

Förstudie och metodutveckling för implementering av fuktberäkningsmodul i datorprogrammet Produktionsplanering Betong

Slutrapport

**Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF
Peter Johansson, LTH
Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier**

2015-11-20, reviderad 2018-10-10. Avser sammansättningen av författargruppen.

Förord

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

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

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar projektet SBUF 13064 "Förstudie och metodutveckling för implementering av fuktberäkningsmodul i datorprogrammet Produktionsplanering Betong". Huvudmomenten i projektets genomförande beskrivs. Slutsatser dragna av arbetsgruppen och baserade på input från externa workshoppar, litteraturstudier, analyser och prototypframtagning redovisas. Slutligen presenteras förstudiens resulterande rekommendationer för vidare åtgärder inom utveckling samt forskning både i närtid och på längre sikt.

Projektet finner att metoder och verktyg för uttorkningsberäkningar är i omedelbart behov av ett mycket omfattande omtag för att kunna motsvara branschens realistiska krav. För att möjliggöra detta måste i princip samtliga, hittills i verktygen använda, materialmodeller revideras eller utökas, ibland redan från grundläggande forskningsnivå. Inmätning av fundamentalegenskaper för moderna betonger, baserade på cement med mineraltillsatser, identifieras vara av vital betydelse.

Rapporten redovisar av projektet redan vidtagna åtgärder på forskningsnivå samt konkreta förslag till omedelbara utvecklingsprojekt, för att förse branschen med en ny generation av verktyg för uttorkningssimulering inom 1,5 år.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning.....	2
Innehållsförteckning.....	3
1 Inledning.....	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Ändringar i projektorganisationen	5
1.3 Rapportens struktur	5
2 Branschens åsikt.....	6
2.1 Genomförande	6
2.1.1 Workshop 1 – Användares åsikter.....	6
2.1.2 Workshop 2 – Materialtillverkares åsikter	6
2.1.3 Workshop 3 – Hur skall vi kravställa uttorkning?.....	7
2.2 Slutsatser	7
2.2.1 Mer avancerad simulering av uttorkning	7
2.2.2 Konstruktionstypfall	7
2.2.3 Pågjutning och avjämning	8
2.2.4 Förenklade ”RBK-typfall”	8
2.2.5 Miljöbeskrivning	8
2.2.6 Golvvärme	9
2.2.7 Kravställning och övervakning.....	9
2.2.8 Resultat.....	10
2.2.9 Hantering av mätdata.....	10
2.2.10 Osäkerheter i prognoserna.....	10
2.2.11 Problemlösning.....	10
2.2.12 Serieberäkningar	10
2.2.13 Hantering av materialdata.....	10
2.2.14 Cement av intresse.....	11
2.2.15 Avjämningsmassor av intresse	11
3 Analys	12
3.1 Genomförande	12
3.1.1 Övergripande modellering	12
3.1.2 Sorption och skanning	14
3.1.3 Kemisk bindning av vatten	15

3.1.4	Transportmodellering.....	17
3.1.5	Beroende av tidig hydratationshastighet.....	18
3.1.6	Framtagning och matematisk analys av beräkningsalgoritmer	18
3.1.7	Mätning och framtagning av materialdata.....	18
3.2	Slutsatser	19
3.2.1	Behov av nytt helhetsgrepp	19
3.2.2	Sorption och scanning	19
3.2.3	Kemisk bindning av vatten	19
3.2.4	Transportegenskaper	19
3.2.5	Beroende av tidig hydratationshastighet.....	20
3.2.6	Material	20
3.2.7	Problemlösning.....	20
3.2.8	Gammal betong.....	21
3.2.9	Serieberäkningar	21
3.2.10	HDF - Inre struktur i block (samt ränder)	21
3.2.11	Förenklade typfall samt osäkerhet i prognos.....	22
3.2.12	Miljöbeskrivning	23
3.2.13	Mark, fukt samt temperatur.....	23
4	Rekommendationer.....	24
4.1	Redan vidtagna åtgärder	24
4.2	Omedelbara åtgärder	24
4.2.1	Grundimplementation.....	24
4.2.2	Inmätning av Bascement	25
4.3	Senare åtgärder	25
4.3.1	Inmätning av avjämningsmassor	25
4.3.2	Finesser och Pedagogik	25
4.4	Vidare utredning och forskning samt ev. framtida implementation	26
	Litteraturförteckning	27

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Detta projekt har haft två syften. Det första var vidareutveckling av beräkningsmetodik för fuktflöde i samt uttorkning av betong. Detta baserade sig på tidigare identifierade problem och utmaningar så som:

- Existerande mjukvara, Torka S, som bygger på grovt förenklade modeller samt inadekvat materialdata
- Nya betonger med mineral tillsatser, som uppvisar ett annorlunda fukt beteende än de gamla baserade på rent Portlandcement
- Branschens behov av att simulera väsentligt mer realistiska uttorkningsförhållanden än vad som är möjligt i Torka S

Det andra syftet med projektet var att utföra en förstudie avs. implementering av en fuktflödessimulering i enlighet med ovanstående, som integrerad funktionalitet i PPB.

Denna rapport redovisar projektets arbete, de analytiska resonemangen samt rekommendationer för vidare implementation och forskning.

1.2 Ändringar i projektorganisationen

Tidigt i projektet blev det klar att Jan-Erik Jonasson inte kommer att kunna delta i projektarbetet i den planerade omfattningen av personliga skäl. Han lämnade därför arbetsgruppen. Samtidigt togs Lars-Olof Nilsson, LTH samt Magnus Åhs, LTH, in i arbetsgruppen och blev kvar i den under hela projektet.

1.3 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i tre delar:

- Branschens åsikt – här redovisas genomförande och resultat av workshoppar som genomfördes för att väcka diskussion i berörda delar av branschen och inhämta parterers åsikter.
- Analys – här redovisas genomförande och resultat av projektets analytiska, utredande och undersökande arbete som baserade sig på projektets mål, branschens åsikter samt forskningsläget inom området
- Rekommendationer – här redovisas vad projektet rekommenderar avseende vidare arbete som skall syfta till implementation av fukt i PPB samt varför projektet gör det.

2 Branschens åsikt

2.1 Genomförande

Branschens åsikt inhämtades genom tre workshoppar där representanter för olika aktörer bjöds in till diskussion.

2.1.1 Workshop 1 – Användares åsikter

Workshopen genomfördes 2015-03-13. De deltagande var representanter för entreprenörer, fuktkonsulter och specialister, samt projektets arbetsgrupp. De deltagande företagen och organisationerna var Skanska, NCC, Peab, Swerock, TCG, Dry-IT, AK-Konsult, Sveriges Byggindustrier, SBUF samt The Green Dragon Magic.

Den nuvarande versionen av PPB presenterades som inledning, för att ge samtliga deltagare en bild av grundverktygets nuvarande nivå, design, funktionsutbud samt användarvänlighet. Sedan diskuterades olika idéer och önskemål kring simulering av fuktflöde och uttorkning.

Diskussionspunkterna omfattade bl.a.:

- Vilka konstruktioner vill man kunna räkna på?
- Vilka situationer, inkl. arbetssätt, omgivande miljö, ev. oförutsedda händelser, skador mm. skall kunna beaktas?
- Hur vill man kunna beskriva den omgivande miljön både kring gjutögonblicket samt på längre sikt under själva uttorkningen?
- Vilka material vill man kunna hantera i simuleringen (cement/betong, avjämningsmassor, olika skikt, andra anslutande material)?
- Hur vill man ha resultaten presenterade och sammanställda?
- Vilka typer av kravformuleringar är intressanta att övervaka?

2.1.2 Workshop 2 – Materialtillverkares åsikter

Workshopen genomfördes 2015-03-19. De deltagande var representanter för tillverkare och leverantörer av cement, betong och avjämningsmassor, samt projektets arbetsgrupp. De deltagande företagen och organisationerna var Cementa, CEMEX, TCG, Swerock, Betongindustri, TM-Progres, Weber Saint Gobain, Skanska, NCC, LTH, Sveriges Byggindustrier, SBUF samt The Green Dragon Magic.

Den nuvarande versionen av PPB presenterades som inledning. Det redovisades hur hanteringen av materialdefinitioner sker i PPB och hur den är tänkt att utvecklas i framtiden.

En presentation av modellering av olika fuktegenskaper i betong gavs. Det redovisades hur olika slags fundamentalegenskaper bidrar till den totala fuktbildens komplexitet och vikten av att mäta in just dessa egenskaper förklarades. Det gavs även en grov struktur till hur totalbilden för vilka egenskaper som måste mätas in för olika material, ser ut.

