

Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning

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

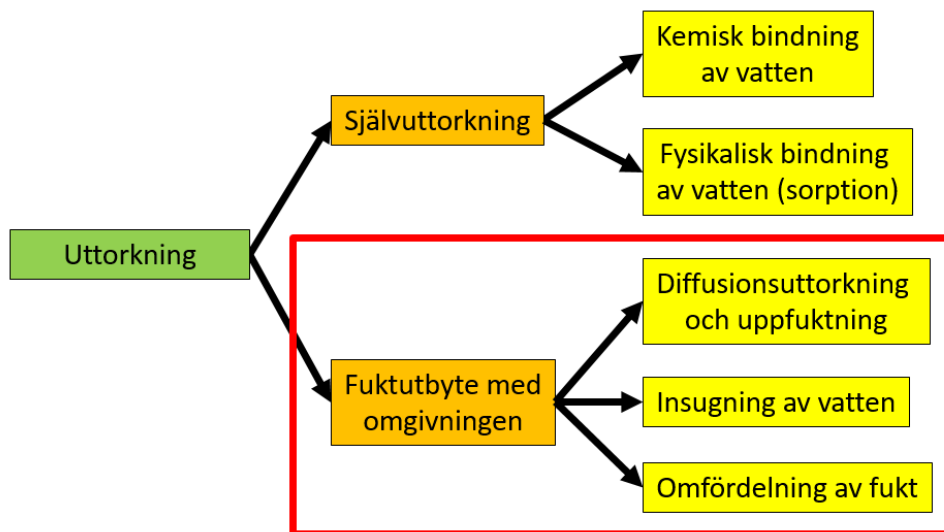


Fig. 1 Funktionell uppdelning av betongens uttorkningsförlopp.

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

Observera dock att både betongens porsystem och vattnets interaktion i porsystemet i verkligheten är mycket mer komplicerade än vad som beskrivs nedan. Meningen med denna artikel är att

presentera de fenomenologiska huvuddragen samt diskutera de mest dominerande mekanismerna och principerna för att kunna dra slutsatser relevanta för betongens fuktutbyte. Som exempel kan nämnas att s.k. hysteres, dvs. en slags fördröjning i sorption, som beskrivs nedan, kan basera sig på fler mekanismer än vad som redovisas i denna artikel. Tanken med denna artikel är att exemplifiera fenomenets mekanismer och diskutera mer ingående dess effekter på fuktutbyte. Det finns även andra mekanismer och detaljer som inte kommer att tas upp - forskningsmässigt intressanta i sig, men inte fullt relevanta för denna tillämpningsorienterade diskussion.

Hysteres i porsystemet

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

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

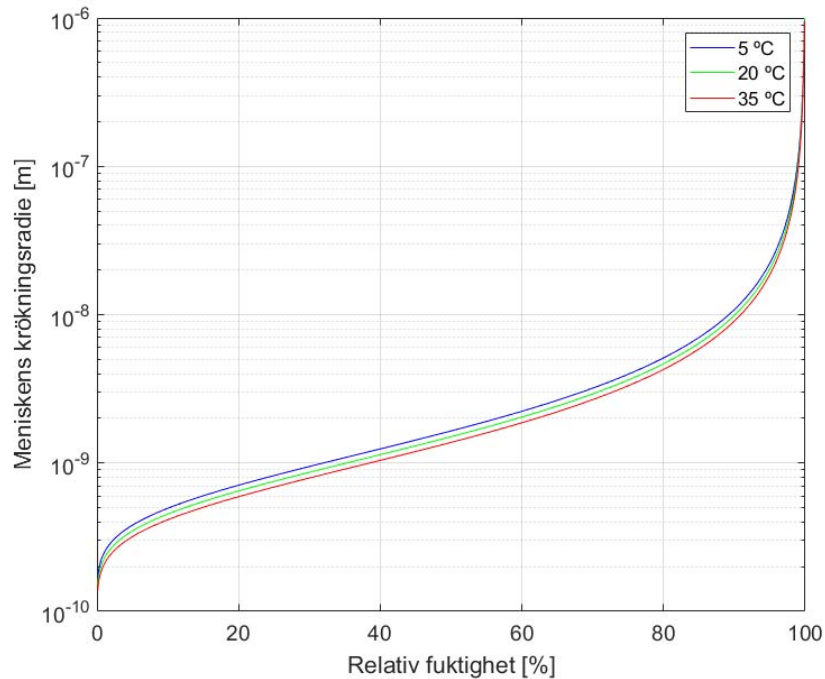


Fig. 2 Termodynamiskt samband mellan relativ fuktighet och krökningsradie hos en vattenmenisk i jämvikt med vattenånga. För cylindriska porer är meniskens krökningsradie lika med porens radie.

