

ANALYS AV MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR INOM OMRÅDET ATT FÖRUTSÄGA TORKTID FÖR BETONG

Fas1-förståelse av process och tillgängliga hjälpmedel

Maj 2012

Lars-Olof Nilsson

moistenginst ab

ANALYS AV MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR I OMRÅDET ATT FÖRUTSÄGA TORKTID FÖR BETONG

**FAS 1 – FÖRSTÅELSE AV PROCESS OCH
TILLGÄNGLIGA HJÄLPMEDEL.**

LARS-OLOF NILSSON

A. BAKGRUND

SBUF-projekt 12543, "Analys av möjligheter och begränsningar inom området att förutsäga torktid för betong; fas 1 – förståelse av process och tillgängliga hjälpmedel", är ett initiativ från Fuktcentrum och temagruppen Byggnadens tekniska funktion inom Sveriges bygguniversitet med avsikten att en djupare studie görs i detta ämne, som ett nationellt projekt med samverkan inom Sveriges bygguniversitet.

Bakgrunden till projektet är en rapport från SBUF-projekt 12389, "Jämförelse mellan verktyg för bedömning av uttorkning av betongkonstruktioner", vars jämförande beräkningar av torktider har skapat viss förvirring kring tillförlitligheten hos beräkningshjälpmedel för beräkning av torktid hos betongkonstruktioner. Eftersom dessa mjukvaror ger grunden till beslut som gäller mycket stora kostnader så är en förståelse av hur de fungerar och hur man ska se på deras resultat av mycket stor praktisk betydelse.

Projektledare gentemot SBUF är Fredrik Gränne, NCC. Folke Björk vid KTH är akademisk ledare av projektet. Undertecknad har fått i uppdrag att utarbeta svar på de första sex frågorna som ställts i projektets första fas. Peter Johansson, LTH, Kristina Mjörnell, SP, och Ted Rapp, RBK, har ingått i en referensgrupp. Alla dessa har lämnat synpunkter på en serie rapportutkast.

B. SYFTE

Syftet med hela projektet beskrivs i projektansökan till SBUF: "Målet för det aktuella projektet är att samla det svenska kunnandet om torkningsprocesser och förutsägelse av torktider för betong för att stärka den svenska byggbranschen. Detta ska resultera i att de som är beroende av att kunna förutsäga betongens torktider ska ha tillgång till relevant information om vad en förutsägelse av en torktid för betong egentligen betyder samt kunna efterfråga all relevant information som behövs för att göra en tillräckligt säker förutsägelse av torktid för en betongkonstruktion. Den slutrapport som blir resultatet av detta projekt kommer att ha en pedagogisk funktion och bör kunna användas vid utbildning på olika nivåer."

Med detta syfte ges svaren på de första tio frågorna som formulerats i planen för projektet. Avsikten är att ge svaren på ett så pedagogiskt sätt som möjligt med användare av beräkningsverktygen som målgrupp. En beskrivning som i en forskningsrapport normalt skulle göras matematiskt, kanske med en partiell differentialekvation, har därför här gjorts med förklarande bilder och diagram så långt det varit möjligt. I vissa fall har detaljsvar krävt en matematisk beskrivning.

C. GENOMFÖRANDE

Projektet utförs i två faser. Fas 1 gäller frågorna 1-10 nedan och en detaljerad planering av arbetet i fas 2. Fas 2 kommer att behandla den resterande frågan och ett fördjupat arbete med frågorna i fas 1. Här planeras också en tillämpningsdel med direkta jämförelser mellan uppmätta torktider och beräkningsresultat.

D. PROJEKTETS DELAR

De frågor som formulerats, för fas 1 och fas 2, är följande.

FÖRSTÅELSE AV PROCESSEN BETONGTORKNING

- 1: Förklara vilka processer som gör att RF i betong minskar.
- 2: Vilka förhållanden är kritiska för att torktiden ska bli rimligt lång?
- 3: Förklara hur dessa förhållanden ska kunna mätas eller dokumenteras.

HUR SKA MJUKVARA FÖR BETONGTORKNING SKULLE FUNGERA I ETT IDEALT FALL.

- 4: Ett avsnitt som beskriver vart man skulle vilja komma när det gäller betongtorkning.
- 5: Vilka frågor ska mjukvara för betongtorkning svara på?
- 6: Vilka indata skulle behövas för att göra en riktigt bra förutsägelse av betongtorkning?

MJUKVARA FÖR BETONGTORKNING I PRAKTIKEN

- 7: Beskriv de hjälpmedel som finns tillgängliga.
- 8: Hjälpmedlen beskrivs vart för sig med förklaring om vilka bakgrundsdata som de grundar sig på och på vilket sätt som dessa är publicerade.
- 9: Hur beräkningarna i programmet fungerar.
- 10: Vilka indata som används i programmet.
- 11: Hur stora avvikelser kan man räkna med mellan ett beräknat resultat och det resultat som erhålls i praktiken.

För att få svar frågorna 7-10 har en aspektmatris tagits fram, se Bilaga. Denna har sedan översänts till respektive programutvecklare.

Nedan ges svar på frågorna 1-10.

FRÅGA 1: FÖRKLARA VILKA PROCESSER SOM GÖR ATT RF I BETONG MINSKAR.

DEFINITIONER

Definition 1a: Fukthalt w är den totala mängden fysikaliskt bundet vatten i ett material, uttryckt i kg/m^3 .

Definition 1b: Den relativa fuktigheten RF i ett material är ett mått på tillståndet hos det fysikaliskt bundna vattnet i ett material porsystem. RF kan mätas direkt, med olika metoder.

Definition 1c: Sorptionskurvan, jämviktsfuktkurvan eller sorptionsisotermen, visar sambandet mellan fukthalt och RF i ett material och är unik för varje material (och betongsammansättning). Sorptionskurvan beror på fukthistorien, dvs hur ett visst fukttillstånd uppkommit. Man skiljer t ex mellan desorptionsisotermen vid uttorkning, absorptionsisotermen vid uppfuktning och scanningkurvor mellan dessa.

Definition 1d: Självtuttorkning är egentligen den minskning av fukthalten i betong som uppkommer av cementets kemiska bindning av vatten. I dagligt tal menar vi oftast den RF-sänkning som denna fukthaltminskning ger upphov till. Alla betonger har självtuttorkning, men bara de med lågt vct får någon nämnvärd RF-sänkning pga. självtuttorkningen.

1.1 RF I ETT MATERIAL MINSKAR OM FUKTHALTEN SJUNKER

”Uttorkning” av de flesta material innebär naturligtvis en process som innebär att fukthalten i materialet minskar. Att RF också minskar då fukthalten minskar kan förklaras med sambandet mellan fukthalt w och relativa fuktigheten RF i ett material, sorptionskurvan, se nedanstående figur.

Svar 1a): Sänkt fukthalt minskar RF i ett material! Den främsta anledningen till att RF minskar i ett material är att uttorkningen av materialet sänker fukthalten! Denna RF-minskning kan förstås med hjälp av en sorptionskurva, som beskriver sambandet mellan fukthalt och RF i ett material.

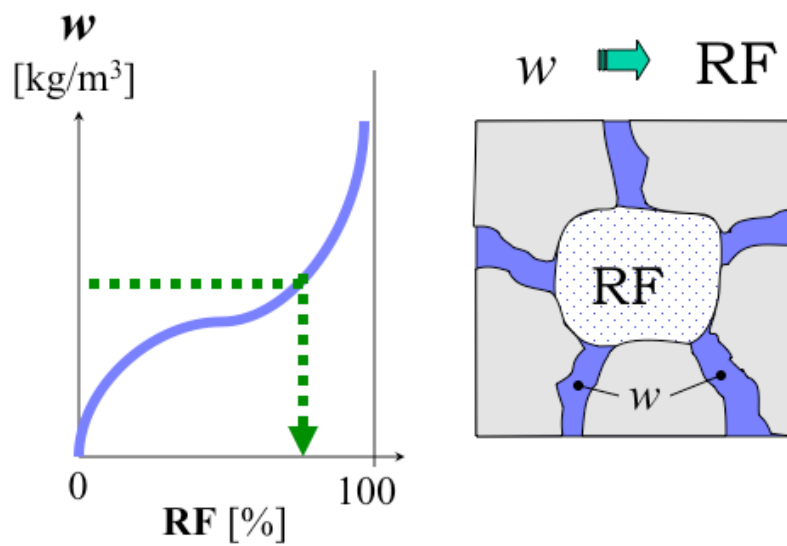


Fig. 1.1 Principiell sorptionskurva som anger sambandet mellan fukthalt och RF. En viss fukthalt ger en viss RF i materialet. Sjuncker fukthalten, sänks RF

Konsekvensen av en sänkt fukthalt är mycket olika beroende på hur sorptionskurvan ser ut, se nedanstående figur. I området 80-100 % RF är lutningen, dvs "fuktkapaciteten", mycket olika för en betong med högt respektive lågt vct.

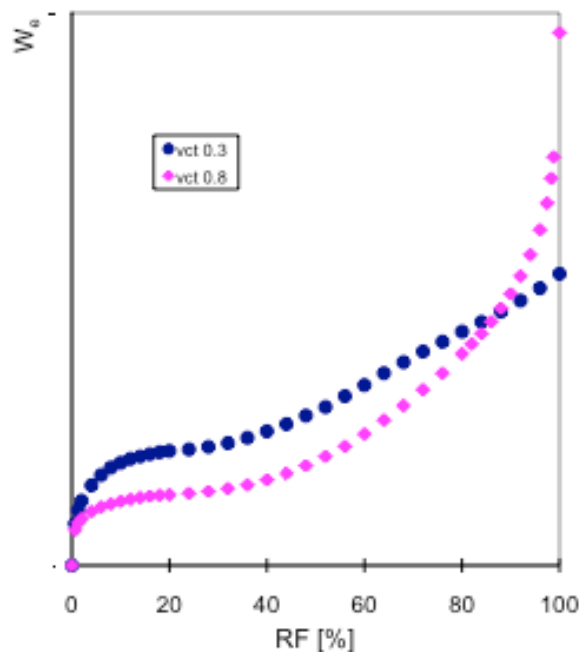


Fig. 1.2 Desorptionsisotermer för två betonger med olika vct, uttryckta i fukthalt [kg/m³], men med samma blandningsvattenmängd

En viss fukthaltsminskning i en betong med högt vct, dvs stor lutning hos sorptionskurvan, ändrar inte RF särskilt mycket. Samma fukthaltssänkning i en betong med lågt vct, med liten lutning hos sorptionskurvan, ger en stor sänkning av RF.

Svar 1b): Sänkt fukthalt minskar RF mer i ett material med liten fuktkapacitet, dvs flackare sorptionskurva! Detta förklarar det stora vct-beroendet av s k självuttorkning.

1.2 RF I BETONG MINSKAR NÅGOT PÅ GRUND AV ALKALIerna FRÅN CEMENTET

I betong kan RF också minska av en annan anledning än att fukthalten sjunker: lösta ämnen i porvattnet, i huvudsak alkalier från cementet, kan ge en RF-sänkning på några % RF, särskilt i betong med låga vct. Detta sker mycket tidigt, de första dygnet.

Betongens desorptionsisoterm är av denna anledning horisontell i sin övre del, se nedanstående figur. Betongens porssystem har samma fukthalt, och är mättat, ned till en RF som är något lägre än 100 %, motsvarande sänkningen pga. lösning av alkalier i porvätskan.