Sedan diskuterades olika idéer, önskemål och synpunkter kring framtida inmätning av materialegenskaper, hantering av materialdata i programmet samt hur tillverkarna ser på framtiden och utveckling av material och deras egenskaper.

2.1.3 Workshop 3 – Hur skall vi kravställa uttorkning?

Workshopen genomfördes 2015-04-13. De deltagande var representanter för entreprenörer, fuktkonsulter och specialister, materialtillverkare, akademier, samt projektets arbetsgrupp. De deltagande företagen och organisationerna var Skanska, NCC, Swerock, TM-Progress, Weber Saint Gobain, Sto Scandinavia, AK-Konsult, LTH, Sveriges Byggindustrier, SBUF samt The Green Dragon Magic. CEMEX samt Betongindustri var inbjudna men tackade nej till deltagandet. Boverket samt Peab meddelade sent återbud.

Den nuvarande versionen av PPB presenterades som inledning. Resultaten av de tidigare workshopparna sammanfattades.

Lars-Olof Nilsson presenterade en kort historik kring mätning och kravställning av fukt i betong. Han gav även en bakgrund till hur dagens syn med ekvivalent djup mm. kom till inkl. bakomliggande tankar och resonemang.

Sedan diskuterades:

- Hur de egentliga kraven ser ut om man utgår från hur betongen används och vad som kan bli fel vid för hög fuktighet?
- Vad är det man egentligen vill kontrollera?
- Huruvida dagens hantering av fuktrelaterade krav och mätningar är tillräcklig jämfört mot olika användnings- och uttorkningssituationer samt dagens material?
- Hur skulle man egentligen vilja jobba med prognostisering, mätning samt kravställning för att komma till rätta med de identifierade problemen?

2.2 Slutsatser

Eftersom slutsatserna från workshopparna delvis överlappar varandra, redovisas de inte per resp. workshop. De sammanställs i stället i en mer logisk ordning för samtliga workshoppar ihop.

2.2.1 Mer avancerad simulering av uttorkning

Man vill kunna modellera mer avancerade uttorkningsförlopp än vad Torks S tillåter. Dessa förlopp skall bättre motsvara den verkliga situationen för uttorkning. Det skall gå att räkna på inverkan av olika typer av ofördelaktiga förhållanden och händelser samt gärna även vattensador.

Eftersom det finns tydliga observationer av att fuktegenskaperna och betongens uttorkning påverkas av hydrationshastigheten i betongens tidiga ålder, bör planering av uttorkning basera sig på en kombinerad simulering av värme- och fuktflöde och inte endast på fuktflöde utifrån antagen betongtemperatur.

2.2.2 Konstruktionstypfall

Majoriteten av de befintliga konstruktionstypfallen i PPB befanns intressanta för uttorkningssimulering. Det är även önskvärt att komplettera dessa med följande specifika fall:

- Källarvägg, utanpåliggande mark och även vattentryck.
- Konstruktion med voter gjuten i två olika etapper – vot för sig och resten för sig – p.g.a. olika vct.

- Stegvis gjutning där ny konstruktion gjuts på tidigare gjutna delar i ett eller flera steg, då anslutning mot tidigare gjutna delar påverkar uttorkningen
- Håldäck, igjutning i fogar och ändupplag, på väggar och hattbalkar, både längdled och tvärled.
- Pågjutning på alla horisontella ytor
- Avjämningsmassor, ett eller flera skikt, påläggning vid given tidpunkt eller vid uppfyllt fuktkrav i underliggande konstruktion

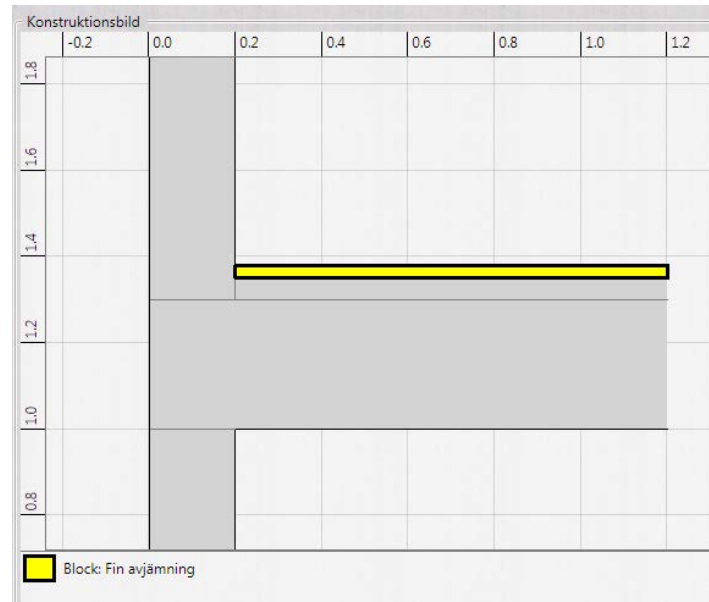


Fig. 1 Exempel på konstruktionsgeometri med pågjutning i två skikt, en grovavjämning och en finavjämning

2.2.3 Pågjutning och avjämning

Man vill kunna simulera pågjutning på samtliga horisontella ytor i en konstruktion. Detta skall kunna ske med betong, men även omfatta påläggning av avjämningsmassor. Avjämningsmassor skall kunna läggas på i ett eller flera skikt, då grov resp. finavjämning ofta kombineras med varandra. En önskad finess för avjämning är att den skall dels kunna ske vid en planerad/given tidpunkt, dels att programmet skall själv räkna ut tidpunkten baserat på ett angivet fuktkrav för underliggande konstruktion.

Avjämningsmassor bedöms inte avge värme i någon större utsträckning, varför denna aspekt av hydratation i dem inte behöver simuleras.

2.2.4 Förenklade "RBK-typfall"

Önskemål föreligger om några väldigt enkla typfall med ett minimalt antal indata. Dessa skall inte användas för planering av uttorkning utan för rimlighetsbedömning av mätningar, enligt dagens RBK-system. De fullskaliga typfallen befaras blir för komplexa för snabb rimlighetsbedömning av mätresultat.

2.2.5 Miljöbeskrivning

Eftersom uttorkningssimulering bör basera sig på kombinerad simulering av både fukt- och värme flöde, bör beskrivningen av miljö kombinera en noggrann beskrivning av startskedet och den

första tiden efter gjutning med någon form av långtidsbeskrivning av genomsnittliga förhållanden på plats. Följande punkter noterades som önskemål:

- Konstant temperatur och relativ fuktighet i omgivande luft.
- Möjlighet till egen variation.
- Möjlighet till att övergå efter en tid till klimatdata från SMHI, kopplade till ort.
- Möjlighet till variation av klimatdata för simulering av mer extrema förhållanden.
- Fritt vatten/regn/vattenskada på ytor.
- Snö.
- Olika typer av mark.
- Möjlighet till uppskattning/beräkning av utbredning av värmekuddar under byggnader av olika storlek.
- Någon form av prognostisering av inomhusklimat, kopplad till utomhusklimatet.

2.2.6 Golvvärme

Golvvärme som både elkabel och värmerör skall kunna simuleras.

2.2.7 Kravställning och övervakning

Det befintliga sättet att kravställa och mäta relativ fuktighet bedöms inte som tillräckligt. Värde på endast ett djup är en grov förenkling av verkligheten. Gällande rekommendationer riskerar att slå fel med moderna betonger med mineraltillsatser. I vissa situationer kan detta medföra förseningar och/eller skador. I andra situationer missar man de fördelar som ett modernt material kan ge. Mot bakgrund av detta önskar man sig ett prognosverktyg som kan simulera fuktförhållanden hela vägen från produktion till användning. Detta skulle möjliggöra en mycket mer precis och adekvat planering av uttorkning. Kombinerat dessutom med fuktmätning i fler punkter och/eller på fler djup, skulle även kontrollen och uppföljningen blir mycket mer effektiv.

