kalibreringsset från Testo.

Under 9 dagar, från 2019-04-29 till 2019-05-08, utfördes kontroller av de båda givarnas förmåga att mäta den relativa fuktigheten. Givarna placerades i varsin fuktburk med saltlösning och efter 3 dagar avlästes givarnas RF och jämfördes mot korrekt värde enligt fuktburk. Se Figur 39. Därefter flyttades givarna till en ny burk med nytt RF. En kortare kontroll utfördes 2019-03-29 under ca 4 timmar där fuktgivarna under ca 2 timmar placerades i 75,3 % RF och 2 timmar i 11,3 % RF. Eftersom kontrollerna utfördes under arbetets gång uteblev ordinarie resultat i mätningarna under denna tid.



Figur 39. Kontroll av fuktgivare i saltlösning med 11,3 % RF och 75,3 % RF.

Genom att kontrollera givarna mot korrekt relativ fuktighet kunde en kalibreringskurva skapas för att korrigera uppmätta värden till korrekta värden. För att underlätta arbetet med att korrigera RF både inomhus och utomhus togs formler och kalibreringskurvor fram i Excel. Se Bilaga 5. Formlerna beräknades genom räta linjens ekvation:

$$y = kx + m \quad (6)$$

Där y är det verkliga värdet, k är riktningskoefficient, d.v.s. linjens lutning mellan uppmätta värden, x är uppmätt värde och m är en konstantterm.

### 3.3.2 Temperatur i betong

Temperaturutvecklingen i betongen loggades både inomhus och utomhus med hjälp av BetongDatorn 5.0. Innan gjutningen påbörjades monterades temperaturslingor i botten och 75 mm upp på markdistansklossar. Av säkerhetsskäl monterades dubbla slingor vid varje mätpunkt för att minimera risken för trasiga slingor. Några timmar efter utförd gjutning kopplades temperaturslingorna till BetongDatorn och loggningen påbörjades inomhus och utomhus. Intervallet för loggningarna sattes till 1 loggning per timme för att registrera hela dygnets temperaturvariation. I Figur 40 visas slingor kopplade från betong till Betongdatorn samt slingor som mäter omgivande temperatur.





Figur 40. Slingor kopplade från betong till Betongdatorn samt från omgivande luft.

### 3.3.3 Temperatur och fukt i omgivning utomhus

En Mitec AT40g med fukt- och tempgivare Vaisala HMP60 installerades i närheten av betongproverna utomhus. Loggning av fukt och temperatur startades direkt efter gjutning, och loggningsintervallet sattes till 1 loggning/timme.

### 3.3.4 Temperatur och fukt i omgivning inomhus

Temperaturen i luften loggades med hjälp av BetongDatorn och slingor. Fukten i luften loggades med en Mitec AT40g och fukt- och tempgivare Vaisala HMP50. Loggning med BetongDatorn påbörjades några timmar efter gjutning och loggning med Mitec startades två veckor efter gjutning när plasten på proverna togs bort.

För att kontrollera BetongDatorns reliabilitet kopplades de extra slingor som fanns ingjutna i betongen in i en Testo 177-T4 datalogger under perioden 2019-03-22 till 2019-03-28 för jämförelse. Se Figur 41.



Figur 41. Testo 177-T4 t.v. och BetongDatorn t.h.

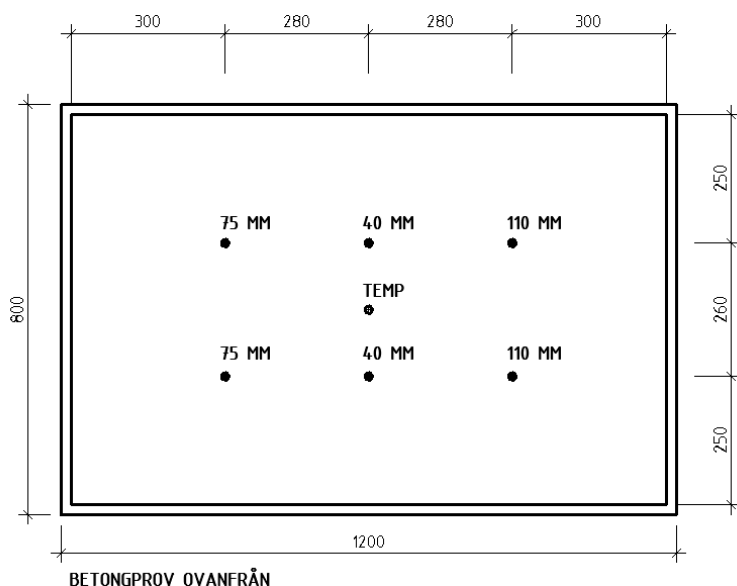
Under perioden 2019-04-29 till 2019-05-08 kontrollerades fuktgivarna från Vaisala mot fuktburkar för att korrigeras. För denna period användes en Standard ST-171 datalogger som kortvarig ersättning. Se Figur 42. Fuktloggaren var ej kalibrerad men ska enligt tillverkare ha en noggrannhet på  $\pm 3,0$  % RF (Clas Ohlson u.å.).



Figur 42. Fuktlogger Standard ST-171 datalogger.

### 3.4 Fuktmätning i betong enligt RBK-metod

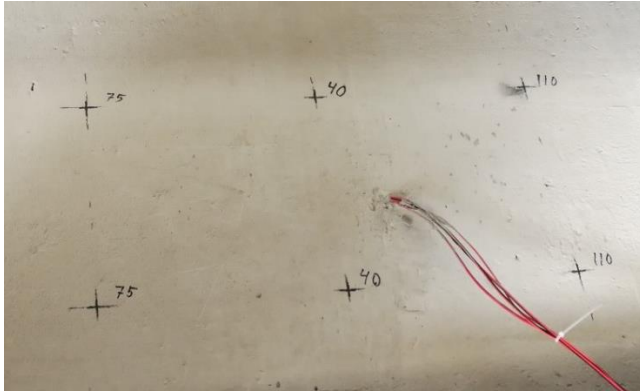
Fuktmätning i betongprover utfördes enligt RBK-metod med instrumentet HumiGuard och av RBK-auktoriserad mättekniker. Mätningarna utfördes vid ett tillfälle med förberedelse till extra omgång i framtiden. Mätningarna utfördes med tre borrhål per prov och omgång. Hålen borrades på tre olika djup: 40, 75 och 110 mm och med ett bestämt avstånd från kanterna. Se Figur 43 för mätplan och placering av mäthål. Montering av fuktgivare HumiGuard dokumenterades med bilder i Bilaga 6.



Figur 43. Mätplan för borrhål och fuktmätning (Autodesk Revit 2019).

### 3.4.1 Förberedelser

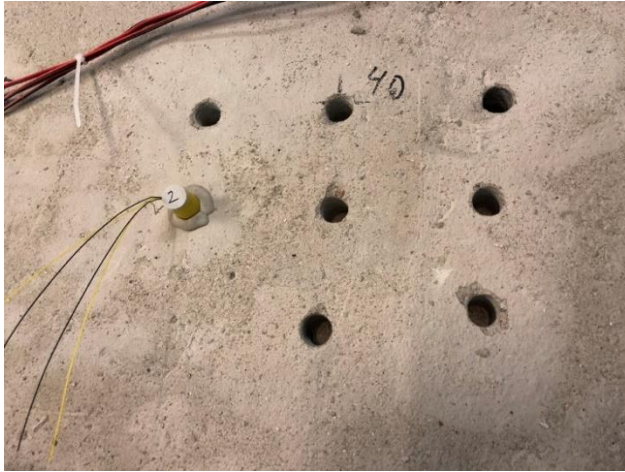
För att möjliggöra fuktmätningar i betongen krävdes en stabil temperatur inom intervallet 15–25 °C. Detta innebar att proverna som var placerade i utomhusmiljö behövde flyttas in till inomhusmiljö. PPB användes för att simulera hur lång tid betongproverna behövde för att nå samma temperatur som rådde inomhus. De två prover som förvarades i utomhusmiljö flyttades till kontrollerad inomhusmiljö 9 dagar innan montering av fuktgivare HumiGuard. Placering av borrhål markerades ut på betongproverna med hjälp av tumstock och tuschpenna. Se Figur 44.



Figur 44. Betongprov med markeringar för borrhål och djup.

### 3.4.2 Borrning av mäthål

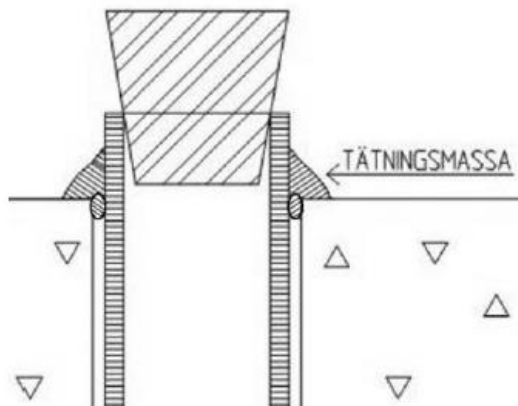
Borrning och montering av HumiGuard fuktgivare utfördes 2019-05-08 av en RBK- auktoriserad fukttekniker. Borrningen utfördes med hjälp av en slagborrmaskin och ett borrstål med diameter 16 mm, vilket var tjockleken på mätrören för HumiGuard. Borrningen utfördes på djupen 40, 75 och 110 mm enligt mätplan (Figur 43). Att borra på olika djup möjliggör analys av självuttorkning och diffusionsuttorkning. Efter utförd borrning borstas och dammsugs hålet för att säkerställa att allt överflödigt borrhåskax avlägsnats. Botten av borrhålet kontrollerades att det inte fanns synliga stenar eller annat material som kunde störa fuktavgången. Om borrhålet inte blev tätt eller om sten träffades, borrades ett nytt hål. Se Figur 45.



Figur 45. Flertalet borrhålsförsök vid 40 mm djup.

### 3.4.3 Montering av givare

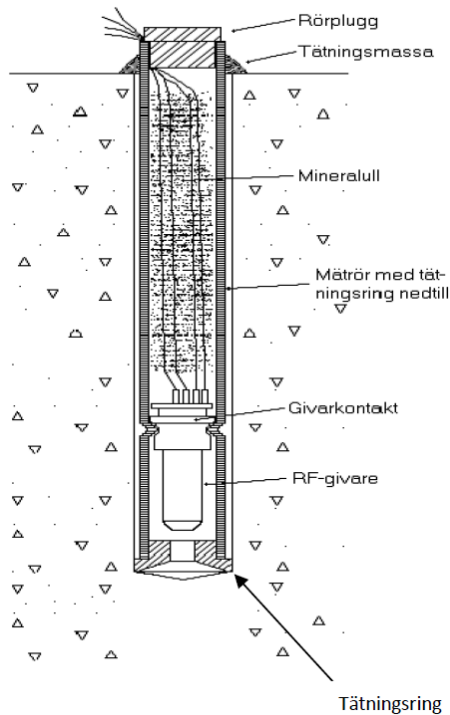
Med rena borrhål gjorda placerades mätrör i hålen. Längden på rören kapades för att de skulle passa motsvarande borrhål. På nederdelen av rören till HumiGuard fanns en tätningssring av gummi som skulle nå botten på borrhålet. Röret fördes först ned med handkraft och sista biten knackades det försiktigt ned med gummiklubba. I ovankant av mätröret placerades en tätningssmassa. Se Figur 46. Rörets täthet testades med hjälp av en gummiblåsa med pip som pressades ihop och placerades i mynningen av röret. Förblev blåsan pressad innebar det att röret var tätt. Givarmonteringen föregicks av borrhålsdammsugning, för att få bort eventuell smuts framkommen i samband med montering av mätrör.



Figur 46. Ovankant mätrör (RBK 2019).

Vid montering av RF-givare skulle dokumentation ske i ett montageprotokoll kallat blankett F3HG. Ett nummer på givarburken dokumenterades i protokollet. I ett monteringsdon fästes givarens kontakt och dess tilliedare. Givaren fördes sedan ned i mätröret med hjälp av donet och trycktes fast där mätröret smalnade av. Mättdonet

hakades av från givarkontakten genom en vridning och kunde avlägsnas från mätröret. Ett lätt drag i tilledarna försäkrade att givarkontakten satt fast i mätröret. Tomrummet mellan rörets mynning och givarkontakt fylldes med mineralull och förslöts med en rörplugg. I en bild från RBK fuktmättningsmanual visas en monterad HumiGuard i genomskärning. Se Figur 47.



Figur 47. Monterad HumiGuard i genomskärning (RBK 2019).

Ett avläsningsinstrument anslöts till de tilledare som satt kopplade i givarkontakten. Det fanns totalt fyra trådar: två gula som satt kopplade till temperaturmätaren och två svarta som var kopplade till RF-mätaren. Den första mätningen som utfördes i samband med montering var en kontroll för att säkerställa att utrustningen fungerade. Avläsningsinstrumentet visade värden angivna i mikrosiemens,  $\mu\text{S}$ . Skulle värdet vid kontrollen hamna under  $1 \mu\text{S}$  hade det inneburit fel på utrustningen och givaren skulle ha bytts ut (RBK 2019).

### 3.4.4 Avläsning

Avläsning utfördes 2019-05-15, 7 dygn efter montering. Avläsningsinstrumentet anslöts till de tilledare som satt kopplade till givarkontakten. Värden lästes av och antecknades, angivna i  $\mu\text{S}$ . Dessa värden överfördes till webbplatsen för Industrifysik där ett dokument skapades och värdena från mätpunkter och referensblock matades in. RF i % och temperatur i  $^{\circ}\text{C}$  räknades fram och ett mätprotokoll med resultat kunde skapas för samtliga prover. Se Bilaga 7.

### 3.5 Simuleringar i programvaran PPB

Fuktsimuleringarna i PPB delades upp i två filer där den ena filen skulle simulera okontrollerad utomhusmiljö och den andra filen skulle simulera kontrollerad inomhusmiljö.

Vid simuleringar i PPB valdes problemtypen "värme + fukt" och typfallet blev ett mellanbjälklag. Simuleringslängden sattes till totalt 70 dagar och starten för gjutningen sattes till 2019-03-06 kl. 11:00 vilket var den ungefärliga tiden som gjutningen utfördes. Konstruktionsgeometrin sattes till 150 mm vilket var provernas betongtjocklek. Materialval och cementhalt valdes utifrån vct och recept. Se Tabell 4.

Tabell 4. Indatavärden för material och cementhalt PPB.

<b>Material</b>	Cementa Bascement (fukt), C28/35 CEM II/A-V, S4, Dmax 16	Cementa Bascement (fukt) C45/55, vct = 0,40, CEM II/A-V, S4, Dmax 16
<b>VCT</b>	0,55	0,40
<b>Cementhalt (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	366	428

Den färska betongmassans temperatur var vid gjutning 19 °C för vct 0,55 och 18 °C för vct 0,40. Se Bilaga 3 och 4 för betongrecept. Dessa värden fördes in i PPB för simulering. I samtliga simuleringsfall gjordes antagandet att gjutningsprocessen skett momentant.

För att få en enkelsidig uttorkning valdes en manuell formrivning med en formrivningstidpunkt på 10 000 timmar för undersidan av konstruktionen. Detta för att garantera att formen satt kvar vid simuleringar i PPB. Formtypen valdes till "plywood 12-19mm + obruten isolering 100 mm" som var mest lik provernas former. För ovansidan av betongen valdes täckningen "presenning" som symboliserade den plast som täckte proverna under de två första veckorna. Täckningen sattes på efter 2,5 h och togs av efter 338,5 h.

För proverna i den kontrollerade labbmiljön användes ett medelvärde för den temperatur och den relativa fuktighet som pågick mellan gjutning fram till mätning, och dessa värden matades in i initial beskrivning.

För proverna som förvarades i den okontrollerade utomhusmiljön, där temperaturvariationen har varit intressant för betongens uttorkning, användes mätdata från den loggning av temperatur och RF som skett under perioden för experimentet. Värdena som loggats varje timme matades in manuellt i initial beskrivning under varierande temperatur och relativ fuktighet.

För att få en intressant jämförelse utfördes även simuleringar baserade på klimatdata från Vänersborg, vilket var orten närmast Trollhättan. När simuleringar utfördes med

klimatdatafil tillkom nederbörd automatiskt i simuleringarna. För att förhindra detta simulerades "tätt hus" på ovansidan betongkonstruktionen med start efter 14 dagar och på undersidan gjordes simuleringar med klimatdata. Anledningen till att tätt hus sätts in efter 14 dagar är för att täckningen med presenning skall behållas under den tiden. Efter 54 dagar så användes ett genomsnittligt torkningsklimat med RF 29,3 % och temperatur 20,5 °C eftersom proverna under 16 dagar stått i kontrollerad miljö inför fuktmätning.

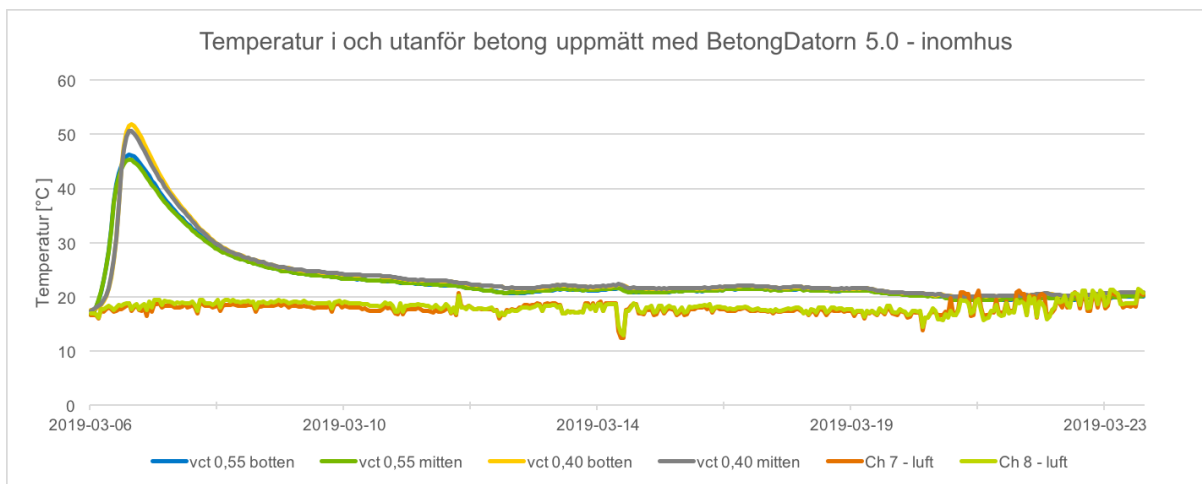
## 4 Resultat och analys

### 4.1 Omgivande lufttemperaturer - indata till PPB

Lufttemperaturerna som omgav betongproverna inomhus och utomhus loggades med både BetongDatorn 5.0 och med Mitec AT40g. Till BetongDatorn kopplades temperaturslingor och till Mitec AT40g kopplades fukt- och temperaturgivare: Vaisala HMP60 utomhus och en Vaisala HMP50 inomhus.

#### 4.1.1 Temperatur inomhus

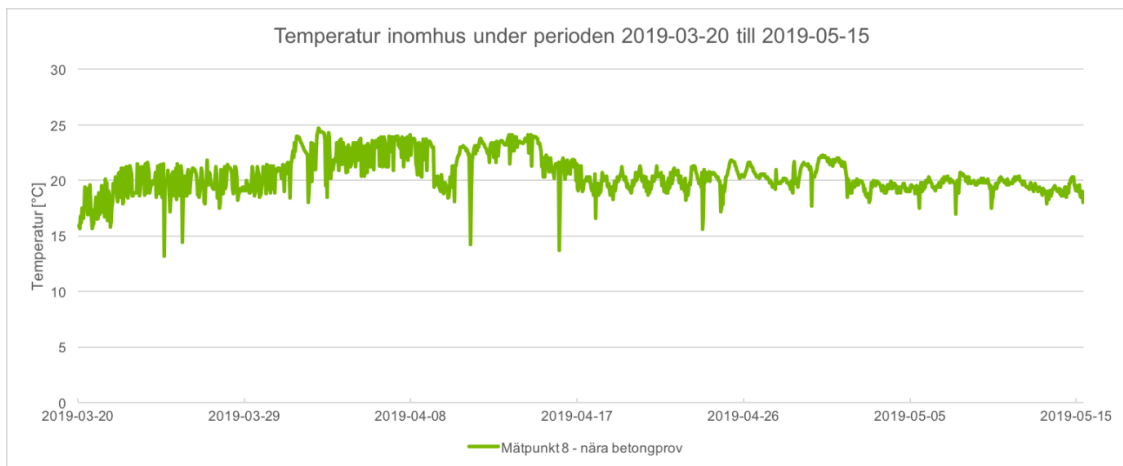
Temperaturdata för simuleringar i PPB baseras på lufttemperatur inomhus loggad med BetongDatorn och temperaturslingor. Placering av mätslingor och givare var avgörande för resultatet. Slingor som hade placerats för nära golvet visade för låga temperaturer. Detta upptäcktes eftersom temperaturen i betongen inte hamnade i jämvikt med omgivande temperatur enligt Figur 48. Två veckor efter gjutning flyttades temperaturslingorna upp en bit och slingorna placerades närmare betongytan. Lufttemperaturen började då efterlikna temperaturen inuti betongen. Se Figur 48. Troligen var golvet oisolerat och detta innebar en lägre registrerad temperatur nära golv.



Figur 48. Temperaturutveckling i betongprover inomhus under perioden 2019-03-06 till 2019-03-23.

För simuleringar i PPB användes en genomsnittlig lufttemperatur inomhus på 20,5 °C för perioden 2019-03-06 till 2019-05-15. Den genomsnittliga temperaturen baseras på data loggad med BetongDatorn och temperaturslingor under perioden 2019-03-20 till 2019-05-15 eftersom givarna troligen visade fel före 2019-03-20. I Figur 49 visas temperaturvariationen inomhus för perioden 2019-03-20 till 2019-05-15. Temperaturen inomhus varierade mellan 13,2 °C och 24,7 °C. Orsaken till variationerna kan bero på att dörren till rummet där proverna förvarades öppnades och stängdes.





Figur 49. Temperatur inomhus uppmätt med BetongDatorn under perioden 2019-03-20 till 2019-05-15.

BetongDatorns reliabilitet kontrollerades mot en Testo 177-T4 under perioden 2019-03-22 till 2019-03-28. Kontrollen visade att BetongDatorn gav likvärdiga resultat som Testo 177-T4 och att resultaten från BetongDatorn kan förväntas vara tillförlitliga. Temperaturen skiljde sig som mest med 0,1 °C. Jämför Tabell 5 med Tabell 6.

Tabell 5. Kontroll av temperaturer i betong med Testo 177-T4 där Channel 1 = vct 0,55, 150 mm djup, Channel 2 = vct 0,55, 75 mm djup; Channel 3 = vct 0,40, 150 mm djup, Channel 4 = vct 0,40, 75 mm djup.

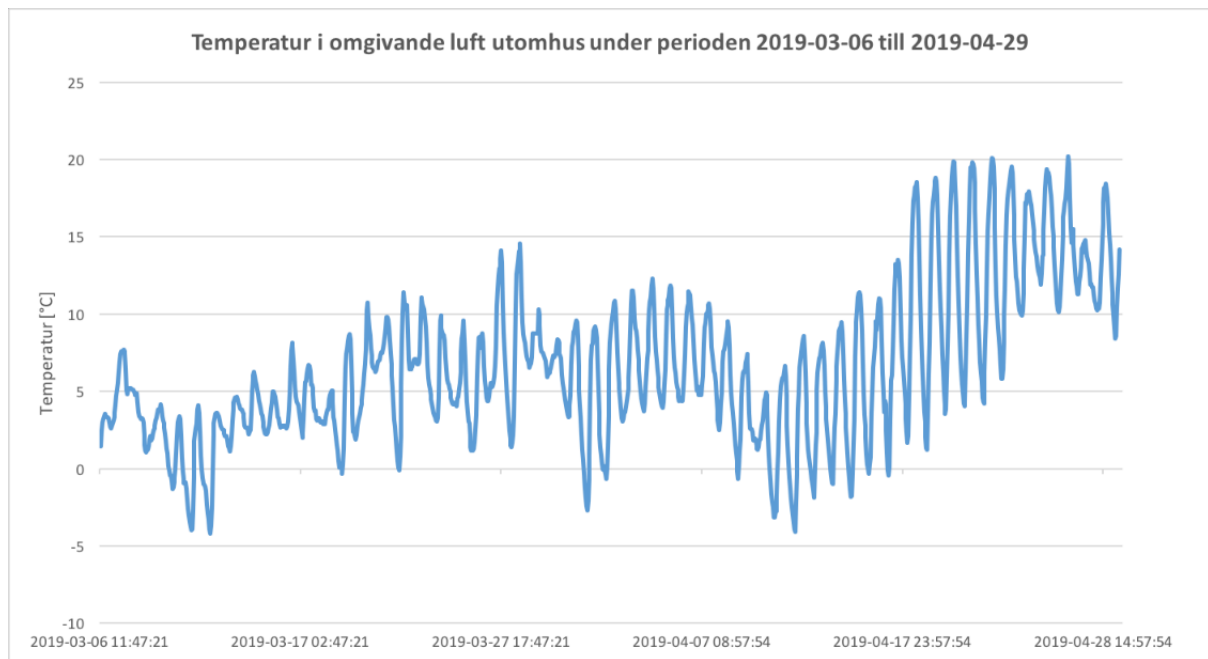
Instrumentnamn: testo 177-T4 02758056		2019-03-28 1			
Starttid: 2019-03-22 13:20:38		Minimum	Maximum	Medelvärde	Gränsvärden
Sluttid: 2019-03-28 16:20:38	Channel 1 [°C]	19,6	20,6	20,019	-100,0/1000,0
Mätkanaler: 4	Channel 2 [°C]	19,7	20,5	20,098	-100,0/1000,0
Mätvärden: 148	Channel 3 [°C]	20,2	21,2	20,741	-100,0/1000,0
C1: SN 02758056 / 404	Channel 4 [°C]	20,3	21,2	20,773	-100,0/1000,0

Tabell 6. Genomsnittlig temperatur i betongprover inomhus under perioden 2019-03-22 till 2019-03-28.

BetongDatorn 5.0 och temperaturslingor i betongprover inomhus				
	Mätpunkt 1	Mätpunkt 2	Mätpunkt 3	Mätpunkt 4
Vct	0,55	0,55	0,40	0,40
Djup	150 mm	75 mm	150 mm	75 mm
Medeltemp	19,9 °C	20,0 °C	20,7 °C	20,7 °C

#### 4.1.2 Temperatur utomhus

Temperaturdata för simuleringar i PPB baseras på lufttemperatur utomhus loggad med Mitec AT40g med fukt och temperaturgivare Vaisala HMP60. Temperaturen i omgivande luft utomhus varierade från -4,2 °C till 20,2 °C. Se Figur 50.



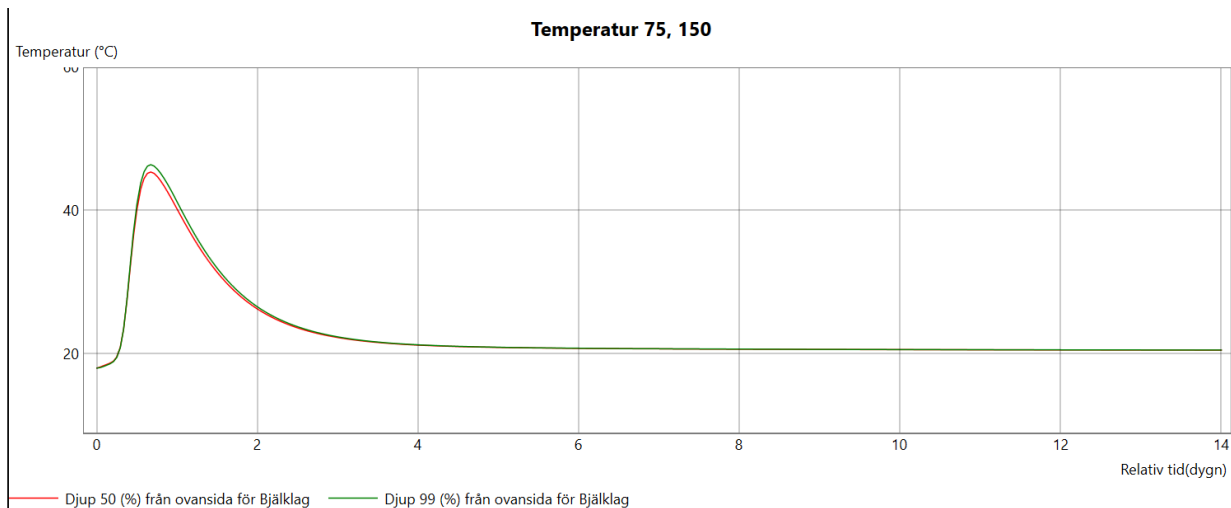
Figur 50. Temperaturvariation utomhus under perioden 2019-03-06 till 2019-04-29. Uppmätt data genom Mitec AT40g och fukt-/tempgivare Vaisala HMP60.

## 4.2 Temperatur i betongprover – simuleringar i PPB

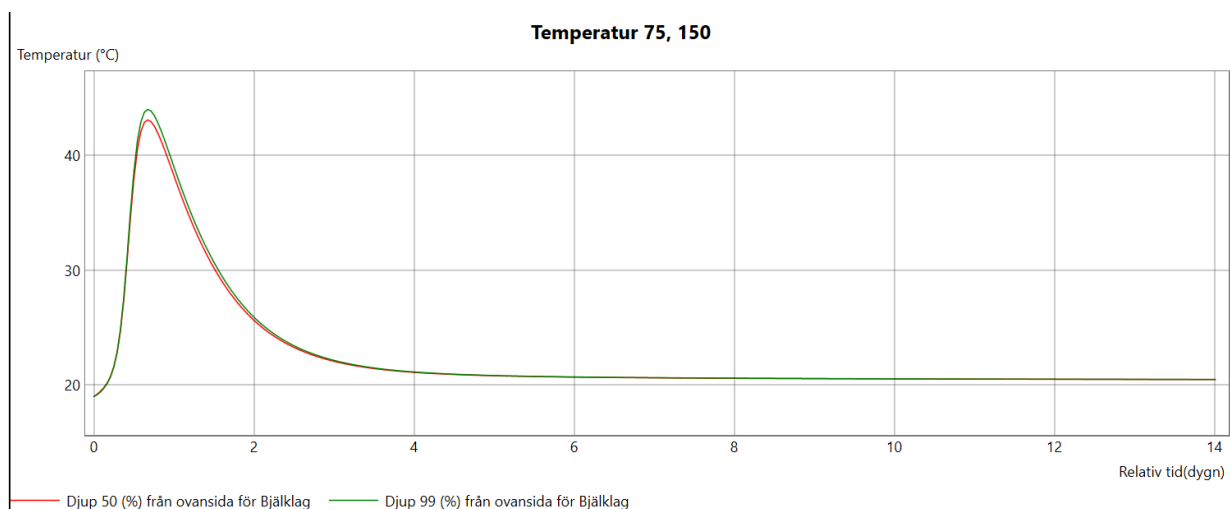
Simuleringar i PPB är baserade på medelvärden av lufttemperaturen inomhus, och utomhusluften matades in timme för timme i programvaran.

### 4.2.1 Temperatur i betongprover inomhus - simulering i PPB

I Figur 51 och Figur 52 visas diagram för simulerad temperaturutveckling i betong med vct 0,40 och 0,55 första 14 dyggen, för prover förvarade i inomhusmiljö. Röd linje symboliserar djupet på 75 mm och grön linje symboliserar djupet på 150 mm. För vct 0,40 och djup 75 mm uppnåddes en simulerad maxtemperatur på 45,3 °C och på djup 150 mm uppnåddes 46,4 °C. För vct 0,55 på djup 75 mm uppnåddes en maxtemperatur på 43,1 °C och på djup 150 mm uppnåddes 44,0°C.



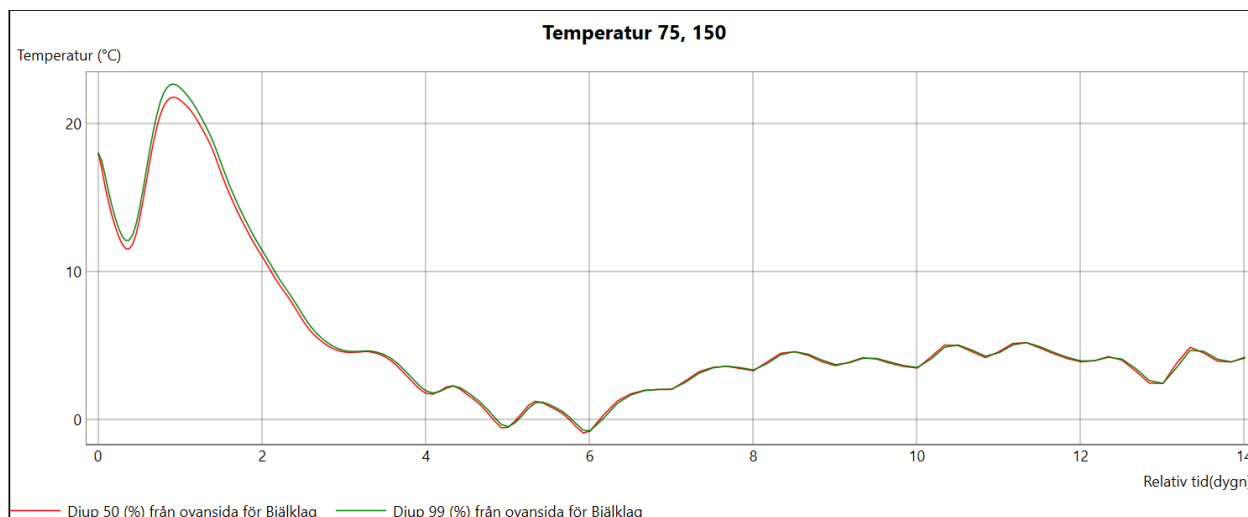
Figur 51. Diagram över simulerad temperaturutveckling i betong inomhus med vct 0.40 (djup 75 och 150 mm) de första 14 dyggen.



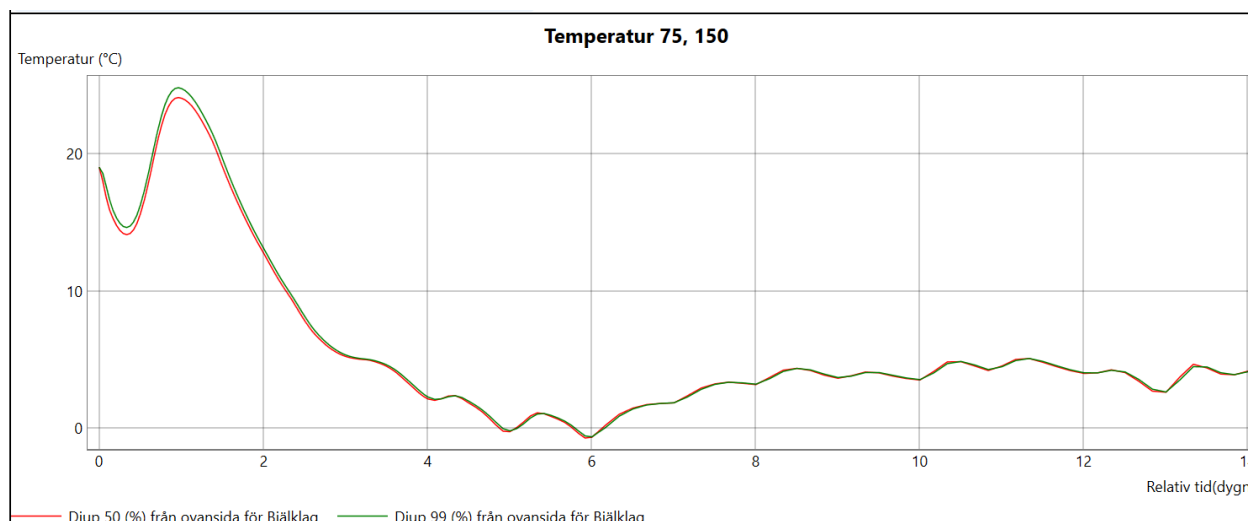
Figur 52. Diagram över simulerad temperaturutveckling i betong inomhus med vct 0.55 (djup 75 och 150 mm) de första 14 dyggen.

#### 4.2.2 Temperatur i betongprover utomhus - simulering i PPB

I Figur 53 och Figur 54 visas diagram för simulerad temperaturutveckling i betong med vct 0,40 och 0,55 första 14 dyggen för prover förvarade i utomhusmiljö. Röd linje symboliserar djupet på 75 mm och grön linje symboliserar djupet på 150 mm. För vct 0,40 och djup 75 mm uppnåddes en simulerad maxtemperatur på 26,0 °C och på djup 150 mm uppnåddes 26,8 °C. För vct 0,55 på djup 75 mm uppnåddes en maxtemperatur på 24,1 °C och på djup 150 mm uppnåddes 24,8°C.



Figur 53. Simulerad temperaturutveckling i betong utomhus med vct 0.40, första 14 dyggen.



Figur 54. Simulerad temperaturutveckling i betong utomhus med vct 0.55, första 14 dyggen.

### 4.3 Temperatur i betong - mätningar med BetongDatorn

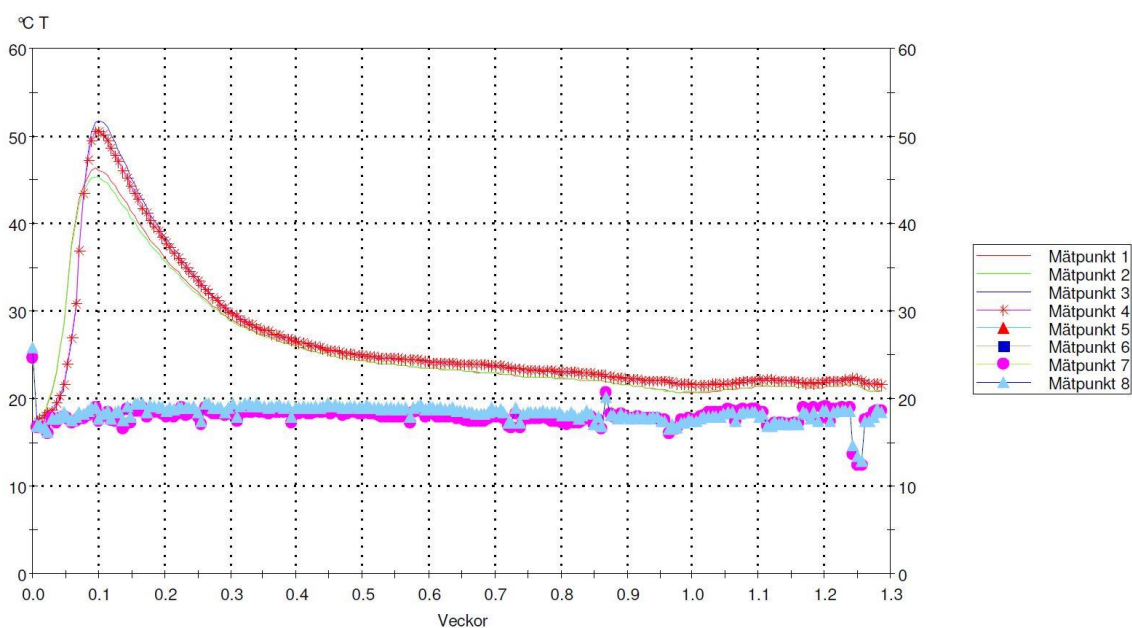
Temperaturen i betongproverna registrerades i BetongDatorn med hjälp av temperaturslingor som göts in i de 150 mm tjocka betongproverna. De gjöts ner i mitten och i botten på proverna. De högsta temperaturerna som betongproverna uppnådde under härdningen resulterade i Tabell 7. Den maximala temperaturen blev ca 15–18 °C varmare i betongproverna som var placerade inomhus. Maxtemp blev högre i botten än i mitten inomhus och det motsatta utomhus. Detta beror troligen på att temperaturen inomhus var högre än den färska betongen var. Utomhus var resultatet omvänt vilket beror på att den omgivande temperaturen var lägre än den färska betongen.

Tabell 7. Högsta uppnådda temperaturer för betongprover vct 0,40 och vct 0,55 utomhus och inomhus, uppmätt med Betongdatorn.

Djup [mm]	Vct	Max temp i btg inne [°C]	Max temp i btg ute [°C]	Differens ute/inne [°C]
75	0,40	50,6 °C	34,8 °C	15,8 °C
150	0,40	51,8 °C	33,9 °C	17,9 °C
75	0,55	45,3 °C	30,0 °C	15,3 °C
150	0,55	46,3 °C	29,1 °C	17,2 °C

#### 4.3.1 Temperatur i betongprover inomhus

Data för temperatur i betongprover förvarade inomhus är insamlade genom BetongDatorn under perioden 2019-03-06 till 2019-05-15. Figur 55 visar temperaturen i betongprover med vct 0,40 och 0,55 förvarade inomhus i olika djup, samt omgivande lufttemperatur. Se Tabell 8 för förklaring av mätpunkter. I Figur 55 visas hur temperaturen i betongprovet med vct 0,40 når ca 5 °C högre temperaturer än betongprovet med vct 0,55.



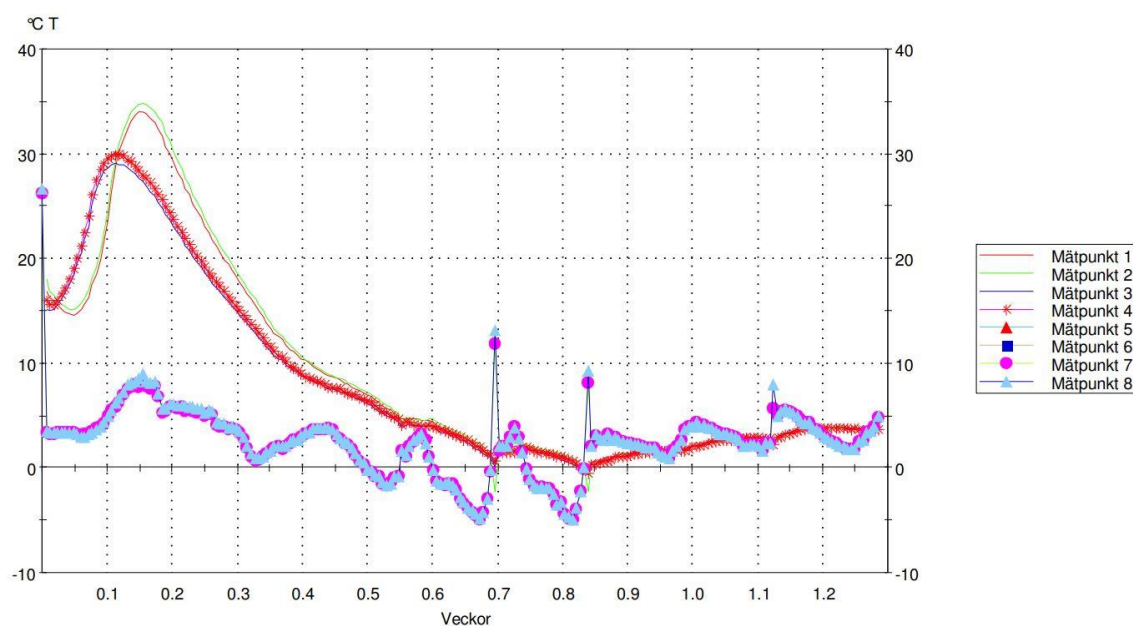
Figur 55. Temperatur i betong inomhus (mätpunkt 1 och 2 för vct 0,55 samt 3 och 4 för vct 0,40) samt temperatur i omgivande luft 1 m ovanför betongprover (mätpunkt 5 och 6) och vid betongyta (mätpunkt 7 och 8). Data uppmätt med BetongDatorn och visar temperatur över tid (veckor).

Tabell 8. Förklaring av BetongDatorns mätpunkter för prover förvarade inomhus.

Mätpunkt	Placering temperaturslinga
Mätpunkt 1	150 mm i vct 0,55
Mätpunkt 2	75 mm i vct 0,55
Mätpunkt 3	150 mm i vct 0,40
Mätpunkt 4	75 mm i vct 0,40
Mätpunkt 5	Lufttemp ca 1 m ovanför prover
Mätpunkt 6	Lufttemp ca 1 m ovanför prover
Mätpunkt 7	Lufttemp vid betongyta
Mätpunkt 8	Lufttemp vid betongyta

#### 4.3.2 Temperatur i betongprover utomhus

Data för temperatur i betongprover förvarade utomhus är insamlade genom BetongDatorn under perioden 2019-03-06 till 2019-05-15. Figur 56 visar temperaturutvecklingen i betongprover med vct 0,40 och 0,55 förvarade utomhus i de olika djupen samt omgivande lufttemperatur. Se Tabell 9 för förklaring av mätpunkter. Figur 56 visar hur temperaturen i betongprovet med vct 0,40 når ca 5 °C högre temperaturer än betongprovet med vct 0,55 vilket var väntat. Figuren visar att temperaturen i betongen hamnar i jämvikt med omgivande lufttemperatur när värmeutvecklingen är färdig i betongen.



Figur 56. Värmeutveckling i betong utomhus (mätpunkt 1 och 2 för vct 0,40 samt 3 och 4 för vct 0,55) samt temperatur i omgivande luft (mätpunkt 7 och 8). Data uppmätt med BetongDatorn.

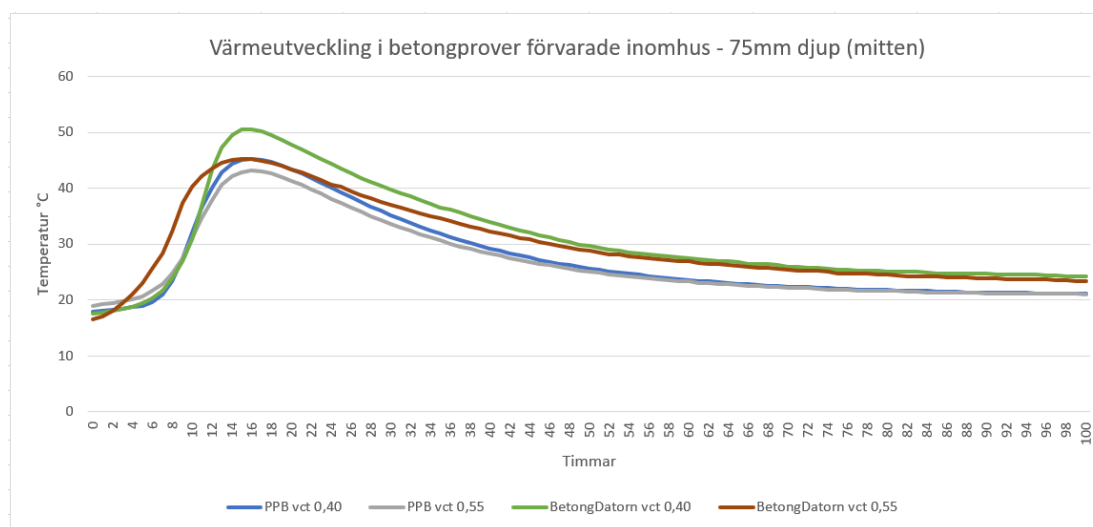
Tabell 9. Förklaring av BetongDatorns mätpunkter för prover förvarade utomhus.

Mätpunkt	Placering temperaturslinga
Mätpunkt 1	Botten vct 0,40
Mätpunkt 2	Mitten vct 0,40
Mätpunkt 3	Botten vct 0,55
Mätpunkt 4	Mitten vct 0,55
Mätpunkt 5	Används ej
Mätpunkt 6	Används ej
Mätpunkt 7	Lufttemp nära betongprov
Mätpunkt 8	Lufttemp nära betongprov

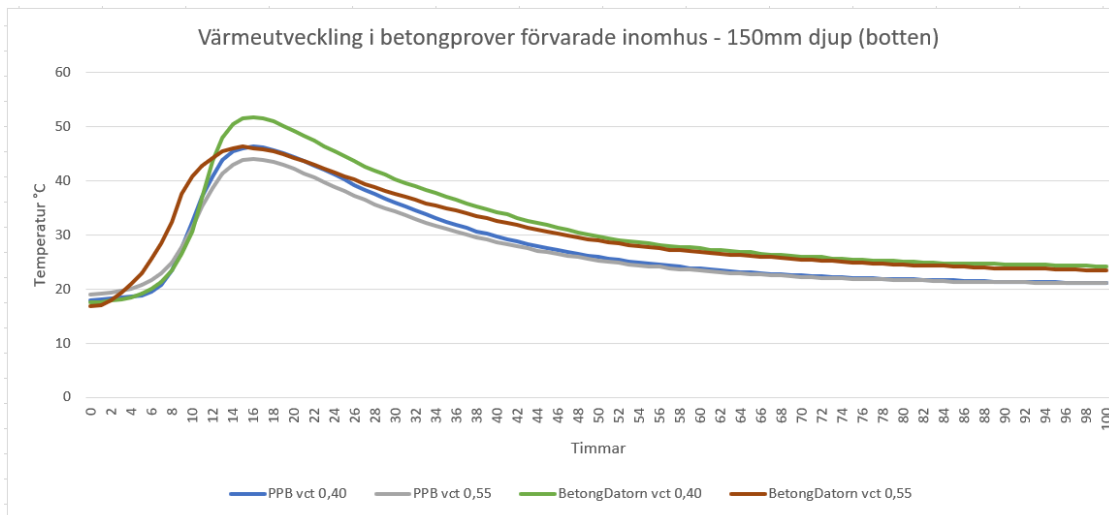
## 4.4 Jämförelse: PPB och BetongDatorn - temperatur i betong

### 4.4.1 Inomhus

Temperaturen i betongprover förvarade inomhus stämde inte överens med simulering i PPB de inledande 50 timmarna. Se Figur 57 och Figur 58. Figurerna visar att temperaturerna som uppmättes med BetongDatorn låg 5,4 °C högre än simulerad temperatur för vct 0,40 och 2,3 °C högre för vct 0,55. Att temperaturen blev högre i verkligheten än i simulering kan bero på att cementet i proverna skiljer sig från cementet som PPB är baserat på. Eftersom andelen flygaska var ca 5 % lägre i aktuellt cement än i PPB så finns en risk för ett annorlunda resultat. En lägre andel flygaska i aktuellt cement har en högre andel cement vilket leder till ökad temperaturutveckling. Att temperaturen inte blev ännu högre kan bero på att den lägre andelen flygaska har kompenserats med en kortare malningstid av cementet d.v.s. blivit mindre finmalt.



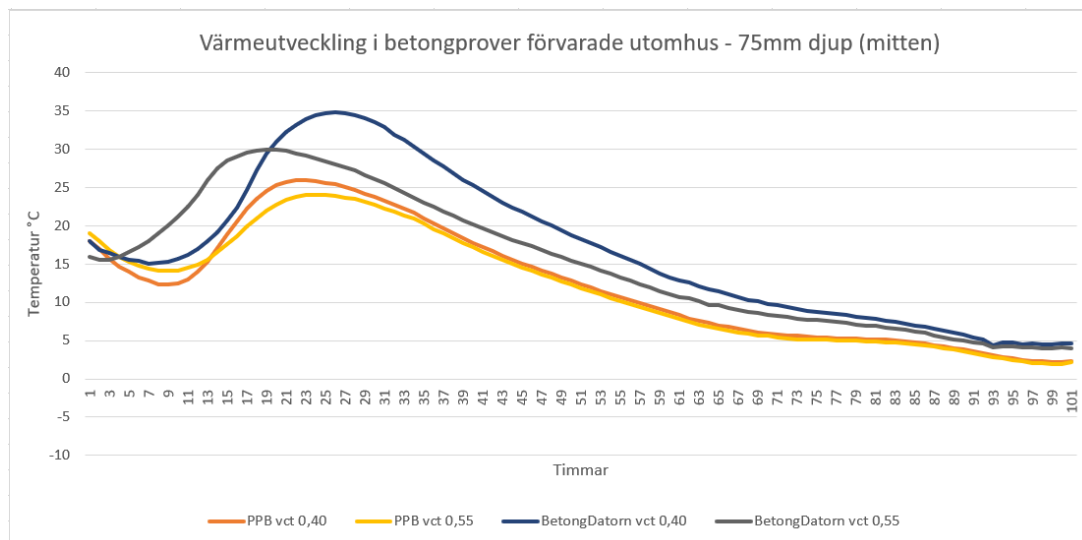
Figur 57. Temperaturutvecklingen i betong inomhus på 75 mm djup under de inledande 100 timmarna efter gjutning.



Figur 58. Temperaturutvecklingen i betong inomhus på 150 mm djup under de inledande 100 timmarna efter gjutning.

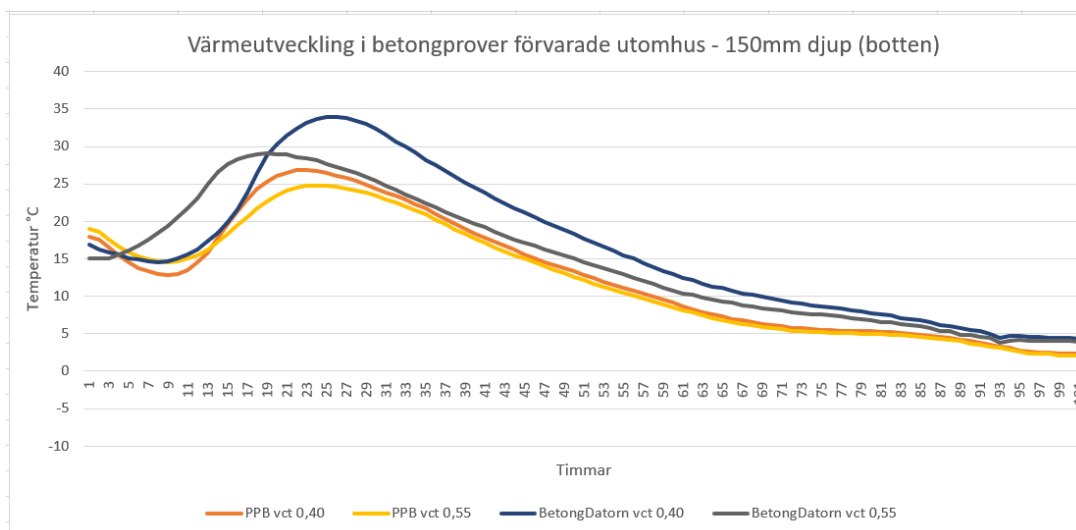
#### 4.4.2 Utomhus

Temperaturutvecklingen i betongprover förvarade utomhus stämde inte heller de överens med simulering i PPB. Se Figur 59 och Figur 60. Figurerna visar att temperaturerna som uppmättes med BetongDatorm låg 7,1 °C högre än simulerad temperatur för vct 0,40 och 5,9 °C högre för vct 0,55.



Figur 59. Temperaturutvecklingen i betong utomhus på 75 mm djup under de inledande 100 timmarna efter gjutning.





Figur 60. Temperaturutvecklingen i betong utomhus på 150 mm djup under de inledande 100 timmarna efter gjutning.

## 4.5 Kalibrering av fuktgivare

Se kap. 3.3.1 för beskrivning av utförandet.

### 4.5.1 Vaisala HMP60 - utomhus

Fukt- och tempgivaren Vaisala HMP60 som registrerade fukten utomhus fick sitta 3 dagar i fuktburkar med bestämda relativa fuktigheter: 11,3, 75,3 och 95,0 % RF. Dessa kontroller utfördes för att kalibrera givarna. Kontrollen visade att givaren avvek med 8,8 % vid 95,0 % RF, 5,0 % vid 75,3 % RF och 0,1 % vid 11,3 % RF. Se Tabell 10. Givaren visade störst avvikelse vid höga RF. Detta innebar att kalibreringskurvor samt formler utformades för att korrigera uppmätta värden innan de fördes in i PPB, se kap. 4.5.3.

Tabell 10. Avvikelse för givare av fabrikat Vaisala HMP60.

Uppmätt RF	Korrigerat RF	Avvikelse
11,4 %	11,3 %	0,1 %
70,3 %	75,3 %	5,0 %
86,2 %	95,0 %	8,8 %

### 4.5.2 Vaisala HMP50 - inomhus

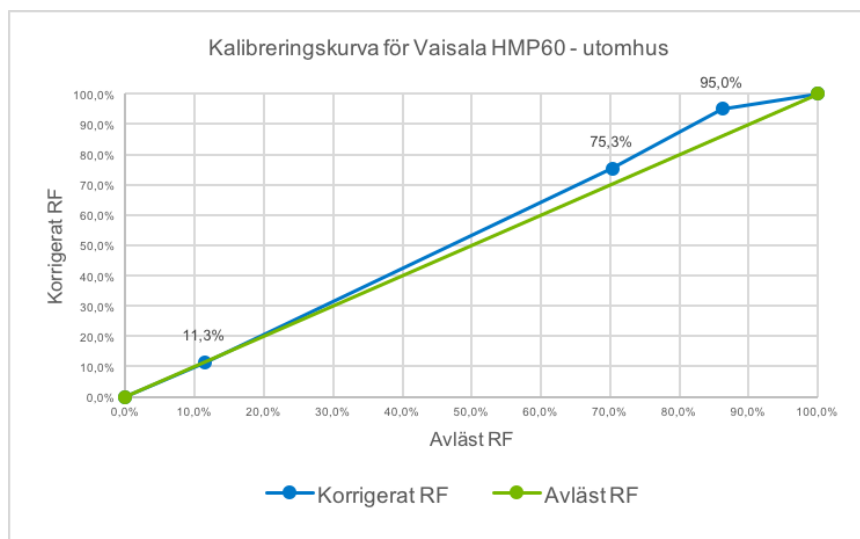
Fukt- och tempgivaren Vaisala HMP50 som registrerade fukten inomhus fick sitta 3 dagar i fuktburkar med bestämda relativa fuktigheter: 11,3, 75,3 och 95,0 % RF. Kontrollen visade att givaren avvek med 9,8 % vid 95,0 % RF, 6,0 % vid 75,3 % RF och 1,1 % vid 11,3 % RF. Se Tabell 11. Givaren visade störst avvikelse vid höga RF likt den andra givaren.

Tabell 11. Avvikelse för givare Vaisala HMP50.

Uppmätt RF	Korrigerat RF	Avvikelse
10,2 %	11,3 %	1,1 %
69,3 %	75,3 %	6,0 %
85,2 %	95,0 %	9,8 %

#### 4.5.3 Kalibreringskurvor och formler för korrigering av uppmätt RF

Kalibreringskurvor och formler för korrigering av uppmätt RF till korrekt RF utformades i Excel efter kontroll mot fuktburkar. Se Bilaga 6 för framställandet av grafer och formler. I Figur 61 visas kalibreringskurva för fuktgivare Vaisala HMP60 som registrerade relativ fuktighet utomhus och i Tabell 12 visas formler för korrigering av uppmätt RF. Den horisontella x-axeln i graferna visar avläst värde och den vertikala y-axeln visar korrekt värde. I grafen visas en grön linje för uppmätt värde och blå linje för korrekt värde enligt fuktburk. Avvikelsen och korrigeringen blir differensen mellan de båda linjerna i vertikal riktning.

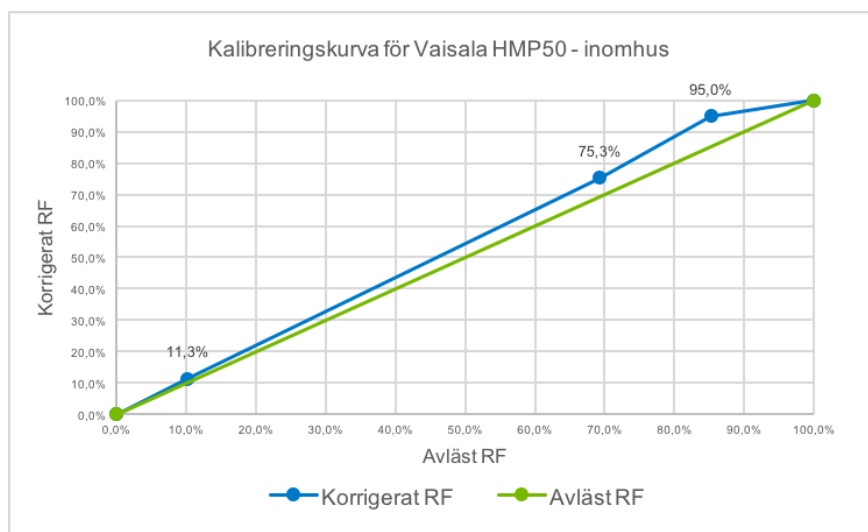


Figur 61. Graf för kalibrering av RF skapad i Excel för givare Vaisala HMP60.

Tabell 12. Formler för korrigering av RF för givare Vaisala HMP60.

Intervall uppmätt RF	Formel för korrigering av RF
0 – 11,4 %	$0,99x$
11,4 – 70,3 %	$1,09x - 1,09$
70,3 – 86,2 %	$1,24x - 11,80$
86,2 – 100 %	$0,36x + 63,77$

I Figur 62 visas kalibreringskurva för fuktgivare Vaisala HMP50 som registrerade relativ fuktighet inomhus och i Tabell 13 visas formler för korrigering av uppmätt RF.



Figur 62. Graf för kalibrering av RF skapad i Excel för givare Vaisala HMP50.

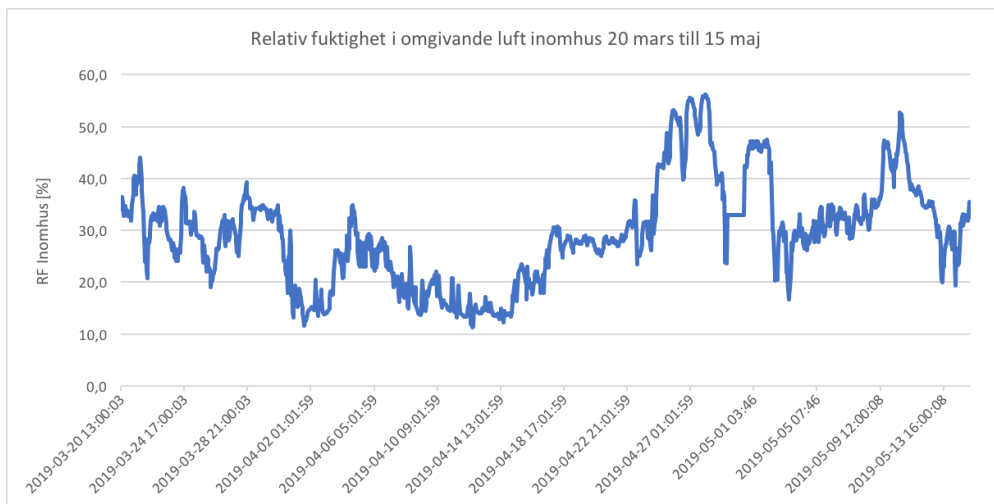
Tabell 13. Formler för korrigering av RF för givare Vaisala HMP50.

Intervall uppmätt RF	Formel för korrigering av RF
0 – 10,2 %	1,11X
10,2 – 69,3%	1,08x + 0,25
69,3 – 85,2 %	1,24x – 10,56
85,2 - 100 %	0,34x + 66,22

## 4.6 Omgivande relativa fuktigheter - Indata till PPB

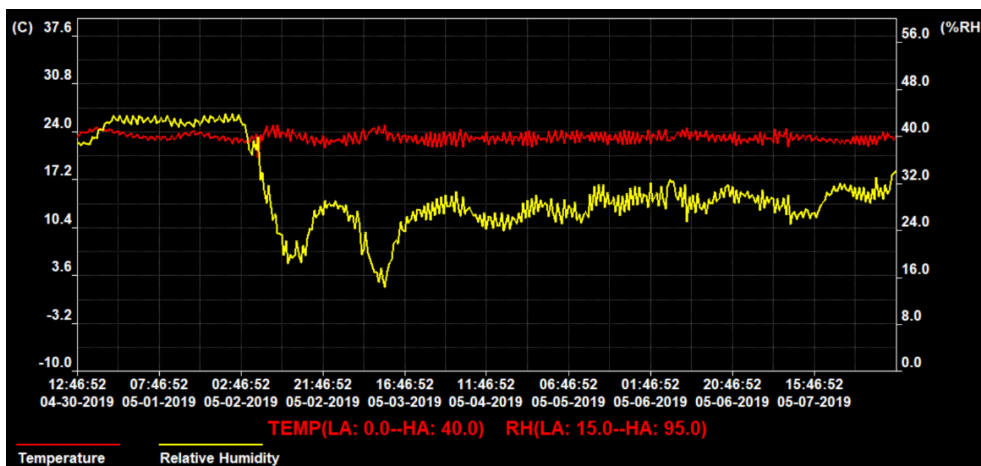
### 4.6.1 Relativ fuktighet inomhus

Den relativa fuktigheten loggades inomhus med en Mitec AT40g och fukt- och temperaturgivare Vaisala HMP50. Korrigeringen av uppmätt RF utfördes i Excel efter kontroll mot fuktburkar. Eftersom den relativa fuktigheten inomhus alltid var lägre än i betongproverna antogs betongproverna vara i konstant uttorkning. Med orsak av detta togs ett genomsnittligt värde fram av den relativa fuktigheten inomhus för att användas i PPB för simulering av uttorkning. Den genomsnittliga relativa fuktigheten inomhus efter korrigerat värde blev 29,3 % för perioden 2019-03-20 till 2019-05-15. Se Figur 63. Innan 2019-03-20 var proverna inplastade och det fanns ingen anledning till fuktmätning.



Figur 63. Relativ fuktighet inomhus under perioden 2019-03-20 till 2019-05-15.

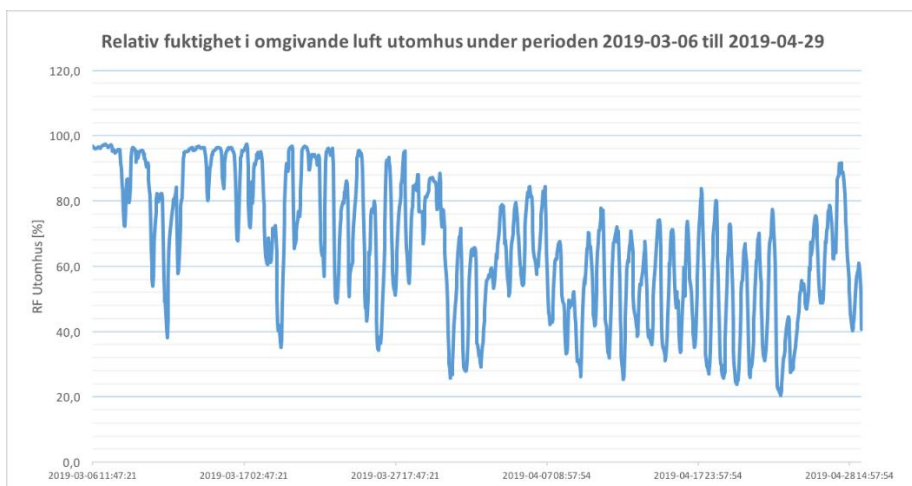
Under perioden 2019-04-29 till 2019-05-08 kontrollerades fuktgivarna mot fuktburkar för korrigering av uppmätta värden. Under perioden 2019-04-30 till 2019-05-08 användes en Standard ST-171 datalogger från Clas Ohlson som ersättning. Den visade ett genomsnittligt värde på ca 30,7 % RF inomhus och detta värde användes som ersättning i PPB för den korta perioden. Se Figur 64.



Figur 64. Relativ fuktighet inomhus under perioden 2019-04-30 till 2019-05-08 uppmätt med fuktlogger ST-171 och programvara fr. Clas Ohlson.

#### 4.6.2 Relativ fuktighet utomhus

Den relativa fuktigheten utomhus loggades med en Mitec AT40g och fukt- och temperaturgivare Vaisala HMP60. Korrigeringen av uppmätt RF utfördes i Excel efter kontroll mot fuktburkar. Den relativa fuktigheten i omgivande luft utomhus efter korrigering varierade från 20,4 % till 97,5 %. Se Figur 65. Uppmätta värden matades in timme för timme för simulering av uttorkning i PPB.



Figur 65. Relativ fuktighet utomhus under perioden 2019-03-06 till 2019-04-29.

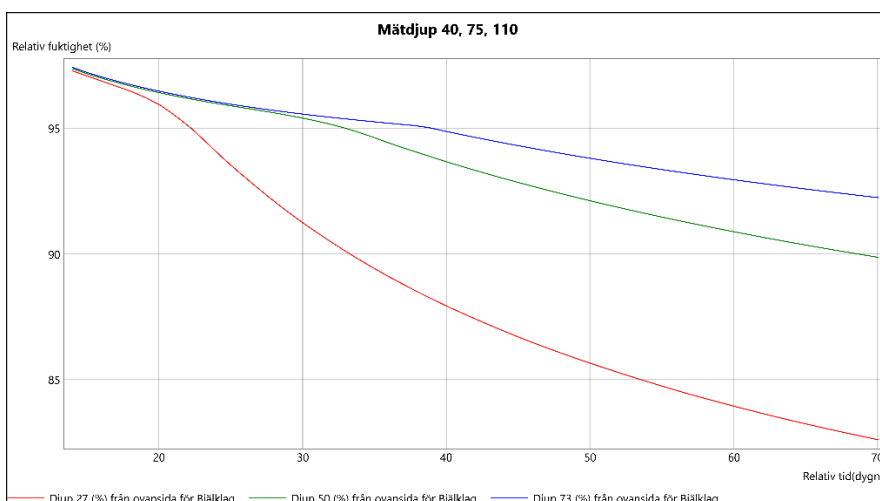
## 4.7 Simuleringar i PPB – fukt i betong

### 4.7.1 Simulering i PPB – fukt i betongprover i inomhusmiljö

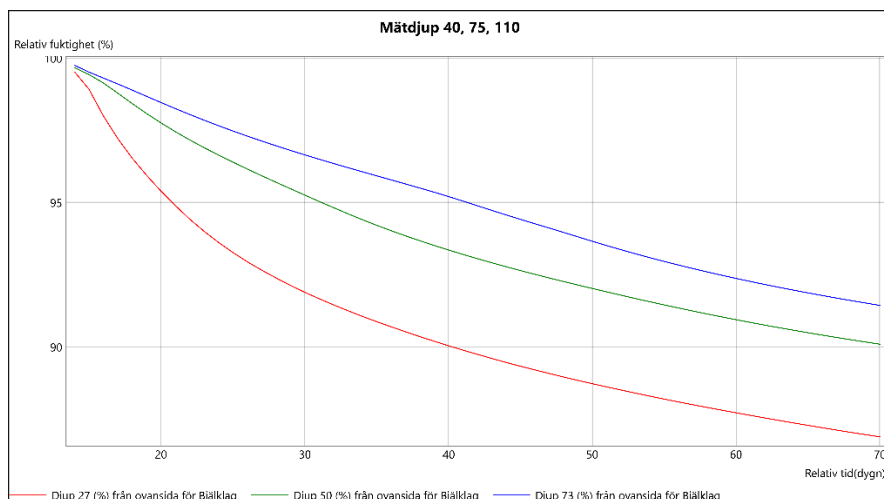
Simuleringar av uttorkning i betong baserades på medelvärden av loggad relativ fuktighet och temperatur inomhus under perioden 2019-03-06 till 2019-05-15. Simuleringarna resulterade i Tabell 14. I Figur 66 och Figur 67 visas diagram för simuleringar av relativa fuktigheter i betongprover med vct 0,40 och vct 0,55 på djupen 110, 75 och 40 mm.

Tabell 14. Relativa fuktigheter i betong baserade på simuleringar i inomhusmiljö, 70 dygn efter gjutning.

PPB-simulering (loggade data) i betongprover inomhus 2019-05-15						
vct	vct 0,40			vct 0,55		
Djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF	92,2 %	89,9 %	82,6 %	91,4 %	90,1 %	86,9 %



Figur 66. Simulering av relativ fuktighet i betongprov med vct 0,40 förvarad i inomhusmiljö.



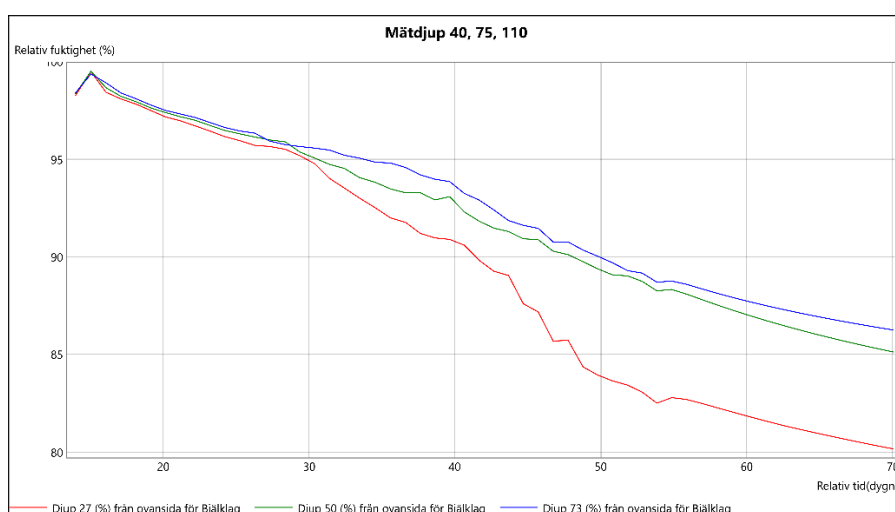
Figur 67. Simulering av relativ fuktighet i betongprov med vct 0,55 förvarad i inomhusmiljö.

#### 4.7.2 Simulering i PPB – fukt i betongprover i utomhusmiljö

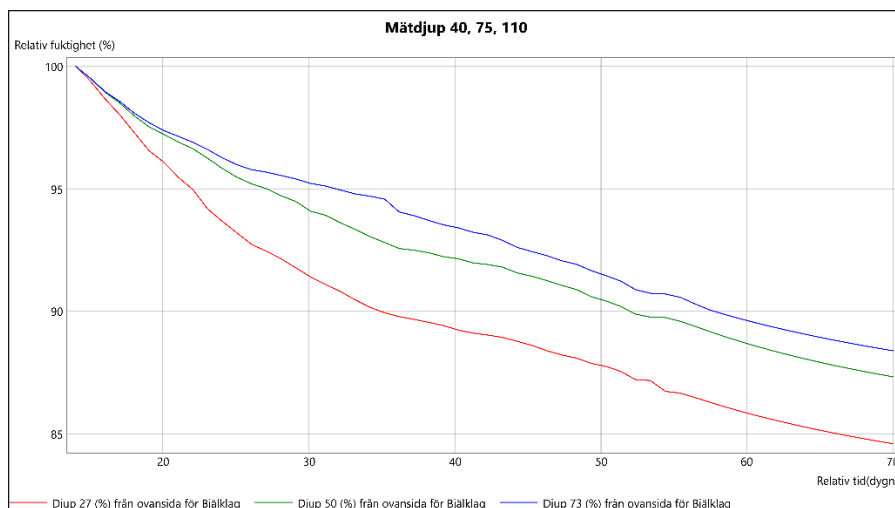
Simuleringar av uttorkningen baserades på loggade värden timme för timme i utomhusmiljö under perioden 2019-03-06 till 2019-04-29, och med genomsnittliga värden för inomhusmiljö under perioden 2019-04-29 till 2019-05-15. Simuleringarna resulterande i Tabell 15. I Figur 68 och Figur 69 visas diagram för simuleringar av relativa fuktigheter i betongprover med vct 0,40 och vct 0,55 på djupen 110, 75 och 40 mm.

Tabell 15. Relativa fuktigheter i betong baserade på simuleringar i utomhusmiljö, 70 dygn efter gjutning.

PPB-simulering (loggade data) i betongprover utomhus						
vct	vct 0,40			vct 0,55		
Djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF	86,2 %	85,1 %	80,2 %	88,4 %	87,3 %	84,6 %



Figur 68. Simulering av relativ fuktighet i betongprov med vct 0,40 förvarad i utomhusmiljö.



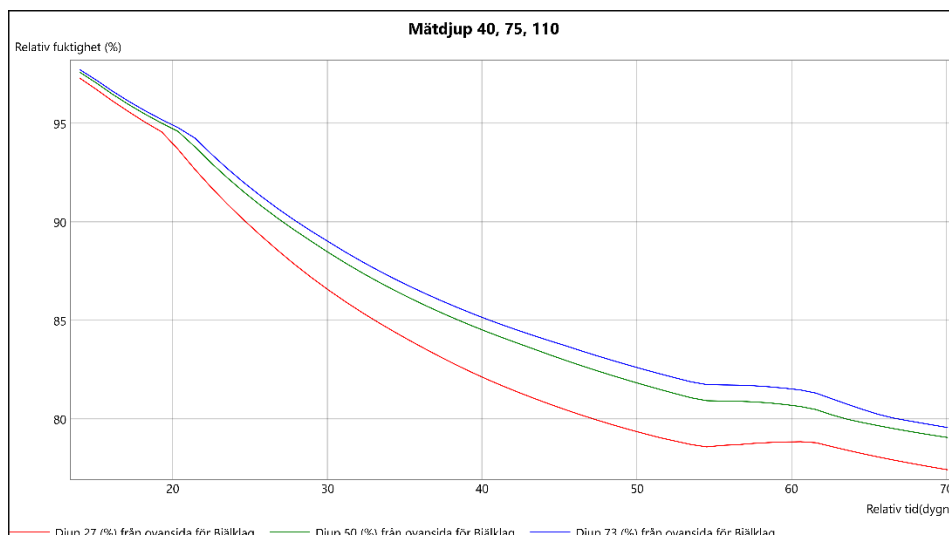
Figur 69. Simulering av relativ fuktighet i betongprov med vct 0,55 förvarad i utomhusmiljö.

#### 4.7.3 Simuleringar i PPB med inbyggda klimatdata

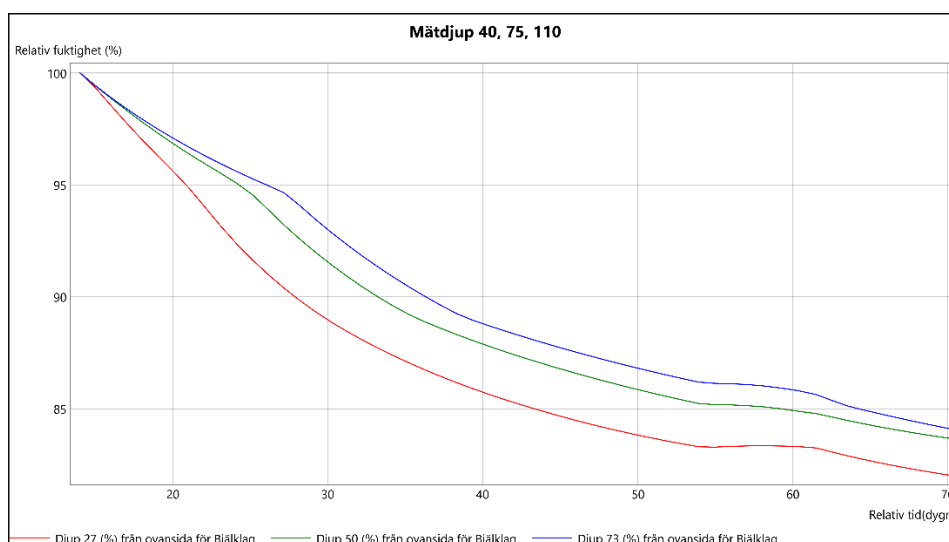
Simuleringar av relativa fuktigheter i betongprover utomhus genom inbyggda klimatdata i PPB är baserade på historiska väderdata från SMHI från ort Vänersborg. Betongproverna som förvarades utomhus flyttades till inomhusmiljö en period inför fuktmätning, vilket simulerades i PPB. Simuleringar med klimatdata under perioden 2019-03-06 till 2019-04-29 och egna uppmätta klimatdata inomhus under perioden 2019-04-29 till 2019-05-15 resulterade i Tabell 16. I Figur 70 och Figur 71 visas diagram från simulerade relativa fuktigheter i betongprover med vct 0,40 och vct 0,55.

Tabell 16. RF i betong vid simuleringar i PPB med klimatdata under perioden 2019-03-06 till 2019-05-15.

PPB-simulering (inbyggd klimatdata) i betongprover utomhus						
vct	vct 0,40			vct 0,55		
Djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF	79,6 %	79,1 %	77,4 %	84,1 %	83,7 %	82,0 %



Figur 70. Diagram över relativ fuktighet i betong med vct 0,40, simulerad i PPB med klimatdata.



Figur 71. Diagram över relativ fuktighet i betong med vct 0,55, simulerad i PPB med klimatdata.

## 4.8 Fuktmätning i betong enligt RBK-metod

Fuktmätningar utfördes på djupen 110, 75 och 40 mm i betongproverna. Se Bilaga 7. RBK-auktoriserade borrhålmätningar med HumiGuard visade att uttorkningen var högst på 40 mm djup och att den relativa fuktigheten steg med djupet. Det beror på den enkelsidiga uttorkning som sker i proverna och det faller sig naturligt att den största uttorkningen sker närmast ytan. Resultat från RBK-fuktmätning visar att betong med vct 0,40 torkar snabbare än betong med vct 0,55. Anledningen till att vct 0,40 torkar snabbare än 0,55 är att den har en större självuttorkning, vilket beror på att andelen vatten är ca 20 % mindre och andelen cement är ca 17 % större.



För proverna som har torkat i inomhusmiljö skiljer sig resultatet med 1,8–2,5 procentenheter mellan de olika vct. För proverna som har torkat i utomhusmiljö skiljer sig uttorkningen med 3,3–3,9 procentenheter mellan de olika vct.

#### 4.8.1 Relativ fuktighet i betongprover i inomhusmiljö

Resultatet för fuktmätningar utförda 2019-05-15 enligt RBK-metod i prover som förvarats i inomhusmiljö redovisas i Tabell 17.

Tabell 17. Relativ fuktighet vid specifikt djup i prover förvarade inomhus - mätning utförd 2019-05-15.

<b>RBK-fuktmätning i betongprover inomhus 2019-05-15</b>						
<b>vct</b>	<b>vct 0,40</b>			<b>vct 0,55</b>		
<b>Djup</b>	<b>110 mm</b>	<b>75 mm</b>	<b>40 mm</b>	<b>110 mm</b>	<b>75 mm</b>	<b>40 mm</b>
<b>RF</b>	91,7 %	90,2 %	87,2 %	94,0 %	92,7 %	89,0 %

#### 4.8.2 Relativ fuktighet i betongprover i utomhusmiljö

Resultatet för fuktmätningar utförda 2019-05-15 enligt RBK-metod i prover som förvarats i utomhusmiljö redovisas i Tabell 18.

Tabell 18. Relativ fuktighet vid specifikt djup i prover förvarade utomhus - mätning utförd 2019-05-15.

<b>RBK-fuktmätning i betongprover utomhus 2019-05-15</b>						
<b>vct</b>	<b>vct 0,40</b>			<b>vct 0,55</b>		
<b>Djup</b>	<b>110 mm</b>	<b>75 mm</b>	<b>40 mm</b>	<b>110 mm</b>	<b>75 mm</b>	<b>40 mm</b>
<b>RF</b>	92,9 %	91,8 %	88,8 %	96,8 %	95,1 %	92,7 %

## 5 Diskussion

### 5.1 Jämförelse: PPB och RBK-fuktmätningar

Jämförelse mellan simuleringar i PPB med egna loggade klimatdata och genomförda fuktmätningar i betongprover visar att PPB, i 11 av 12 fall, simulerar en högre uttorkning och därmed överskattar uttorkningen. Se Tabell 19. I ett fall, vid 110 mm djup, vct 0,40, inomhus, visar PPB 0,5 procentenheter lägre uttorkning än verkligheten. I resterande elva fall visar PPB tvärt emot en överskattning av uttorkningen. PPB överskattade uttorkningen med 6,7–8,6 procentenheter för betongprover förvarade utomhus och med 0,3–4,6 procentenheter för prover förvarade inomhus.

Simuleringar i PPB visar att betongprover förvarade utomhus bör ha torkat mer än betongprover förvarade inomhus efter 70 dagar. Se Tabell 19. Genomförda fuktmätningar i betongprover motsäger detta eftersom uttorkningen var större i betongproverna som hade förvarats inomhus. Det är dock oklart om betongproverna förvarade utomhus torkar snabbare över en längre tid. För att bekräfta detta måste fler fuktmätningar utföras i proverna längre fram i tiden. Det kan då bli möjligt att avgöra om betongproverna som förvarats utomhus torkar snabbare än de som förvarats inomhus.

Tabell 19. Jämförelse: simuleringar i PPB och resultat från fuktmätningar i betongprover enligt RBK-metod.

	Simulering i PPB									RBK fuktmätningar					
	Inomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - inb. klimatdata			Inomhusmiljö			Utomhusmiljö		
Borrhåls - djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF [%] vct 0,55	91,4	90,1	86,9	88,4	87,3	84,6	84,1	83,7	82,0	94,0	92,7	89,0	96,8	95,1	92,7
RF [%] vct 0,40	92,2	89,9	82,6	86,2	85,1	80,2	79,6	79,1	77,4	91,7	90,2	87,2	92,9	91,8	88,8

Jämförelse mellan simuleringar med inbyggda klimatdata i PPB och genomförda fuktmätningar i betongprover förvarade utomhus, visar att PPB simulerar en ännu högre uttorkning än med egna loggade klimatdata. Se Tabell 19. I samtliga fall visar PPB med inbyggda klimatdata en överskattning av uttorkningen med 10,7–13,3 procentenheter mot genomförda fuktmätningar.

## 5.2 Utvärdering av resultat

### 5.2.1 Skillnaden mellan simuleringar i PPB och genomförda mätningar

Resultatet visade att PPB överskattade uttorkningen med 6,7–8,6 procentenheter i betongproverna som förvarades utomhus och med 4,6 procentenheter i betongprovet med vct 0,40 som förvarades inomhus, på 40 mm djup. För prover förvarade inomhus stämmer PPB i de flesta fall. Se Tabell 20. Mindre skillnader kan bero på att aktuellt cement var något annorlunda mot cementet som PPB baseras på. Orsaken till de större differenserna kan ha flera anledningar. När betongproverna plastades in efter gjutning skapades en luftspalt över betongytan eftersom plasten drogs över pallkragarna som nådde ca 15 cm över ytan. Detta kan ha inneburit att luftspalten hade en isolerande effekt där kondensbildning kunnat uppstå vilket kan påverkat resultatet. Detta kan ha varit orsaken till att maxtemperaturerna var högre vid genomförda mätningar än vid simuleringar i PPB.

Tabell 20. Tabell innan korrigering till korrekt maxtemperatur, gröna siffror markerar differensen mellan PPB och genomförda fuktmätningar mindre än 3 procentenheter och röda siffror större än 3 procentenheter.

	Simulering i PPB									RBK fuktmätningar					
	Inomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - inb. klimatdata			Inomhusmiljö			Utomhusmiljö		
Borrhåls - djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF [%] vct 0,55	91,4	90,1	86,9	88,4	87,3	84,6	84,1	83,7	82,0	94,0	92,7	89,0	96,8	95,1	92,7
RF [%] vct 0,40	92,2	89,9	82,6	86,2	85,1	80,2	79,6	79,1	77,4	91,7	90,2	87,2	92,9	91,8	88,8

För att undersöka hur stor påverkan maxtemperaturen hade på simuleringarna så gjordes förändringar av förhållanden i PPB för att uppnå liknande maxtemperatur i simuleringar som de genomförda mätningarna från BetongDatorn. Förändringen i PPB krävde att presenning byttes ut mot en isolerande matta på 1 cm. Ibland krävdes även en förändring av omgivande lufttemperatur under det första dygnet i PPB för att nå rätt maxtemperatur. Detta resulterade i Tabell 21, där den relativa fuktigheten ökade mest i betongprover med vct 0,40 förvarade utomhus. Ökningen sammanställs i Tabell 22.

Tabell 21. Tabell efter korrigering till korrekt maxtemperatur, gröna siffror markerar differensen mellan PPB och genomförda fuktmätningar mindre än 3 procentenheter och röda siffror större än 3 procentenheter.

	Simulering i PPB									RBK fuktmätningar					
	Inomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - inb. klimatdata			Inomhusmiljö			Utomhusmiljö		
Borrhåls- djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF [%] vct 0,55	92,1	90,7	87,4	89,4	88,4	85,7	86,2	86,3	84,3	94,0	92,7	89,0	96,8	95,1	92,7
RF [%] vct 0,40	93,1	90,6	83,2	90,2	89,6	84,2	87,9	87,5	83,7	91,7	90,2	87,2	92,9	91,8	88,8

Tabell 22. Ökning av relativ fuktighet vid korrigering av maxtemperatur i PPB.

	Ökning av relativ fuktighet vid korrigering av maxtemperatur i PPB.								
	Inomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - egna data			Utomhusmiljö - inb. klimatdata		
Borrhåls- djup	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm	110 mm	75 mm	40 mm
RF [%] vct 0,55	+0,7	+0,6	+0,5	+1,0	+1,1	+1,1	+2,1	+2,6	+2,3
RF [%] vct 0,40	+0,9	+0,7	+0,6	+4,0	+4,5	+4,0	+8,3	+8,4	+6,3

För betongprovet som förvarades utomhus med vct 0,55 blev skillnaden liten genom förändringarna i PPB. Enligt de nya simuleringarna i PPB med korrekt maxtemperatur blev ökningen av RF ca 1 procentenhet i de olika djupen. Enligt Marcin Stelmarczyk<sup>2</sup> har vct 0,55 lägre grad av självuttorkning än vct 0,40 och en temperaturhöjning kommer därför ge en mindre påverkan av den relativa fuktigheten. De höga relativa fuktigheterna i betongproverna kan enligt honom orsakats av kondensbildning i spalten mellan betong och plast under de första 14 dagarna. När den fuktiga luften i spalten kyls ned på nätterna uppkommer kondens som kan sugas in i betongen. Eftersom vct 0,55 är en relativt öppen betong kommer det kondenserande vattnet tränga in i betongen och påverka uttorkningen. När luften sedan värms upp på dagen kommer den bli torrare och kan då suga in fuktig luft från omgivningen genom otätheter där plasten är fäst. Fenomenet kan ha en mycket större inverkan på vct 0,55 än på vct 0,40 på grund av skillnaden i betongens täthet samt hur snabbt den byggs upp. Detta kan ge ett ökat fukttillstånd under de första 14 dagarna enligt Stelmarczyk och detta är något som PPB inte kan simulera i dagsläget. En annan orsak till de höga relativa fuktigheterna kan enligt honom orsakats av formen och pallkragarna som stack upp ca 15 cm ovan betongytan. Luften kan bli stillastående och detta kan orsaka högre luftfuktigheter vid betongytan vilket leder till att diffusionsuttorkningen blir lägre. Detta kan leda till att mer fukt stannar i betongen eftersom drivkraften minskar.

<sup>2</sup> Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic, Civ. Ing, utvecklare av PPB, personlig kommunikation den 21 maj 2019.

En ökning av maxtemperaturen med ca 5-10 °C i PPB visar att temperaturen har stor betydelse för uttorkningen. För betongprovet som förvarades utomhus med vct 0,40 blev skillnaden i RF stor i PPB och ökade med ca 4 procentenheter. Ökningen av RF innebär att simuleringen liknar de genomförda fuktmätningarna på djupen 75 och 110 mm. På djupet 40 mm utomhus förblev skillnaden mot genomförda fuktmätningar fortsatt större än 3 procentenheter. Enligt Stelmarczyk kan detta bero på kondensbildning under plasten som runnit ner på betongen och därmed höjt den relativa fuktigheten i det yttre skiktet av betongen. Med inbyggda klimatdata ökade RF med ca 6-8 procentenheter i PPB, vilket fortfarande ej räcker för att efterlikna genomförda fuktmätningar.

Att betongprovet med vct 0,40 på djupet 40 mm inomhus skiljer sig så mycket i simulering mot verklig fuktmätning kan enligt Stelmarczyk bero på att fukttransporten kan vara lite för hög i PPB och att resultatet från denna studie eventuellt kommer leda till en justering i PPB.

Vad som kan både motsäga och bekräfta hypotesen om att luftspalten påverkat resultatet för betongproverna utomhus är ett tidigare examensarbete av Frifelt & Larsson (2016), vilket liknade denna studie. Betongproverna i det examensarbetet göts med Bascement, liknande form, samma dimensioner och förvarades på samma plats som proverna i denna studie. Det som främst skiljde sig från denna studie var att de använde annan mätmetod med Testo 605-h1, borrade på 60 mm djup (ekvivalent djup) och att betongproverna vattenhärdades. I det examensarbetet var uttorkningen i betongproverna förvarade utomhus ännu lägre än i proverna i denna studie. Det är oklart om det var vattenhärdningen som orsakade den låga uttorkningen. För vct 0,50 uppnåddes 99,4 % RF i deras studie och i denna studie för vct 0,55 uppnåddes mellan 92,7-95,1 % RF. Jämför Tabell 20 med Tabell 23. Detta innebär att båda studierna visar låg uttorkning i betongprover med höga vct, förvarade utomhus, efter ca 70 dagar. Orsaken till detta kan bero på att luftspalten och kondensation i denna studie ger liknande effekter som vattenhärdningen i studien av Frifelt & Larsson (2016). Orsaken kan även vara att PPB helt enkelt överskattar uttorkningen av betong med höga vct i ett varierande klimat, vilket dock måste bekräftas genom fler studier.

Tabell 23. Relativ fuktighet på 60 mm djup i betongprover förvarade utomhus efter ca 70 dagar. I ett examensarbete av Frifelt & Larsson (2016).

	Ospacklad inomhus	Spacklad inomhus	Ospacklad utomhus	Spacklad utomhus
VCT 0,34	86,81 [%, RF]	91,07 [%, RF]	92,03 [%, RF]	92,90 [%, RF]
	Ospacklad inomhus	Spacklad inomhus	Ospacklad utomhus	Spacklad utomhus
VCT 0,38	89,79 [%, RF]	90,57 [%, RF]	95,16 [%, RF]	96,64 [%, RF]
	Ospacklad inomhus	Spacklad inomhus	Ospacklad utomhus	Spacklad utomhus
VCT 0,50	93,98 [%, RF]	95,48 [%, RF]	99,37 [%, RF]	98,98 [%, RF]

### 5.2.2 PPB och dess reliabilitet

Resultaten från denna studie visar att simuleringar i PPB stämmer bra mot fuktmätningar i betongprover förvarade inomhus. I ett verkligt bygge råder oftast inte stabila klimat och det mest intressanta är resultaten från betongproverna förvarade utomhus. Betongprovet med vct 0,55 förvarat utomhus visade differenser mellan simulering och verklig fuktmätning och det kan bero på ett fukttillskott i tidig ålder, vilket diskuterades tidigare. Att kunna använda betong med vct 0,55 skulle vara positivt för klimatbelastningen och det behövs därför vidare studier för att jämföra PPB mot betong med höga vct, med och utan fukttillskott.

Betongprovet med vct 0,40 som förvarades utomhus visade mer liknande resultat mellan simuleringar och genomförda fuktmätningar när maxtemperaturen korrigerades i PPB. Att korrigera maxtemperaturer i PPB efter genomförda mätningar kan vara en lösning för att få rätt simulering, särskilt vid låga vct. Det är därför viktigt att personer som använder PPB i planering av gjutningar känner till att avvikelser kan uppstå i simulering vid t.ex. fel maxtemperatur eller vid fukttillskott. PPB har aldrig varit tänkt att användas utan riktiga fuktmätningar. PPB är tänkt som en hjälpreda och vägledning vid planering av betonggjutningar och riktiga fuktmätningar, exempel genom RBK-fukttekniker, skall alltid användas för kontroll. Vidare utveckling av PPB behövs dock för att programvaran ska kunna ta hänsyn till fler aspekter som fukttillskott och fler cementsorter.

I denna studie simulerades eller utsattes betongproverna för varken regn eller vind. Gjutningar i produktion är oftast utsatta för temperaturförändringar, varierande luftfuktighet, nederbörd och vind. I PPB saknas möjligheten att mata in nederbörd manuellt, vilket gör det svårt att utföra kontrollerade experiment som exponeras för den sortens miljö. Det går att göra simuleringar baserade på klimatdata i PPB som grundar sig på genomsnittsdata på månadsbasis från SMHI, för att sedan låta proverna stå utomhus under bar himmel. Problemet med detta är att det inte garanterar några exakta resultat eftersom vädret kan variera från SMHI:s klimatdata. Detta skulle kunna underlättas genom att införa en funktion i PPB där fukttillskott kan styras manuellt.

## 5.3 Utvärdering av metod

Under projektets gång har det uppkommit problem som kan påverka det slutgiltiga resultatet mer eller mindre. För att studien ska vara så vetenskapligt reliabel som möjligt, har åtgärder utförts för att minska felkällor i så stor mån som möjligt.

### 5.3.1 Kalibrering av mätutrustning

Ett problem som uppkom under arbetets gång, vilket innebar extra arbete, var att utrustningen som användes för att mäta fukt i omgivande luft ej var kalibrerad från start. Detta innebar att fuktmätningarna fick avbrytas under studien och givarna

kopplades ur i två omgångar för att kontrolleras. Första omgången kopplades de båda fukt- och temperaturgivarna ut under några timmar vilket visade sig ej räcka till. För denna tid användes ett snitt av temperatur och fukt före och efter urkoppling som ersättning i PPB. Det är rimligt att anta att den korta perioden av ersatt fuktdata inte påverkar resultatet.

Vid det andra tillfället kopplades båda Mitec AT40g med temp- och fuktgivare ut under 9 dagar, i samband med att betongproverna som tidigare förvarats utomhus flyttades in inför fuktmätning. För proverna blev det därför ett glapp på 9 dagar med fuktmätning med givarna som hittills hade använts. Under denna tid köptes en fuktmätare in för att logga och kontrollera så att inga stora förändringar uppkom. Den enkla fuktloggaren visade inga stora avvikelser mot tidigare resultat. Det är därför rimligt att anta att dessa värden inte påverkar resultatet märkvärt, dels p.g.a. den korta tiden, dels p.g.a. att fuktloggern visade rimliga värden.

### 5.3.2 Formens påverkan

Användandet av euro-pall som grund i formen borde eventuellt ha kompletterats med en tjock plywoodskiva för att säkerställa att betongplattan blev helt slät i botten. Tyngden från betongen kan göra att cellplasten pressas ner mellan ribborna på pallen vilket i sin tur kan ge en ojämn botten på betongen. Detta var troligtvis inget problem för betongproverna i denna studie eftersom tjockleken endast var 150 mm. Om tjockleken på betongen hade ökats skulle troligen en förstärkning av pallen samt pallkragarna ha varit nödvändig.

När pallkragarna överstiger betongytan med 15 cm kan det skapa en annorlunda miljö vid betongytan eftersom luften kan bli stillastående. Detta kan påverka resultatet något eftersom en högre fukthalt vid ytan kan försämra diffusionsuttorkningen då drivkrafterna minskas. Att kapa pallkragarna till samma höjd som betongytan kan göra att luften rör sig bättre och mer realistiskt under experimenten. Det kan även underlätta inplastning av betongytan efter gjutning.

### 5.3.3 Ingen löpande fuktmätning under studien

Den ursprungliga idén till studien var att följa uttorkningen i betongen i realtid med kontinuerliga avläsningar av den relativa fuktigheten. Det hade varit intressant att få diagram över uttorkningen som direkt kunnat jämföras med diagrammen i PPB. Dessvärre går det i dagsläget inte att utföra den sortens mätningar i en okontrollerad miljö utomhus eftersom temperaturen och den relativa fuktigheten varierar för mycket. Fuktavläsningarna kan inte göras vid temperaturvariationer som överstiger 2°C och kan endast utföras inom ett temperaturspann mellan 15–25°C. Hysteres i betong och mätutrustning kan medföra att det blir för höga RF-värden om betongen är under uppfuktning vid tillfället för mätning. Betongproverna utomhus flyttades därför

in till kontrollerad miljö en period innan RBK-fuktmätning för att betongen skulle hamna i rätt temperatur och under uttorkning. Efter mätning flyttades de ut igen.

Fuktgivare HumiGuard som användes i detta arbete ska avläsas mellan 6–10 dagar efter montering. Efter 10 dagar är givarna “förbrukade” enligt RBK. Skulle kontinuerliga mätningar utföras under studien skulle det behövas större betongprover för att givarna skulle få plats. Betongprover som förvarades utomhus skulle behöva flyttas in fler gånger för att nå jämvikt med temperaturen inomhus och därmed förvaras längre tid i värme vilket troligen hade påverkat resultatet.

#### 5.3.4 Avstånd mellan borrhål mindre än 3 gånger borrhål djupet

För en godkänd RBK-fuktmätning ska det enligt RBK:s fuktmättningsmanual vara ett avstånd på minst 3 gånger borrhål djupet mellan borrhålen. Avståndet mellan borrhålen vid 110 mm innebar ett icke godkänt avstånd enligt RBK eftersom 3 x 110 mm är mer än 250 mm, vilket var avståndet till kant. Tidigare var kravet 2 gånger borrhål djupet. Att RBK förespråkar 3 gånger borrhål djupet istället för 2 grundar sig inte på någon vetenskap utan på en framtagna säkerhetsmarginal enligt Ted Rapp<sup>3</sup>. Säkerhetsmarginalen är enligt honom framtagna på grund av den ökade tätheten i betong med mineraliska tillsatsmaterial. Ted Rapp har svårt att se att detta skulle påverka mätresultaten i detta arbete.

När felaktiga borrhål gjordes om vid montering av HumiGuard av RBK-auktorisera fuktmätare blev avståndet kortare än 3 gånger borrhål djupet vid flera hål. Eftersom avläsning skedde endast 7 dagar efter montering är det inte troligt att betongen hunnit påverkats av de korta avstånden mellan borrhålen.

### 5.4 Hållbar utveckling

Bascement innehåller flygaska och har en lägre klimatbelastning än ordinarie Portlandcement och Byggcement. Anledningen till att klimatbelastningen minskar är att klinkerandelen reduceras och ersätts med flygaska. Det är vid tillverkningen av klinker som stora mängder koldioxid släpps ut. Flygaska är en restprodukt från andra industrigrenar, vilket tas tillvara på och ersätter en del av cementklinkern. Ur ett ekonomiskt perspektiv är det bra eftersom restprodukter från andra industrier inte går till spillo och inte lika mycket cement behöver framställas.

Betong med Bascement har visat sig ha längre uttorkningstid än med andra cement och för att kompensera för detta används ofta en högre halt Bascement i betongen för att komma ner i samma uttorkningstider som tidigare. Vinsten som erhålls genom minskad koldioxid vid framställning förloras sedan när högre cementhalter används.

---

<sup>3</sup> Tedd Rapp, ansvarig för utveckling av Fukt- & Betongutbildningar. RBK, Rådet för Byggkompetens, personlig kommunikation den 26 mars 2019.



Detta gäller för konstruktioner där kraven på uttorkning är höga som exempelvis betonggolv med plastmatta (Ginner 2019).

Det är framförallt okunskap kring Bascement och dess beteende som gör det svårt att planera dess uttorkningstider och därför väljs ibland lägre vct för att påskynda uttorkningen vilket förstör syftet med ett miljövänligt cement. PPB togs fram som en del av lösningen på problemet och kommer utvecklas vidare. Användning av PPB möjliggör bättre planering av betonggjutningar med Bascement. Byggbranschen behöver minska sin negativa klimatpåverkan och bör använda mer klimatsmarta material. Om det blir enklare att planera gjutningar med PPB kommer förhoppningsvis högre vct och lägre halt Bascement kunna användas.

Ett exempel på branschens utveckling inom betong och hållbart byggande är Skanskas nya produkt Grön Betong som kom 2019. Betongen innehåller cement med en stor andel masugnsslagg, vilket är ett tillsatsmaterial precis som flygaska, dock med andra egenskaper. Andelen cementklinker i Grön Betong kan reducerats med 30–65 % och ska enligt Skanska (2019) leda upp till 50 % mindre klimatbelastning. Grön Betong är en del av Skanskas mål att bli ett klimatneutralt företag år 2045.

## 5.5 Förslag på vidare studier

- Att undersöka hur PPB hanterar vind, regn och stående vatten. Detta eftersom betong oftast inte står skyddad av tak eller i en konstant varm och torr miljö.
- Undersöka hur väl PPB simulerar dubbelsidig uttorkning i betong med Bascement.
- Undersöka uttorkningen i Skanskas ”Grön betong” och jämföra mot t.ex. Bascement och Byggcement.
- Jämföra uttorkning i betong med kylslingor mot betong med värmeslingor i samma klimat. Detta för att undersöka om kylslingor kan ersätta värmeslingor i betong med mineraliska tillsatsmaterial som t.ex. flygaska för att påvisa att uttorkningen blir bättre.

## 6 Slutsats

Slutsatsen i denna studie är baserad på simuleringar och fuktmätningar i ett fåtal betongprover, vilka kan ha utsatts för störningar. Fler studier behövs för att validera reliabiliteten hos programvaran PPB. Simuleringar i PPB tenderar, i denna studie, att visa något lägre relativ fuktighet än genomförda fuktmätningar. Denna överskattning tenderar att bli större vid simulering med en varierande utomhusmiljö än med en stabil inomhusmiljö.

Att PPB visar för stor uttorkning i betongprover med vct 0,40 vid 40 mm djup tyder på att programvaran har en för hög simulerad transportförmåga och för hög diffusionsuttorkning under för lång tid.

Simuleringar i PPB med inbyggd klimatdata tenderar att överskatta uttorkningen mer än simuleringar med egna loggade klimatdata. Rekommendationen är att använda egna loggade klimatdata i PPB, samt att utveckla av PPB möjliggör en funktion för inmatning av egna uppmätta klimatdata med fil.

Temperaturutvecklingen i betongen under härdning har en viss påverkan på uttorkningsförloppet. Rätt maxtemperatur i PPB är viktigt för en mer korrekt simulering av uttorkning i betong, särskilt vid låga vct. Rekommendationen är att justera maxtemperaturen i PPB efter verkligt uppmätt maxtemperatur i betong.

Härdningsmetod har betydelse för uttorkningsförloppet, särskilt för betong med höga vct. Simuleringar med PPB tenderar att avvika om betong med höga vct utsätts för vattentillskott kort efter gjutning. Rekommendationen är att vidareutveckla PPB genom att införa en möjlighet att manuellt justera fukttillskott.

## 7 Referenser

- Andersson, G. & Ekman S-O. (2017). *Osäkerhet kring uttorkning av ny betong*. Byggvärlden, 12 apr.  
<https://www.byggvarlden.se/osakerhet-kring-uttorkning-av-ny-betong-110573/nyhet.html> [2019-02-21]
- Arfvidsson, J., Harderup, L-E. & Samuelson, I. (2017). *Fukthandbok: praktik och teori*. Fjärde utgåvan. Stockholm: Svensk byggtjänst.
- ATAG. (2018). *Facts & Figures*.  
<https://www.atag.org/facts-figures.html> [2019-05-28]
- Boverket. (2014). *Kritiskt fukttillstånd*.  
<https://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/om-fukt-i-byggnader/nyproduktion--fuktsakerhetsprojektering/kritiskt-fukttillstand/>  
[2019-05-06] Borttagen ”ordlista”
- Boverket. (2018). *Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn*. Karlskrona: Boverket.  
<https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/kartlaggning-av-fel-brister-och-skador-inom-byggsektorn.pdf> [2019-06-09]
- Burström, P. G. (2007). *Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur.
- Cementa. (u.å.). *Bascement – teknisk beskrivning*.  
[https://www.cementa.se/system/files\\_force/assets/document/4b/fc/bascement\\_tek\\_nisk\\_beskrivning.pdf?download=1](https://www.cementa.se/system/files_force/assets/document/4b/fc/bascement_tek_nisk_beskrivning.pdf?download=1) [2019-02-25]
- Clas Ohlson. (u.å.). *Temperature and moisture logger with USB*.  
[https://images.clasohlson.com/medias/sys\\_master/9542751158302.pdf](https://images.clasohlson.com/medias/sys_master/9542751158302.pdf)  
[2019-05-10]
- Frifelt, H., & Larsson, W. (2016). *Uttorkning av betongprover: För betong med fokus på lågt vct, samt avjämningsmassans påverkan av uttorkningen*.  
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-43622> [2019-02-18]
- Ginner, V (2019). *Modern betong kan ge större utsläpp*.  
<https://omvarldsbevakning.byggtjanst.se/artiklar/2019/januari/modern-betong-kan-ge-mer-utslapp/> [2019-04-16]

Golvbranschen. (2016). *Limrekommendationer för golvbeläggningar på nya betongunderlag*.  
<https://www.golvbranschen.se/rad-riktlinjer/limrekommendationer/> [2019-05-16]

Mitec. (2002). *Datalogger Mitec AT40g*.  
<http://www.mitec.se/dokument/bibliotek/File/PDF/Broschyrer/C10052.pdf>  
[2019-03-28]

Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V. & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*. doi:  
10.1016/j.cscm.2019.e00218.

Nationalencyklopedin. (u.å.-a). *Desorption*.  
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/desorption> [2019-04-09]

Nationalencyklopedin. (u.å.-b). *Luftfuktighet*.  
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/luftfuktighet> [2019-05-06]

Nilsson, Lars-Olof . (2012). Analys av möjligheter och begränsningar inom området att förutsäga torktid för betong. Trelleborg: Moisture Engineering Institute, SBUF projekt 12543.

RBK. (2019). *Manual - Fuktmätning i betong*.  
[http://www.rbk.nu/ladda-ner-bestall/fuktmatningsmanual\\_36](http://www.rbk.nu/ladda-ner-bestall/fuktmatningsmanual_36) [2019-03-26]

SBUF. (1995). *Betongtorkning – lathund*. SBUF Informerar nr 95:14, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 1995.  
<https://www.sbuf.se/Projektsida/?id=1806db46-faae-4398-b1ec-3f39577foeeo>  
[2019-02-18]

SBUF. (2012). *Beräknad uttorkningsprognos för betongkonstruktioner med tillgängliga prognosverktyg*, Rapport SBUF-projekt 12476, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2012.

SBUF. (2014). *Simulering av fuktmätning i betong med lågt vct- Steg 2*, Rapport SBUF-projekt 12706, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2014.

SBUF. (2018a). *Fuktegenskaper för golvkonstruktioner*, Rapport SBUF-projekt 13498, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2018.

SBUF. (2018b). *Inventering: Uttorkning av betonggolv*, Rapport SBUF-projekt 13358, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm, 2018.

SBUF. (u.å.). *Produktionsplanering Betong (Projekt 12799), Rapport 12799*, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Stockholm u.å.

Skanska. (2000). *BetongDatorn 4.1. För mätning av temperatur och hållfasthet i betong.*

<http://www.jibabetong.com/userfiles/file/pdf/Betongdatorn.pdf> [2019-03-28]

Skanska. (2019). *Grön betong för en hållbar framtid.*

<https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/gron-betong-for-en-hallbar-framtid/> [2019-05-07]

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H., Gränne, G., Gunnarsson, M. (2017a). *Betongfunktion: Uttorkning.*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/PPB\\_och\\_fukt/](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/PPB_och_fukt/) [2019-02-18]

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H., Gränne, G., Gunnarsson, M. (2017b). *Självuttorkning av betong.*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Sjalvuttorkning\\_av\\_betong/](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Sjalvuttorkning_av_betong/) [2019-03-26]

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H., Gränne, G., Gunnarsson, M. (2017c). *Diffusionstorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning.*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Diffusionstorkning\\_av\\_betong/](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Diffusionstorkning_av_betong/) [2019-05-07]

Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H., Gränne, G., Gunnarsson, M. (2018). *Finns det någon fördel med modern, tät betong?*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Finns det nagon fordel](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/Finns_det_nagon_fordel) [2019-02-27]

Stelmarczyk M., Rapp T., Hedlund H., Gränne G. (2019a). *Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning.*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/PPB\\_beraknar\\_uttorkning/](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/PPB_beraknar_uttorkning/) [2019-02-27]

Stelmarczyk M., Rapp T., Hedlund H., Gränne G. (2019b). *Självuttorkning och temperatur.*

[https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/sjalvtorkning\\_och\\_temperatur/](https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/sjalvtorkning_och_temperatur/) [2019-04-15]

Svensk byggtjänst. (2017). *Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong.* (Tredje, reviderade utgåvan). Solna: Svensk byggtjänst.

Svensk byggtjänst. (1992). *Betonghandbok. Arbetsutförande. Projektering och byggande.* (Andra, reviderade utgåvan). Solna: Svensk byggtjänst.

Sveriges byggindustrier. (2016). *Betong- och armeringsteknik.* Göteborg: Sveriges byggindustrier.

Åhs, M. (2011). *Redistribution of moisture and ions in cement based materials*  
*Division of Building Materials*. LTH, Lund University.  
<http://portal.research.lu.se/ws/files/4190229/1898106.pdf> [2019-02-27]

## Bilaga 1 – Formbygge.



Pallkragar monteras på pall.



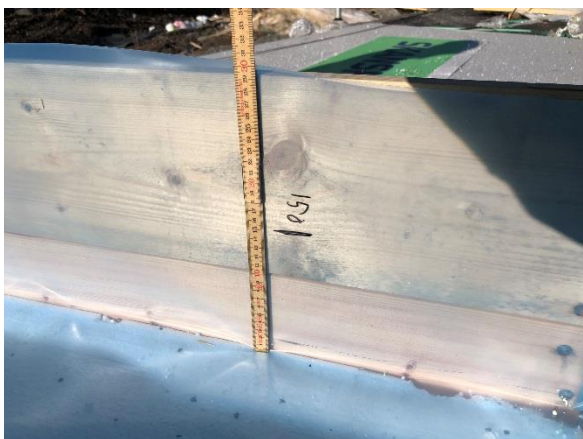
Cellplast monteras efter pallkragens mått.



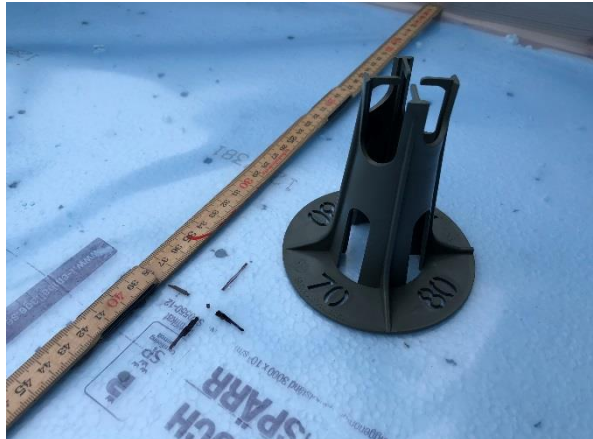
Nästa pallkrage skruvas fast för ökad stabilitet.



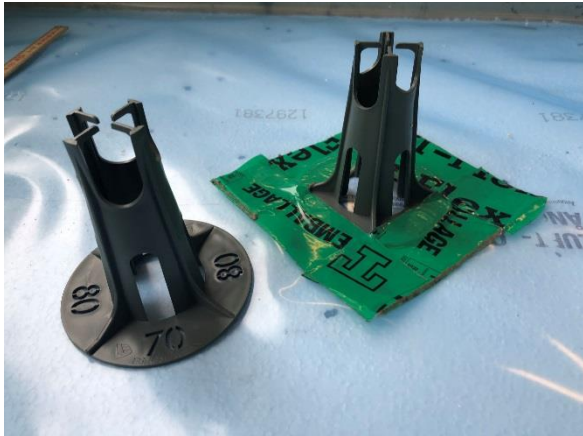
Formarna plastas in.



Markeringar för plattans tjocklek markeras ut.



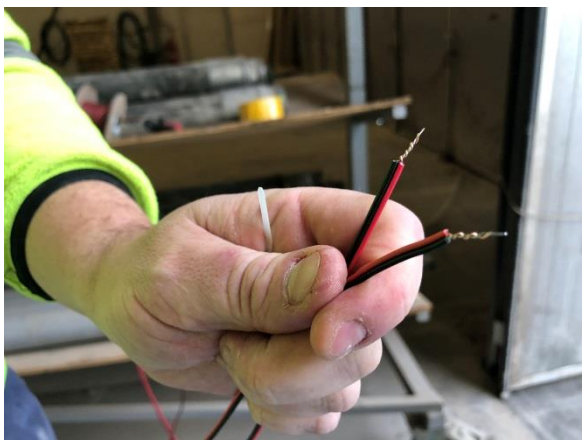
Distanser för fäste av temperaturslingor markeras ut i mitten av formen.



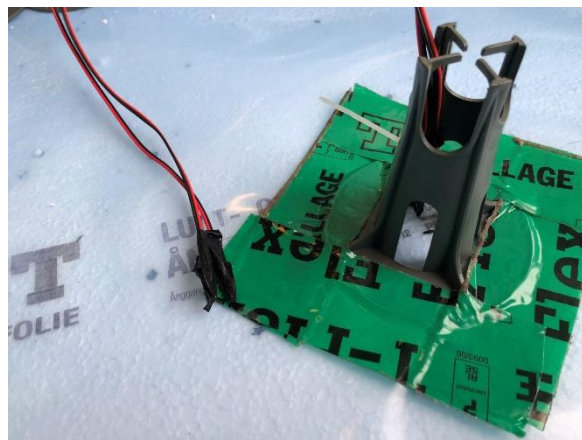
Distanser tejpas fast i botten av formarna.



Färdiga formar.



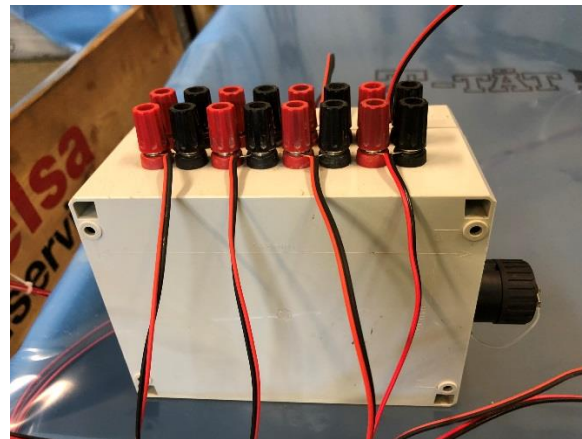
Temperaturslingor.



Temperaturslingor tejpas för att undvika ev. kortslutning.



Temperaturslingor fästs i distans i botten och 75 mm från botten.



Temperaturslingor monteras i Betongdatorn.



## Bilaga 2. Gjutning av betongprover.



Betongen blandas och fylls i betongbil.



Betongen transporteras till formarna.



Betongen fylls i form, distans hålls på plats.



Med skyffel bearbetas betongen.



Färdiga prover placeras i utomhusmiljö (skjul).



Proverna plastas in med diffusionstät plast.



Proverna utomhus täcks med presenning.



Proverna placeras i inomhusklimat.



Proverna plastas in med diffusientät plast.



Proverna inomhus täcks med presenning.



Efter 14 dagar tas plasten bort utomhus.



Efter 14 dagar tas plasten bort inomhus.

# Bilaga 3 Receptlogg [] C32/40 S2 16 VCT0,55



2019-03-06

<b>Datum</b>	2019-03-06	<b>Kund</b>	338-SKANSKA INDUSTRIAL SOLUTIONS - INT
<b>Tid</b>	10:26	<b>Kundnummer</b>	FELAKTIGT_NR338
<b>Följesedelsnr</b>	98318	<b>Arbetsplats</b>	Examensarbete Bas-Uttorkningsprov
<b>Fabrik</b>	TROLLHÄTTAN	<b>Receptnamn</b>	C32/40 S2 16 VCT0,55
<b>Bilnr</b>	T38	<b>Receptnummer</b>	1006509
<b>Zon</b>		<b>Blandare</b>	1
<b>Mängd önskad (m3)</b>	2	<b>Hållfastighetsklass</b>	C32/40
<b>Mängd uppnådd (m3)</b>	2	<b>Konsistensklass</b>	
<b>Totalvikt (kg)</b>		<b>D max</b>	16
<b>Lass antal</b>		<b>Kloridhalt</b>	0
<b>Lassnr</b>		<b>Temp önskad</b>	20
<b>VCT önskad</b>	0,534	<b>Temp uppnådd</b>	19
<b>VCT uppnådd</b>	0,522	<b>Tillsatsrecept</b>	
<b>Exponeringsklass</b>		<b>1007440</b>	S3
<b>Lufthalt önskad</b>	2		
<b>Konsistens uppnådd</b>	67		

## Vatten material (liter)

### Spädvatten (liter)

### Totalt vatten (liter)

Material	Namn	Oraclenr	Densitet	Önskad (Kg)	Uppnådd (Kg)	Avvikelse
BALLAST	8-16	005154	2,68	1643	1636	-0,43 %
BALLAST	0-8 MIX	007448	2,7	2060	2060	0,00 %
BINDEMEDEL	CEM2/A-V 52.5N	006375	3,08	730	733	0,41 %
T-MEDEL	SX-A 170	007704	1,06	4,38	4,65	5,81 %
VATTEN	KALLVATTEN		1	73	69	-5,80 %
VATTEN	VARMVATTEN		1	184	177	-3,95 %

# Bilaga 4 Receptlogg [] C45/55 S2 16 VCT0,40

2019-03-06

<b>Datum</b>	2019-03-06	<b>Kund</b>	338-SKANSKA INDUSTRIAL SOLUTIONS - INT
<b>Tid</b>	11:06	<b>Kundnummer</b>	FELAKTIGT_NR338
<b>Följesedelsnr</b>	98319	<b>Arbetsplats</b>	Examensarbete Bas-Uttorkningsprov
<b>Fabrik</b>	TROLLHÄTTAN	<b>Receptnamn</b>	C45/55 S2 16 VCT0,40
<b>Bilnr</b>	T38	<b>Receptnummer</b>	1006519
<b>Zon</b>		<b>Blandare</b>	1
<b>Mängd önskad (m3)</b>	2	<b>Hållfastighetsklass</b>	C45/55
<b>Mängd uppnådd (m3)</b>	2	<b>Konsistensklass</b>	
<b>Totalvikt (kg)</b>		<b>D max</b>	16
<b>Lass antal</b>		<b>Kloridhalt</b>	0
<b>Lassnr</b>		<b>Temp önskad</b>	20
<b>VCT önskad</b>	0,400	<b>Temp uppnådd</b>	18
<b>VCT uppnådd</b>	0,391	<b>Tillsatsrecept</b>	
<b>Exponeringsklass</b>		<b>1007441</b>	S4
<b>Lufthalt önskad</b>	2		
<b>Konsistens uppnådd</b>	75		

## Vatten material (liter)

### Spädvatten (liter)

### Totalt vatten (liter)

Material	Namn	Oraclenr	Densitet	Önskad (Kg)	Uppnådd (Kg)	Avvikelse
BALLAST	8-16	005154	2,68	1736	1726	-0,58 %
BALLAST	0-8 MIX	007448	2,7	2008	2006	-0,10 %
BINDEMEDEL	CEM2/A-V 52.5N	006375	3,08	840	857	1,98 %
T-MEDEL	SX-A 170	007704	1,06	5,88	5,95	1,18 %
T-MEDEL	SX-A 170	007704	1,06	8,4	8,5	1,18 %
VATTEN	KALLVATTEN		1	43	41	-4,88 %
VATTEN	VARMVATTEN		1	157	156	-0,64 %

## Bilaga 5

### Beräkning av formler för korrigering av RF [%] givare Vaisala HMP60 - utomhus

$$y = kx + m$$

$$k = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$m = y - kx$$

x (avläst)	y (korrigerat)
0,0	0,0 [%]
11,4	11,3 [%]
70,3	75,3 [%]
86,2	95,0 [%]
100,0	100,0 [%]

Indata för kurva			
x1	y1	x2	y2
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
11,4%	11,3%	100,0%	100,0%
70,3%	75,3%		
86,2%	95,0%		
100,0%	100,0%		

**0 - 11,4 %**

$$k = (11,3 - 0) / (11,4 - 0)$$

$$k = 0,9912$$

$$m = 0 - 0,99 \cdot 0$$

$$m = 0$$

$$y = 0,99x$$

**11,4 - 70,3 %**

$$k = (75,3 - 11,3) / (70,3 - 11,4)$$

$$k = 1,0866$$

$$m = 75,3 - 1,09 \cdot 70,3$$

$$m = -1,0871$$

$$y = 1,09x - 1,09$$

**70,3 - 86,2 %**

$$k = (95 - 75,3) / (86,2 - 70,3)$$

$$k = 1,2390$$

$$m = 95 - 1,24 \cdot 86,2$$

$$m = -11,8013$$

$$y = 1,24x - 11,80$$

**86,2 - 100 %**

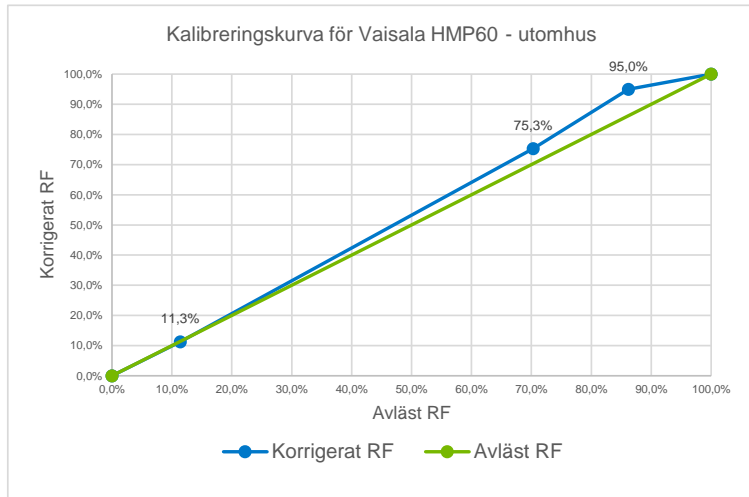
$$k = (100 - 95) / (100 - 86,2)$$

$$k = 0,3623$$

$$m = 100 - 0,36 \cdot 100$$

$$m = 63,7681$$

$$y = 0,36x + 63,77$$



### Beräkning av formler för korrigering av RF [%] givare Vaisala HMP50 - inomhus

$$y = kx + m$$

$$k = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$m = y - kx$$

x (avläst)	y (korrigerat)
0,0	0,0 [%]
10,2	11,3 [%]
69,3	75,3 [%]
85,2	95,0 [%]
100,0	100,0 [%]

Indata för kurva			
x1	y1	x2	y2
0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10,2%	11,3%	100,0%	100,0%
69,3%	75,3%		
85,2%	95,0%		
100,0%	100,0%		

**0 - 10,2 %**

$$k = (11,3 - 0) / (10,2 - 0)$$

$$k = 1,1078$$

$$m = 0 - 1,11 \cdot 0$$

$$m = 0$$

$$y = 1,11x$$

**10,2 - 69,3 %**

$$k = (75,3 - 11,3) / (69,3 - 10,2)$$

$$k = 1,0829$$

$$m = 75,3 - 1,08 \cdot 69,3$$

$$m = 0,2543$$

$$y = 1,08x + 0,25$$

**69,3 - 85,2 %**

$$k = (95 - 75,3) / (85,2 - 69,3)$$

$$k = 1,2390$$

$$m = 95 - 1,24 \cdot 85,2$$

$$m = -10,5623$$

$$y = 1,24x - 10,56$$

**85,2 - 100 %**

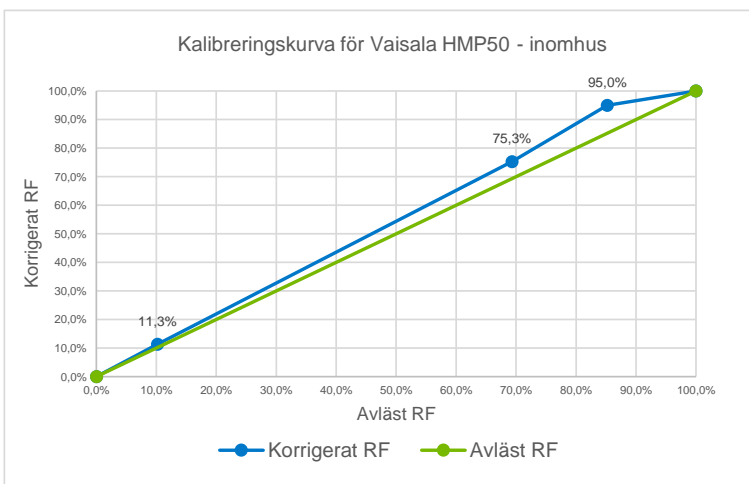
$$k = (100 - 95) / (100 - 85,2)$$

$$k = 0,3378$$

$$m = 100 - 0,34 \cdot 100$$

$$m = 66,2162$$

$$y = 0,34x + 66,22$$



## Bilaga 6. Montering av fuktgivare HumiGuard i betong.



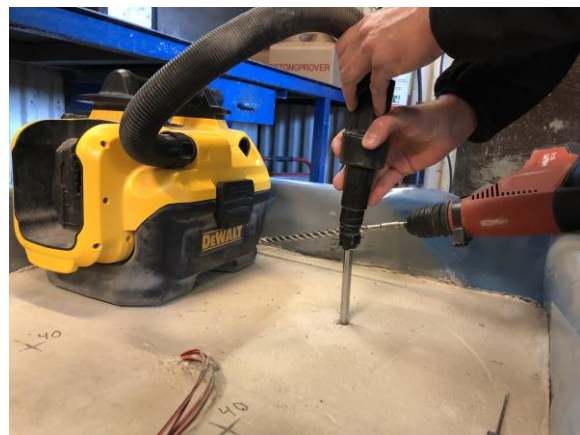
Placering av borrhål markeras ut.



Hål borrar enligt angivet djup.



Djup kontrolleras med skjutmått.



Borrhål rengörs med dammsugare.



Borrhål rengörs ytterligare med borste.



Rör med tätning i botten monteras.



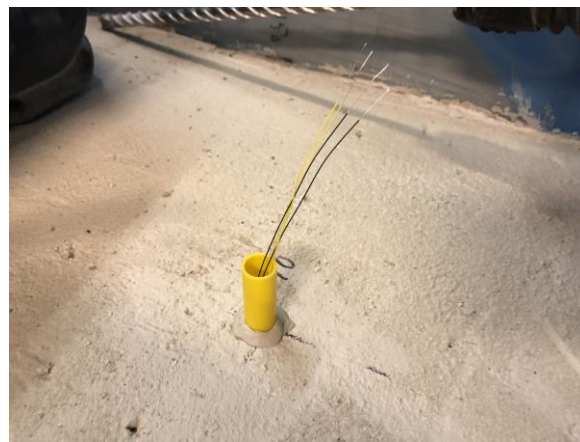
Rör kontrolleras så att det är tätt i botten.



Röret tätas med tätningssmassa



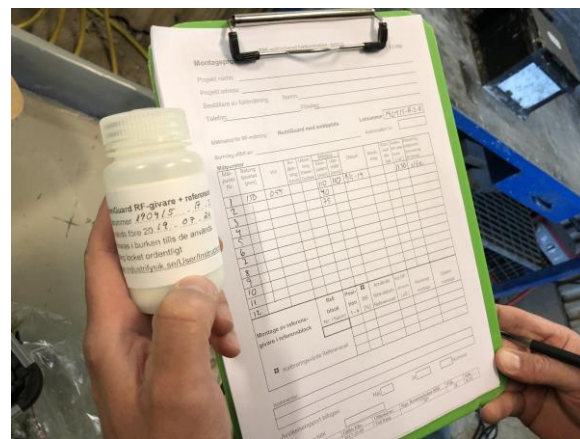
Fuktgivare placeras i monteringsverktyg.



Fuktgivare monteras i botten på rör



Avläsning av RF i  $\mu\text{S}$  (endast för kontroll).



Detaljer och givarnas referensnummer noteras.



Rör isoleras.



Rör sluts med lock och märks med nummer.



## Examensarbete KAU Skanska

## HumiGuard® Concrete Drilled Hole RH Measurement Report 2019-05-15 10:52

## Bilaga 7

Main controller:	2080, Mikael Edvall
Last updated:	2019-05-15 10:49

Concr. temp. uncert.:	0.30 %RH
Drilling depth uncert.:	0.26 %RH
Concr. thickn. uncert.:	0.19 %RH

## Meas. point 1

110 mm/ute

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	53.00 $\mu$ S	84.20 $\mu$ S	96.8 %RH	21.1 °C	-0.05 %RH	2.7 %RH	99.5 %RH	2080	

## Meas. point 2

40 mm/ute

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	28.70 $\mu$ S	80.20 $\mu$ S	92.7 %RH	20.0 °C	$\pm$ 0.00 %RH	2.3 %RH	95.0 %RH	2080	

## Meas. point 3

75 mm/ute

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	41.70 $\mu$ S	81.40 $\mu$ S	95.1 %RH	20.4 °C	-0.02 %RH	2.5 %RH	97.5 %RH	2080	

## Meas. point 4

110 mm/inne

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	24.40 $\mu$ S	80.40 $\mu$ S	91.7 %RH	20.1 °C	-0.02 %RH	2.2 %RH	93.8 %RH	2080	

## Meas. point 5

40 mm/inne

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	12.72 $\mu$ S	78.70 $\mu$ S	87.2 %RH	19.6 °C	+0.10 %RH	2.0 %RH	89.3 %RH	2080	

## Meas. point 6

75 mm/inne

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	18.94 $\mu$ S	79.50 $\mu$ S	90.2 %RH	19.8 °C	+0.04 %RH	2.1 %RH	92.3 %RH	2080	

## Meas. point 7

110 mm/inne

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	35.30 $\mu$ S	78.20 $\mu$ S	94.0 %RH	19.5 °C	+0.04 %RH	2.4 %RH	96.5 %RH	2080	

## Meas. point 8

40 mm/inne

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	15.71 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	89.0 %RH	19.4 °C	+0.08 %RH	2.0 %RH	91.0 %RH	2080	

## Meas. point 9

75 mm/inne

W/C ratio:	0.55
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	28.60 $\mu$ S	78.20 $\mu$ S	92.7 %RH	19.5 °C	+0.04 %RH	2.3 %RH	95.1 %RH	2080	

## Meas. point 10

110 mm/ute

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	29.50 $\mu$ S	78.20 $\mu$ S	92.9 %RH	19.5 °C	+0.13 %RH	2.3 %RH	95.3 %RH	2080	

## Meas. point 11

40 mm/ute

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	15.41 $\mu$ S	77.50 $\mu$ S	88.8 %RH	19.3 °C	+0.19 %RH	2.0 %RH	91.0 %RH	2080	

## Meas. point 12

75 mm/ute

W/C ratio:	0.40
------------	------

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	24.20 $\mu$ S	76.30 $\mu$ S	91.8 %RH	18.9 °C	+0.27 %RH	2.2 %RH	94.2 %RH	2080	

## References for 190415-A-3-8

Time	Block	RH1	T1	RH2	T2	RH3	T3	RH4	T4	Cal val	Expires	Cond	ID	Notes
2019-05-15 08:32	Block 1 MIED					10.57	86.00	10.25	86.50	85.1 %RH	2019-07-24	9.79 $\mu$ S	2080	

**Lot numbers**

Lot number	Expires
190415-A-3-8	2019-07-24

**Controllers**

ID	Name	RBK authorization number
2080	Mikael Edvall	194

Dates & times are UTC+02:00 in ISO 8601 format *yyyy-mm-dd hh:mm*.

Measured values are in units of microsiemens ( $\mu\text{S}$ ), relative humidity in percentage (%RH) and temperature in degree celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Expanded measurement uncertainty with coverage factor  $k = 2$  is used.

End of HumiGuard® report

[www.industrifysik.se](http://www.industrifysik.se)

## Examensarbete KAU Skanska

## HumiGuard® Concrete Drilled Hole RH Measurement Report 2019-08-21 14:48

Main controller:	2080, Mikael Edvall
Last updated:	2019-08-21 14:48

Concr. temp. uncert.:	0.30 %RH
Drilling depth uncert.:	0.26 %RH
Concr. thicken. uncert.:	0.19 %RH

## Meas. point 1

W/C ratio: 0.55

110 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	53.00 µS	84.20 µS	96.8 %RH	21.1 °C	-0.05 %RH	2.7 %RH	99.5 %RH	2080	

## Meas. point 2

W/C ratio: 0.55

40 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	28.70 µS	80.20 µS	92.7 %RH	20.0 °C	±0.00 %RH	2.3 %RH	95.0 %RH	2080	

## Meas. point 3

W/C ratio: 0.55

75 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	41.70 µS	81.40 µS	95.1 %RH	20.4 °C	-0.02 %RH	2.5 %RH	97.5 %RH	2080	

## Meas. point 4

W/C ratio: 0.40

110 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	24.40 µS	80.40 µS	91.7 %RH	20.1 °C	-0.02 %RH	2.2 %RH	93.8 %RH	2080	

## Meas. point 5

W/C ratio: 0.40

40 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	12.72 µS	78.70 µS	87.2 %RH	19.6 °C	+0.10 %RH	2.0 %RH	89.3 %RH	2080	

## Meas. point 6

W/C ratio: 0.40

75 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	18.94 µS	79.50 µS	90.2 %RH	19.8 °C	+0.04 %RH	2.1 %RH	92.3 %RH	2080	

## Meas. point 7

W/C ratio: 0.55

110 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	35.30 µS	78.20 µS	94.0 %RH	19.5 °C	+0.04 %RH	2.4 %RH	96.5 %RH	2080	

## Meas. point 8

W/C ratio: 0.55

40 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	15.71 µS	77.80 µS	89.0 %RH	19.4 °C	+0.08 %RH	2.0 %RH	91.0 %RH	2080	

## Meas. point 9

W/C ratio: 0.55

75 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	28.60 µS	78.20 µS	92.7 %RH	19.5 °C	+0.04 %RH	2.3 %RH	95.1 %RH	2080	

## Meas. point 10

W/C ratio: 0.40

110 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	29.50 µS	78.20 µS	92.9 %RH	19.5 °C	+0.13 %RH	2.3 %RH	95.3 %RH	2080	

## Meas. point 11

W/C ratio: 0.40

40 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	15.41 µS	77.50 µS	88.8 %RH	19.3 °C	+0.19 %RH	2.0 %RH	91.0 %RH	2080	

## Meas. point 12

W/C ratio: 0.40

75 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-05-15 10:41	190415-A-3-8	24.20 µS	76.30 µS	91.8 %RH	18.9 °C	+0.27 %RH	2.2 %RH	94.2 %RH	2080	

## Meas. point 13

W/C ratio: 0.55

110 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes

2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	16.30 $\mu$ S	78.00 $\mu$ S	90.9 %RH	19.4 °C	+0.06 %RH	2.1 %RH	93.1 %RH	2080	
------------------	--------------	---------------	---------------	----------	---------	-----------	---------	----------	------	--

**Meas. point 14**

W/C ratio: 0.55

40 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	9.47 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	87.0 %RH	19.4 °C	+0.09 %RH	1.9 %RH	89.0 %RH	2080	

**Meas. point 15**

W/C ratio: 0.55

75 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	13.95 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	90.0 %RH	19.4 °C	+0.07 %RH	2.1 %RH	92.2 %RH	2080	

**Meas. point 16**

W/C ratio: 0.40

110 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	10.88 $\mu$ S	78.20 $\mu$ S	88.1 %RH	19.5 °C	+0.14 %RH	2.0 %RH	90.3 %RH	2080	

**Meas. point 17**

W/C ratio: 0.40

40 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	6.00 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	83.2 %RH	19.4 °C	+0.18 %RH	1.9 %RH	85.3 %RH	2080	

**Meas. point 18**

W/C ratio: 0.40

75 mm/inne

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	9.95 $\mu$ S	78.20 $\mu$ S	87.4 %RH	19.5 °C	+0.14 %RH	2.0 %RH	89.5 %RH	2080	

**Meas. point 19**

W/C ratio: 0.55

110 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	20.00 $\mu$ S	78.50 $\mu$ S	92.1 %RH	19.6 °C	+0.04 %RH	2.2 %RH	94.4 %RH	2080	

**Meas. point 20**

W/C ratio: 0.55

40 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	10.10 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	87.5 %RH	19.4 °C	+0.09 %RH	2.0 %RH	89.6 %RH	2080	

**Meas. point 21**

W/C ratio: 0.55

75 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	14.78 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	90.3 %RH	19.4 °C	+0.07 %RH	2.1 %RH	92.5 %RH	2080	

**Meas. point 22**

W/C ratio: 0.40

110 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	14.88 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	90.4 %RH	19.4 °C	+0.16 %RH	2.1 %RH	92.6 %RH	2080	

**Meas. point 23**

W/C ratio: 0.40

40 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	7.19 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	84.8 %RH	19.4 °C	+0.18 %RH	1.9 %RH	86.9 %RH	2080	

**Meas. point 24**

W/C ratio: 0.40

75 mm/ute

Time	Lot number	Wire RH	Wire T	RH	Temp	Correction	Uncertainty	Final RH	ID	Notes
2019-08-21 14:41	190527-A-3-8	11.48 $\mu$ S	77.80 $\mu$ S	88.6 %RH	19.4 °C	+0.17 %RH	2.0 %RH	90.8 %RH	2080	

**References for 190415-A-3-8**

Time	Block	RH1	T1	RH2	T2	RH3	T3	RH4	T4	Cal val	Expires	Cond	ID	Notes
2019-05-15 08:32	Block 1 MIED					10.57	86.00	10.25	86.50	85.1 %RH	2019-07-24	9.79 $\mu$ S	2080	

**References for 190527-A-3-8**

Time	Block	RH1	T1	RH2	T2	RH3	T3	RH4	T4	Cal val	Expires	Cond	ID	Notes
2019-08-21 09:39	Block 2 MIED	7.88	85.90	8.02	86.00					85.1 %RH	2019-09-04	7.49 $\mu$ S	2080	

**Lot numbers**

Lot number	Expires
190415-A-3-8	2019-07-24
190527-A-3-8	2019-09-04

**Controllers**

ID	Name	RBK authorization number
2080	Mikael Edvall	194

Dates & times are UTC+02:00 in ISO 8601 format *yyyy-mm-dd hh:mm*.

Measured values are in units of microsiemens ( $\mu\text{S}$ ), relative humidity in percentage (%RH) and temperature in degree celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Expanded measurement uncertainty with coverage factor  $k = 2$  is used.

**End of HumiGuard® report**

[www.industrifysik.se](http://www.industrifysik.se)