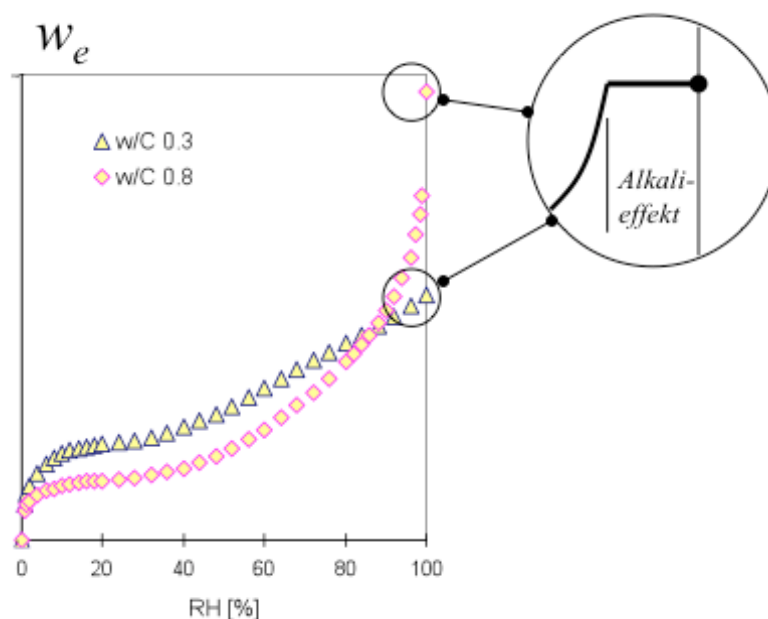


Fig. 1.3 Trolig alkali-effekt på desorptionsisotermens övre del

Svar 1c): Alkalier från cementet sänker RF i betong några %!

Förtydligande om alkalier: Alkalier är mindre komponenter i cementet. Det handlar främst om natrium, kalium och hydroxider, men egentligen gäller det alla joner som är lösta i porvattnet. De lösta ämnena sänker ånghalten, och därmed RF, vilket betyder att de

gör ångtransporten långsammare. Alkalierna hindrar inte kapillär fukttransport. Mätning med RF-givare underskattar alltså fuktnivån i materialet eftersom lösta ämnen i porvattnet sänker RF. Här finns också ett temperaturberoende. Ökad temperatur betyder ökad löslighet, och därmed att RF ökar mindre än vad som annars skulle kunna förväntas. Sorptionskurvorna gäller betong med alkalier eftersom betong utan alkalier inte finns.

1.3 RF MINSKAR TILLFÄLLIGT OM TEMPERATUREN SJUNKER

Ett material kan också få en tillfällig RF-sänkning om det kyls av, men denna effekt är liten, ca 0.1-0.4 % RF/C, och den återgår genast då materials temperatur återvänder till den tidigare. Detta beror på att sorptionskurvan är något temperaturberoende på så sätt att den ligger lägre vid en högre temperatur. Effekten är relativt liten, men fullt mätbar, se figur. Observera att effekten har motsatt tecken mot RF-ändring i luft!

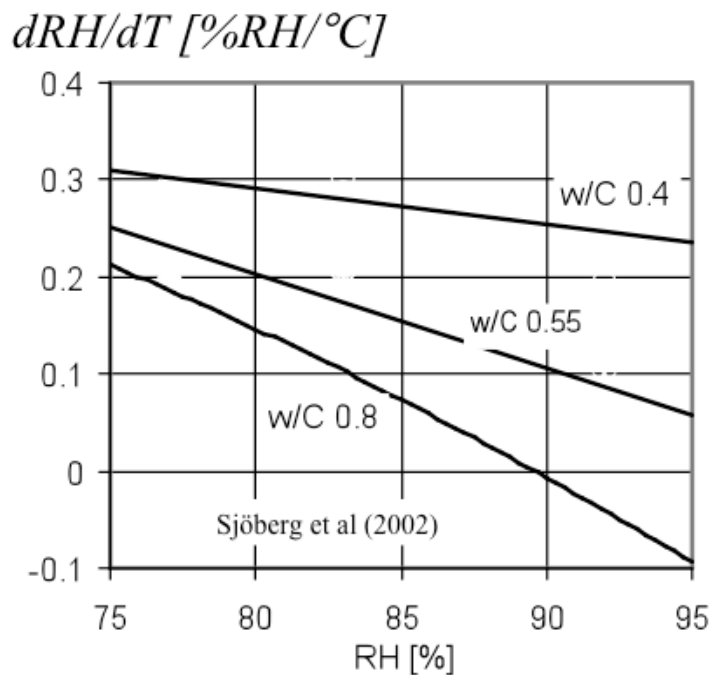


Fig. 1.4 Temperaturberoendet hos sorptionskurvan för betong med olika vct. Data från Sjöberg et al (2002). Figuren visar medelvärden och spridningen är stor

Svar 1d): En temperatursänkning minskar RF i ett material, men bara lite och bara tillfälligt!

1.4 FUKTHALTEN SJUNKER P G A FUKTTRANSPORT

De processer som sänker fukthalten i ett material är flera.

Fukthalten på ett visst djup i en betongkonstruktion minskar med tiden om fukttransport från detta djup är större än fukttransport dit. Detta är normalfallet vid vanlig uttorkning.

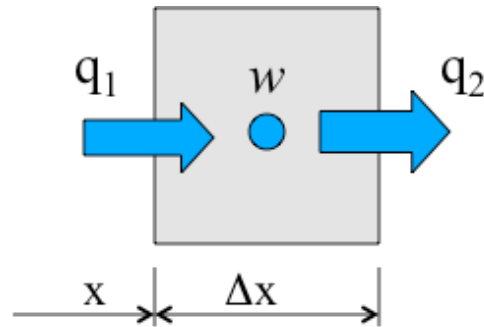


Fig. 1.5 Fukthalansen på ett visst djup. Om fukttransporten från punkten är större än till, sjunker fukthalten (och därmed RF)

Svar 1e): Fukthalten i ett material sjunker om fukttransport för bort fukt!

Ett specialfall, utan yttre uttorkning, är omfördelning av fukt inom en konstruktion. RF kan då sjunka i en fuktigare del av konstruktionen genom att fukt transporteras därifrån till torrare delar.

1.5 FUKTHALTEN SJUNKER PGA. ATT CEMENTET BINDER VATTEN

I betong tillkommer en viktig process som sänker fukthalten: den kemiska bindningen av vatten till cementet. Så snart cement och vatten blandas börjar cementreaktionerna. De reaktioner som binder vatten kemiskt kommer igång efter några timmar och reaktionshastigheten är störst de första dygnen. Efter 28 dygn har 60 – 80 % av dessa reaktioner skett, beroende på vct, men cementreaktionerna kan fortsätta att binda vatten kemiskt under många år.

Denna fukthaltssänkning är stor. Den motsvarar ungefär 0.25 liter vatten per kg reagerat cement. När 80 % av cementet reagerat och cementhalten är 250 kg/m³ är det alltså 50 liter vatten per m³ betong som bundits kemiskt och alltså minskat fukthalten med lika mycket, i hela betongvolymen.

Dessa kemiska reaktioner sker bara om det är tillräckligt fuktigt i porsystemet. Fuktnivån avgör hur fort reaktionerna går och

fuktberoendet beror på betongens ålder/hydratationsgrad. Ett exempel ges i figuren nedan.

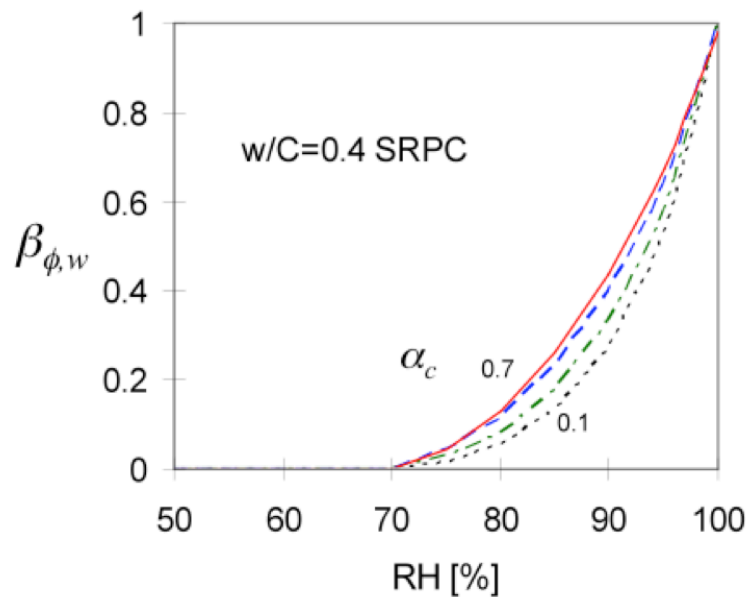


Fig. 1. 6 Fuktnivåns (RH) och hydratationsgradens (α) inverkan på hastigheten (β) i cementreaktionerna som binder vatten kemiskt. Data från Norling-Mjörnell (1997)

När RF sjunkit under 75-80 % blir det inte längre några cementreaktioner och därmed heller inte någon sänkning av fukthalten av detta skäl.

De tidiga cementreaktionerna ger upphov till en kraftig värmeutveckling som oftast höjer temperaturen hos betongen. Temperaturnivån påverkar också hastigheten i den kemiska fuktbindningen, men också strukturen hos reaktionsprodukterna, vilket kan ha stora effekter på RF-sänkningar.

Svar 1f): Fukthalten i betong sjunker dessutom pga. att cementet binder vatten kemiskt! Denna effekt är stor, ca 0.25 liter/kg cement, och den sker i hela betongvolymen och huvudsakligen redan första månaden efter gjutning. Cementreaktionerna ger också temperaturhöjningar under första dygnet och de påverkar vilka egenskaper som betongen får.

1.6 TOTAL FUKTHALTSÄNKNING I EN BETONGPLATTA

Fukthaltsänkning på grund av kemisk bindning av vatten, s k självuttorkning, och på grund av fuktransport, dvs uttorkning till omgivningen, sker samtidigt. Beroende på betongsammansättning, främst vct, dominerar den ena av dessa båda processer. I betong

med lågt vct är självuttorkningen särskilt stor, på grund av den höga cementhalten. Denna sker på alla djup samtidigt, dvs även i en grov konstruktion.

I betong med hög vct sker också självuttorkning men denna sänker inte RF i lika hög grad på grund av att sorptionskurvan är brantare, dvs fuktkapaciteten är större. För en kraftigare RF-sänkning fordras därför ytterligare sänkning av fukthalten utöver vad självuttorkningen kan ge. Detta måste då ske genom fukttransport ut ur betong, dvs uttorkning till omgivningen. Denna process är mycket långsammare än självuttorkning genom cementreaktionerna och i grova konstruktioner blir det knappast någon fukthaltssänkning alls på större djup inom rimlig tid.

Effekten av dessa båda processer kan åskådliggöras enligt nedanstående figur som visar RF-profilerna i betong med högt respektive lågt vct.

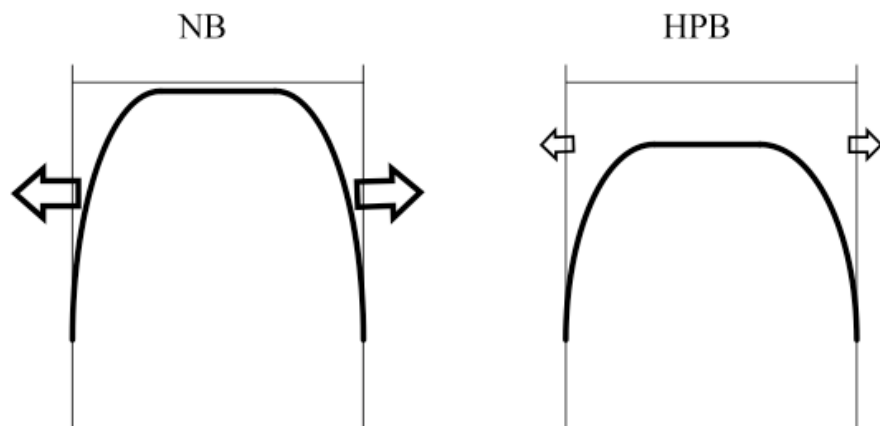


Fig. 1.7 Exempel på principiella RF-profiler vid dubbelsidig uttorkning av betong med högt vct (NB, normalbetong) respektive lågt vct (HPB, högpysterande betong), Nilsson et al (2000)

I en "normalbetong" med ganska högt vct blir det inte någon större RF-sänkning av den tidiga självuttorkningen utan RF-sänkningen sker främst pga. fukttransport till omgivningen. I en "högpysterande betong" med lågt vct blir RF-sänkningen på grund av självuttorkning stor och kommer tidigt och på alla djup. Fortsatt RF-sänkning sker pga. en relativt blygsam fukttransport till omgivningen.

Svar 1g): Den totala RF-sänkningen sker pga. en fukthaltssänkning som är en kombination av kemisk fuktbindning som ger självuttorkning och fukttransport som ger uttorkning till omgivningen. Inverkan av delarna i denna kombination varierar från betong till betong.