Den totala identifierade kravbilden från verkligheten täcker:

- Direkta effekter:
 - Kapacitet att ta upp fukt från anslutande material t.ex. lim
 - Negativ påverkan på anslutande material t.ex. mögel, krökning, materialnedbrytning av trägolv, linoleum, pvc-mattor, epoxygolv
 - Möjliggörande av uttorkning av andra pålagda skikt
- Indirekta effekter:
 - Alkalitransport med tillhörande materialbrytning t.ex. av lim, pvc, linoleum
 - Kvarvarande krympning med mekanisk påverkan på t.ex. anslutande keramik

De krav som identifierades för övervakning i programvaran är:

- X% RF på ytan
- X% RF genom valfri del eller hela profilen
- Ingen fuktväg för alkali

2.2.8 Resultat

Relativ fuktighet är det mest intressanta värdet. I vissa fall kan det vara av intresse att se även ånghalt, ångans partialtryck, porvattentryck samt fukthalt. Dessa värden bör kunna presenteras så som temperatur och hållfasthet hanteras idag i PPB.

Det vore av högt pedagogiskt värde att kunna visa fuktflödet över ränderna. Idag finns inte någon motsvarande funktion för värmeflöde i PPB, men det skulle vara av värde att se det också, dvs. bägge flöden.

2.2.9 Hantering av mätdata

Man skall kunna mata in mätdata i programmet och få dem jämförda med simulerade värden. Detta handlar om:

- enstaka mätningar i en punkt
- enstaka mätningar av en profil (flera punkter/djup)
- en tidsbaserad följd av data i en punkt eller profil

Dessa mätdata skall kunna visualiseras i lämpliga diagram och redovisas tillsammans med simulerade data i tabellform för jämförelse.

Relativ fuktighet skall alltid mätas och matas in tillsammans med värden på temperatur.

Det finns även önskemål om prognostisering av kvarvarande uttorkningstid efter inmatning av uppmätt fuktprofil.

Ett annat sätt att följa upp mätningar som avviker från beräknade förlopp skulle kunna vara en guide där användaren får tips om vilka delar av indata som skall kontrolleras för avvikelser för att rätta in beräkningen mot de uppmätta fuktvärdena.

2.2.10 Osäkerheter i prognoserna

Användaren bör på något sätt göras medveten om osäkerheten i prognoserna och dess beroende av fel i olika indata. En studie av osäkerheten och dess variation bör göras och dess resultat bör ingå i utbildningsmaterialet till programverktyget.

2.2.11 Problemlösning

Det finns önskemål om en kapacitet till problemlösning hos det tilltänkta programmet. Angivna grundförutsättningar och ett datum för t.ex. mattläggning skall kunna resultera i förslag till adekvata åtgärder för uttorkning.

2.2.12 Serieberäkningar

Det finns ett starkt intresse för serieberäkningar av liknande slag som i Hett97. Där skall det vara möjligt att uppge olika alternativ för indata (typiskt variera en eller ett par variabler) och få resultat från samtliga alternativen sammanställda enligt ett eller flera specifika krav.

2.2.13 Hantering av materialdata

Komplexiteten för materialdata avs. fukt kommer i praktiken att omöjliggöra för materialtillverkare att mäta in sina egna material. Det krävs både speciell utrustning samt kompetens för ändamålet. På grund av detta är det högst önskvärt att materialdata framtagna vid därtill kompetenta labb inte

blandas ihop med "icke auktoriserade" materialdata. Materialdata skall således kunna signeras elektroniskt så att det klar framgår vem som har tagit fram dem.

Idag ingår det en grunduppsättning av materialdata i PPB-installationen. Därutöver kan materialdata distribueras som filer, t.ex. kan en materialtillverkare skicka ut sådana med mail eller lägga upp dem för nedladdning på en web-server. I framtiden vore det även önskvärt med en centraliserad tjänst där materialtillverkare kan publicera sina materialdata för samtliga användare av PPB. Från samma ställe skulle PPB automatiskt kunna ladda ner nya materialdata utan behov av manuell distribution.

2.2.14 Cement av intresse

Cementas Bascement är mest intressant som material idag för fuktberäkning. Därefter är det svårt att peka ut en viss prioriteringsordning. Både Cementas Anläggningscement och SH, samt ett flertal produkter från CEMEX och andra tillverkare förekommer och används. Cementas Byggcement används i liten omfattning och anses vara på väg ut. Därför anses den inte vara av intresse.

2.2.15 Avjämningsmassor av intresse

Branschen önskar sig möjlighet att räkna på både snabbtorkande och normaltorkande avjämning. Vidare bör även olika typer av avjämningsmassor täckas då produkter gärna kombineras med varandra idag, t.ex. grovavjämning först och finavjämning på topp.

3 Analys

3.1 Genomförande

Sju interna, heldagars workshoppar har ägt rum inom projektet på LTH. De deltagande var projektets arbetsgrupp. Innehållet i dessa workshoppar följde inte någon speciell uppdelning. Workshopparna användes till att avhandla löpande ärenden under projektets gång, så som div. analyser, löpande diskussioner, förberedelser samt uppföljning till externa workshoppar, planering och uppföljning av mätningar samt prototypframtagning mm.

Som en del av det interna arbetet utfördes en litteraturstudie. Denna omfattade en rad olika områden. Behovet samt omfattningen identifierades löpande under dels det interna arbetet i projektet, dels som en konsekvens av vad som framkom under de externa workshopparna.

Det har inte varit projektets mål att mäta in några materialegenskaper. Däremot har det visat sig nödvändigt att utföra vissa mätningar. Dels har det rört sig om framtagning av rådata för vidare tester av materialmodeller. Dels har vissa mätningar samt deras utvärdering syftat till att utvärdera olika mätmetoder och igenom detta reducera risker i kommande inmättningsprojekt.

Projektet har inte heller haft för avsikt att utveckla någon skarp mjukvara. Däremot har det tagits fram ett antal mindre mjukvaruprototyper. Dessa har används för utvärdering av modeller samt numeriska algoritmer för anpassning av materialdata samt beräkning av fuktflöde. Poängteras bör att dessa mjukvaror är just prototyper och inte på någon sätt färdiga eller fullständiga produkter som skulle kunna användas av branschen.

3.1.1 Övergripande modellering

De idag existerande verktygen för beräkning av uttorkning, Torka S samt BI Dry, baserar sig på ett antal grova förenklingar av verkligheten:

- Förenklad modellering av fuktflöde
- Förenklad modellering av fysikalisk bindning av vatten (sorption)
- Materialmodeller för huvudsakligen Portlandcement (och ev. mindre tillsatser av silika)
- Ingen modellering av inverkan hos det tidiga hydratationsförloppet på hur materialegenskaper utvecklas.

Fuktflödet modelleras som drivet av endast en potential. För att detta skall vara en bra approximation av verkligheten får inte temperaturen variera mellan olika delar av konstruktionen (inga temperaturgradienter). Detta kan i sin tur antas gälla endast för väldigt tunna konstruktioner med fullständigt symmetriska randvillkor avsv. värme. Dessutom omöjliggör ansatsen i praktiken beräkningar i 2-dimensionella geometrier (t.ex. platta på mark med voter), där större tvärsnittstjocklekar samt större variation i randvillkoren nästan alltid förekommer, samt beräkning under hårdnandets första fas, där temperaturen varierar kraftigt p.g.a. cementets reaktion. Utöver detta skall nämnas att endast en transportpotential inte heller kan tillgodose behovet av samtidig modellering av såväl ångtransport som kapillärt sug. Detta omöjliggör uttorkningsberäkning med inverkan av insug av vatten från ytor, t.ex. vid regn, vattenskada eller vid kontakt med material som innehåller kapillärt bundet vatten. Tyvärr klarar inget av de idag i branschen tillgängliga verktygen verklighetens normala komplexitet.

Förenklad modellering av fysikalisk bindning av vatten ställer till med andra problem. Förenklingen består av att man endast modellerar sambandet mellan relativ fuktighet och fukthalt under ren desorption, dvs. endast då den relativa fuktigheten kontinuerligt sjunker. Om eventuell uppfuktning skulle äga rum ger inte modellen en korrekt bild av verkligheten på grund av de fördröjningseffekter (hysteres) som finns i den fysikaliska bindningen av vatten. Uppfuktning i delar av konstruktionen kan ske till följd av:

- Ojämn hydratation som medför ojämn kemisk bindning av vatten, variation i relativ fuktighet och därmed initierat flöde från fuktigare till torrare delar av konstruktionen
- Omfördelning av fukt p.g.a. en temperaturgradient (se stycket ovan för resonemang om när detta förekommer)
- Insugning av vatten från konstruktionens ytor

I samtliga dessa fall adderas mindre eller större fel till simuleringen och ackumuleras i totalresultatet. Detta påverkar de redovisade uttorkningstiderna och ger en felaktig bild av verkligheten.