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

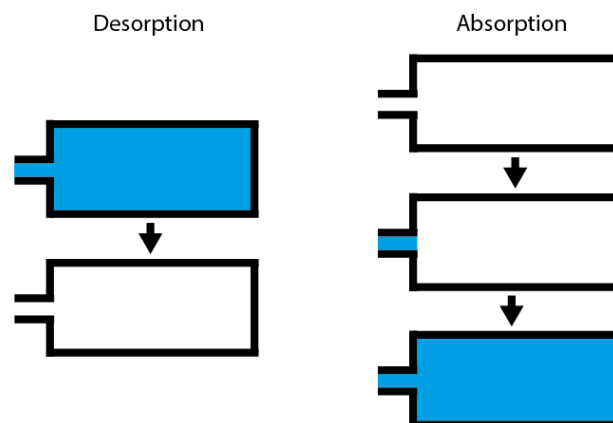


Fig. 3 Desorption och absorption för s.k. ink-bottle-porer, steg för steg.

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

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

Desorption, absorption och skanning

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

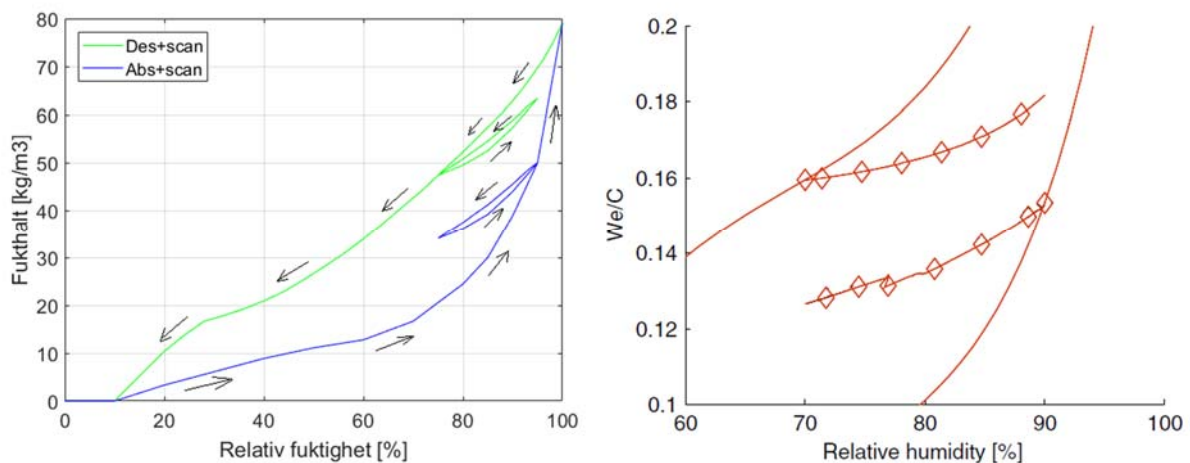


Fig. 4 Desorption, absorption och skanning. Vänster – fukthalt som funktion av relativ fuktighet för en fiktiv exempelbetong, grön kurva visar desorption (från 100% RF till 0% RF) med en skanningloop (från 75% RF till 95%RF och tillbaks till 75%), blå kurva visar absorption (från 0% RF till 100% RF)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