1.7 SAMVERKAN MELLAN DE OLIKA DELPROCESSERNA

Varje beräkningsverktyg för betongtorkning måste kunna beskriva ett antal samtidiga delprocesser som hänger intimt samman och påverkar varandra. Det måste beskriva värmeutveckling och hur temperaturfördelningen utvecklas i tiden samtidigt som det beskriver cementreaktionernas kemiska bindning av vatten, den fysikaliska bindningen av fukt i porsystemet och fukttransporten genom det härdande materialet. Alla dessa processer sker samtidigt och är beroende av varandra. Dagens beräkningsverktyg gör allt detta i viss utsträckning, men uppenbarligen på olika vis och utan att beräkningsosäkerheten blir kvantifierad.

I nedanstående figur görs ett försök att beskriva de olika delprocesserna och hur de hänger samman med varandra.

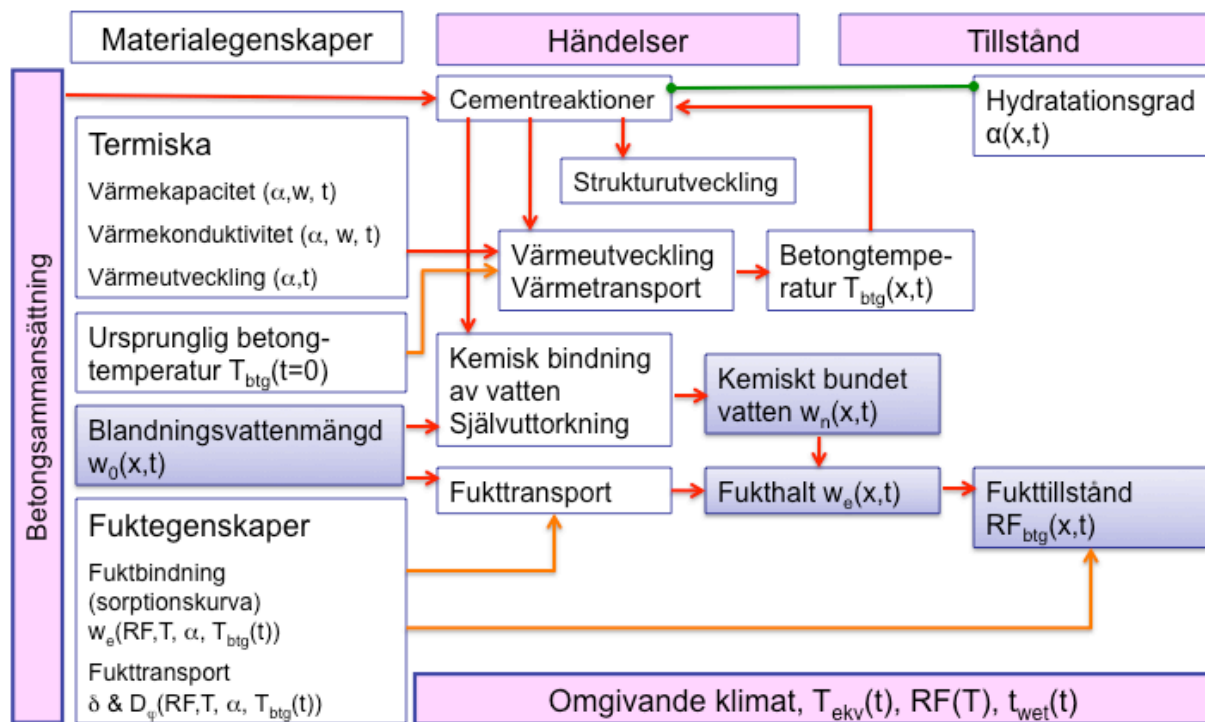


Fig. 1.8 Delprocesserna som ger RF-sänkning i betong och hur de hänger samman.

Framtida, sofistikerade beräkningsverktyg måste kunna beskriva alla dessa delprocesser, och hur de hänger samman, på ett mycket bättre sätt än dagens verktyg. På så sätt kan man genom känslighetsanalyser identifiera var kunskapsbristerna har störst effekt på osäkerheten i beräkningsresultaten.

Svar 1h): RF-sänkning i betong sker genom ett antal samtidiga delprocesser som hänger intimt samman och som alla påverkar varandra.

FRÅGA 2: VILKA FÖRHÅLLANDEN ÄR KRITISKA FÖR ATT TORKTIDEN SKA BLI RIMLIGT LÅNG?

DEFINITIONER

Definition 2a: Med "torktid" avses här den tid det tar för en betongkonstruktion att torka till en viss RF på ett visst mätdjup.

Definition 2b: Med "vct" avses betongens vattencementtal, dvs viktförhållandet mellan blandningsvattenmängden och cementmängden.

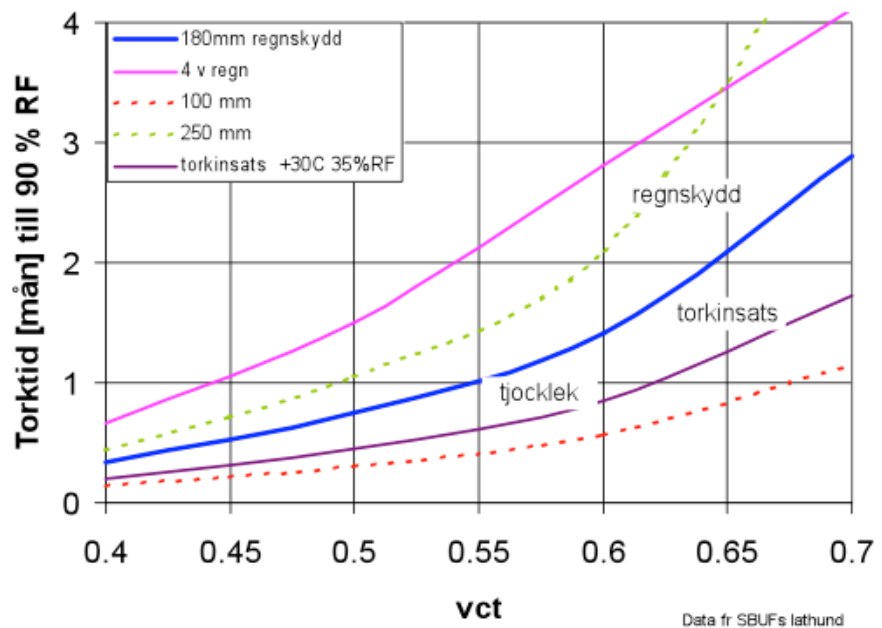
Definition 2c: Med "vct" avses också en betongs sammansättning där naturligtvis andra sammansättningsparametrar har betydelse för betongens fuktegenskaper. Inverkan av övriga parametrar på betongens fuktegenskaper är emellertid mycket mindre än vct och dessutom dåligt känd.

2.1 VATTENCEMENTAL VS. UTTORKNINGSMÖJLIGHETER

Den enskilt avgörande parametern för att få en rimligt lång torktid är valet av vct hos betongen! Med ett tillräckligt lågt vct blir torktiden rimligt lång även för grova konstruktioner och för konstruktioner som inte ges några nämnvärda uttorkningsmöjligheter.

Med vct som är högre än så är det två andra parametrar som är kritiska för att torktiden skall bli rimligt lång: tjocklek och uttorkningsförhållanden. Vilket vct man väljer är naturligtvis även viktigt här, men riktigt grova konstruktioner, och konstruktioner som inte ges ordentliga uttorkningsmöjligheter, får orimligt långa torktider om de inte kan självuttorka till önskad RF.

Inverkan av olika förhållanden kan åskådliggöras med ett exempel, som är en sammanställning av torktider enligt SBUFs lathund för torktider för att nå 90 % RF, se nedanstående figur. Tiderna för att nå 85 % RF är naturligtvis längre men inverkan av de olika förhållandena är principiellt densamma.



Figur 2.1 Torktider för att nå 90 % RF, på mätdjup enligt HusAMA98, beräknade med SBUFs lathund. Observera att detta är ett exempel som inte har generell tillämpning.

Av figuren framgår att ju lägre vct är desto mindre roll spelar övriga förhållanden.

Svar 2a): Valet av vattencementtal är det mest kritiska förhållandet för att få rimliga torktider. Med ett lågt vct spelar övriga förhållanden mindre roll.

2.2 TJOCKLEK OCH UTTORKNINGSMÖJLIGHETER

För betong med högt vct har tjockleken hos betongkonstruktionen en avgörande roll för torktidens längd. För riktigt grova konstruktioner som börjar torka långt efter gjutning kan tjockleksberoendet bli närmast kvadratisk, dvs en fördubbling av tjockleken fördubblar torktiden! På grund av den kemiska bindningen av vatten på alla djup blir tjockleksberoendet inte så stort för tunnare plattor och för plattor som börja torka tidigt. Då självuttorkningen är som störst.

Den "ekvivalenta" tjockleken hos en platta beror på uttorkningsmöjligheterna. Vid ensidig uttorkning är den ekvivalenta tjockleken L lika med plattjockleken. Vid dubbelsidig uttorkning är den ekvivalenta tjockleken lika med halva plattjockleken.

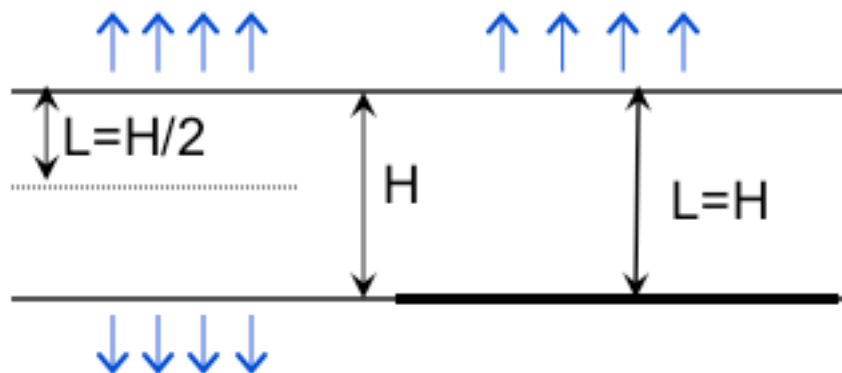


Fig. 2.2 Ekvivalent tjocklek L vid dubbelsidig (till vänster) respektive enkelsidig (till höger) uttorkning

Betong i ett mellanbjälklag som gjuts på kvarsittande form får en viss uttorkningsmöjlighet nedåt genom fukttransport genom formen. Hur stor denna är beror på fuktmotståndet hos den kvarsittande formen.

Betong i en platta på mark på underliggande värmeisolering får också en viss uttorkningsmöjlighet genom fukttransport nedåt mot marken, genom värmeisoleringen. På samma sätt beror denna uttorkningsmöjlighet på fuktmotståndet hos isoleringsskiktet, men den beror också på temperaturen i marken. Temperaturen i sin tur beror på markförhållanden, byggnadens form och storlek samt värmemotståndet hos isoleringen.

Svar 2b): Om inte ett lågt vct väljs, är valet av plattjocklek och uttorkningsmöjligheterna kritiska parametrar. En fördubbling av tjockleken, liksom ensidig uttorkning jämfört med dubbelsidig, ger nästan en fyrdubbling av torktiden.

2.3 UTTORKNINGSFÖRHÅLLANDENA

En betongkonstruktion som måste torka genom fukttransport till omgivningen kräver goda uttorkningsförhållanden för att få en rimligt kort torktid. Det är då alltid gynnsamt med en hög materialtemperatur, som höjer ånghalten i materialet, och en låg ånghalt i omgivande luft, som kan fås genom god ventilation eller avfuktning. En betongplatta i en ouppvärmad och oventilerad byggnad torkar knappast alls.

Uttorkningen av betongen kan inte starta förrän betongplattans yta är torr. Skyddet mot nederbörd och borttagning av eventuellt stående vatten efter nederbörd eller läckage är därför kritiska faktorer för att korta den totala tiden till att nå uttorkningsmålen.

För betong är också tiden efter gjutning då uttorkningen kan startas viktig för en kortare torktid eftersom fukttransportförmågan minskar med ökande ålder, hydratationsgrad, hos betongen.