De materialmodeller som används för beskrivning av hur vatten binds kemiskt är framtagna för Portlandcement samt utökade för modellering av mindre mängder ($\leq 5\%$) tillsatt silika [3,8]. De bygger på en rad antaganden som inte kommer att kunna gälla för större mängder av flygaska eller slagg. Tidigare spelade detta ingen roll eftersom det i Sverige huvudsakligen användes Portlandcement utan tillsatser eller med små mängder därav. Detta gäller inte längre idag, då branschen uppger Cementas Bascement (med 15 % flygaska) som mest intressant för uttorkningssimulering.

Även om man planerar för ett optimalt uttorkningsförlopp där uttorkningsmiljön och materialet skraddarsyfts så blir det verkliga förloppet i regel inte helt enligt antagna förutsättningar. För tillförlitliga uttorkningsprognoser måste man kunna simulera en mycket bredare del av verkligheten, som täcker typiska avvikelser från de planerade uttorkningsförloppen. För bedömning av hur robust prognosen är erfordras att användaren tidigt kan utföra känslighets- och uppföljningsanalyser för jämförelse med tidigt mätta värden, som avviker från den planerade uttorkningen av konstruktionen.

Idag vill man enligt resultaten från de externa workshopparna kunna täcka olika klasser av uttorkningsproblem där tvådimensionellt flöde, insugning av vatten direkt från ränder eller från anslutande material, fukttransport under en temperaturgradient och liknande ingår.

Tidigt under projektet initierades misstanken att det krävs ett mycket omfattande omtag, jämfört med tidigare lösningar. Annars kommer man inte till rätta med branschens övergripande önskemål och behov kring uttorkningssimulering. Input från de externa workshopparna bekräftade denna misstanke. Därför inleddes ett brett analysarbete som fördelades på tre huvudsakliga modelleringsområden:

- Sorption och skanning (dvs. fysikalisk bindning av vatten). Tidigare använda modeller och data, som täckte endast desorption, kommer inte att räcka eftersom man i dagens läge vill räkna på fall som medför omfördelning av fukt samt insugning av vatten, dvs. uppfuktning. Här bör man också beakta att existerande data gäller huvudsakligen Portlandcement utan mineral tillsatser.

- Kemisk bindning av vatten. Tidigare använda modeller och data täcker inte beteendet hos större inblandning av puzzolaner och halvpuzzolaner, vilka används idag (t.ex. flygaska i Cementas Bascement). Att nya data måste mätas upp var uppenbart. Valet av mätmetodik för att fastställa och särskilja hydratationsgrad hos olika bindemedel var dock inte lika uppenbart. Även frågor rörande grundmodellens täckning av nödvändig fenomenologi behövde adresseras.
- Transportegenskaper inkl. insugning av vatten. Detta område är i störst behov av modernisering. Hittills har fukttransport modellerats med hjälp av en drivande potential. Detta är en grov förenkling och ett behov av åtminstone två identifierades för att kunna hantera flöden under en temperaturgradient samt insugning av vatten.

Denna analys omfattade till en början en litteraturstudie, men efter diskussioner utvidgades i vissa fall till mätningar och prototypframtagning (se vidare följande subkapitel).

3.1.2 Sorption och skanning

Studien tog sin start i äldre litteratur [20] som togs upp för grundläggande förståelse av den tidigare modelleringen. Nytt material avs. olika existerande modeller för sorption och skanning [1,2,4] studerades. För och nackdelar diskuterades och slutligen valdes [2] som den mest lovande för test genom anpassning till mätdata.

Vidare utfördes mätning på Bascement, där sorptions- och skanningspunkter registrerades på prov vid två olika betongåldrar. Denna mätning utfördes på ett förenklat sätt där t.ex. hårdningen inte hade stoppats, vilket kommer att krävas i en skarp inmätning av materialegenskaper. Försöket syftade till att kontrollera mätmetodens lämplighet och en rad praktiska aspekter i själva utförandet. Mätförsöket utföll väl och mätmetodiken bedöms som tillämpbar för skarp inmätning.

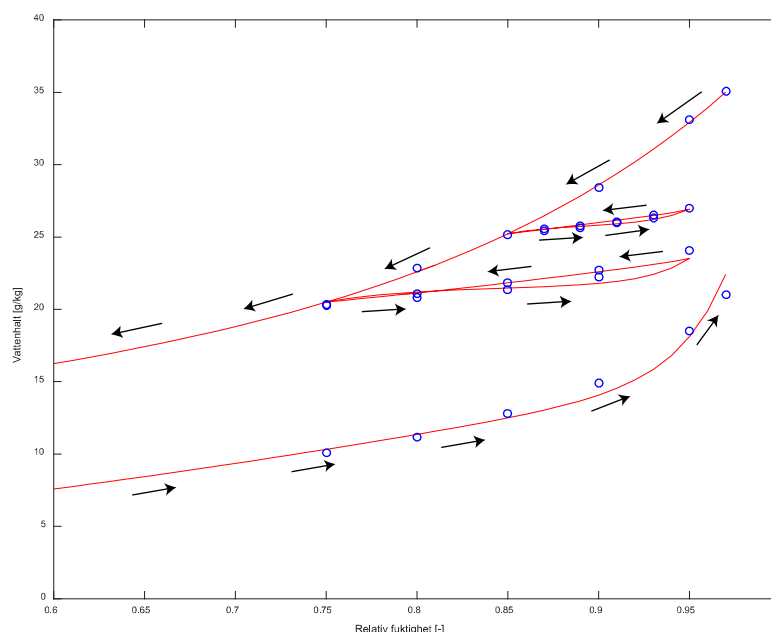


Fig. 2 Absorptionskurva och desorptionskurva med två skanningloopar, punkterna är uppmätta data, linjerna är den anpassade modellen

För att testa själva modellen för beskrivning av sorption och skanning i [2] utvecklades mjukvaruprototyper i både Matlab och Microsoft Visual Studio C#/.net för beräkning av fukthalt utifrån en historik i relativ fuktighet. För dessa utvecklades även anpassningsrutiner för beräkning av materialdata från uppmätta sorptions- och skanningsdata, även här i både Matlab och Microsoft Visual Studio C#/.net. I själva testet anpassades materialdata till de tidigare uppmätta värdena för två olika åldrar, och jämfördes med de uppmätta data. Testet föll väl ut, dvs. modellen bedömdes kunna beskriva de uppmätta förloppen väl, även om anpassningen av materialdata kräver någon timmes körning på en kraftfullare arbetsstation och inte skall ses som en uppgift för en vanlig kontorsdator.

Vidare studerades befintlig kunskap om sorptionsegenskapernas beroende av ålder samt temperatur. Åldersberoendet kan hanteras medelst interpolering mellan separata modeller vid olika åldrar/hydratationsgrader. Avseende temperaturberoendet finns det viss kunskap men inte entydig och mer mätdata på området vore högst önskvärt.

3.1.3 Kemisk bindning av vatten

Studien tog sin start i äldre litteratur [3,8] för att förstå den tidigare modelleringen av hydratationsgrad och kemisk bindning av vatten hos Portlandcement med tillsatser av silika. En rad publikationer rörande hydratationsgrad samt kemisk bindning av vatten hos Portlandcement med tillsats av flygaska och slagg studerades sedan [10,11,12,13,14]. En jämförelse och analys av dessa väckte frågeställningar rörande både modellering och mätning:

- Förenklad modellering av silikas inverkan kommer med hög sannolikhet inte att vara möjlig för flygaska och slagg, dels på grund av den relativt stora kornstorleken (jämfört med silika), dels på grund av mycket större mängder vid tillsättning.
- Kornstorleken kommer med hög sannolikhet att medföra behov av modellering av någon form av självbegränsning av reaktionsgrad på grund av minskad lokal tillgång till hydroxid, på liknande sätt som det redan sker för cementet.
- Större andel av mineraltillsats kommer också att kräva modellering av total tillgång till hydroxid, vilket kommer att medföra en återkoppling till både cementets samt mineraltillsatsens reaktionsgrad samt fukthalt.
- Litteraturen väckte också frågeställningar kring själva mätningen av hydratationsgrad i olika situationer för de olika bindemedlen var för sig.