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

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

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

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

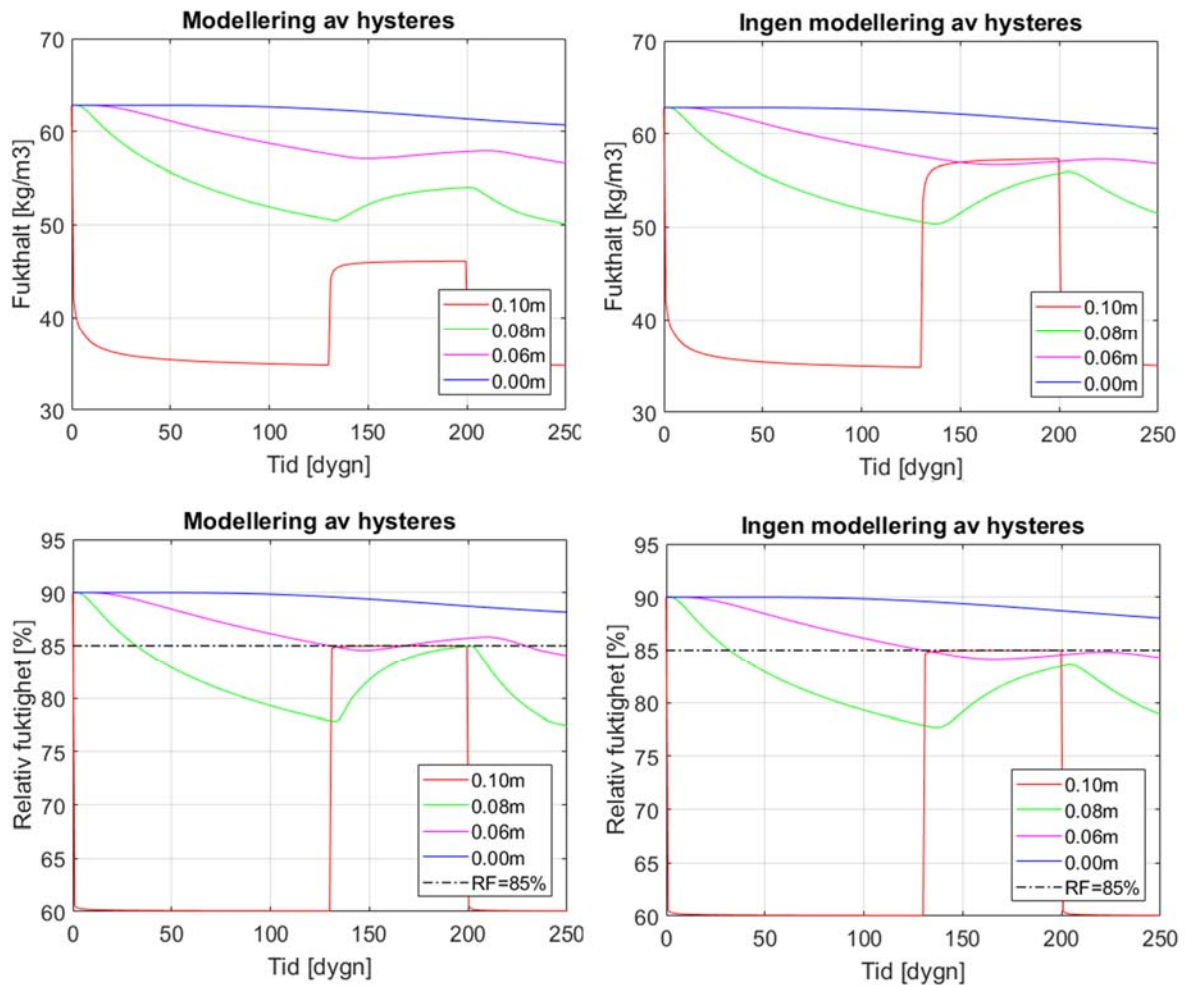


Fig. 5 Fukthalt samt relativ fuktighet som funktion av tid för olika djup i 100m tjockt bottenplatta vid simulering av enkelsidig uttorkning, OPC vct 0,4, materialdata hämtade från Nilsson 1994. Uttorkning sker mot luft 60% RF, med tillfällig höjning av luftens RF till 85% från dag 130 till dag 200.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

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

Sammanfattningsvis kan sägas:

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

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

Fukttransport i betong

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

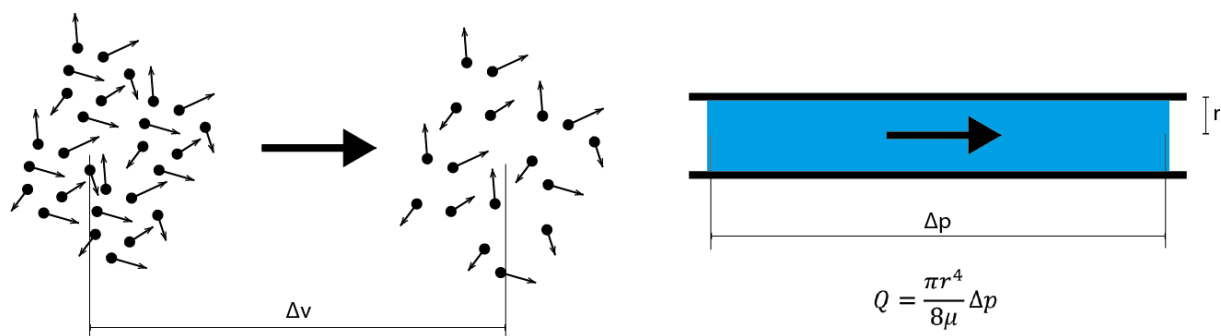


Fig. 6 Olika typer av fukttransport. Vänster – ångdiffusion som drivs av skillnad i ånghalt (Δv) som är ett mått på antalet vattenmolekyler per volym. Höger – vattenflöde genom rör som drivs av tryckskillnad mellan rörets ändpunkter. Formeln nedanför höger bild är en variant av Darcys lag och ger flöde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

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

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

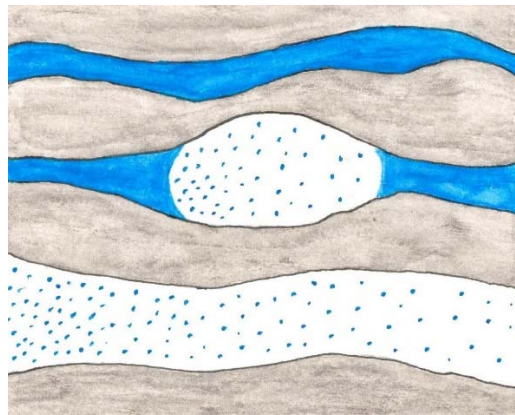


Fig. 7 Tre transportfall för fukt i betong. Ovan – fylld por med vattentransport drivet av skillnad i porvattentryck. Under – tom por med ångdiffusion. Mitt – delvis fylld por där kapillärsug och ångdiffusion samverkar. De blåa prickarna symboliserar ånga och koncentration antyder relativa skillnader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

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

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

Sammanfattningsvis kan sägas att:

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

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

Fuktutbyte med omgivningen

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

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

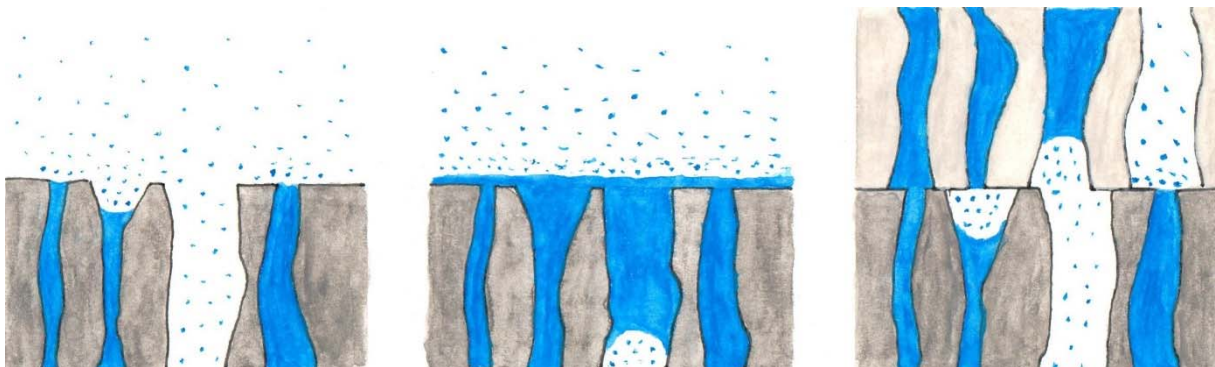


Fig. 8 Utbyte av fukt med omgivningen. Vänster – uttorkning mot luft. Mitt – insugning av vatten från yta. Höger – samverkan med annat poröst material, t.ex. avjämningsmassa. De blåa prickarna symboliserar ånga och koncentration antyder relativa skillnader i ånghalt.

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

Modern, tät betong

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

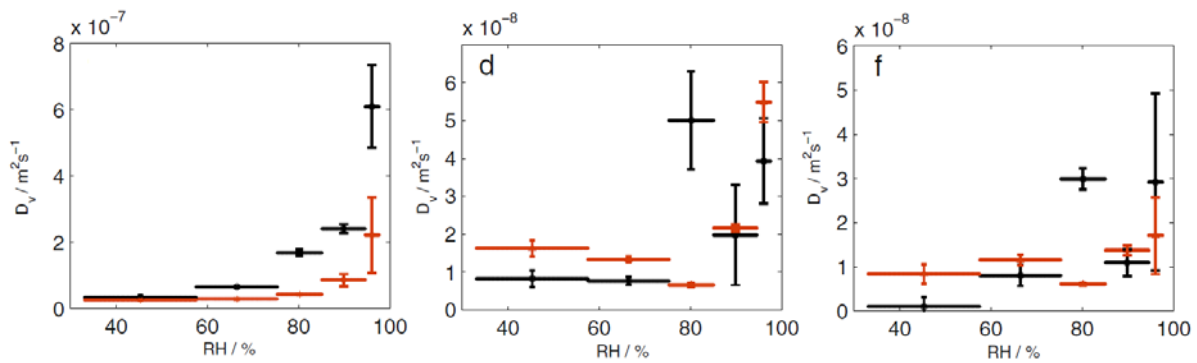


Fig. 9 Jämförelse av transportkoefficient för ånghalt som funktion av relativ fuktighet. Vänster – CEM I (OPC) vct 0.4. Mitten – OPC med 10% silikastoft vct 0.4. Höger – OPC med 70% slagg vct 0.4, svart – under desorption, röd – under absorption. Källa: Saeidpour & Wadsö 2016.

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

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

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

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

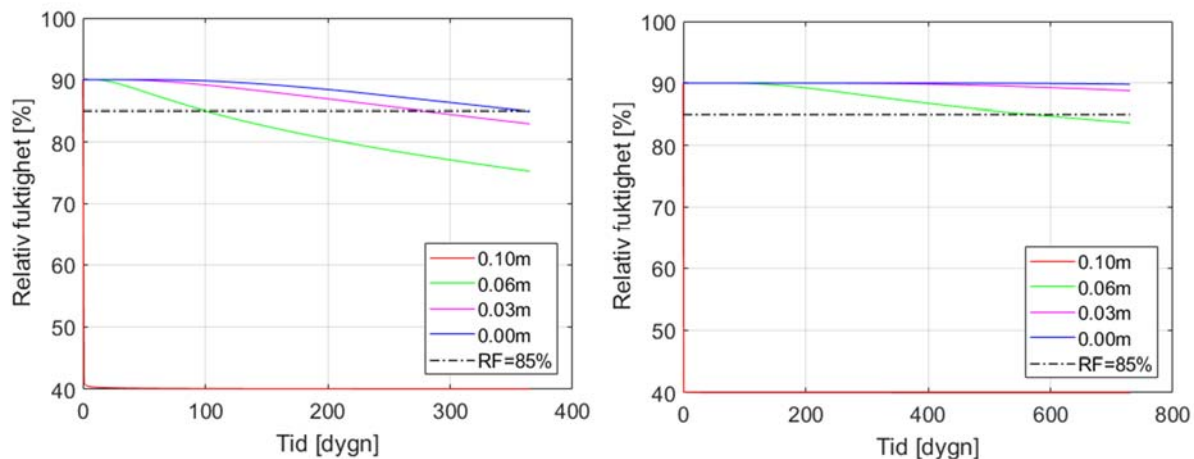


Fig. 10 Simulering av enkelsidig diffusionsuttorkning av 100 mm tjock betong med start vid 95% RF mot luft med 40% RF. Vänster – OPC vct 0.4 med data från Nilsson 1994, höger – hypotetisk betong med transportdata Saeidpour & Wadsö 2016 och sorptionsdata från Stelmarczyk m.fl. 2017. Diagrammet visar relativ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

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

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

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

Slutsatser

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

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

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

Referenser

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

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

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

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

Stelmarczyk m.fl. 2017a – M. Stelmarczyk, P. Johansson, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Betongfunktion: Uttorkning*, www.sbuf.se/ppb 2017

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

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

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

Artikelförfattare

Civ.ing. Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

Civ.ing. Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier, Tekniskt sakkunnig RBK

Dr., Adj. Prof. Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF, PPB Koordinator

Dr. Fredrik Gränne, NCC Sverige AB

Ing. Mattias Gunnarsson, Fuksakkunnig, Peab Sverige AB