Svar 2c): Uttorkningsförhållandena är kritiska för att få en rimligt kort torktid för en betong som måste torka genom fukttransport till omgivningen. Viktiga faktorer är då skydd mot nederbörd, tidig torkstart, uppvärmning av betongen och låg ånghalt i luften.

2.4 BETONGSAMMANSÄTTNING

Betongens vct är en kritisk parameter inte bara när det är lågt. Tillsammans med cementhalten, påverkar vct mängden byggfukt som skall torkas ut. Ett exempel ges i figuren nedan.

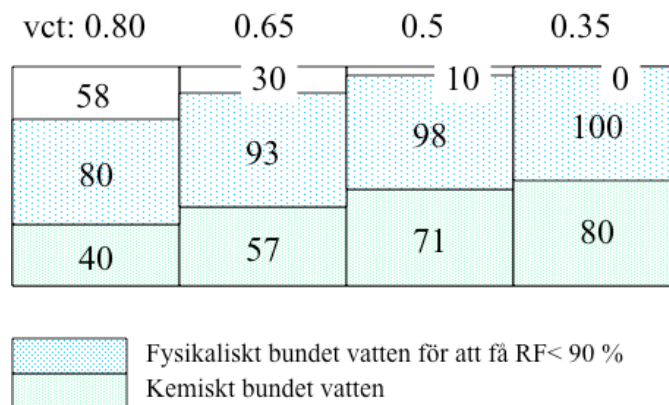


Fig. 2.3 Mängd byggfukt att torka ut (i ofärgade rutor) för att nå 90 % RF i betong med olika vct och blandningsvattenmängd på 180 l/m³

Betongens vct har också avgörande inverkan på fukttransportegenskaperna, dvs uttorkningshastigheten på grund av fukttransport. En betong med lägre vct har större motstånd mot fukttransport, dvs lägre värde på fukttransportkoefficienten. En betong med högt vct har alltså mer byggfukt att torka ut men fukttransporten är snabbare. Effekten av den större mängden byggfukt, och den mindre självuttorkningen, är att torktiden blir längre med högre vct.

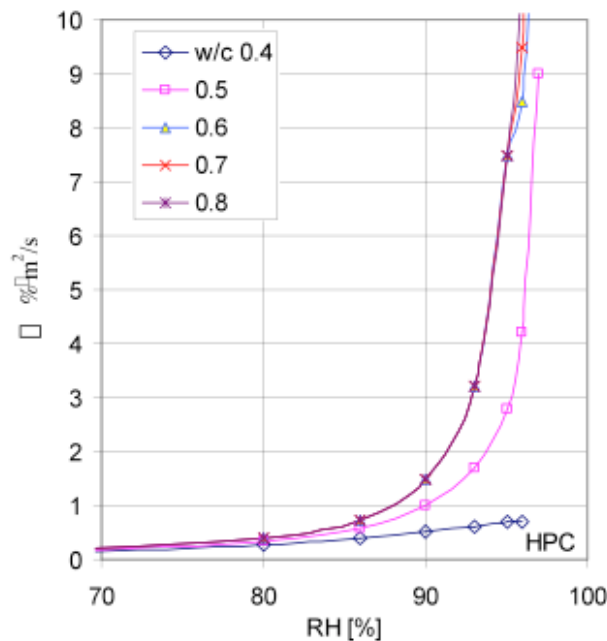


Fig. 2.4 Fukktransportkoefficienten för välhärdad betong med olika vct; data från Hedenblad (1993)

Andra parametrar i betongsammansättningen har också en viss betydelse för fuktransportegenskaperna, t ex lufthalt, cementhalt, stenmax etc., men dessa har mycket mindre inverkan än vct.

Svar 2d): En betong med högre vct har mer byggfukt att torka ut än en betong med lägre vct. Trots att fuktransporten är snabbare, kräver en sådan betong längre torktid. Övriga betongparametrar har mycket mindre betydelse.

2.5 YTSKIKTETS EGENSKAPER

Egenskaperna hos den ytbehandling eller beläggning som skall appliceras på betongen efter torktidens slut är också kritiska för om torktiden blir rimligt lång. Det är främst tre egenskaper som är avgörande:

- det kritiska fukttillståndet hos ytbehandlingen/-beläggningen
- fuktmotståndet hos ytbehandlingen/-beläggningen
- eventuellt fukttillskott från ytskiktet, t ex limfukt

Ett ytskikt med en hög kritisk RF kräver kortare torktid eftersom uttorkningen inte måste drivas lika långt. På samma sätt inverkar ett mindre fuktmotstånd hos ytskiktet, även om det kritiska fukttillståndet är detsamma. Omfördelningen efter uttorkningen och applicering av ytskiktet ger lägre RF i betongytan ju mindre fuktmotstånd ytskiktet har. Detta åskådliggörs i figuren nedan.

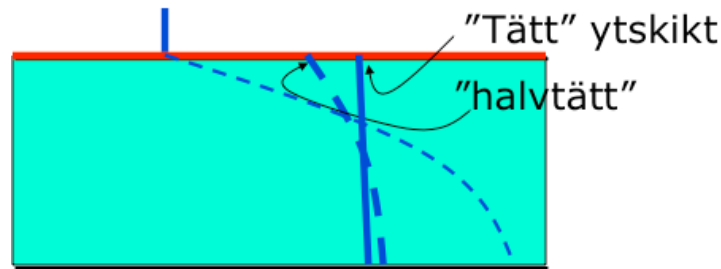


Fig. 2.5 RF-profiler före och efter omfördelning då ett ytskikt med olika fuktmotstånd applicerats

Ytskiktets fuktmotstånd skall här jämföras med betongens fuktmotstånd, dvs det är inte fuktmotståndens absolutvärden som är avgörande utan förhållandet mellan dem.

Vissa ytskikt appliceras med vattenbaserade fästmedel, t ex vattenbaserade mattlim. Dessa ger då ett fukttillskott till underlaget, dvs betongen eller en eventuell avjämningsmassa. Beroende på underlagets sugförmåga tränger denna "limfukt" in olika djupt och orsakar då en viss fuktförhöjning i överytan, högre ju mindre inträngningen är.

En avjämning eller en pågjutning har i princip samma effekt på betongen. Pågjutningen innehåller vatten som delvis sugs in i underliggande betong. Samtidigt härdar den och en viss del av kvarvarande vatten binds kemiskt. Avjämningen/pågjutningen torkar dels uppåt till luften men också delvis nedåt till betongen som till att börja med är torrare. Byggfukten i betongen måste sedan torka ut med hjälp av fuktransport genom det pågjutna skiktet.

Den omfördelning som sker efter applicering av ett ytskikt är synnerligen komplicerad att kvantifiera eftersom hänsyn också måste tas till hysteres och scanning mellan desorptions- och absorptionsisotermerna, se Åhs (2011). Kunskap om detta finns men bara för ett begränsat antal betonger. Det finns dock ännu inget bra sätt att beskriva scanningkurvorna i datorverktyg.

FRÅGA 3: FÖRKLARA HUR DESSA FÖRHÅLLANDEN SKA KUNNA MÄTAS ELLER DOKUMENTERAS.

”Förhållandena” i fråga 2 är sammanställda nedan, i den ordning de behandlas där. För varje ”förhållande” diskuteras hur det skulle kunna mätas eller dokumenteras.

3.1 VATTENCEMENTTAL, VCT

Vattencementtalet är svårt att mäta i färdig konstruktion. I teorin går det att kvantifiera vct på ett uttaget prov, men precisionen i en sådan analys är låg; lägre än vad som är acceptabelt för denna tillämpning.

Istället skulle vct kunna mätas indirekt genom att mäta den stora effekt som vattencementtalet har på självuttorkningen, se figuren nedan.

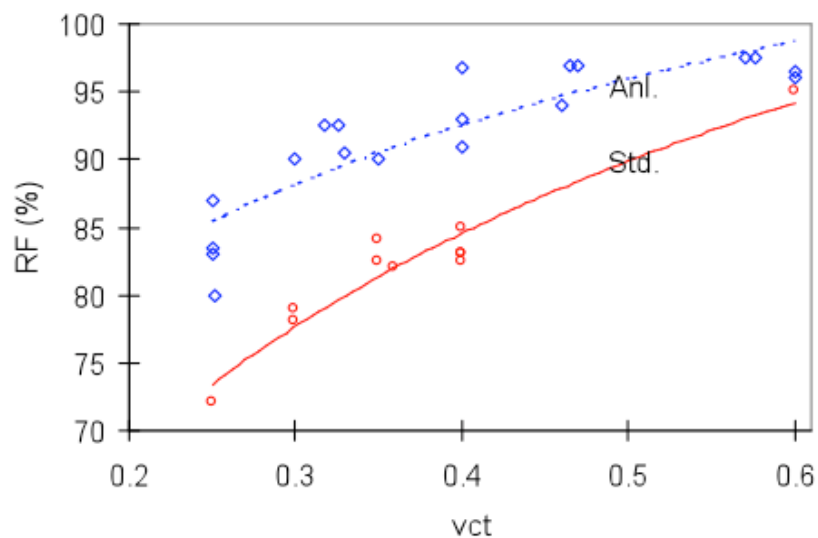


Fig. 3.1 RF efter 28 dygns självuttorkning i betong, bruk eller cementpasta med olika cementtyper. Data från olika källor, se Nilsson et al (2000).

Resultaten i figuren har för stor osäkerhet, men genom att använda en standardiserad mätmetod skulle denna kunna minskas avsevärt. Det skulle då innebära att ett betongprov tas t ex vid betongleverans. Provet placeras i en sluten behållare och förvaras vid en temperatur nära +20C till en ålder av 28 dygn eller eventuellt vid en tidigare tidpunkt. Därefter mäts RF på detta prov, vilket bör kunna ske med osäkerhet som är mindre än 2 % RF.

3.2 TJOCKLEK

Tjockleken hos en gjuten betongplatta kan bestämmas på olika sätt beroende på förhållandena. För ett mellanbjälklag borde det kunna göras genom en direkt avvägning via en öppning i bjälklaget. För en platta på mark skulle det kunna göras genom en avvägning före och efter gjutning eller genom en kalkyl utifrån mängd levererad betong och ritningar.

3.3 UTTORKNINGSMÖJLIGHETER

3.3.1 ENSIDIGT ELLER TVÅSIDIGT

Möjligheterna för uttorkning från mer än ovansidan av en betongplatta beror på fukttransportegenskaperna hos de material som plattan vilar på. Ett mellanbjälklag kan naturligtvis torka tvåsidigt när bjälklagsformen rivits. Uttorkningsmöjligheterna nedåt kan begränsas senare av en eventuell ytbehandling på undersidan. Uttorkningsmöjligheterna kan dokumenteras genom en besiktning av undersidan.

3.3.2 KVARSITTANDE FORM

Uttorkning nedåt genom en kvarsittande form beror på fuktmotståndet hos själva formen, som bör vara dokumenterat genom en separat mätning. Uttorkningsmöjligheterna nedåt genom den kvarsittande formen beror också på om denna först måste torkas ut, dvs hur fuktig den är/blir vid betonggjutningen. Detta kan dokumenteras med en fuktmätning i själva formmaterialet före eller efter gjutning.

3.3.3 UNDERLIGGANDE VÄRMEISOLERING

Uttorkning nedåt genom en underliggande värmeisolering bestäms i huvudsak av två faktorer: värmeisoleringens fuktmotstånd och marktemperaturen.

Värmeisoleringens fuktmotstånd kan bestämmas i en separat mätning på själva materialet och omräknas till fuktmotstånd för den aktuella tjockleken.

Marktemperaturen beror på en mängd faktorer: utomhustemperatur under perioden närmast före gjutning, värmeförseln inifrån dvs. betongplattans temperatur och värmemotståndet hos värmeisoleringen, markens termiska egenskaper, byggnadens storlek och form samt årsmedeltemperaturen. Marktemperaturen under uttorkningsperioden kan mätas direkt genom att placera en (trådlös) temperaturgivare under värmeisoleringen i relevanta punkter. Lämpligen bör detta kompletteras med en motsvarande mätning i betongen.

3.4 UTTORKNINGSFÖRHÅLLANDEN

Uttorkningsförhållandena på ömse sidor om en betongplatta är naturligtvis avhängiga av klimatet, dvs lufttemperatur, luftfuktighet och nederbörd. Dessa kan dokumenteras direkt genom separat klimatregistrering. Uttorkningsmöjligheterna beror dock också på konsekvenserna av de klimatförhållanden man har och har haft samt vilka torkinsatser man gjort och gör.