Osäkerheter kring mätmetodiken föranledde ett antal mätningar, vars syfte var att försöka fånga olika data rörande hydratationsgrad för att sedan genom analys av dessa avgöra hur komplex inmätning kommer att krävas i det skarpa fallet. Mätningar var:

- Kalorimetrisk analys av avgivet hydratationsvärme för ett Portlandcement utan, med 15 % samt med 35 % flygaska.
- Termogravimetrisk analys med inriktning på upptagning av kemiskt bundet vatten (totalt resp. motsvarande kalciumhydroxid) för 7 olika åldrar hos ett Portlandcement utan, med 15 % samt med 35 % flygaska.
- Analys av mängd kemiskt bundet vatten genom manuell upphettning av prov samt vägning av dessa för 7 olika åldrar hos ett Portlandcement utan, med 15 % samt med 35 % flygaska.



Fig. 3 Nygjutet provobjekt av pasta, för vidare härdning samt TGA-analys

Mätresultaten analyserades och det bedömdes som fullt möjligt att med kombinerad TGA samt kalorimetri fånga hydratationsgrad, värmeutveckling samt kemisk bindning av vatten. Mätmetoderna kommer dock att kräva viss intrimning, särskilt för TGA.

När det gäller själva modelleringen och anpassningen av materialparametrar, identifierades att de tidigare gjorda anpassningarna i [3] byggde på förenklande antagande hos hydratationsfunktionen. Detta sågs som en svaghet som kan ställa till med problem i den mer komplexa modelleringen som kommer att behövas för t.ex. Portlandcement med flygaska. En prototyp för en mer avancerad anpassning av hydratationsgradens samt mognadsålderns parametrar (de delar som vid inmätning inte är separabla) utan tidigare förenklingar utvecklades. Anpassningar gjordes och testet föll väl ut.

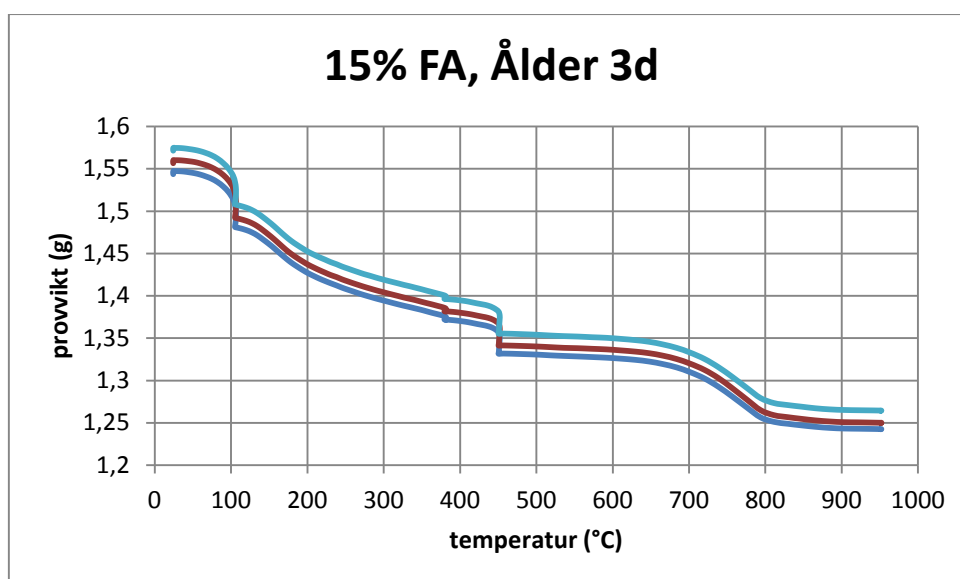


Fig. 4 TGA-kurvor för tre provkroppar av SH-cement med 15 % flygaska efter 3 dagars härdning, vid 105, 380 samt 450°C syns tydliga stopp då temperaturen hölls konstant i ca 30 min för att invänta viktstabilitet.

Även en annan utmaning rörande modellering av hydratationsgrad identifierades. Inom simulering av härdningsförlopp ur värme- och hållfasthetssynvinkel används en förenklad modell för betongens

mognad med en s.k. temperaturekvivalent mognadsålder. De mer avancerade modellerna av hydratationsgrad som ligger till grund för kemisk bindning av vatten använder sig av en mognadsålder med mer komplexa beroenden och dessutom av en mognadsålder per bindemedel. Dessa två modeller behöver på något sätt sys ihop för att kunna simulera både initial med även långsiktig härdning ur både värme och fuktsynvinkel i samma beräkning. Det är inte heller särskilt pedagogiskt att presentera mognadsåldrar enligt olika definitioner för samma betong för en användare av ett framtida beräkningsprogram.

3.1.4 Transportmodellering

Att transportmodellering med endast en drivande potential inte klarar av att modellera ångtransport samt vatteninsugning är väl känt [6]. Det finns även tydliga indikationer på att en potential inte heller räcker för att modellera fuktflöde under en temperaturgradient [5,7]. Den stora utmaningen är dock brist på mätdata för transportegenskaperna när flöde modelleras med hjälp av fler än en potential samt svårigheten i att separera de olika flödena åt vid mätning. Det sistnämnda beror på att olika slags flöden blandas på mikronivå i betongen och bildar ett summaflöde på makronivå. Ångflöde övergår i vattenflöde som övergår i ångflöde igen osv. Detta medför att önskan att modellera flödet med fler än en transportpotential huvudsakligen skall ses ur ett matematiskt perspektiv.

En matematisk analys utfördes avs. konsekvenserna vid modellering av flöde med två eller fler gradienter. De olika fuktrelaterade potentialerna studerades avs. gradientens form i olika situationer och jämfördes med varandra. Baserat på denna analys konstaterades att lämpliga kandidater till transportmodellering är någon av ångpotentialerna (t.ex. ånghalt) samt porvattentrycket, då dessa skiljer sig mest åt i karaktär och ett sådant val kommer att maximera det antalet skilda beteenden i fuktflöde som man vill kunna beskriva. Det observerades även att eftersom potentialerna ses huvudsakligen på ett matematiskt plan och inte tolkas fysikaliskt var för sig, kan det vara lämpligt att testa även temperatur som en andra eller tredje drivande potential för fuktflöde.

När det kommer till själva anpassningen av materialparametrar för transportegenskaperna identifierades följande metod:

1. Givet: inmätta egenskaper och anpassade materialdata för sorption och skanning samt för kemisk bindning av vatten
2. Mätförsök: ett antal uttorkningsförsök vid varierande situationer (blandning av: temperaturgradient eller ej, symmetriska och asymmetriska randvillkor avs. temperatur och/eller fukt, insugning av vatten eller ej) med tidsperiodisk mätning av fuktprofil.
3. Anpassning: simulera samtliga mätförsök med en FEM-beräkning, räkna ut det sammanlagda felet i samtliga mätpunkter och använd en lämplig metod för icke-linjär optimering för att hitta transportparametrar som minimerar det totala felet.

Metodens fördel är att den angriper problemet huvudsakligen matematiskt och inte behöver någon separation av mätdata för olika slags flöden. Priset för just detta är att metoden kommer att kräva en ansevärd beräkningskraft vid anpassning av materialdata till mätresultat. Detta bedöms dock överkomligt och ses för närvarande som den enda identifierade vägen för att komma åt transportdata för fler än en potential.

3.1.5 Beroende av tidig hydratationshastighet

Erfarenheter visar att hastigheten under det initiala hydratationsförloppet har inverkan på uttorkning [9]. En långsammare initial hydratation ger sedan en snabbare uttorkning. En liknande inverkan har sedan tidigare observerats, uppmätts och modellerats för hållfasthet. En sänkning av hållfasthet p.g.a. hög temperatur under hydratationens tidiga fas finns inbyggd i materialmodellen för hållfasthet i PPB. För fukt har detta fenomen inte undersökts närmare eller tidigare modellerats. En analys av möjliga mekanismer bakom ledde snabbt in på misstankar om förändrad porstruktur i materialet. Detta bör ha klar påverkan på både sorptions- och transportegenskaperna. Vidare kan det hittas exempel i litteraturen att även kemisk bindning av vatten påverkas genom att den maximala reaktionsgraden för cementet förändras[14].

Detta område är av hög vikt att modellera i ett framtida program för simulering av uttorkning. Inverkan på torktiderna kan ibland vara väsentlig. Kunskap saknas tyvärr för tillfället och projektet kan endast rekommendera att snarast inleda forskning på området.

3.1.6 Framtagning och matematisk analys av beräkningsalgoritmer

För att vidare reducera risker i ett framtida implementationsprojekt tog projektet fram en fullständig härledning av en matematisk finita elementformulering för de kombinerade partiella differentialekvationerna, energibalans för värme flöde samt massbalans för fuktflöde. Finita elementformuleringen anpassades till linjära ansatsfunktioner på elementen.

Därefter utfördes en analys som syftade till att uppskatta den numeriska utmaningen i att lösa det matematiska problemet och på detta sätt uppskatta rimligheten för de kommande beräkningstiderna för en skarpt implementerad mjukvara. Analysen utfördes genom att jämföra modellkomplexitet (t.ex. för sorption och skanning, flera transportpotentialer mm.), fysikalisk och matematisk problemstabilitet samt olika inverkan på dessa av verkliga problemegenskaper. Denna analys tog hänsyn till hela den ökade komplexiteten i modelleringen som de nya, föreslagna materialmodellerna kommer att medföra. Analysen föll väl ut och som resultat av denna bedömdes det rimligt att föreslå en implementation i PPB av 2-dimensionell, kombinerad fukt- och värme flödessimulering med de föreslagna materialmodellerna.

3.1.7 Mätning och framtagning av materialdata

Dagens mjukvara för uttorkningsberäkning utgår från fundamentaldata (sorption, kemisk bindning av vatten samt transport) för Portlandcement. Sedan har man gjort diverse korrigeringar av dessa data baserade på jämförelse mellan beräkningsresultat och ett mindre antal uttorkningstest. Dessa korrektionsmodeller är inte publicerade utan behandlas som respektive verktygs hemlighet. Följaktligen har dessa modeller aldrig utsatts för oberoende vetenskaplig analys eller granskning.

Det är vida känt att olika slags fundamentalegenskaper skiljer sig avsevärt mellan rent Portlandcement samt dito med mineral tillsatser [14,18,19]. Att ersätta uppmätning av fundamentaldata med några snabbare och mindre omfattande uttorkningstest sparar säkert mycket pengar och en del tid. Vid större skillnader i fundamentalbeteende ger dock ett mindre antal uttorkningstester endast en begränsad del av skillnaden. Denna information är dessutom uppmätt som ett enda totalmått på fel, dvs. inte uppdelad på de olika fundamentalegenskaperna, vilket bäddar för felinterpretationer och felkorrektioner.

För att komma tillrätta med beteendet hos moderna betonger med mineral tillsatser måste mätning av fundamentalegensaker utföras och data anpassas i enlighet med de föreslagna mer komplexa modellerna för resp. beteende. Skillnaden i beteende mellan betongerna baserade på rent Portlandcement resp. med mineral tillsatser är för stor för att försöka snåla sig igenom. Vi måste ha ny fundamentalkunskap från vilken det sedan kanske går att hitta vetenskapliga förenklingar för att på sikt få ner priset för inmätning av beteendet hos en ny betong.

Vidare bör observeras att mätning av relativ fuktighet baserat på uttaget prov ej får användas vid inmätning av materialegenskaper. Denna metod har utretts och funnits ge för stora fel [15,16,17]. Torka S 3.2 är kalibrerat mot uttorkningsmätningar med just uttaget prov. Detta misstag får inte upprepas vid nya mätningar.

3.2 Slutsatser

3.2.1 Behov av nytt helhetsgrepp

Gammal modellering täcker inte branschens verklighet. Existerande program simulerar uttorkning på ett så grovt förenklat sätt att resultatet endast stämmer i en labbmiljö. Detta är inte entreprenörens vardag. Ett helt nytt grepp från grunden behövs och bör inkludera:

- Fullständig modellering av sorption och skanning
- Transportmodellering med minst två drivande potentialer
- Utvidgad modell för kemisk bindning som täcker beteendet hos moderna cement med mineral tillsatser
- Beräkningsprogram baserad på FEM med beräkning av 2-dimensionellt flöde
- Materialdata som baserar sig på nya fundamentalmätningar av materialens beteende

3.2.2 Sorption och skanning

Modellering av sorption och skanning bör ske enligt [2] med:

- En modell vid 4 olika åldrar (ca 5d, 14d, 6mån och 12mån)
- Linjär interpolering i logaritmisk tid/mognadsålder mellan modellerna
- Temperaturkorrektur framtagen baserat på en ny/kompletterande inmätning av beroendet

3.2.3 Kemisk bindning av vatten

Utvidgad modell för kemisk bindning av vatten bör tas fram där:

- Självlösningseffekt modelleras inte bara för cement utan även för andra bindemedel
- Beroende av tillgång till hydroxidjoner modelleras för puzzolaner
- Någon form av sammanslagning av syn på mognadsålder och hydratation mellan värme och fukt tas fram.

3.2.4 Transportegenskaper

Transportmodellering bör arbetas om från grunden enligt:

- 2 eller 3 drivande potentialer skall användas (förslag: ånghalt, porvattentryck och möjligen temperatur)

- Inmätning baserar sig på anpassning av parametrar mot ett flertal uttorkningsförsök med kraftigt varierande förutsättningar. Anpassningen skall ske med hjälp av optimering byggt på fullskalig simulering av försöken med FEM.

3.2.5 Beroende av tidig hydratationshastighet

Forskning bör inledas på området kring:

- Hur påverkas maximal reaktionsgrad för cementet av olika hydratationshastigheter
- Hur påverkas strukturaspekter av olika hydratationshastigheter
- Hur påverkar strukturskillnader egenskaper för sorption samt transport av fukt

Med dessa forskningsresultat som bas bör nya modeller tas fram och implementeras i PPB när de är tillgängliga.

3.2.6 Material

Inmätning av fundamentalegenskaper och anpassning till nya materialmodeller måste ske. Detta kommer initialt att bli kostnadskrävande och bör begränsas till Cementas Bascement, i enlighet med branschens uppfattning om att det är det mest använda cementet, i de fall man vill räkna på uttorkning. Materialtillverkarens intresse av finansiering av detta bör undersökas och beroende av resultatet kan man välja mellan två nivåer:

- Den förenklade inmätningen – den minsta tänkbara inmätningen utan att kompromissa på själva egenskaperna och modelleringen. Inget arbete läggs ner för att mäta in hur bindemedlen samverkar för att sedan kunna justera egenskaperna vid förändringar i bindemedelssammansättningen.
- Matrisinmätningen – en utökad inmätning som utöver målet att mäta in beteendet för dagens Bascement, även kompletterar med mätningar för andra sammansättningar av klinker och flygaska. Detta för att dels förstå hur dessa samverkar och dels kunna räkna ut beteendet för andra proportioner än för dagens Bascement.

I en förlängning kan man vidare tänka sig inmätning av fler cement. Intresse för detta bör undersökas hos fler materialtillverkare när den första inmätningen är utförd och när man lärt sig mer om hur mineraltillsatser samverkar med klinkern, vilket förhoppningsvis kan reducera kostnaden för sådana inmätningar i framtiden.

Inmätning av avjämningsmassor bör också utföras. Där är det av värde att invänta stabilisering av nya materialmodeller för betong, då avjämningsmassors beteende bygger på samma fenomenologi, dock med lägre nivå av komplexitet. Kort sagt bör man kunna återanvända kunskapen från betongen dock i förenklad variant.

3.2.7 Problemlösning

Den av branschen efterfrågade möjligheten till problemlösning i ett framtida program bedöms inte vara tekniskt genomförbar. Problemområdets komplexitet är på tok för hög. Dessutom bedöms en automatisk problemlösare motverka det pedagogiska värdet av ett framtida program. En användare skall inte bara trycka på en knapp och få en lösning med helt okänd robusthet presenterad. Det som man vill eftersträva är en medveten användare som lär sig förstå hur fukten rör sig och vad som påverkar uttorkningen. En sådan användare kan sedan med beaktande av de rådande

förutsättningarna ta fram en mycket mer genomtänkt lösning, som med hög sannolikhet är mer robust eftersom just olika förutsättningar har tagits i beaktande.

När det kommer till korrigerande och omprognostisering baserat på en eller flera mätprofiler blir resonemanget liknande. Olika slags fel i indata kan resultera i samma eller liknande differens i mätning jämfört med prognos. För att kunna korrigera prognosen på ett tillförlitligt sätt måste man lista ut vad som var fel från början och rätta till det. Detta kan inte göras automatiskt. I stället går det att bygga in en guide i programmet som hjälper användaren att gå igenom de vanliga felkällorna och på detta strukturerade sätt identifiera vad som behöver korrigeras för att prognosen skall stämma överens med mätdata och blir tillförlitlig. Detta förfarande har också den pedagogiska fördelen att användaren engageras i felsökningen och bygger upp en större förståelse. Detta gäller inte bara fuktflöde utan även vad som leder till att det blir annorlunda än planerat, vilket i sin tur resulterar i felprognoser. Denna kunskap kan sedan användas till att förebygga felprognoser.

