

Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering

Slutrapport

**Marcin Stelmarczyk, LTU
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB
Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier**

2019-09-11

Förord

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

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

Denna slutrapport utgör en delrapportering av SBUF 13140, vilket är en del av den vetenskapliga underlaget till tillämpningsmodelleringen och nya materialmodeller, som implementerats i Produktionsplanering Betongs fuktmodul.

Göteborg, 2019-09-13

Styrgruppen

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar första etappen av doktorandprojektet beskrivet i SBUF 13140 Tillämpningsmodellering av fuktfenomen i betong för modern uttorkningssimulering. Kort bakgrund till projekten ges. Projektgenomförandet beskrivs inom de olika arbetsområdena inklusive samarbete med andra SBUF-projekt. Resultaten presenteras översiktligt inom de respektive områdena.

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 Litteraturstudie och kurser.....	4
2.2 Analys av problemområdet	5
2.3 Revidering av existerande materialmodeller	5
2.4 Dokumentation.....	5
2.5 Samarbete med SBUF 13197 & 13198	6
2.6 Styr- och referensgruppsmöten	6
2.7 Ändringar i projektorganisationen	6
3 Resultat.....	7
3.1 Materialmodeller.....	7
3.1.1 Hydratation och kemisk bindning av vatten.....	7
3.1.2 Sorption	8
3.1.3 Transport	8
3.2 Kommande avhandling.....	9
3.3 PPB samt materialdata för betong med Bascement	9
3.4 Annan kommunikation	9
Bilageförteckning.....	10

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Projektet SBUF 13140 startades i syfte att förse den tilltänkta utbyggnaden av mjukvaran Produktionsplanering Betong (PPB) i separata projekt, med reviderade materialmodeller för fuktfenomenologi i betong. Detta behov identifierades tidigt inom SBUF 13064 Förstudie Fukt PPB.

Denna rapport redovisar projektetens genomförande och resultat.

1.2 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i tre delar:

- Inledning – detta kapitel.
- Projektets genomförande – här redovisas det arbetet som utfördes under projektet.
- Resultat – här redovisas en övergripande bild av resultaten.

Till rapporten hör även en fristående bilaga innehållande en partiell draft av den kommande doktorsavhandlingen. Då materialet där består av ännu opublicerad vetenskaplig text som kommer att ingå i doktorsmeriteringen framhåller författarna om att denna bilaga hanteras konfidentiellt och inte publiceras tillsammans med rapporten i SBUF:s resultatdatabas. All information i denna bilaga kommer att publiceras i sin slutliga form som en del av den kommande avhandlingen i samband med disputationen.

2 Projektens genomförande

Doktorandprojektet startades 2016 vid avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH. Under hösten 2018 avslutades samarbete med LTH. Återstående delen av doktorandprojektet har utförts vid avdelningen för Byggmaterial vid LTU. Doktoranden har arbetat deltid, parallellt med hans engagemang i SBUF 13197 och 13198.

2.1 Litteraturstudie och kurser

Under projektet har doktoranden tagit totalt 48,5 Hp i form av följande kurser:

- Concepts in Thermal Physics, 7,5 Hp
- Chemistry of Cement and Concrete, 8,0 Hp
- Continuous Course, 2,0 Hp
- Sorption and Transport of Moisture in Materials and Structure, 8,0 Hp
- Temperature Influence on Sorption and Transport of Moisture, 10,0 Hp, se figur nedan för litteraturexempel
- Experiment, 4,0 Hp
- Functional Analysis, 9,0 Hp



Fig. 1 Ett urval av litteratur som studerades under kursen *Temperature Influence on Sorption and Transport of Moisture*

Utöver kurserna har en omfattande litteraturstudie utförts med inriktning dels mot andra mer fundamentala områden som fysikalisk kemi och kinetik samt hydrataion av cement och betong, och dels mot mer tillämpade som modellering av hydrataion, sorption och transport av fukt.

2.2 Analys av problemområdet

Parallellt med litteraturstudien har en analys av problemområdet utförts. Slutsatser har dragits om olika krav på och andra aspekter av de materialmodeller som skulle revideras. Denna kunskap har resulterat i en förfining av litteraturstudien och även gett input till SBUF 13198 gällande design av mätuppställning samt metoder för behandling och anpassning av mätdata.

2.3 Revidering av existerande materialmodeller

Existerande materialmodeller har analyserats. Nya materialmodeller har ställts upp, baserat delvis på existerande modeller och dels på nya ansatser och med ny struktur. Dessa har validerats mot uppmätta materialdata från SBUF 13198 och vidare används i SBUF 13197 vid implementation av fuktberäkningen i PPB.

2.4 Dokumentation

Tidigt i projektet beslutades att licentiatavhandling inte skulle tas fram utan att arbete skulle inriktas direkt på en doktorsavhandling. Då avhandlingens problemområde har signifikant komplexitet och många beroenden mellan sina resp. delar valdes monografi som form för avhandlingen. Detta möjliggör en sammanhängande redovisning av helheten av arbetet och lämpar sig bäst för dokumentation av de materialmodeller och beräkningsmetoder som ligger till grund för PPB:s fuktberäkning.

Det beslutades även att den monografiska avhandlingen skulle kompletteras med en vetenskaplig artikel i internationell tidskrift.

Under projektets gång har industriella artiklar publicerats i samarbete med SBUF 13197, 13198 och 13354 samt tagits fram för publicering i samarbete med 13710 (ej publicerade i skrivande stund).

2.5 Samarbete med SBUF 13197 & 13198

Samarbete med SBUF 13197 och 13198 har skett löpande under hela projektiden och omfattade:

- Justering av mätmetoder och mätupställningar i 13198, baserat på analysresultat och litteraturstudie i detta projekt
- Input från detta projekt till 13198 som bas för utveckling av metoder och verktyg för behandling av mätdata och anpassning av materialdata till dessa
- SBUF 13198 försåg detta projekt med mätdata nödvändiga för validering av de utvecklade materialmodellerna
- Detta projekt försåg 13197 med materialmodeller och beräkningsmetodik för implementation i PPB
- 13197 försåg detta projekt med ett fungerande beräkningsverktyg, PPB, för slutlig validering av beräkningsmetodik inkl. materialmodeller
- Ett antal industriella artiklar har publicerats i samarbete mellan projekten.

2.6 Styr- och referensgruppsmöten

Gemensamma styr- och referensgruppsmöten har genomförts 2016-11-25 samt 2017-11-08.

Ytterligare ett styrgruppsmöte genomfördes 2018-09-21.

2.7 Ändringar i projektorganisationen

Jonas Magnusson avböjde deltagande i referensgruppen då NCC redan var representerat i projektet av Fredrik Gränne.

Vid första styrgruppsmötet framförde Lars-Olof Nilsson en önskan att få lämna styrgruppen p.g.a. brist på arbetstid, vilket så skedde. Samtidigt flyttades Ted Rapp från referensgruppen till styrgruppen och Sture Lindmark togs in i referensgruppen.

I samband med byte av universitet har huvudhandledning tagits över av Andrzej Ćwirzeń och biträdande handledning samt projektledning tagits över av Hans Hedlund.

Referensgruppen har under projektets gång drabbats av ytterligare två bortfall, beroende dels på byte av arbetsgivare/uppgifter och dels privata orsaker. Detta gäller Helena Eriksson samt Anders Sjöberg.

3 Resultat

På önskan av branschrepresentanter har projektet prioriterat att ta fram fungerande materialmodeller och beräkningsmetodik för implementation i PPB. Detta har resulterat i frisläppning av en fungerande mjukvara till industrin i slutet av 2018, till pris av att den vetenskapliga dokumentationen inte kunnat tas fram i samma tempo.

3.1 Materialmodeller

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

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

3.1.1 Hydratation och kemisk bindning av vatten

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

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

Hydratationsmodellen tar hänsyn till följande parametrar som påverkar hydratationsförloppet:

- Cementets förbrukning inkl. en startförsening på grund av den s.k. dormanta fasen mellan upplösningen av cementet i vatten och hydratationens huvudintensitetstopp
- Temperaturberoende hos reaktionens hastighet
- Temperaturberoende hos mängd vatten som binds per mängd hydratiserat cement, se Fig. 2
- Vattnets tillgänglighet i porsystemet vid högre hydratationsgrader - detta beroende modelleras endast sent i hydratationen och används som begränsande faktor vid låga vct. Modellen i PPB 2.0.14 har inte detta beroende implementerat, då den delen av modellen utvecklats efter frisläppandet av programvaran, men kommer att implementeras i nästkommande version.

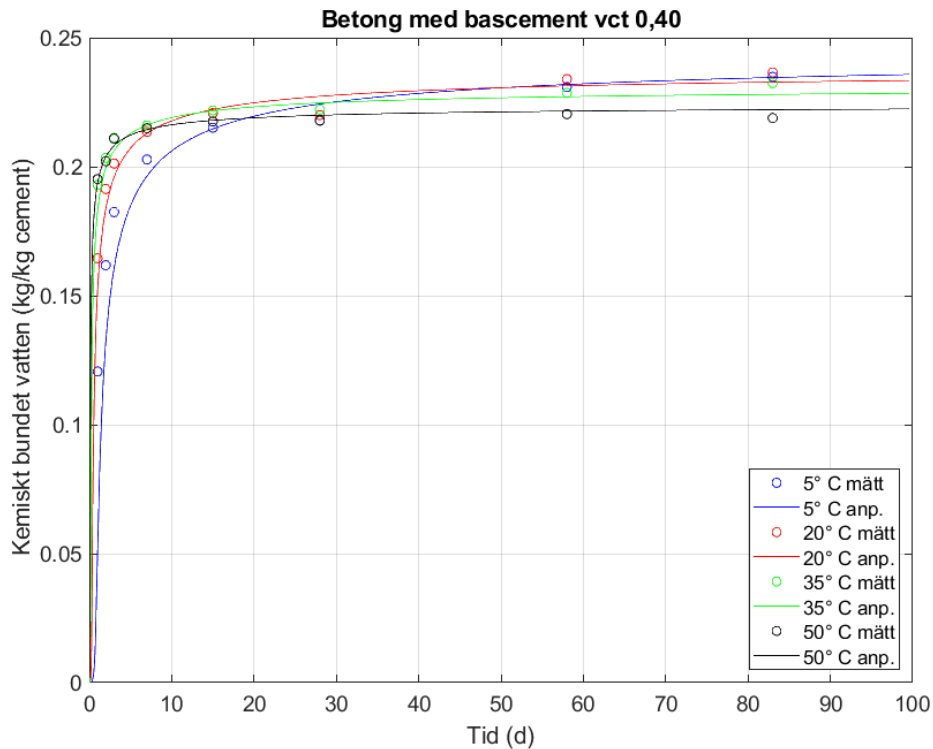


Fig. 2 Kemiskt bundet vatten (kg/kg cement) som funktion av tid för betong med Bascement, vct 0,40 härdad i förseglat tillstånd vid olika temperaturer, ringar visar uppmätta värden och linjerna predikerade data från den nytvecklade modellen som tar hänsyn till att vattnet binds olika effektivt vid olika temperaturer.

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

3.1.2 Sorption

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

3.1.3 Transport

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

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

3.2 Kommande avhandling

En partiell draft av den kommande avhandlingen bifogas till denna slutrapport. Avhandlingens hela struktur framgår av draften, likaså de inledande kapitlen med beskrivning av industriell bakgrund, problemanalys, formulering av den vetenskapliga problemställningen samt en litteraturstudie i flera delar. Texten och figurerna befinner sig inte i sin slutgiltiga och granskade form utan skall ses som temporärt tillstånd av avhandlingen under pågående arbete.

3.3 PPB samt materialdata för betong med Bascement

Samarbete mellan detta projekt och SBUF 13197 & 13198 har varit en direkt förutsättning för ett lyckat genomförande av 13197 och 13198 och resultat från dessa projekt. Detta omfattar en ny version av PPB med 3 typfall för beräkning av uttorkning i betong samt inmätt fundamentalbeteende hos betong med Bascement, se slutrapporten till SBUF 13197 & 13198. Vidare har detta projekt tagit fram resultat som kommer att användas i kommande utveckling av PPB, främst inom 13710 samt 13711.

3.4 Annan kommunikation

I samarbete med SBUF 13197, 13198 samt 13354 har totalt 6 industriella artiklar publicerats på PPB:s webbsajt, se bilagor i slutrapporten till SBUF 13197 & 13198 och exempel i Fig. 3. I samarbete med 13710 har 3 artiklar för publicering i Bygg & Teknik skrivits. Dessa är inte publicerade i skrivande stund utan kommer i betongnumret av tidningen under hösten 2019.



Fig. 3 En av artiklarna publicerade på PPB:s webbsajt.

Bilageförteckning

1. M. Stelmarczyk, *Applied Modelling of Moisture Phenomena in Concrete*, partiell draft av kommande doktorsavhandling