3.4.1 SKYDD MOT NEDERBÖRD, STÅENDE VATTEN

Längden hos perioder med regn, och mängden nederbörd, kan registreras med klimatmätningar men uttorkningsförhållandena avgörs mycket mer av hur länge regn- och smältvatten står kvar på betongplattan.

Att förutsäga dessa "våttider" i en uttorkningsprognos är svårt. Visserligen skulle det, teoretiskt, gå att bestämma mängden vatten från nederbördsuppgifter och beräkna uttorkningstiden för att detta vatten skall avdunsta i det klimat man räknar med att ha och den vindhastighet man förväntar sig. En betongplatta är dock sällan helt jämn utan det blir vatten stående i "svackor", som kräver en mycket längre torktid än en genomsnittlig betongyta. På samma sätt är inte nederbörden jämnt fördelad över betongplattan. Det kan bli lokal ansamling av vatten kring öppna fönsterhål, hisschakt o dyl.

Dessa förhållanden måste dokumenteras vid en verifiering av en uttorkningsprognos. Lämpligen görs det med okulära observationer, fotodokumentation eller användning av webbkamera på så sätt att man dagligen dokumenterar vilka ytor det står vatten på och under vilka perioder.

3.4.2 TIDIG TORKSTART, UPPVÄRMNING AV BETONGEN, ÅNGHALT I LUFTEN

Uttorkningsförhållandena i ett givet klimat beror också på förhållandena i betongen, främst betongens temperatur. En viktig parameter vid uttorkningen är skillnaden i ånghalt mellan betongens ytskikt och ånghalten i luften. Denna skillnad påverkas bland annat av om betongplattan är uppvärmd i förhållanden till luften. Betongtemperaturen bör därför dokumenteras genom en direkt mätning.

I vilken utsträckning man kan åstadkomma att betongen får en tidig torkstart beror inte bara på när torkinsatser sätts in i förhållande till gjuttillfället. Kvarstående vatten på betongplattan, från nederbörd eller läckage, kan skjuta på torkstarten så att en planerad tidig torkstart blir kraftigt fördröjd.

3.5 BETONGSAMMANSÄTTNING

Betongens vattencementtal diskuterades i 3.1. Övriga delar av betongsammansättning spelar naturligtvis också en viss roll för materialegenskaperna och hur mycket byggfukt som måste torkas ut för att nå torkkraven. Betongsammansättningen är svår att mäta i färdig konstruktion. En dokumentation bör göras med hjälp av betongleverantörens leveransdokument.

3.6 YTSKIKTSEGENSKAPER

Hänsyn till egenskaperna hos det ytskikt som skall appliceras efter betongtorkningen kräver dels att man har tillgång till dessa egenskaper och dels att man har verktyg för att beräkna inverkan av dem. Sådana beräkningsverktyg skulle kunna bli en del av ett framtida prognosverktyg för betongtorkning.

3.6.1 KRITISKT FUKTTILLSTÅND

En viktig egenskap hos ett ytskikt på en delvis uttorkad, byggfuktig betongplatta är det kritiska fukttillståndet, dvs den fuktnivå som inte får överskridas i kontaktytan mellan ytskiktet och betongplattan/avjämningen. Denna fuktnivå är avgörande för hur långt uttorkningen av betongen måste drivas innan applicering av ytskiktet. Kvarvarande byggfukt, efter omfördelning, får inte ge ett högre fukttillstånd i ytan.

Bestämning av detta kritiska fukttillstånd för ett nytt ytskikt är svårt och det finns inga standardiserade mätmetoder. I praktiken behövs det idag ett FoU-projekt för att kunna göra en sådan bestämning.

3.6.2 FUKTMOTSTÅND

Fuktmotståndet hos ett ytskikt avgör bland annat hur fuktigt det maximalt blir under ytskiktet då betongplattan har torkat till en viss nivå. Ett större fuktmotstånd ger en högre RF än ett mindre fuktmotstånd vid samma uttorkningsgrad.

Fuktmotståndet hos ett ytskikt kan bestämmas relativt enkelt med hjälp av en standardiserad provningsmetod, som regel en s k koppmetod. Det är då viktigt att fuktberoendet hos fuktmotståndet bestäms och inte bara ett konstant värde. Mätningen måste då göras i flera RF-intervall.

3.6.3 FUKTTILLSKOTT

Storleken hos ett eventuellt fukttillskott från ett ytskikt som appliceras på en delvis uttorkad betongplatta bör dokumenteras genom dels vatteninnehållet och dels desorptionskurvan.

FRÅGA 4: ETT AVSNITT SOM BESKRIVER VART MAN SKULLE VILJA KOMMA NÄR DET GÄLLER (BERÄKNINGSVERKTYG FÖR) BETONGTORKNING.

Svaret/svaren på fråga 4 är naturligtvis beroende av vem "man" är! Olika aktörer har här olika önskemål, dels när det gäller vad beräkningsverktyget kan klara av och dels när det gäller användarvänligheten. Frågan skulle också kunna formuleras på följande sätt: Hur skulle mjukvara för betongtorkning kunna fungera i ett idealt fall? Även här är svaret beroende på vems ideala fall man avser. Svaret beror därför på vad man vill använda verktyget till. Detta är fråga 5!

På sätt och vis är fråga 4 och 5 egentligen samma fråga: Vart vill man komma och vad skall ett beräkningsverktyg kunna svara på? Här görs ett försök att först svara på fråga 4, vart vill man komma, utan att ta upp vilka frågor man sedan vill att ett verktyg skall kunna svara på.

För ett, eller flera, framtida beräkningsverktyg för betongtorkning borde man ställa upp följande övergripande mål

- det måste räkna rätt,
- man måste veta hur stor osäkerheten är
- det borde kunna ta hänsyn till fler faktorer
- användarvänligheten måste anpassas till aktuella tillämpningar
- det måste vara "långsiktigt hållbart"!

4.1 ATT "RÄKNA RÄTT"

Målet att "räkna rätt" innebär att man samtidigt beskriver de fysikaliska och kemiska processerna så korrekt man någonsin kan, har separat kvantifierade indata och ändå kan göra prognoser som vid verifieringar hamnar nära mätvärden utan att "justera" en mängd parametrar.

4.2 OSÄKERHETER

Osäkerheterna i prognosverktyget borde synas i en prognos som en spridning kring den prognosticerade fuktnivån (RF) och kanske till och med som en osäkerhet i beräknad torktid. Den borde kvantifieras dels genom känslighetsanalyser för att se inverkan av osäkerheten i indata och dels genom noggranna verifieringsmätningar i laboratorium och i fält.

Ett exempel på hur detta skulle kunna se ut ges i figuren, dels som osäkerhet i beräknad RF efter en viss tid och dels som en osäkerhet i nödvändig torktid för att nå en viss RF.

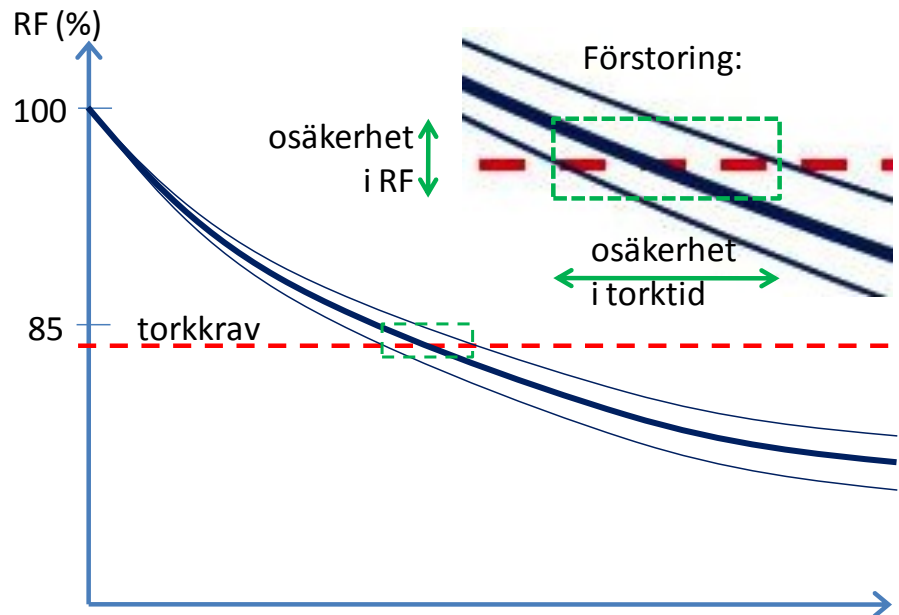


Fig. 4.1 Exempel på hur osäkerheter i en uttorkningsberäkning skulle kunna redovisas.

4.3 NYA FAKTORER ATT BEAKTA

Det finns ett antal faktorer man skulle vilja att ett framtida prognosverktyg kan ta hänsyn till. Olika parametrar i betongsammansättningen, utöver vct och cementhalt eller blandningsvattenmängd, borde kunna hanteras, t ex användning av olika tillsatsmedel. Idag behärskar vi inte att beskriva uttorkning av självkompakterande betong och kan inte beakta luftinblandning eller olika cementtyper eller ballasttyper på ett nyanserat sätt. Likaså borde det vara möjligt att beskriva uttorkning nedåt genom kvarsittande form eller värmeisolering av olika slag på ett mer korrekt sätt, t ex genom att ta hänsyn till vatten i prefabricerade formar och marktemperaturer vid platta på mark. Effekten av temperaturgradienter vid mellanbjälklag och tidig användning av golvvärme eller värmekablar borde också kunna beskrivas bättre.

De flesta betonggolven idag avjämnas eller får en pågjutning, t ex prefabricerade betongelement, ibland med tjocka avjämningsskikt. Uttorkningen av dessa materialkombinationer kan inte heller beskrivas idag. Här borde t o m förändringen av pågjutningen eller avjämnningen ingå då det delvis uttorkade betongunderlaget suger ut vatten under pågjutningen.

I slutet av ett uttorkningsförlopp sker en omfördelning av fukt då ett mer eller mindre tätt ytskikt appliceras. Denna omfördelning borde också kunna beskrivas med ett framtida prognosverktyg för betongtorkning.

4.4 ANPASSAD ANVÄNDARVÄNLIGHET

Anpassad användarvänlighet skulle kunna åstadkommas med hjälp av flera verktyg, varav ett, sofistikerat "kan allt" och kan användas för att kalibrera mera användarvänliga verktyg för speciella tillämpningar, se fråga 5.

4.5 LÅNGSIKTIGT "HÅLLBART"

Långsiktigt "hållbart" innebär att ett framtida beräkningsverktyg inte är beroende av enstaka personer och är "öppet" så att olika framtida forskare kan uppdatera och förbättra verktyget.

Svar 4): Målet bör vara flera beräkningsverktyg, som

- **bevisligen ger korrekta förutsägelser, inom vissa begränsningar,**
- **har olika grad av användarvänlighet och tillämplighet,**
- **har små och kvantifierade osäkerheter**
- **är långsiktigt hållbart.**

FRÅGA 5: VILKA FRÅGOR SKA MJUKVARA FÖR BETONGTORKNING SVARA PÅ?

Framtidens prognosverktyg för betongtorkning skulle behöva kunna besvara ett antal frågor, utöver de "självklara". Med hjälp av olika mjukvaror skulle detta kunna åstadkommas med samma basverktyg som grund.

5.1 FRÅGA A: VAD BLIR UTTORKNINGSFÖRLOPPET FÖR ETT GIVET FALL?

Med en given betong och pågjutning/avjämning, en given konstruktion, ett givet härdningssätt och ett givet klimat på ömse sidor, innan och efter att torkinsatser påbörjats, önskas en prognos över hur RF på olika djup förändras med tiden. Prognosticerad RF skall anges med en osäkerhet.

Anm.: Dagens TorkaS är ett exempel på en mjukvara som försöker svara på fråga A.