3.2.8 Gammal betong

För att kunna räkna korrekt på uttorkning där gammal betong ingår skulle fullständig historik av fuktillstånd samt härdningsförlopp i den gamla betongen behövas. Detta ses möjligt endast om den gamla betongen inte är så gammal, d.v.s. endast om den är en tidigare gjuten del av samma konstruktion och om den ansluter på ett sådant sätt att dess härdning och uttorkning kan simuleras i samma beräkning som den egentligen tilltänkta unga betongen. Detta eliminerar tyvärr all betong som platsgjutits en ansevärd tid tidigare och även prefab.

Det är uppenbart att ett förenklat sätt för hantering av gammal betong i uttorkningssimulering måste tas fram där man kanske får välja mellan ett antal typfall på betongen och dess historik. En sådan utredning och ev. valideringsberäkningar görs lämpligen när grundverktyget är färdigutvecklat och kan användas för simulering av uttorkning och inverkan från gammal betong med skild historik.

3.2.9 Serieberäkningar

De av användarna önskade serieberäkningar (som i Hett97) är fullt möjliga att implementera i PPB. Komplexiteten blir dock högre än för Hett97 p.g.a. av större omfattning och högre komplexitet i både indata och resultat hos 2-dimensionella beräkningar. Detta bör utredas närmare av design av finesserna samt användargränssnittet. Själva implementationen bedöms inte som särskilt svår dock kommer den att vara rätt omfattande i arbete.

Stöd för serieberäkningar bör implementeras förr eller senare. Det kommer att vara en kraftfull funktion för användarnas problemlösning. Funktionen är dock oberoende av vilken slags simulering som PPB har implementerat (värme, fukt och/eller spänning) och kan implementeras när som helst oberoende av implementation av nya simuleringar. Projektet bedömer att detta inte är en topprioritering och föreslår att serieberäkningar implementeras senare, dvs. efter att ett fungerande stöd för fuktberäkning är frisläppt.

3.2.10 HDF - Inre struktur i block (samt ränder)

Modellering av block med en inre struktur (geometri samt olika material, t.ex. för HDF både betong och luft, möjligen vatten) är fullt möjlig och även önskvärd inom ren värmesimulering i PPB. Samma strukturella idé är även av intresse för hantering av mer avancerat randbeteende i programmet. Att bygga in en sådan möjlighet i PPB kräver dock en ansevärd programmeringsinsats.

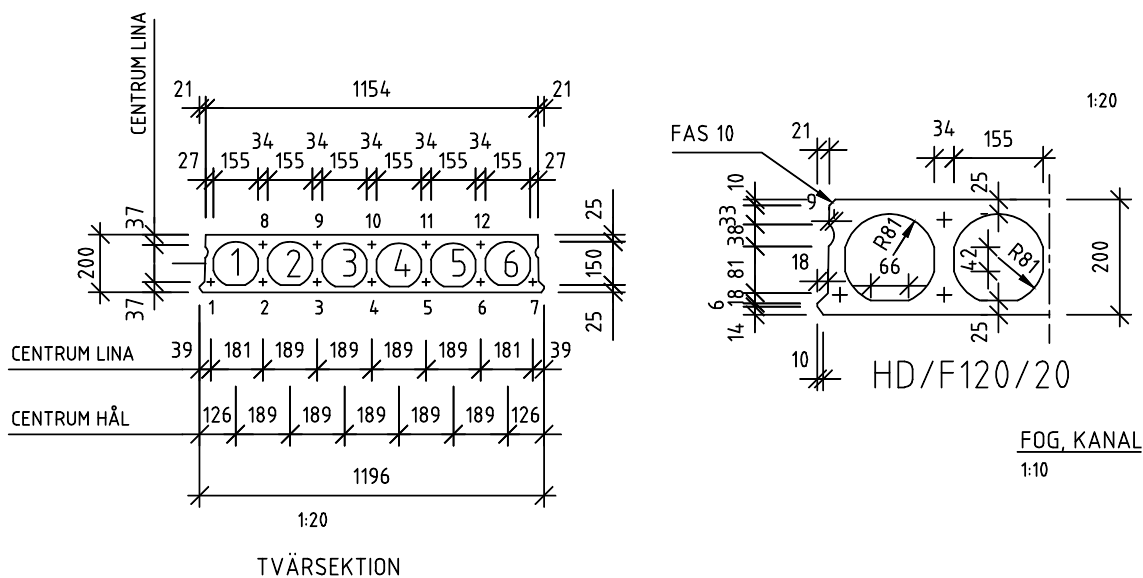


Fig. 5 Exempel på HDF som bör modelleras som block med fast geometri och inre struktur (lufthål).

HDF ger även vissa andra utmaningar för beskrivning av förhållanden. Dels är det frågan om gammal betong med sin problematik (se subkapitel ovan), dels rör det förhållanden i själva hålen (RH, vattenfylt eller ej). Detta bör dock kunna hanteras på ett praktiskt sätt när väl det strukturella stödet finns i PPB.

Stödet för HDF bedöms inte vara av lika hög prioritet som en fungerande, modern fuktberäkning i sig. Därför bör man överväga en senare implementation, gärna kombinerad med att de specifika strukturella förutsättningarna i programmet utnyttjas för fler likartade finesser och inte endast HDF.

3.2.11 Förenklade typfall samt osäkerhet i prognos

En prognos av uttorkning innehåller alltid osäkerheter. Dels är beräkningen, materialmodellerna samt anpassade materialdata en approximation av verkligheten, dels är beskrivningen av förutsättningarna, miljön, och arbetssättet baserad på uppskattningar. Det är av vikt att den framtida användaren blir medveten om hur variationer i olika indata påverkar resultatet av simuleringen. För detta ändamål bör en analys av osäkerhet utföras när programmets beräkningsmodul är operativ. Detta sker lämpligen genom en strukturerad studie av hur olika variationer i indata påverkar vanliga uttorkningskrav för en uppsättning av referenssituationer. Resultat av en sådan studie bör ingå i utbildningsmaterialet för PPB.

Branschen har även uttryckt en önskan om förenklade typfall, s.k. RBK-typfall. Dessa förenklingar av den mer komplexa verkligheten kommer att medföra lägre precision i modelleringen. För att inte mista kontrollen om precisionen och inte ge användarna falska förhoppningar måste dessa förenklade typfall utformas med stor varsamhet ur både beräkningsteknisk samt pedagogisk synvinkel. Detta utförs lämpligen efter att ovan nämnda osäkerhetsanalysen är utförd och utnyttjar dess resultat. På detta sätt behåller man kontrollen över vad man mister i precision p.g.a. förenklarna.

3.2.12 Miljöbeskrivning

Alla önskemål från workshopparna, avseende vad som skall kunna beskrivas om miljön runt konstruktionen, bör implementeras. Viss utredning krävs för design av hur kort och långtidsbeskrivning skall skarvas ihop samt hur variationer för extremer kontra medelvärde skall specificeras i olika avseenden. Detta gäller temperatur, relativ fuktighet, fritt vatten på ytor mm.

3.2.13 Mark, fukt samt temperatur

Hantering av mark, särskilt avseende dess tillstånd under en byggnad, är viktig för korrekt beräkning av uttorkning av plattor på mark. Detta område har inte ägnats någon större uppmärksamhet inom förstudien, eftersom det inte bedöms vara av samma svårighetsgrad som t.ex. modelleringen av betongens fuktegenskaper. Projektets bedömning är att en mindre utredning av mer praktisk karaktär är både nödvändig och tillräcklig. En sådan utredning bör utföras inom ramen för implementationsprojektet.

4 Rekommendationer

Vid utformning av rekommendationer har projektet tagit hänsyn inte endast till aspekter redan avhandlade i denna rapport utan även till tidsaspekten. Branschen har idag inget i praktiken fungerande verktyg för uttorkningsberäkning. Projektet utgör från att det är bråttom att få ett sådant till stånd och att det är av högre värde att tidigt kunna leverera ett fungerande simuleringsverktyg än att verktyget i sin första version skall ha alla önskvärda finesser. Däremot är det projektets åsikt att avkall på modellering inte får ske för att vinna tid, då det redan finns verktyg med bristande materialmodeller och detta skulle göra hela implementationen meningslös.

4.1 Redan vidtagna åtgärder

Forskning tar tid. Före sommaren 2015 identifierades behovet av både grundforskning och tillämpad forskning på området för att:

- Få fram kunskap om de nya materialen
- Konstruera och validera materialmodeller
- Utveckla erforderlig mätmetodik
- Utveckla och validera erforderlig beräkningsmetodik

Projektet fann att detta har värde inte bara för PPB utan även rent forskningsmässigt. Anslag till två doktorandprojekt avseende detta söktes från och beviljades av SBUF. Det är SBUF projekt 13140 och 13146. Projekten är redan igång hos LTH.

En bieffekt av att utföra den nödvändiga forskningen som konventionella doktorandprojekt blir att all metod- och modellutveckling blir dokumenterad, publicerad och utsatt för oberoende vetenskaplig granskning. Man undviker på detta sätt byggande av svarta lådor, vilket tyvärr är fallen avs. Torka S och BI Dry.

4.2 Omedelbara åtgärder

De rekommenderade omedelbara åtgärderna fokuserar på att frisläppa ett minsta rimliga paket till branschen så fort som möjlig, dock utan att ge avkall på modellering. De två projekten kommer ändå att bli stora i omfattning och mjukvaran kommer att leverera en omfattande funktionalitet. Projekten bedöms kunna leverera resultat inom 1,5 år från start.

4.2.1 Grundimplementation

Det första utvecklingssteget syftar till att ta de största utmaningarna, de kvarvarande riskerna och etablera en bra, fungerande grund på vilken alla andra bitar kan bygga. Grundimplementationen bör utföras som ett projekt och omfatta:

- Fullskalig FEM-baserad simulering av 2-dimensionell fukt- och värmefflöde – bägge simuleringarna bör kombineras till samma beräkning och denna bör implementeras i PPB utöver den redan existerande värmesimuleringen.
- Ny materialmodellering inkl.:
 - Ny sorptionsmodell
 - Utvidgad modell för reaktionsgrad, kemisk bindning av vatten och reaktionsvärme
 - Ny transportmodell med 2 eller 3 drivande potentialer
- Konstruktionstypfall i enlighet med kap. 1.5.2, dock utan HDF

- Stöd för simulering av pågjutning och avjämning
- Support av spärrskikt mellan betong och pågjutna skikt
- Övervakning av krav uttryckta i enlighet med kap. 1.5.7
- Presentation av resultat i enlighet med kap. 1.5.8
- Miljöbeskrivning i enlighet med 1.5.5
- Förenklad hantering av gammal betong
- Signering av materialdata

Grundimplementationen bör koordineras med:

- SBUF 13140, avs. materialmodellering och beräkningsmetodik
- Inmätning av Bascement, avs. materialdata

4.2.2 Inmätning av Bascement

Parallellt med grundimplementationen bör Bascementet mätas in. Denna uppgift har en helt annan beskaffenhet och föreslås därför att hanteras som ett separat projekt. Omfattningen bör väljas i enlighet med kap. 1.7.6, beroende på materialleverantörens intresse av finansiering.

4.3 Senare åtgärder

De senare åtgärderna är inte av mindre intresse än de omedelbara. De är helt enkelt lämpliga att utföra senare av olika praktiska resp. prioriteringsskäl.

4.3.1 Inmätning av avjämningsmassor

Det är av intresse att mäta in beteendet hos avjämningsmassor. Detta bör ske i samverkan med ett flertal leverantörer. Eftersom detta arbete huvudsakligen kommer att basera sig på samma modeller som de för betong, dock med en rad förenklingar, är det lämpligt att starta detta projekt ca 1 år efter start för inmätning av Bascementet.

Under tiden bör diskussion med materialleverantörer föras, intresset undersökas och finansiering fastställas.

4.3.2 Finesser och Pedagogik

Denna del är att betrakta som del 2 av implementationen. Den innehåller alla de delar som prioriterades bort från grundimplementationen för att få fram en rimligt snabb första leverans. Här finns också viktiga och nyttiga funktioner samt en större fokus på pedagogik kring verktyget samt fuktberäkningen för att göra det möjligt att förutse korrekt uttorkning för en bredare användarskara. Denna del bör köras som ett projekt efter att grundimplementationen avslutats och omfatta:

- Osäkerhetsanalys
- Förenklade RBK-typfall
- Guide för prognoskorrigering mot mätdata
- HDF mm. – inre blockstruktur
- Serieberäkningar
- Prefab – material samt hantering för vidare förståelse av ”gammal betong”
- Inverkan av tidig hydratationshastighet – modellering av denna del befaras inte hinna bli färdig inom SBUF 13140 samt 13146 för att kunna frisläppas inom grundimplementationen.

4.4 Vidare utredning och forskning samt ev. framtida implementation

Den önskade centrala funktionen för publicering och spridning av materialdata kan implementeras i princip när som helst. Det bedöms dock som felprioritering att göra det innan materialleverantörerna börjat ta fram egna materialdata i en större omfattning. Därför är projektets rekommendation att vänta med denna funktion.

Som tidigare nämnt i kap. 1.7.7, bedöms en problemlösningsfunktion inte vara möjlig att konstruera. Däremot är det av vikt att dels förstå vilka problem som finns och fel som begås ute i branschen inom prognostisering och uppföljning av uttorkning, dels utbilda branschens aktörer och hjälpa dem att komma tillrätta med problemen. Här är projektets rekommendation att efter frisläppning av verktygets andra del, se kap. 1.10.2, och vidare efter ca 1 års användning utföra en undersökning kring hur verktyget upplevs av branschen, hur det fungerar i praktisk tillämpning och vad man skulle kunna göra för att förbättra det ytterligare.

Litteraturförteckning

1. Z. Zhang: *Modelling of sorption hysteresis and its effects on moisture transport within cementitious materials*, Doctoral Thesis, Université Paris-Est, 2014
2. H. Derluyn, D. Derome, J. Carmeliet, E. Stora, R. Barbarulo: *Hysteretic moisture behaviour of concrete: Modeling and analysis*, Cement and Concrete Research 42 (2012)
3. K. Norling Mjörnell: *Moisture Conditions in High Performance Concrete*, Institution för byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1997
4. R. M. Espinosa, L. Franke: *Inkbottle Pore Method: Prediction of hygroscopic water content in hardened cement paste at variable climatic conditions*, Cement and Concrete Research 36 (2006)
5. L-O. Nilsson: *Moisture Transport under a Temperature Gradient – Some Old and New Studies, Understanding the Fundamental Properties of Concrete*, Celebrating Professor Erik J. Sellevold on his 75th birthday 25th-26th April 2013, Trondheim
6. B. Johannesson: *Modeling of a Viscous Fluid Percolating a Porous Material due to Capillary Forces*, Report TVBM-3095, Avdelningen för byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola
7. B. Johannesson: *Nonlinear Transient Phenomena in Porous Media with Special Regard to Concrete and Durability*, Advanced Cement Based Materials, Volume 6, 1997
8. E. Helsing Atlassi: *A quantitative Thermogravimetric Study on the Nonevaporable Water in Mature Silica Fume Concrete*, Institution för byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1993
9. P. Johansson: *Uttorkning av betong-Laborariestudien bakom TorkaS3*, Avd. Byggnadsmaterial LTH, Rapport TVBM-3165, 2012.
10. F. Deschner, B. Lothenbach, F. Winnefeld, J. Neubauer: *Effect of temperature on the hydration of portland cement blended with siliceous fly ash*. Cement and Concrete Research 52 (2013) 169–181
11. K. De Weerd, M. Ben Haha, G. Le Saout, K.O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach: *Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash*. Cement and Concrete Research 41 (2011) 279–291
12. M. Ben Haha, K. De Weerd, B. Lothenbach: *Quantification of the degree of reaction of fly ash*. Cement and Concrete Research 40 (2010) 1620–1629
13. M-H Zhang, O.E. Gjörv: *Effect of Silica Fume on Cement Hydration in Low Porosity Cement Pastes*. Cement and Concrete Research. Vol 21, 1991, Nr 5
14. I. Pane, W. Hansen: *Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1155–1164
15. P. Johansson: *Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 1*, SBUF 12656, Slutrapport 2014-12-22
16. M. Åhs: *Simulering av fuktmätning i betong med lågt vct*, SBUF 12706m Slutrapport 2014-11-17
17. Muntlig kommunikation med pågående SBUF 12941 och 13085, *Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 3*
18. M. Saeidpour, L. Wadsö: *Moisture equilibrium of cement based materials containing slag or silica fume and exposed to repeated sorption cycles*, Cement and Concrete Research 69 (2015) 88-95
19. M. Saeidpour, L. Wadsö: *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, Building Materials, Lund University 2015
20. H.J.H. Brouwers: *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1697–1716