5.2 FRÅGA B: VAD BLIR NÖDVÄNDIG TORKTID FÖR ETT GIVET FALL?

En prognos över uttorkningsförloppet enligt 5.1 ger inte automatiskt en nödvändig torktid. För detta krävs att man också anger antingen vilken RF torkningen skall drivas till, på ett visst ekvivalent djup, eller ett acceptabelt fuktillstånd ("tillåten RF" enligt BBR) på ytan av betongkonstruktionen efter applicering av ett ytskikt med kända egenskaper.

Torktiden önskas beskriven med osäkerhet. Möjlighet önskas också att dessutom få svar på frågor som: Vilka är de kritiska parametrarna, dvs vad skall planeras och följas upp? Detta borde kunna kvantifieras m h a ett sofistikerat verktyg.

Anm.: Dagens TorkaS försöker besvara fråga B genom att visa beräknad RF på ekvivalent djup som funktion av datum.

5.3 FRÅGA C: VILKEN BETONG ÄR LÄMPLIG FÖR ETT GIVET FALL?

Ett helt annat sätt att använda ett prognosverktyg är att ange en given konstruktion, ett givet klimat, en given tidplan och ett uppställt torkkrav och sedan låta beräkningsverktyget välja vilken betongkvalitet som kan uppfylla kraven.

Anm.: Dagens BI-dry försöker besvara fråga C.

5.4 FRÅGA D: VILKA ANDRA ALTERNATIVA ÅTGÄRDER KAN ANVÄNDAS?

Om man vill pröva andra alternativa åtgärder för att nå uppställda torkkrav än att välja betongkvalitet måste man med dagens verktyg pröva sig fram med en ny beräkning för varje ny kombination av åtgärder och se om kraven uppfylls. Ett framtida beräkningsverktyg borde kunna göra en sådan prövning på begäran och föreslå alternativa möjligheter och kanske rent utav prioritera dem.

5.5 FRÅGA E: VILKA FORTSATT TORCKINSATSER BEHÖVS?

Ett framtida beräkningsverktyg borde kunna användas för en enkel uppföljning av ett uttorkningsförlopp, t ex genom trådlös koppling kontinuerliga fuktmätningar i betongen och klimatregistrering. Vid varje tillfälle borde det sedan vara möjligt att göra en prognos över det fortsatta uttorkningsförloppet med de klimatprognoser som gäller. Om det då visar sig svårt att nå uppställda torkkrav skall verktyget kunna föreslå alternativa tork- och värminningsinsatser för att påskynda uttorkningsförlopp inom tillgängliga tidsramar.

FRÅGA 6: VILKA INDATA SKULLE BEHÖVAS FÖR ATT GÖRA EN RIKTIGT BRA FÖRUTSÄGELSE AV BETONGTORKNING?

För att riktigt bra kunna förutsäga uttorkningsförloppet hos en betongkonstruktion måste man beskriva fuktbalansen på ett så fysikaliskt och kemiskt korrekt sätt som möjligt, med kemisk fuktbindning och fukttransport. För den betong vars uttorkning man vill förutsäga krävs då omfattande och detaljerade indata i form av geometri, materialegenskaper, randvillkor och initialvillkor. Materialegenskaperna är inte några konstanter utan är funktioner av främst fuktnivå, hydratationsgrad och härdningssätt. För betongkonstruktionen krävs detaljerade data för randvillkoren på ömse sidor om betongplattan. Dessa är heller inga konstanter utan varierar som regel med tiden.

Allmänt för fuktberäkningar krävs också initialvillkor, dvs vilken fuktfördelningen är då uttorkningsberäkningen startar.

Dessa indata, initialvillkor och randvillkor beskrivs kortfattat nedan, med en del exempel.

6.1 MATERIALEGENSKAPER

Egenskaperna hos betongen måste kunna beskrivas för just den aktuella betongsammansättningen, med de delmaterial som man avser att använda. Det kan inte vara rimligt att kräva varken att detta skall finnas uppmätt eller att man måste genomföra omfattande och långvariga mätprogram inför varje beräkningsfall. Det måste alltså finnas modeller för hur man bedömer det absoluta parametervärdet för varje egenskap hos en ny betong. Osäkerheten hos dessa materialmodeller har stor inverkan på hur bra en uttorkningsprognos blir. Vissa egenskaper är här viktigare än andra och kunskapsnivån är också högst varierande.

6.1.1 CEMENTETS VÄRMEUTVECKLINGSEGENSKAPER

Värmeutvecklingen från det aktuella cementet måste kunna beskrivas för varje tänkbart vattencementtal vid olika temperaturnivåer och vid olika fuktnivåer, som funktion av hydratationsgraden.

6.1.2 BETONGENS VÄRMETEKNISKA EGENSKAPER

De värmetekniska egenskaperna är värmekapacitet och värmekonduktivitet. För en aktuell betong beror dessa naturligtvis på betongsammansättningen men de måste också kunna beskrivas som funktion av hydratationsgrad och fukthalt.

6.1.3 CEMENTETS KEMISKA BINDNING AV VATTEN

Det aktuella cementets reaktioner med vatten, och vilka mängder vatten som binds kemiskt, måste kunna beskrivas för varje tänkbart vattencementtal vid olika temperaturnivåer och vid olika fuktnivåer, som funktion av hydratationsgraden.

6.1.4 BETONGENS DESORPTIONSISOTERMER

Desorptionsisotermen är extremt viktig att känna mycket precist, särskilt för betong med låga vct. Denna används i en uttorkningsberäkning för att översätta fukthalten till RF. Minsta lilla osäkerhet hos desorptionsisotermen skapar en stor osäkerhet i vilken RF man har, se nedanstående figur.

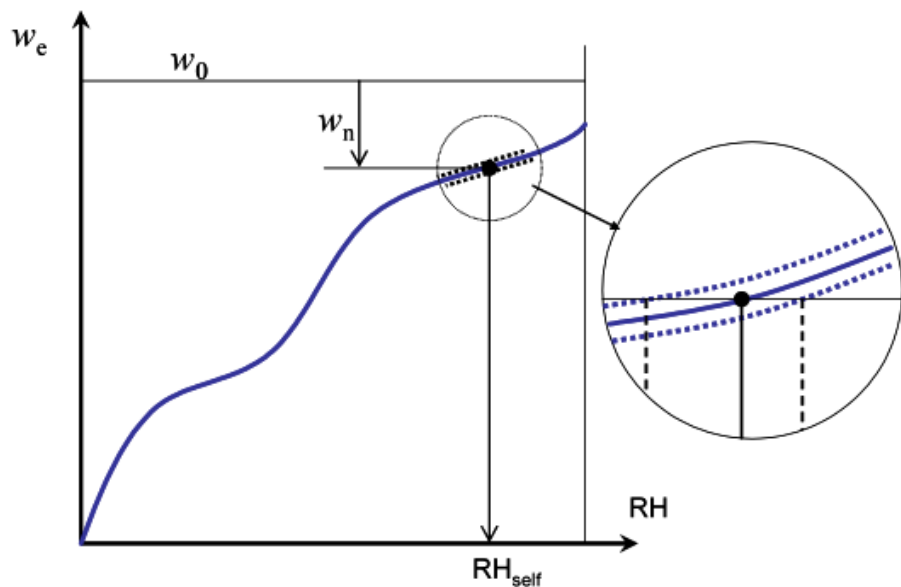


Fig. 6.1 Principiell inverkan av osäkerhet hos desorptionsisotermen på vilken RF man får i en uttorkningsberäkning

Figuren visar också hur viktigt det är att kunna förutsäga fukthaltsändringar noggrant. Ett litet fel i beräkningen av fukthaltsändringen, se w_n i figur 6.1, kan ge ett stort fel i beräknad RF om sorptionskurvan är så flack som i figuren.

Det som gör detta särskilt svårt, och viktigt, är att desorptionsisotermen dels hela tiden ändras med tiden, olika på olika djup i en platta, och dels blir olika för olika plattor med samma betong beroende på hur betongen härdats, jfr Johansson (2009).

Desorptionsisotermen för varje tänkbar betongsammansättning måste alltså kunna beskrivas som funktion av ålder (hydratationsgrad), temperatur, cementtyp, alkalitet och härdningshistoria.

Mätningar för olika betonger har t ex gjorts av Ahlgren (1972) (OPC), Nilsson (1980) (OPC), Xu (1992) (flygaska), Atlassi (1993) (silika), Baroghel-Bouny (1994) (2007) (OPC & silika). Norling-Mjörnell (1997) skapade modeller för åldersberoendet och gav unika data för en del låg-vct-betonger. Sjöberg et al (2002) mätte temperaturberoendet för betonger med vct 0.4-0.8 i fuktområdet 80-100 % RF.

Effekten på desorptionsisotermen av härdningshistoria har aldrig undersökts. Johansson (2009) fick självuttorkningsresultat som verkar peka på en stor effekt. Atlassi et al (1989) visade på stor skillnad mellan olika cementtyper, stor inverkan av olika tillsatsmaterial och en viss inverkan av tillsatsmedel. Några direkta mätningar för t ex Byggcement har inte publicerats.

6.1.5 BETONGENS FUKTTRANSPORTEGENSKAPER

På samma sätt som för desorptionsisotermen måste fukttransportegenskaperna kunna beskrivas för en ny betong. Förutom det stora fuktberoendet, jämför figur 2.4, behövs fukttransportegenskaperna som funktion av ålder (hydratationsgrad) samt temperaturnivå och härdningshistoria. De data och modeller vi har idag bygger i princip på data från Hedenblad (1993), se exemplet i figur 2.4. Dessa gäller för mycket välhärdad betong. Hedenblad utvecklade modeller för åldersberoendet med hjälp av kapillärporositeten men dessa har aldrig verifierats vid unga åldrar.

6.1.6 FUKTTRANSPORTEGENSKAPER HOS YTSKIKT/YTBHANDLINGAR

För tunnare, icke-hygroskopiska ytskikt måste fuktmotståndet och dess fuktberoende anges. Eventuellt fukttillskott till underlaget måste också kunna beskrivas. För tjockare, hygroskopiska pågjutningar, avjämnings och ytskikt krävs dels fukttransportkoefficienten som funktion av fuktnivån och dels sorptionskurvan. För material med bindemedelsreaktioner krävs också att dessa kan beskrivas så att t ex kemisk bindning av vatten kan kvantifieras.

6.2 RANDVILLKOR

Randvillkoren på ovansidan av en betongplatta är lufttemperatur, luftfuktighet och perioder med vatten på ytan. Ett yttre klimat måste kunna översättas till dessa egentliga randvillkor för uttorkningsberäkningen. Eventuell uppvärmning med strålningsvärmare/solsken eller eventuell utstrålning mot himlen under kalla, klara nätter tillkommer som randvillkor. På undersidan av ett mellanbjälklag är det i huvudsak lufttemperatur, luftfuktighet och eventuell strålningsvärme som behöver anges.

För konstruktioner mot mark med underliggande värmeisolering krävs att man kan ange marktemperaturen eller ange indata så att denna beräknas av verktyget. RF i marken bör antas till 100 %.

6.3 INITIALVILLKOR

Initialvillkoren då beräkningen börjar borde gälla då betongen gjutits och komprimerats. Betongens ålder är då bara några timmar, hydratationsgraden är i det närmaste noll och ingen uttorkning eller självtuttorkning har ännu skett. Initialvillkoret skulle då kunna anges som att

- betongen på alla djup har samma sammansättning som betongen i blandaren,
- fukthalten på alla djup är lika med blandningsvattenmängden w_0 ,

vilket är vad i princip alla beräkningsverktyg antar.

Skall man vara riktigt korrekt är betongen i en platta inte alltid helt homogen utan en viss separation uppkommer ofta, dels genom att ballasten sjunker något mot botten och en viss vattenseparation omfördelar vattnet något. Dessutom finns det en "väggeffekt" vid formbotten och vid betongöverytan där den grova ballasten inte "får plats". Istället är andelen mindre ballast och cementhalten större närmast dessa ytor. Ett exempel visas i figuren nedan.

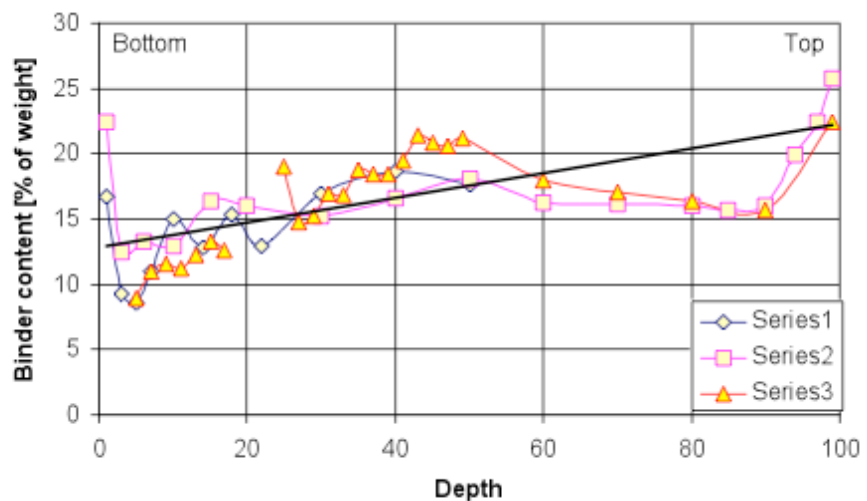


Fig. 6.2 Exempel på cementhaltsfördelning i en 10 cm tjock betongplatta, pga. separation och väggeffekt mot formbotten och överyta, Nilsson (2002). Djupet räknas från botten!

Detta kan möjligen förklara en del egendomliga resultat, Johansson (2009), som visar olika RF på olika djup i förseglade betongplattor som bara självtorkat.

6.4 KOMMENTAR

Av ovanstående framgår inte hur viktiga olika osäkerheter och förenklingar är för slutresultatet i en uttorkningsprognos. För att klargöra detta måste varje förenkling/osäkerhet prövas med en känslighetsanalys. Utan en sådan är det svårt att kvantifiera hur viktiga de olika antagandena är.

FRÅGA 7: BESKRIV DE HJÄLPMEDEL SOM FINNS TILLGÄNGLIGA.

TORKAS OCH BI-DRY

Det finns bara två beräkningsverktyg som behärskar att beräkna uttorkning av betongkonstruktioner i tidig ålder: TorkaS och BI-Dry. Det som är unikt för dessa båda beräkningsverktyg är deras förmåga att

- a. beskriva alla betongens materialegenskaper som funktion av tiden, och
- b. beskriva den kemiska bindningen av vatten till cementet under uttorkningsförloppet.

Dessa två delar innebär att de båda verktygen kan beskriva samtidigt självuttorkning och uttorkning genom fukttransport. Det kan inte något annat verktyg. För beräkningar av uttorkning som påbörjas tidigare än 1-2 månader efter gjutning måste man använda ett verktyg som har dessa funktioner om man skall efterlikna verkliga förhållanden.

TorkaS och BI-dry har, å andra sidan, sådana begränsningar att vissa konstruktionstyper inte kan beskrivas på ett nyanserat sätt. Detta gäller t ex

1. uttorkning av pågjutningar på tjockare underlag där man vill ta hänsyn till fuktändringar i underlaget,
2. uttorkning av fasadelement av sandwichtyp,
3. uttorkning i två dimensioner, t ex förstuvningar, fogar, hattbalkar etc.
4. uttorkning av betongplatta på mark där man vill ta hänsyn till markförhållanden, byggnadens storlek och form etc.
5. uttorkning samtidigt med omfördelning av kvarvarande byggfukt under mer eller mindre täta ytskikt.

I TorkaS och BI-dry finns ändå en del av dessa möjligheter men på ett ytterst förenklat sätt.

Istället finns det andra beräkningsverktyg (KFX, VaDau, WUFI etc.) som på ett utmärkt sätt klarar av att beräkna uttorkningsförloppen hos denna typ av konstruktioner, men då med den begränsningen att man inte kan beskriva det tidiga uttorkningsförloppet.

Tillsvi vidare måste man alltså försöka hitta en lämplig kompromiss. Lämpligen prövar man olika beräkningsverktyg och olika typer av antaganden och förenklingar.

FRÅGA 8: HJÄLPMEDLEN BESKRIVS VART FÖR SIG MED FÖRKLARING OM VILKA BAKGRUNDSDATA SOM DE GRUNDAR SIG PÅ OCH PÅ VILKET SÄTT SOM DESSA ÄR PUBLICERADE.

Både TorkaS och BI-dry baserar sig på klassisk fuktmekanisk teori där den kemiska bindningen av vatten till cementet har inkluderats. I denna teoretiska del finns ett stort antal parametrar som måste beskrivas som funktion av fuktnivå och betongålder. Dessa parametrar har kvantifierats i en rad tidigare forskningsprojekt, som har publicerats bland annat i ett antal doktors- och licentiatavhandlingar och forskningsrapporter, se referenslistan.

Vissa materialegenskaper har uppmätts särskilt för ett urval av de betonger som ingår i BI-dry.

TORKAS

Den senaste versionen av TorkaS är den tredje. Denna och de två tidigare baserar sig på ett stort antal mätningar av uttorkningsprocessen för olika betongsammansättningar, härdningsförhållanden och uttorkningsförhållanden.

För den första versionen användes ett 40-tal betonger med Slite Std-cement, som också ligger bakom S:et i namnet TorkaS. Dessa laboratorieundersökningar publicerades av Hedenblad (1995). Jämförelser har också gjorts mot undersökningar som publicerats av Linné & Utgenannt (1995) som gjorde mätningar på ett 15-tal betongkonstruktioner.

För den andra och tredje versionen användes Byggcement. För den tredje versionen gjordes ett 50-tal olika uttorkningsförsök. Särskilt studerades effekten av tidig härdning vid olika temperaturnivåer. Försöken för version 2 och 3 har ännu inte publicerats.

I princip har inga nya mätningar gjorts av materialegenskaper utan man har baserat på de data som finns i alla forskningsrapporter, främst Nilsson (1980), Hedenblad (1993) och Norling-Mjörnell (1997).

Beräknade uttorkningsförlopp har sedan passats mot de uppmätta.

BI-DRY

BI-dry baseras på undersökningar av uttorkning och självuttorkning hos sex av Betongindustris betonger, se nästa avsnitt. Beräkningar med programmet har jämförts med dessa försöksresultat.

Temperaturdelen baseras på undersökningar av värmeutveckling, mognadsutveckling och hållfasthetstillväxt som publicerats av Hedlund och Jonasson (1999).

FRÅGA 9: HUR BERÄKNINGARNA I PROGRAMMET FUNGERAR.

Beräkningarna i de båda beräkningsverktygen fungerar i stort sett på precis samma vis. Betongplattan delas automatiskt upp i ett antal beräkningsceller. Ett tidssteg väljs som ger numeriskt stabila lösningar. Därefter utgår man från den ursprungliga vattenhalten i betongen. Den kemiska bindningen av vatten till cementet beräknas i varje cell för varje tidssteg. I varje tidssteg beräknas också fuktflödet mellan de olika cellerna och mellan kantcellerna och omgivningen. Sedan beräknas en ny fukthalt i varje cell, beroende på skillnad i fuktflöde till och från respektive cell. Fukthalten översätts till en relativ fuktighet RF i varje cell och ett nytt tidssteg börjar.

Den stora skillnaden mellan de två beräkningsverktygen är vilka betongsammansättningar som beräkningar görs för och hur dessa betonger hanteras..

BETONGSAMMANSÄTTNINGAR

I **TorkaS** kan användaren fritt välja betongsammansättning (vct, vattenhalt, cementhalt) inom relativt vida gränser:

Vattencementtal vct: 0.32-0.80 i steg om 0.01.

Vattenhalt w_0 : 160-210 kg/m³, i steg om 1 kg/m³.

Cementhalt C: beräknas ur vct och w_0 .

Användaren anger förutsättningarna, dvs

- konstruktionstyp och -geometri,
- tidplan för härdnings-/täckningsförhållanden, skydd mot regn, tätt hus,
- uttorkningsklimat, som konstant temperatur och luftfuktighet,
- tidpunkt när beräkningen skall avslutas.

För den valda betongen beräknar verktyget nödvändiga materialegenskaper. Dessa används sedan i en uttorkningsberäkning. Användaren får sedan själv avgöra om uttorkningen är tillräcklig och vid behov göra en ny beräkning med andra förutsättningar.

Beräkningsresultatet kan sägas vara en kontroll av om den valda betongen är användbar.

I **BI-dry** görs beräkningar bara för sex betonger. Den enda uppgift som finns om dessa är deras namn och vilket vct de har, se tabellen.

Betong	vct
TorkBI 1	0.34
TorkBI 2	0.38
TorkBI 3	0.43
TorkBI 4	0.47
TorkBI 5	0.53
C25/30	0.66

Dessa betonger kan väljas utan och med luftinblandning.

Användaren anger förutsättningarna, dvs

- konstruktionstyp och -geometri,
- uttorkningskrav, i form av RF_{OK} , antingen manuellt eller genom val av golvbeläggningstyp.
- tidplan för härdnings-/täckningsförhållanden, skydd mot regn, tätt hus,
- uttorkningsklimat, som konstant temperatur och luftfuktighet,
- tidpunkt när uttorkningskravet skall vara uppfyllt.

För betongen med vct 0.43 beräknar verktyget uttorkningsförloppet och jämför beräknad RF med uppställt torkkrav. Om kravet uppfylls redovisar verktyget att denna betong kan användas och en ny beräkning görs för en betong med högre vct. Om kravet inte uppfylls görs en ny beräkning med annan betong som har större förutsättningar att uppfylla torkkravet, dvs med lägre vct.

Beräkningsresultatet är en betong som uppfyller ställda torkkrav under de givna förutsättningarna.

TEMPERATURFÖRHÅLLANDEN

TorkaS har en ytterst enkel beräkning av betongtemperaturen. Denna antas vara densamma i hela betongplattans tvärsnitt. Den beräknas med hjälp av cementets värmeutveckling, betongens värmekapacitet, värmeisolering hos form och täckning samt omgivande klimat.

BI-dry har en mer sofistikerad temperaturberäkning av samma slag som programmet Hett. Här kan betongplattan få en temperaturprofil genom tvärsnittet. Samma parametrar beaktas i BI-dry som i TorkaS. Dessutom ingår värmetransport i betongen, dvs betongens värmekonduktivitet ingår i beräkningen.

KEMISK BINDNING AV VATTEN

Den kemiska bindningen av vatten till cementet beräknas på samma sätt i båda verktygen, med samma modeller, se Norling-Mjörnell (1997). Mängden vatten som binds kemiskt under en viss tidsperiod beräknas ur data från det aktuella cementet vid samma ekvivalenta betongålder för ett referensklimat, normalt +20°C och vattenmättnad. Hastigheten hos den kemiska bindningen korrigeras för aktuell betongtemperatur och RF hos betongen, enligt Norling-Mjörnell (1997).

FUKTFIXERING

Betongens fuktfixeringsgenskaper beskrivs i båda verktygen med desorptionsisotermen som funktion av ekvivalent betongålder (egentligen hydratationsgrad). Hänsyn tas inte till att då betongen uppfuktas periodvis beroende på omgivande klimat, t ex regn borde scanningkurvor använts.

Betongens desorptionsisoterm som funktion av hydratationsgrad beräknas med hjälp av en ekvation framtagen av Bengt Hedberg och publicerad av Norling-Mjörnell (1997). I denna ekvation ingår ett antal parametrar som behöver kvantifieras för respektive betong.

TorkaS har inkluderat en alkalieffekt på sorptionskurvan vid höga fukthalter. Det innebär att i TorkaS sjunker RF snabbt under 100 % i början av uttorkningsförloppet, även för betonger med högt vct, vilket inte sker i BI-dry. Ett exempel visas i nedanstående figurer.

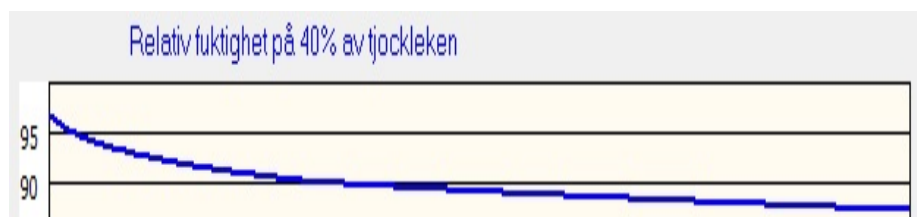


Fig. 9.1 Principiellt uttorkningsförlopp i TorkaS. Observera att RF börjar vid 96-97 % RF viden tiden noll.

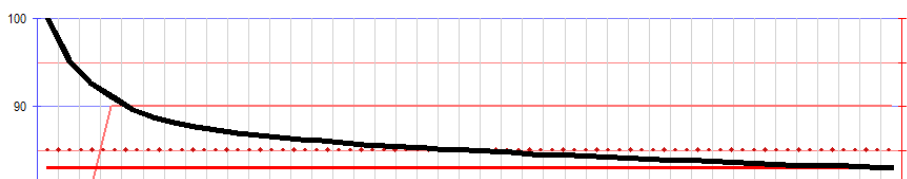


Fig. 9.2 Principiellt uttorkningsförlopp i BI-dry. Observera att RF är 100 % under en viss tid i början av förloppet.

SJÄLVUTTORKNING

Betongens självuttorkning, dvs RF-sänkning utan fukttransport, blir en direkt följd av den kemiska bindningen av vatten, som sänker betongens fukthalt, och den åldersberoende desorptionsisotermen.

FUKTTRANSPORT

Betongens fuktberoende fukttransportegenskaper måste också beskrivas som funktion av betongens ekvivalenta ålder. Data från mätningar finns bara för välhärdad betong, främst av Hedenblad (1993).

Detta åldersberoende beskrivs på något olika sätt i de båda verktygen. Båda utnyttjar kapillärporositeten p_{kap} som den styrande parametern

$$p_{kap} = \frac{vct - 0.39\alpha}{vct + 0.32}$$

där vct är vattencementtalet och α är hydratationsgraden. Med hjälp av denna parameter kan fukttransportkoefficientens åldersberoende beskrivas, se detaljer i Hedenblad et al (2010) och Jonasson et al (2008).

TorkaS använder Kirchhoff-potentialen Ψ som fukttransportegenskap medan BI-dry använder fukttransportkoefficienten δ_p med ångtrycket som transportpotential. Detta innebär teoretiskt ingen skillnad; de är omräkningsbara i varandra. Det kan dock påverka beräkningstiden så att den blir längre då man använder en fukttransportkoefficient.

I TorkaS är fukttransportegenskaperna beroende av tjockleken hos betongplattan. Detta låter egendomligt men är vad Hedenblad (1993) fann i sina mätningar. Det är inte förklarat hur det är möjligt att en materialegenskap skulle vara dimensionsberoende eller om det är en provkroppsegenskap. Det kan inte uteslutas att det blir något olika betong om man gjuter och komprimerar plattor med olika tjocklek varför detta bör klarläggas i framtiden.

RANDVILLKOR

Randvillkoren beskrivs som temperatur och luftfuktighet hos luften över och under betongkonstruktionen. Under vissa dagar då det regnar beskrivs detta som RF=100% på betongytan under den dagen (TorkaS) eller under de sista sex timmarna på regndygnet (BI-dry). Att regn blir stående på betongytan flera dygn efter regn tas inte med i beräkningarna utan måste göras manuellt.

Det framgår inte vilken temperatur man räknar med när det gäller betongplatta på mark. Denna borde dels bero på markförhållanden, omgivningsklimat, byggnadens storlek och form och dels på tidpunkten på året då konstruktionen byggs och värmekudden under byggnaden börjar byggas upp. Detta beskrivs på ett förenklat vis i båda verktygen med en marktemperatur, oklart vilken, och $RF=100\%$ i marken.

I de fall där betongen som skall torka gjuts på ett underlag av värmeisolering, gammal betong, plattbärlag eller HD/F-platta beskrivs dessa underlag bara som ett fuktmotstånd. Deras fuktkapacitet och initiala fuktnivå ingår inte i beräkningen. Detta är en grov förenkling.

FRÅGA 10: VILKA INDATA SOM ANVÄNDS I PROGRAMMET.

Båda beräkningsverktygen ger användaren möjlighet att välja en mängd olika alternativ genom att välja olika indata. Indata är av olika slag. De redovisas här gruppvis och eventuella skillnader mellan de båda beräkningsverktygen påpekas.

KONSTRUKTIONSTYP OCH -GEOMETRI

Båda beräkningsverktygen delar upp konstruktionstyperna i mellanbjälklag och platta på mark. För mellanbjälklag har båda verktygen alternativen homogent bjälklag, pågjutning på plattbärlag och pågjutning på kvarsittande plåtform, dvs ingen uttorkning alls nedåt. BI-dry har dessutom alternativen pågjutning på HD/F-platta och på en gammal betong, men dessa är knappast realistiska enligt vad som sagts ovan. Tjocklekarna kan väljas fritt.

För platta på mark finns tre alternativ i båda verktygen: platta på ett tätskikt och platta med underliggande värmeisolering av cellplast respektive mineralull. Tjocklekarna hos betongplattan och värmeisoleringarna kan väljas. Tjockleken påverkar värmeisoleringens fuktmotstånd. Det är oklart om den också påverkar temperaturskillnaden över värmeisoleringen, vilket den borde göra.

I BI-dry finns fler alternativ, platta på en befintlig betong på mark och platta med en plastfolie mellan två skikt värmeisolering. Det är dock oklart hur dessa hanteras. En befintlig platta direkt på mark utan värmeisolering saknar skydd mot markfukt och kommer att bli fuktig med tiden om man lägger på tät golvbeläggning på den nya betongen. Alternativet med en plastfolie mellan två skikt värmeisolering kommer att få kondens ovanpå folien under uttorkningsförloppet. Denna kondensmängd kommer att innebära att konstruktionen fungerar sämre ur uttorkningssynpunkt än utan folie. Det är oklart hur detta hanteras i beräkningen.

UTOMHUSKLIMAT

Utomhusklimatet under perioden innan betongplattan är skyddad mot regn och byggnaden är tät så att torkklimatet kan styras kan väljas i båda verktygen genom att klicka på en Sverigekarta. I Torcas kan man välja mellan tolv olika orter över hela landet för att få tillgång till utomhusklimat : Kiruna, Luleå, Umeå, Östersund, Borlänge, Karlstad, Stockholm, Norrköping, Göteborg, Visby, Växjö, Lund. Klimatdata för dessa orter under perioden 1995-2005 har

gjorts om till ett "normalår" utan extrema perioder med värme och kyla.

I BI-dry kan man välja mellan ett stort antal orter där Betongindustri har betongleverantörer. Man får då utomhusklimat nära den orten från SMHI-data 1986-2006.

I BI-dry är det många fler orter man kan välja bland men spridningen över landet är mycket sämre än i TorkaS.

GJUTTEMPERATUR

I båda beräkningsverktygen kan man välja vilken temperatur betongen har vid gjutning, dvs när beräkningen startar.

TIDPLAN

I båda beräkningsverktygen anger man tidplanen för uttorkningen genom att välja datum från en kalender. Datum kan väljas för viktiga tidpunkter:

- gjutning, täckning, formrivning
- tak på, dvs. då det inte längre kan regna eller snöa på betongen,
- då styrd uttorkning påbörjas, dvs då byggnaden är mer eller mindre lufttät så att den kan värmas upp,
- datum då uttorkningen skall vara avslutad.

I BI-dry kan man också lägga in när eventuell golvvärme kopplas in.

TORKKLIMAT

Båda beräkningsverktygen ger möjlighet att välja ett torkklimat som innebär att man väljer en konstant temperatur T och en konstant relativ luftfuktighet RF och när detta skall påbörjas.

BETONGSAMMANSÄTTNING

I TorkaS kan betongsammansättningen anges med vct 0.32-0.80 i steg om 0.01 och vattenhalt w_0 i intervallet 160-210 kg/m³, i steg om 1 kg/m³. Cementhalten beräknas ur dessa.

I BI-dry anges inte betongen som indata; lämplig betong beräknas av programmet. Det finns dock möjlighet att välja betong med eller utan luftinblandning.

TORKKRAV

I TorkaS behöver man inte lägga in ett torkkrav. Det förutsätts att användaren själv har ett sådant att denne jämför beräknat uttorkningsförlopp med detta.

I BI-dry kan man välja torkkrav antingen manuellt genom att välja en relativ fuktighet RF_{OK} eller genom att välja bland ett antal olika golvbeläggningstyper. Man får då det torkkrav som anges i HusAMA för respektive beläggning.

REFERENSER

Ahlgren, L. (1972) Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Rapport 36, Byggnadsteknik, LTH, Lund

Atlassi, E, Nilsson, L-O & Xu A (1989) Moisture sorption properties of concrete with admixtures and industrial by-products - implications for durability. BFR Document D9:1989, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Baroghel-Bouny, V. (1994) Characterization of cement pastes and concretes - Methods, analysis, interpretations (på franska), Ph.D. Dissertation, LCPC Publ., Paris, 1994, 468 p.

Baroghel-Bouny, V. (2007) Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp.414–437

Betongindustri (2008) Datorprogrammet BI Dry –Handledning för framtagning av uttorkningsprognoser. Handledning version 1.0, Betongindustri, Stockholm.

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

Hedenblad, G., (1995). Uttorkning av byggfukt i betong, torktider och fuktmätning. Byggeforskningsrådet, Stockholm. Rapport T12:1995. Distribution; Svensk Byggtjänst.

Hedenblad, G., Arfvidsson, J. & Nilsson, L.-O. (2010) Datorprogrammet TorkaS 3, som prognosverktyg vid val av ekonomisk betongkvalitet från uttorkningssynpunkt. Manual. www.fuktcentrum.lth.se/fileadmin/fuktcentrum/PDF-filer/Datorprogrammet_TorkaS_3_slutversion_rev_1.pdf

Hedlund H. och Jonasson J.-E. (1999): Värme- och mognadsutveckling för PK-cement. Luleå tekniska universitet, avd f Konstruktionsteknik, Teknisk Rapport 1993:13, Luleå.

Johansson N. (2005): Uttorkning av betong – Inverkan av cementtyp, betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden. Lund tekniska högskola, avd f Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3124, Lund 2005.

Johansson P. och Nilsson L.-O. (2006): Vattensugning i betong – Laboratorieundersökningar, fältmätningar, beräkningar och modeller. Lunds tekniska högskola, avd f Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3134, Lund 2006.

Johansson, P. (2009) RF-profiler i provkroppar för verifiering av TorKaS3.0. Opublicerade data. Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund

Jonasson J.-E (1994): Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete. Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 1994:153D, Luleå 1994.

Jonasson J.-E, Carlsson C A och Mjörnell K (2005): Modell för beräkning av fuktighet i moderna betonger vid variabel temperatur. Tidskriften Bygg& Teknik, oktober 2005.

Jonasson J.-E., Carlsson C. A. och Mjörnell K. (2006): Beräkning av uttorkning för betong med Byggcement. Tidskriften Bygg& Teknik, oktober 2006.

Jonasson J.-E., Mjörnell K. och Carlsson C. A. (2008) Modelling of simultaneous temperature and Moisture transportation in modern concrete. ConMod08-konferensen, Delft universitet, Delft.

Linné, B. & Utgenannt, P. (1995) Uttorkning av betong: en fältstudie. Examensarbete TVBM-5029, Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund.

Nevander L. E. och Elmarsson B. (1981): Fukt-handbok – Teori, Dimensionering, Konstruktion. Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1981.

Nilsson, L.-O. (1977) Fuktproblem vid betonggolv, Rapport TVBM-3002, Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund

Nilsson, L.-O. (1980) Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties. Rapport TVBM-1003, Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund

Nilsson, L.-O., Hedenblad, G., Norling-Mjörnell, K. (2000) Fuktegenskaper, kapitel 11 i Handbok Högpresterande Betong. Material och utförande, Konsortiet för Högpresterande Betongkonstruktioner, Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Norling-Mjörnell, K. (1997) Moisture conditions in high performance concrete – mathematical modelling and measurements. Rapport P-97:6, inst f Byggnadsmaterial, Chalmers, Göteborg

SBUF (1995) Lathund för betongtorkning, SBUF informerar nr. 95:14. SBUF, Box 7835, 103 98 Stockholm. 1995.

Sjöberg, A., Nilsson, L.-O., Rapp, T. (2002) Fuktmätning i golv med golvvärme. Rapport P-02:1, inst f Byggnadsmaterial, Chalmers, Göteborg

Åhs. M. (2011) Redistribution of moisture and ions in cement based materials, rapport TVBM-1028, Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund.