

Kapillärstyrt putssystem, Steg 1

Kenneth Sandin
Peter Johansson

Avdelning Byggnadsmaterial



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

ISRN LUTVDG/TVBM-14/3180-SE(1-31)

ISSN 0348-7911TVBM

Lunds Universitet

Avdelning Byggnadsmaterial

Box 118

221 00 Lund

Telefon: +46 46 222 74 15

www.byggnadsmaterial.lth.se

1 BAKGRUND

De mineraliska putsystem som idag förekommer på marknaden fungerar ofta som en transportväg där regnvatten transporteras vidare in i konstruktionen och fuktar upp bakomliggande material. Putsade massiva murverk av exempelvis lättbetong, tegel eller lättklinkerblock som regelbundet utsätts för slagregn uppvisar ofta fuktskador och fuktrelaterade problem. Kombinationen med puts på ett sugande underlag kan medföra att väggen ständigt hålls uppfuktad av den yttre regnbelastningen. Fuktproblematiken har varit speciellt tydlig då väggens uttorkning hindrats inåt genom täta färgsystem eller väggfast inredning.

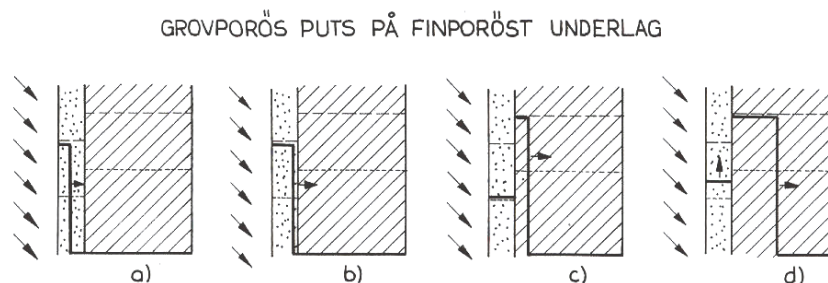
Ett putsystem som antar höga fuktnivåer efter en yttre fuktbelastning kan också tillföra den bakomliggande väggkonstruktionen fukt genom diffusion. Detta kan exempelvis inträffa när ett putsskikt är applicerat på en diffusionsöppen putsbärare av mineralull. Om väggen invändigt är försedd med en ångspärr finns det stor risk att "sommarkondens" kan uppträda som en följd av att den uppfuktade putsen utsätts för uppvärmning på grund av solinstrålning.

Vid putsning på underlag av exempelvis cementbundna skivmaterial, är fukt- och temperaturbetingade rörelser hos skivorna ett problem. Eftersom de flesta förekommande skivmaterial uppvisar svällning som ett resultat av uppfuktning är det av stor betydelse att man väljer ett skivmaterial med så små fuktrelaterade rörelser som möjligt. Även om en relativt formstabil skiva väljs som putsbärare uppstår ibland sprickor i det applicerade putsskiktet som en följd av fuktrelaterade rörelser. Därför är det också av största betydelse att det putsystem som appliceras har en förmåga att motstå yttre regnbelastning utan att anta höga fuktnivåer.

Den huvudsakliga orsaken till dessa fuktproblem är porstorleksfördelningen hos putsystemet i samverkan med porstorleksfördelningen hos underlaget. Ett traditionellt putsystem består ofta av tre olika skikt, det vill säga grundning, utstockning och ytputs. Sammansättningen hos de olika skikten utformas så att dessa har en minskande hållfasthet utåt.

Hållfastheten hos de olika skikten styrs bland annat av mängden cementbaserat bindemedel. Som en följd av ökad bindemedelmängd ändras normalt också porstorleksfördelningen där en större andel fina porer blir resultatet. Vid en yttre fuktbelastning resulterar detta i att de inre och mer finporösa putsskikten, d.v.s. grundning och utstockning, suger vatten från den mer grovporösa ytputsen. Resultatet av regn mot ytputsen blir därför att det normalt grovporösa skiktet snabbt fuktas upp av regnvatten, vilket i sin tur transporteras vidare in i de mer finporösa skikten, se figur 1.

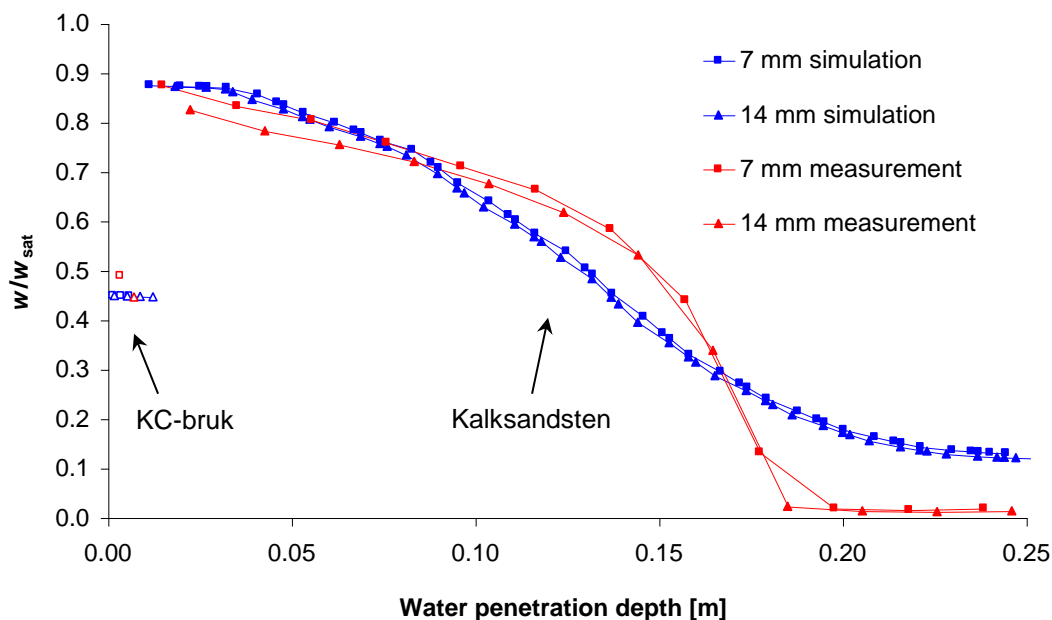
När de inre och mer finporösa skikten fuktats upp går uttorkningen utåt relativt långsamt, eftersom en stor del av den fukt som ska avgå transporteras med hjälp av diffusion genom de yttre putsskiktens grövre porer. Sammanfattningsvis fungerar de yttre putsskikten som en backventil eftersom vatten snabbt transporteras in med hjälp av kapillärtransport, men har sedan svårt att torka ut, då detta sker via diffusion i det relativt grova putsystemet.



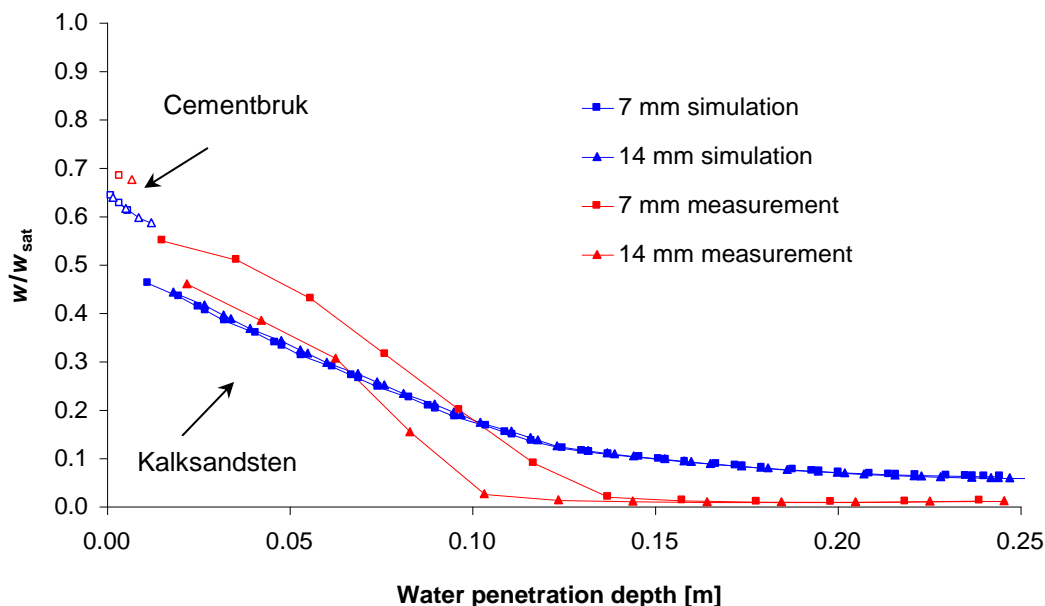
Figur 1 Principiell fuktfördelning vid yttre fuktbelastning på grovporös puts på finporöst underlag, Sandin (1980).

Fuktfördelningen efter yttre fuktbelastning i kombinerade material har beskrivits kvalitativt av Sandin (1980), se figur 1. Under senare år har ytterligare en studie genomförts där tidigare kvalitativa resonemang har bekräftats kvantitativt med hjälp av beräkningar och laboriestudier, se Johansson (2005). Resultat från både beräknade och uppmätta fuktprofiler ur den senare studien redovisas som figur 2-3. Figur 2 visar dels beräknad och dels uppmätt fuktfördelning efter yttre fuktbelastning på ett murverk av kalksandsten belagt med en relativt grovporös puts av KC-bruk. I Figur 3 visas motsvarande fuktfördelning men för fallet då kalksandstenen är kombinerad med ett relativt finporöst cementbruk.

I de båda fallen antar respektive putsbruk snabbt kapillärmättad. Men även då båda putsbruken är kapillärmättade antar den bakomliggande kalksandstenen markant lägre fuktnivåer, då den är belagd med ett finporöst cementbruk, se figur 3.



Figur 2 Fuktfördelning vid sju dygns yttre fuktbelastning mot grovporös puts av KC-bruk på underlag av kalksandsten, Johansson (2005).



Figur 3 Fuktfordelning vid sju dygns yttre fuktbelastning mot finporös puts av cementbruk på underlag av kalksandsten, Johansson (2005).

Med hjälp av beräkningsverktyg enligt Johansson (2005) kan de efterfrågade materialegenskaperna hos ett vattenavvisande putssystem identifieras. Funktionen hos det vattenavvisande putssystemet baseras på två olika putsskikt med väsentligt skilda materialegenskaper. De egenskaper som främst skiljer hos de två kombinerade putsskikten är dess porstorleksfördelning. Genom att ett grovporöst putsskikt först appliceras på murverkets yta och därefter ett finporöst putsskikt kan ett putssystem som har en vattenavvisande funktion uppnås. Det inre mer grovporösa putsskiktet kan då i huvudsak få en kapillärbrytande funktion.

Erfarenhetsmässigt byggs ett putssystem upp med det svagaste putsskikt ytterst. Anledningen till detta är att det är de yttre skikten som utsätts för störst fukt och temperaturvariationer. Dessa variationer resulterar i krympning och svällning. Eftersom det är ytputsens som vill anta störst rörelser är det en utbredd uppfattning att detta skikt också måste utgöra den svagaste länken för att inte underliggande skikt ska skadas. Eventuella skador ska i stället ske i det yttersta skiktet.

Grundidén hos aktuellt koncept är istället att placera det mest finporösa putsskiktet ytterst, det vill säga som en ytputs. Med hänsyn till dess sammansättning kommer då istället det finporösa putsskiktet att utgöra putssystemets starkaste skikt. Eftersom detta erfarenhetsmässigt utgör ett beständighetsproblem, kommer en metod att utvecklas, där hållfastheten hos putsskiktet sänks samtidigt som dess egenskaper ur fukttransportssynpunkt bibehålls. Sänkningen av hållfastheten kan sannolikt genomföras med hjälp av inblandning av en försvagande ballast. Detta ligger dock utanför projektets ramar.

Att bryta kapillärtransporten från putssystemets yta och inåt genom att kombinera putsskikt med olika porstorleksfördelning kan också ha en avgörande betydelse för omfattningen av kalkutfällningar. När ett finporöst putsskikt appliceras på en bakgrund bestående av ett mer grovporöst putsskikt, bryts en stor

del av kapillärtransporten från de inre delarna av putssystemet, vilket sannolikt kommer att resultera i en minskad risk för kalkutfällningar.

2 SYFTE

Projektets syfte är att utveckla en metodik som kan användas för att välja putssystem som fungerar som en fuktskyddande barriär utan att innehålla vattenavvisande tillsatser. I stället för att använda vattenavvisande tillsatser ska putssystemet byggas upp så att vatten får svårt att tränga in men lätt att sugas fram till ytan där det kan avdunsta. Detta innebär bland annat att systemet blir långtidsstabil. Det finns ingen som helst anledning att befara någon nedbrytning.

Tanken ligger helt i tiden, nämligen att skapa ett långtidsstabil system som inte är beroende av kemiska tillsatser och inte förväntas ändra egenskaperna med tiden.

3 GENOMFÖRANDE

3.1 ALLMÄNT

Enligt de ursprungliga planerna skulle följande moment ingå:

- Parameterstudier/simuleringar
- Framtagande av materialdata
- Laborativa verifieringsförsök
- Fullskaleförsök

Av olika skäl gjordes en omprioritering. Den största ändringen är att parameterstudien/simuleringarna senarelagts i tidplanen och att fullskaleförsöken tidigarelagts.

Orsaken till detta är:

- Parameterstudier kräver materialdata, vilka inte fanns från början. (Detta borde vi ha insett, men det är mänskligt att fela.)
- Fullskaleförsöken tar lång tid och måste förberedas i god tid.

I nuläget finns inga parameterstudier. De övriga delarna i projektet redovisas i det följande.

3.2 MATERIALDATA

3.2.1 Material och provkroppar

Två olika putser har ingått i undersökningen. Den grundläggande tanken var att ha en grovporös och en finporös puts. Efterdiskussion med Rolf Blank, weber, bestämdes att använda ett B-bruk och ett D-bruk. Bruken skulle appliceras omväxlande. I ena fallet applicerades B-bruket först och därefter D-bruket. I det andra fallet applicerades D-bruket först och därefter B-bruket.

Den grundläggande tanken var att B-bruket är mer finporöst än D-bruket.

Som underlag användes H+H Multiplatta 535, 600x200x150. Putsen applicerades både på torr och blöt platta för att efterlikna fallen med kraftigt sugande respektive mindre sugande underlag.

De använda bruken har följande sammansättning:

B-bruk

- 10 % SH-cement
- 8 % A20 Dolomitfiller
- 20 % Riksten 1-2 mm
- 20 % Riksten 0,5-1 mm
- 42 % Baskarp B25 0,1-0,5 mm

D-bruk

- 12 % NHL från Skandinavisk Jura AS
- 3 % släckt kalk från Nordkalk
- 5 % A20 Dolomitfiller
- 20 % Riksten 1-2 mm
- 20 % Riksten 0,5-1 mm
- 40 % Baskarp B25 0,1-0,5 mm

För att underlätta avlägsnandet från lättbetongen hos de provkroppar som var avsedda för bestämning av direkta materialegenskaper hos de enskilda putsarna placerades ett "hushållspapper" på lättbetongen innan putsningen enligt Foto 1. Putstjockleken var alltid 10 mm. Prover som putsades på torrt underlag har beteckningen BT (B-bruk) respektive DT (D-bruk). Motsvarande beteckning med våta underlag är BV respektive DV. Lättbetongen har beteckningen Lbtg. Efter härdning avlägsnades putsen och provkroppar 50x50 mm sågades ut. För vissa provningar borrades i stället ut diskar med diametern 65 mm.

Prover som var avsedda att testa som materialkombinationer putsades direkt på lättbetongen utan hushållspapper enligt Foto 2. Dessa prover hade antingen 7 mm B-bruk som första skikt och 7 mm D-bruk som andra skikt eller tvärtom. Det första skiktet fick härda 3 dygn innan nästa skikt applicerades. Prover med det första skiktet av 7 mm B-bruk har beteckningen B+D. Prover med det första skiktet av 7 mm D-bruk har beteckningen D+B.

Samtliga prover fick härda under plastfolie i 3 dygn och därefter i 65 % RF utan plastfolie tills putsen var "praktiskt genomkarbonatiserad". Under härdningen vattnades proverna någon gång i veckan.



Foto 1. Putsning av prover för bestämning av enskilda materialegenskaper.



Foto 2. Putsning av prover för studium av materialkombinationer.

3.2.2 Jämviktsfuktkvot i det hygroskopiska området

Jämviktsfuktkvoterna har bestämts både vid absorption och desorption.

Cirka 20 gram material grovkrossades. Materialet för bestämning av jämviktsfuktkvot vid absorption torkades vid 50°C och placerades i petriskålar. Materialet för bestämning av jämviktsfuktkvot vid desorption vattenmättades och placerades i petriskålar. Härefter placerades skålarna i plastboxar med klimaten 55, 76, 83 och 92 % RF. Temperaturen var 20°C.

Proverna vägdes 1 gång i veckan och när jämvikt rådde torkades proverna vid 105°C för att bestämma torrvikten.

Totalt har 80 prover ingått i bestämningen.

De enskilda proverna visas i Foto 3 och boxarna i Foto 4.



Foto 3. Enskilda provkroppar.



Foto 4. Klimatboxarna.

3.2.3 Jämviktsfuktkvot i det överhygroskopiska området

Inledning

Jämviktsfuktkurvan i det överhygroskopiska området kallas ofta "suctionkurva" och beskriver förhållandet mellan fukttinhåll i ett material och dess porvattentryck. Porvattentrycket kan räknas om till relativ fuktighet, ϕ , med hjälp av Kelvin-ekvationen.

$$\ln \Phi = -\frac{v_s}{R \cdot T} \cdot \Delta P \quad (3.1)$$

där

- Φ är den relativa fuktigheten hos materialet;
- v_s är molvolymen hos materialets porvattnet [0.018 m³/kmol];
- R är allmänna gaskonstanten [8314 J/kmol·K];
- T är temperaturen [K];
- ΔP är det kapillära porvattenundertrycket [Pa].

En "suctionkurva" kan tas fram genom att ett vått materialprov placeras på ett finporöst membran. Membranets undersida tillåts ha kontakt med omgivningen via ett rör och exponeras därför för atmosfärstryck. Genom att membranet, med materialprovet på, placeras i en tryckbehållare kan en tryckskillnad skapas över membranet, vilket fungerar som ett lufttätande skikt eftersom det är mycket finporöst och vattenmättas före försöket. Membranets porer är så pass små att det uppstår starka kapillärkrafter som klarar motstå den pålagda tryckskillnaden. Vid försöken valdes membran som hade ett finare porsystem jämfört med proven vilket innebar att när en tillräcklig tryckskillnad applicerades så tömdes den grövsta delen av porsystemet hos provet, medan det underliggande membranet fortfarande var vattenmättat. Genom att tryckskillnaden ökades stegvis så kunde allt finare porer hos provet tömmas samtidigt som membranet fortfarande var vattenmättat.

När ett vattenfyllt kapillärporsystem utsätts för en viss tryckskillnad kommer så småningom ett jämviktsläge att uppnås. Enligt ekvation 3.2 råder ett visst förhållande mellan radie hos kapillärporerna och tryckskillnaden över porsystemet.

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (3.2)$$

där

- ΔP är tryckskillnad över kapillärporerna [Pa];
- σ är ytspänningen för vatten vid 293K [0.074 N/m];
- r är porradien [m];

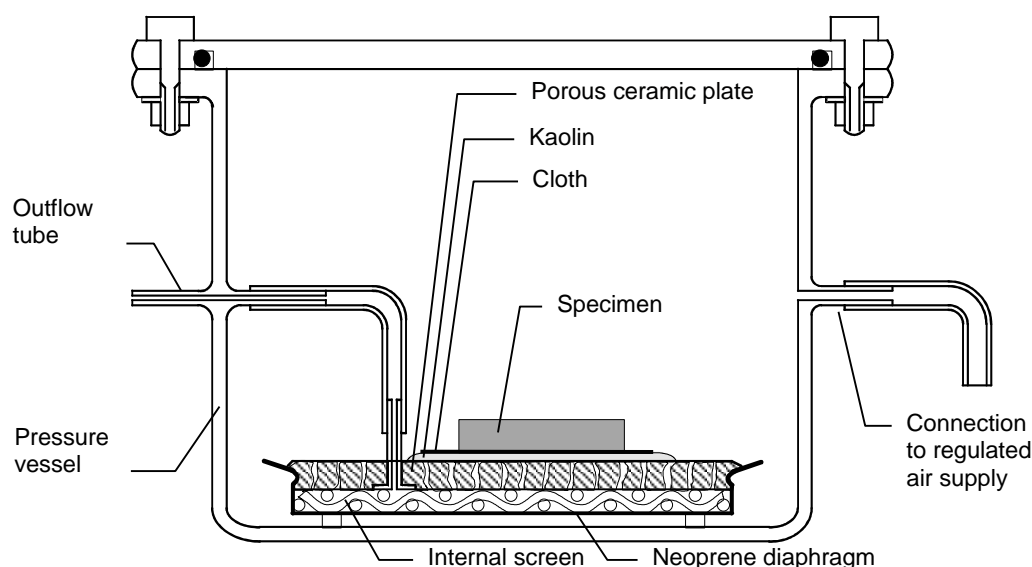
Större porer med förhållandevis svaga kapillärkrafter kommer att tömmas på vatten medan porer med mindre diameter förblir vattenfyllda.

Metod

Jämviktsfuktkurva för desorption togs fram i det överhygroskopiska fuktområdet för två olika putsbruk, märkta DV och BV samt lättbetong märkt LBTG. Materialen är beskrivna tidigare i avsnitt 3.2.1. För varje material gjordes mätningar på tre prov med måtten $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ och proven placerades så att dess flata yta var i kontakt med membranet vid mätningarna. Före försöket vakuummättades alla proven enligt följande rutin;

1. Proven torkades i $50 \text{ }^\circ\text{C}$ och placerades i en vakuumkanmare under tre timmar med tryck i intervallet 100 till 250 Pa.
2. Rumstempererat vatten fylldes på i vakuumkanmaren så att proven täcktes med vatten.
3. Vakuumpumpen kördes cirka 5 minuter efter att vatten fyllts på i vakuumkanmaren.
4. Vakuumpumpen stoppades och en ventil öppnades så att atmosfärstryck släpptes in i kammaren.

Proven vakuummättades inför försöket för att säkerställa att proven som helhet med god marginal hade en högre fuktnivå jämfört med den fuktnivå som förväntades vid lägsta trycknivån. Försöket gjordes med en "pressure plate" kammare vilken var dimensionerad för det maximala trycket 10 MPa, se figur 4.



Figur 4. Schematisk skiss av "pressure plate" kammare.

Proven exponerades stegvis för två olika trycknivåer där mätningen började med den lägsta trycknivån, se tabell 3.1. I tabellen finns också den korresponderande relativa fuktigheten, dvs. den relativa fuktighet som motsvaras av trycket, samt maximal radie hos porer som kan hålla kapillärt vatten vid det aktuella trycket.

Tabell 3.1 Trycknivåer för "pressure plate"-mätningar med korresponderande relativ fuktighet enligt ekvation 3.1 och tillhörande porradie enligt ekvation 3.2.

Tryck [MPa]	Relativ fuktighet [%]	Porradie [μm]
3.35	97.555	0.044
8.26	94.078	0.018

För att säkerställa hydraulisk kontakt mellan proven och membranet så placerades en mycket tunn duk av bomull mellan membranet och proven. Mätningarna gjordes i ett klimatiserat utrymme med temperaturen $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ och vid mätningen trycksattes "pressure plate" kammaren genom att en gasflaska med kvävgas, via tryckregulator, kopplades till röret märkt "connection to regulated air supply", se figur 4 och foto 5. När en viss trycknivå lagts på i kammaren trycktes vatten ut ur provet och vidare genom membranet. Membranets undersida var exponerat för atmosfärstryck och vattnet ledde ut från tryckkammaren genom rör markerat "outflow tube" i figur 4. Mängden vatten som lämnade provet samlades i en pipett och registrerades dagligen. När provet slutligen uppnått jämvikt med det första pålagda trycket 3.35 MPa och alla porer med större radie än $0.044 \mu\text{m}$ tömts, registrerades ingen vattentillförsel i pipetten. Definitionen för jämviktsläge var att ingen mätbar vattenmängd skulle lämna provet under 14 dagar.



Foto 5. Två "pressure plate" kammare avsedda för maximala trycken 1.5 MPa respektive 10 MPa anslutna till tryckregulatorer och gasflaskor.

När jämviktsläget uppnåddes för den första trycknivån togs proven ut och vägdes. Direkt efter vägningen, som genomfördes på några minuter, placerades proven åter i "pressure plate" kammaren och den en högre trycknivån om 8.26 MPa lades på. Jämvikt inväntades och säkerställdes på samma vis som för den lägre trycknivån. Vi ny jämvikt togs proven ut och vägdes och för att få fram torrvikten torkades proverna i värmeskåp vid temperaturen 50°C . Den förhållandevis låga temperaturen för att torka proven valdes med hänsyn till att proven skulle användas för vidare mätningar och att torkning vid en högre temperatur kan innebära påverkan på materialets struktur med förändrade fuktegenskaper som följd. Med hjälp av provens vikt efter jämvikt med respektive trycknivå och deras torr vikt så bestämdes fuktkvoten för respektive tryck/RF-nivå.

3.2.4 Fukttransportkoefficienter i det hygroskopiska området

I det hygroskopiska området användes koppmetoden med prover med diametern 65 mm och tjockleken 10 mm. RF i kopparna var 76, 83 respektive 91 %. Klimatet i rummet var 58 % RF och 20°C. 2 prover av varje sort ingick i mätningen. Mätning gjordes både på prov som från början var torr respektive blöta.

Totalt testades 60 prover.

Provuppställningen visas i Foto 6.



Foto 6. Provuppställning vid bestämning av fukttransportkoefficienter i det hygroskopiska området.

3.2.5 Fukttransportkoefficienter i det överhygroskopiska området

I det överhygroskopiska området användes kapillaritetsmetoden enligt Peter Johanssons avhandling. Metoden innebär att prover kapillärmätts till olika kapillärmättnadsgrad i intervallen 0, 0,1, 0,2, ..., 0,8, 0,9. Härefter genomförs traditionella kapillaritetsförsök med bestämmande av kapillaritetskoefficienten vid de olika startfuktnivåerna. 2 prover användes vid varje startfuktnivå. Totalt ingick 80 prover i testen.

Innan proverna konditionerades till olika kapillärmättnadsgrad torkades de ut vid 50°C. För att bestämma exakt vattenmättnadsgrad torkades proverna efter genomförd test ut vid 105°C.

Provkroppstorleken var 100x100x10 mm. Alla ytor utom sugytan 10x100 mm förseglades med Al-folie.

Under sugtiden vägdes proverna efter 1, 4, 9,16, 25, 36,49, 64, 81, 100, 121, 144, 196, 256, 400 minuter. Härefter vägdes proverna med ett dygns mellanrum.

Provuppställningen visas i Foto 7.

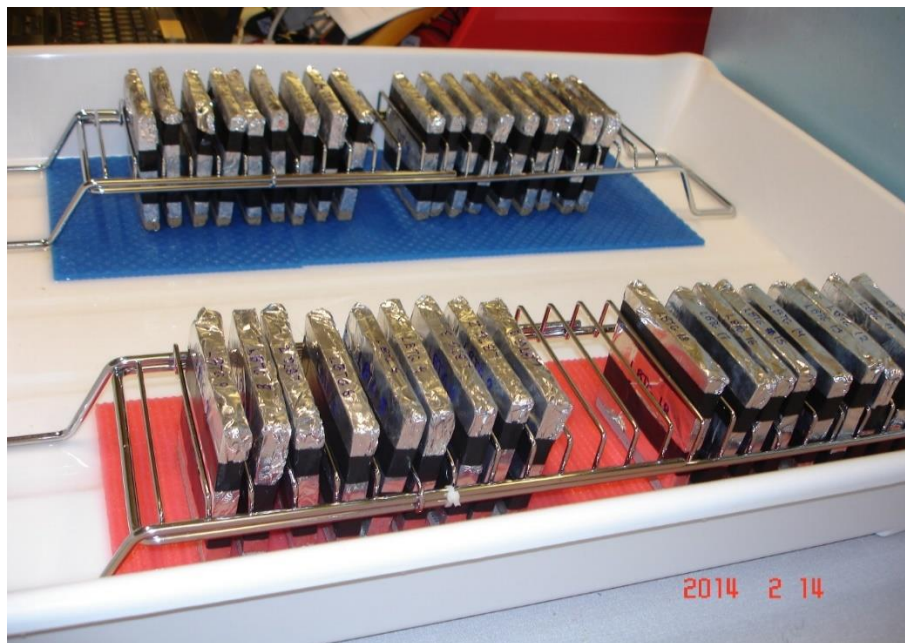


Foto 7. Provuppställning vid bestämning av fukttransportkoefficient i det överhygroskopiska området.

3.2.6 Fuktackumulation vid cyklisk fuktbelastning/uttorkning

Denna provning är att betrakta som en förprovning inför en större provning senare.

Provkroppar med storleken 50x50 mm sågades ut tillsammans med lättbetongen. Proverna lagrades i "rumsklimat" i cirka en månad för att nå en rimlig startfuktnivå. Exakt fuktinnehåll bestämdes inte eftersom vi inte ville påverka proverna genom upphettning innan provningen. Detta gjordes efter avslutad provning. Enbart de prover som putsats på våta underlag testades. Prover med torra underlag uppvisade vissa brister i vidhäftning.

Sidorna och baksidan förseglades med Al-folie. Härefter genomgick proverna en cyklisk uppfuktning/uttorkning. Uppfuktningen gjordes genom kapillärsugning genom putsen. Mängden uppsugen vattenmängd skulle motsvara 2 respektive 4 kg/m² slagregn eller max 2 respektive 4 timmars vattenbelastning. Det som inträffade först var avgörande. Härefter fick proverna torka i 2 respektive 7 dygn innan proverna fick suga vatten på nytt.

Den valda vattenbelastningen 2 kg/m² motsvarar fallet med att putsen har blivit vattenmättad medan lättbetongen fortfarande inte sugit åt sig något vatten. Vattenbelastningen 4 kg/m² motsvarar fallet med den dubbla vattenbelastningen. Att vi införde en alternativ tidsmässig begränsning beror på att fallet skulle motsvara en slagregnsbelastning med den maximala intensiteten 1 mm/h under 2 respektive 4 timmar. Proverna har littererats med

Lbtg 2-2: Ingen puts, enbart lättbetong, 2 kg/m² eller 2 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

Lbtg 4-2: Ingen puts, enbart lättbetong, 4 kg/m² eller 4 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

D+B 2-2: D-bruk underst, B-bruk ytterst, 2 kg/m² eller 2 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

D+B 4-2: D-bruk underst, B-bruk ytterst, 4 kg/m² eller 4 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

B+D 2-2: B-bruk underst, D-bruk ytterst, 2 kg/m² eller 2 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

B+D 4-2: B-bruk underst, D-bruk ytterst, 4 kg/m² eller 4 tim vattenbelastning, 2 dygns torkning

Uttorkningen mellan vattenbelastningarna skedde i klimatrums med cirka 60 % RF och 20°C.

Provning gjordes även med 7 dygns uttorkning. Dessa prover hann nästan torka ut helt mellan vattenbelastningarna och redovisas inte.

Totalt ingick 72 provkroppar i testen.

En provkropp under kapillärsugning visas i Foto 8.

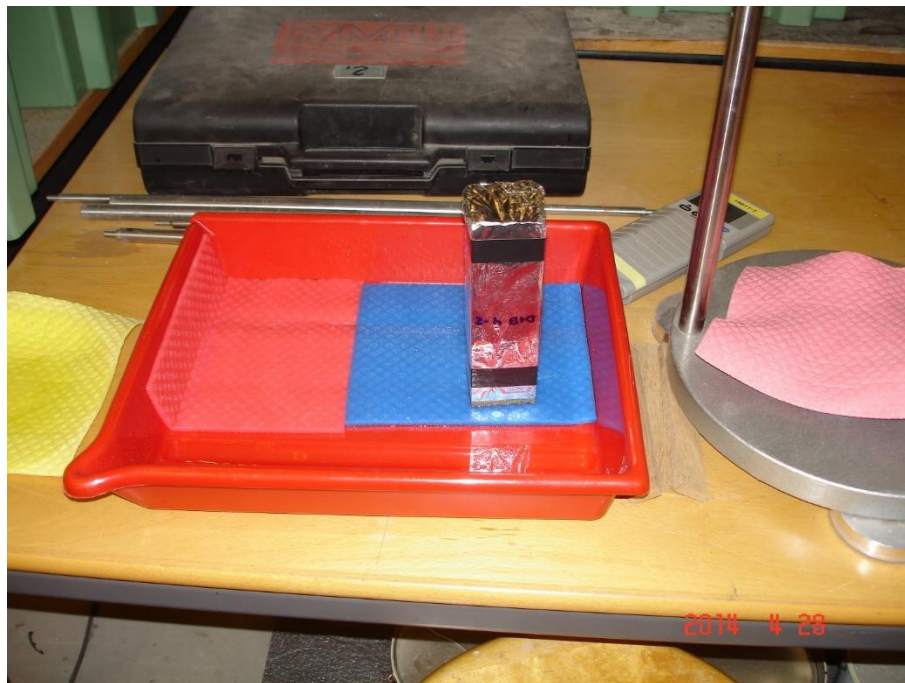


Foto 8. Provkropp under kapillärsugning.

Efter 1½ månads provning avbröts försöken för att bestämma fuktprofilerna. Proverna var då inte i jämvikt men eftersom aktuell provning var att betrakta som ett förförsök bedömdes erhållna resultat tillräckliga för att fastställa ett fortsatt heltäckande provningsprogram.

Provkropparna sågades upp i 10-30 mm tjocka skivor, varefter fuktkvoten bestämdes genom uttorkning vid 105°C. Närmast putsen var tjockleken 10 mm och längst bak 30 mm.

3.2.7 Fullskaleförsök

För att genomföra fullskaleförsök under naturliga klimatförhållanden har två provväggar cirka 1.0x2.2 meter murats upp. Murningen gjordes 2014-04-28. Murandet illustreras i Foto 9.

Väggarna kommer senare att förses med putssystemen B+D respektive D+B. Innan detta görs ska väggarna torka ut "naturligt". Putsningen beräknas ske i september. Då ska även insidan förses med ett "normalt" ytskikt. Tanken med att vänta med den utvändiga putsen och det invändiga ytskiktet är att väggarna vid starten av provningarna ska vara så torra som möjligt.

För att kontinuerligt registrera fukttillståndet i väggarna monterades elektroder på djupen (inifrån räknat) 80, 120, 160, 180, 190 och 204 mm. Det senare djupet avser att elektroderna hamnar i putsen. Metoden är väletablerad och har använts i flera undersökningar tidigare.

Mätmetoden är enbart relativ. Under försöksperioden kommer dock prover att tas ut för att bestämma exakt fuktillstånd. Härigenom kan den relativa mätningen översättas till fuktkvoter.

Elektroden består av stångar som isolerats hela längden utom själva spetsen. Vid monteringen förborras ett hål till djupet någon cm av det avsedda mätdjupet enligt Foto 10. Härefter för elektroden in och tätning sker med fogmassa enligt Foto 11. För att säkerställa perfekt kontakt mellan elektroden och lättbetong införs elektroden sista biten med lätta hammarslag enligt Foto 12. Slutligen monteras sladdar på elektroden enligt Foto 13 för att senare kunna avläsas med ett manuellt instrument.

I Foto 14 visas elektroden som kommer att finnas i putsen.

Mätningarna har påbörjats och kommer att fortsätta kontinuerligt cirka 2 gånger per månad.



Foto 9. Uppmurning av provväggar.

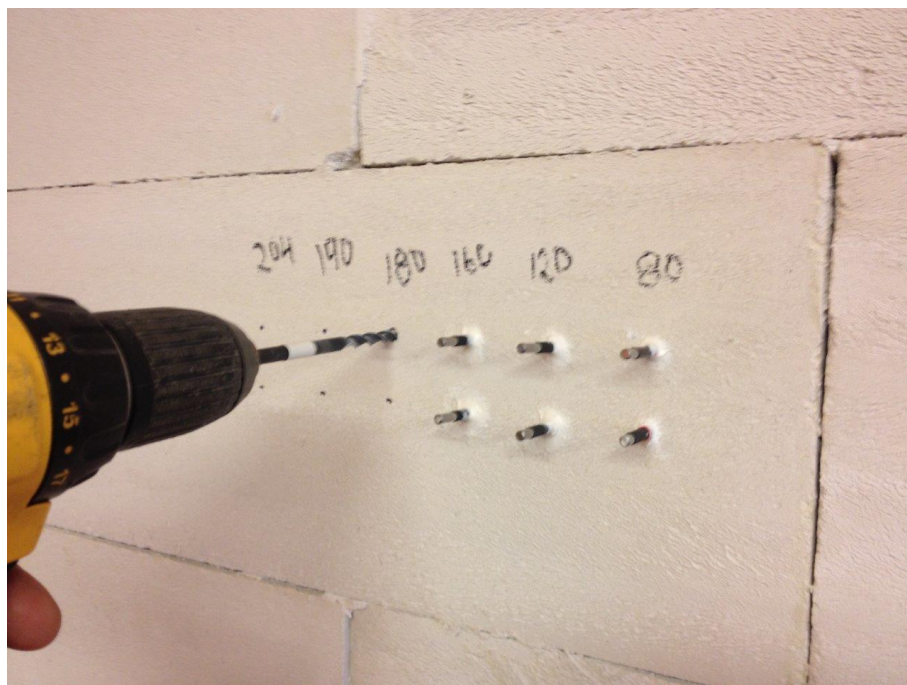


Foto 10. Förborring inför montering av elektroder.

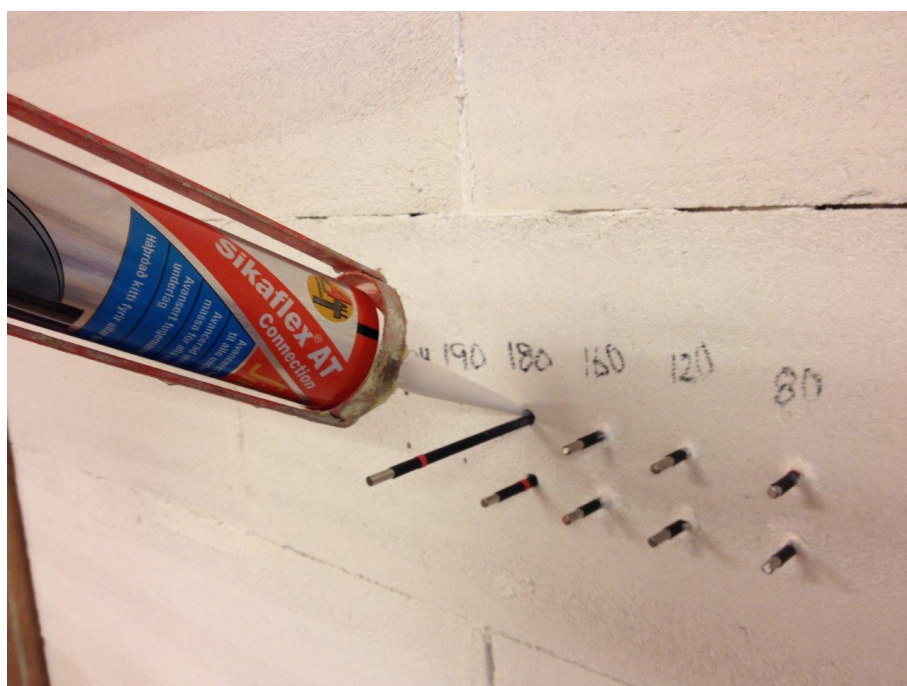


Foto 11. Tätning av elektroder med fogmassa.



Foto 12. Inslagning av elektroder.

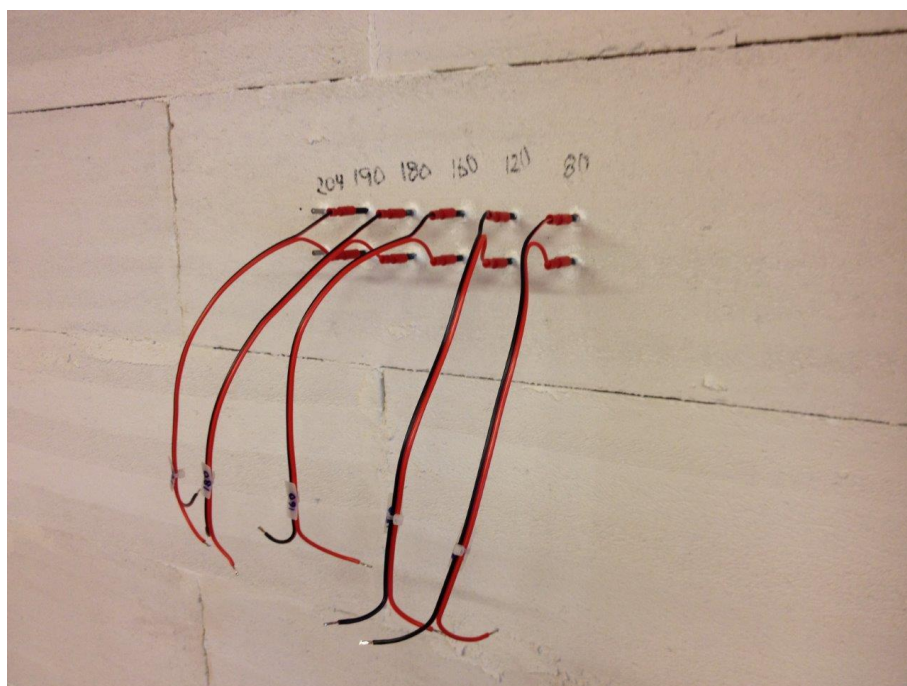


Foto 13. Sladdar monterade på elektrodena.



Foto 14. Elektrospetsar som ska finnas i putsen.

4 RESULTAT

4.1 JÄMVIKTSFUKTKVOTER

Jämviktsfuktkvoterna för lättbetong och puts på våta underlag redovisas i Diagram 1-4.

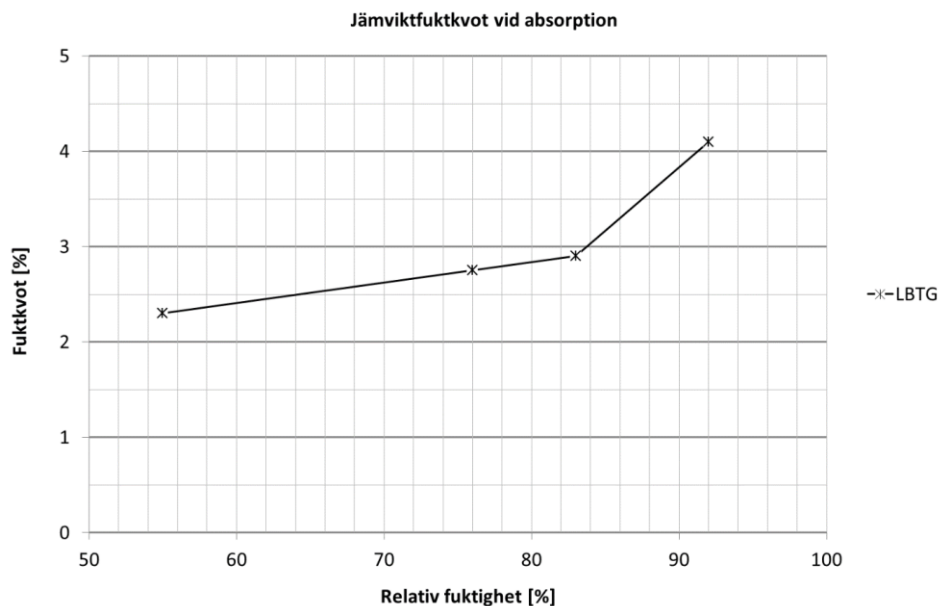


Diagram 1. Jämviktsfuktkvot för lättbetongen, absorption.

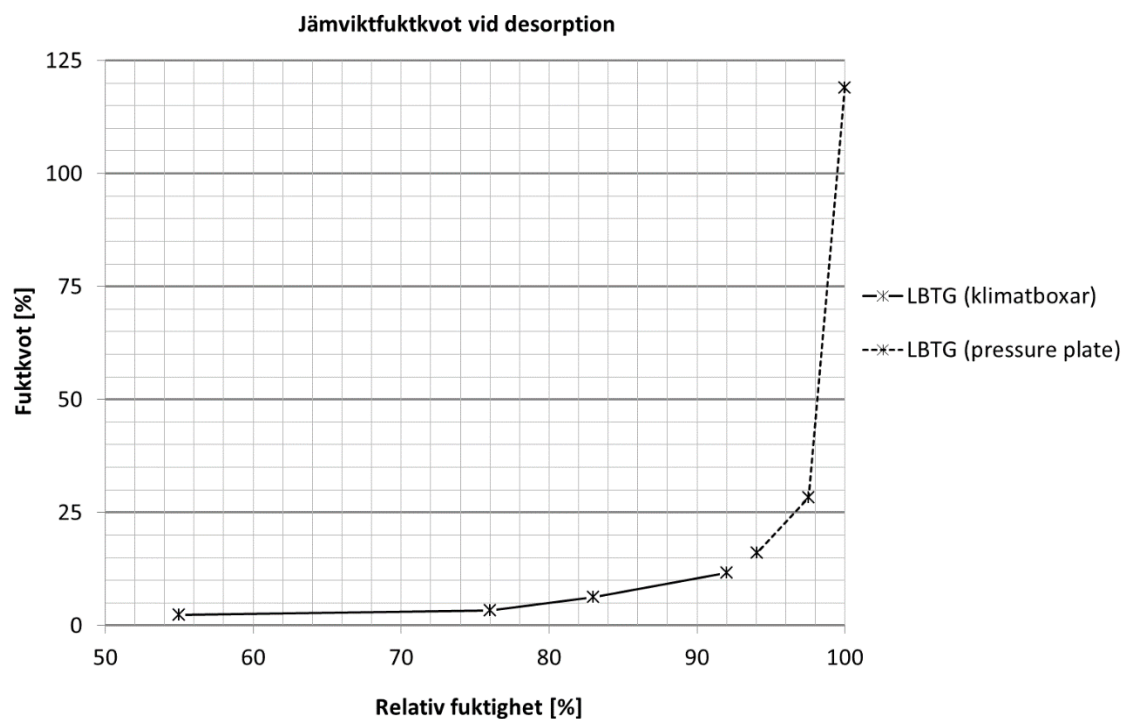


Diagram 2. Jämviktsfuktkvot för lättbetongen, desorption.

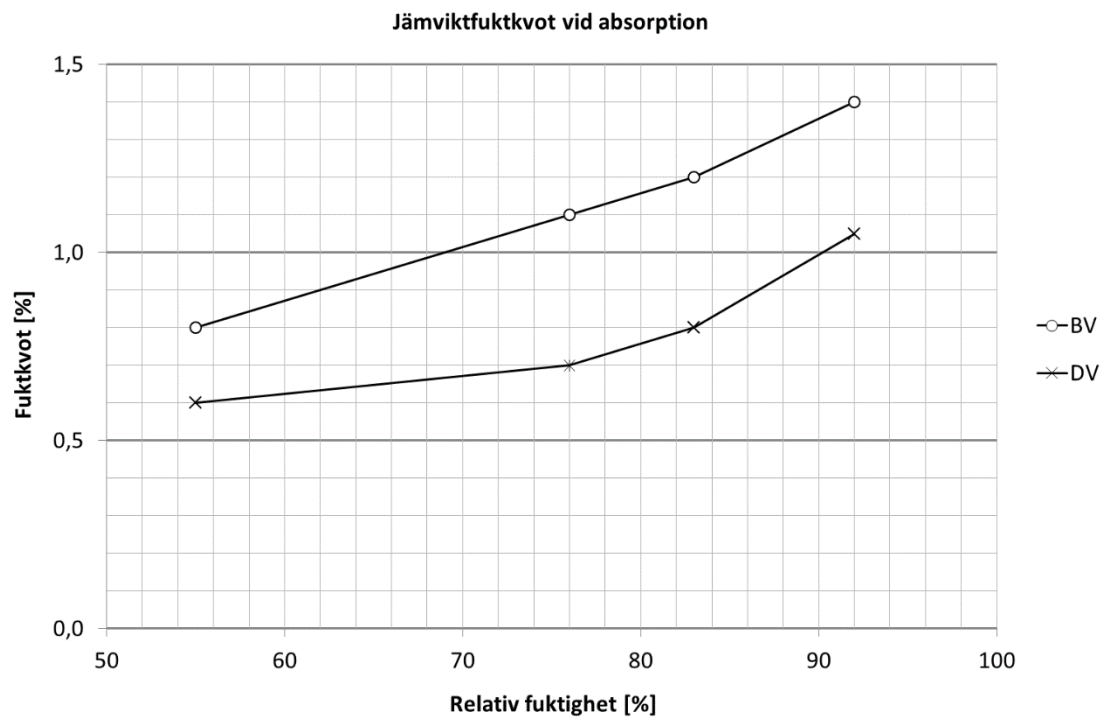


Diagram 3. Jämviktsfuktkvot för putser som applicerats på våta underlag, absorption.

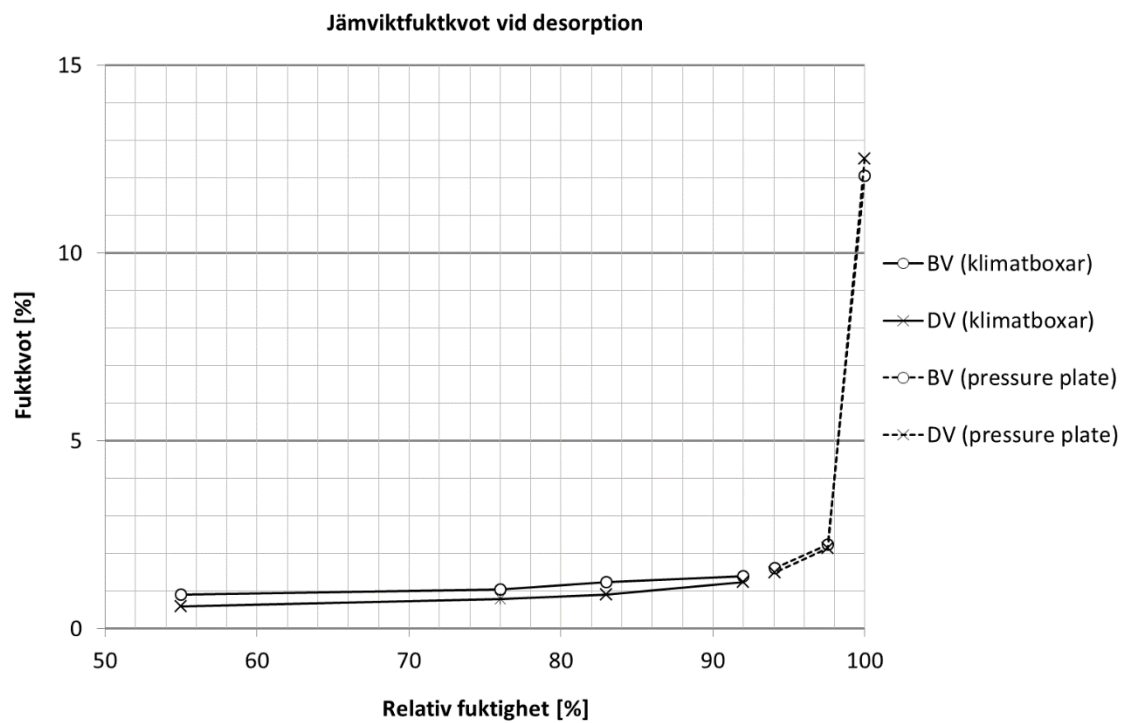


Diagram 4. Jämviktsfuktkvoter för putser som applicerats på våta underlag, desorption.

Som förväntat ligger B-kurvorna högre än D-kurvorna. Det är dock inte speciellt stor skillnad.

Det är mycket god anpassning mellan klimatboxar och pressure plate. Mätmetoden visade sig mycket bra och skall användas i fortsättningen. Mätning av desorptionskurvorna i pressure plate pågår.

Nästa steg blir att utveckla nya bruk där skillnaden mellan de olika bruken är väsentligt större. Härefter körs nya mätningar för att kunna välja ut optimala bruk för fullständiga mätningar av andra egenskaper.

4.2 FUKTRANSPORTKOEFFICIENTER I DET HYGROSKOPISKA OMRÅDET

Fukttransportkoefficienterna (ånggenomsläppligheten) uttryckt m^2/s redovisas i Tabell 1. Angivna värden avser medelvärden av de båda proverna.

Tabell 1. Ånggenomsläppligheten ($10^{-6} m^2/s$).

	76-58 % RF	83-58 % RF	91-58 % RF
Lbtg	3.5	4.3	---
DT	1.3	1.4	1.4
DV	1.0	1.2	0.9
BT	0.6	0.6	0.5
BV	1.1	1.2	1.3

Som synes är de uppmätta värden i några fall ologiska. Detta gäller främst DV vid 91-58 % RF. Någon förklaring till detta finns inte.

Det är även anmärkningsvärt att D-bruket på vått underlag har lägre ånggenomsläpplighet än samma bruk på torrt underlag. För B-bruket gäller motsatsen, vilket var förväntat. Putsar man på ett vått underlag härdar nämligen bruket med ett visst vattenöverskott, vilket ger ett "extra porsystem". En möjlig förklaring till att D-bruket uppvisar motsatsen är att ett kalkbruk inte härdar innan allt överskottsvatten avgått. Detta bruk får då mer tid att "komprimera sig". B-bruket med cement härdar däremot direkt, innan överskottsvattnet hinner avgå.

4.3 FUKTRANSPORTKOEFFICIENTER I DET ÖVERHYGROSKOPISKA OMRÅDET

Syftet med provningen var att finna ett samband mellan kapillaritetskoefficienten ($k kg/m^2vs$) och den kapillära mättnadsgraden (KMG). Försöken har utvärderats genom att först rita upp sambandet mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten av tiden för de olika KMG. Alla dessa kurvor (100 st) visas inte. Här visas endast några exempel för att visa principen. För den som är intresserad finns samtliga diagram hos Peter Johansson på Byggnadsmaterial. I Diagram 5-9 visas de principiella sambanden för några olika KMG. Observera att den slutliga utvärderingen bygger på alla 100 provningar.

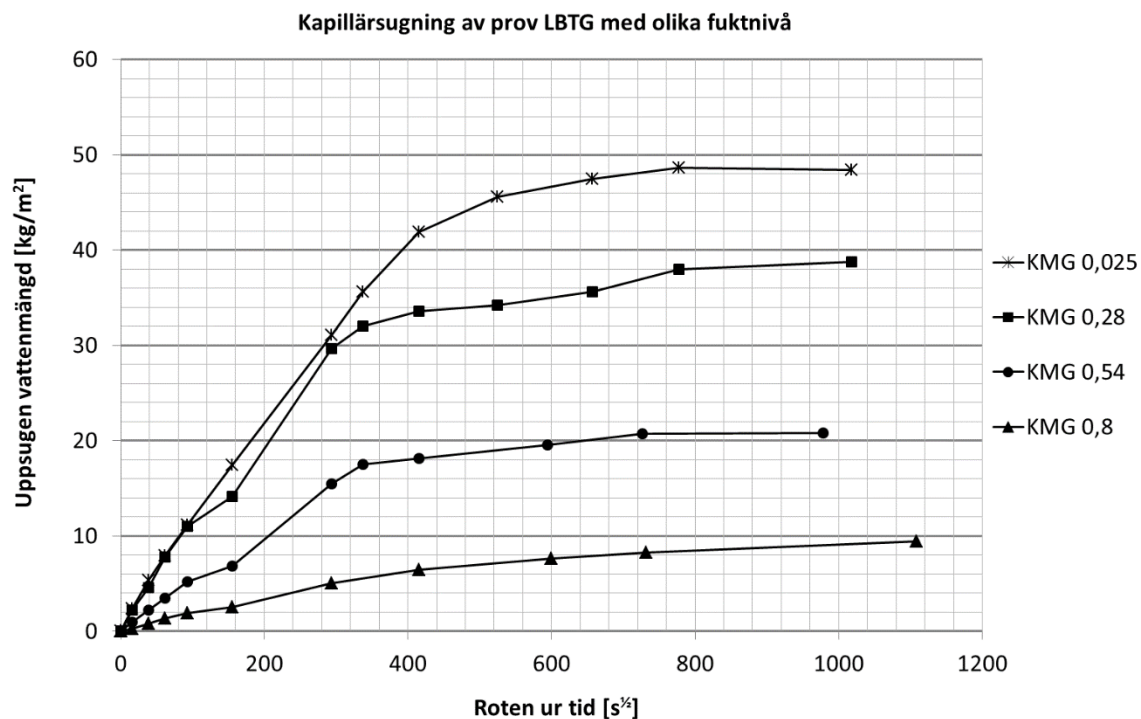


Diagram 5. Samband mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten ur tiden för några enskilda prover med lättbetong.

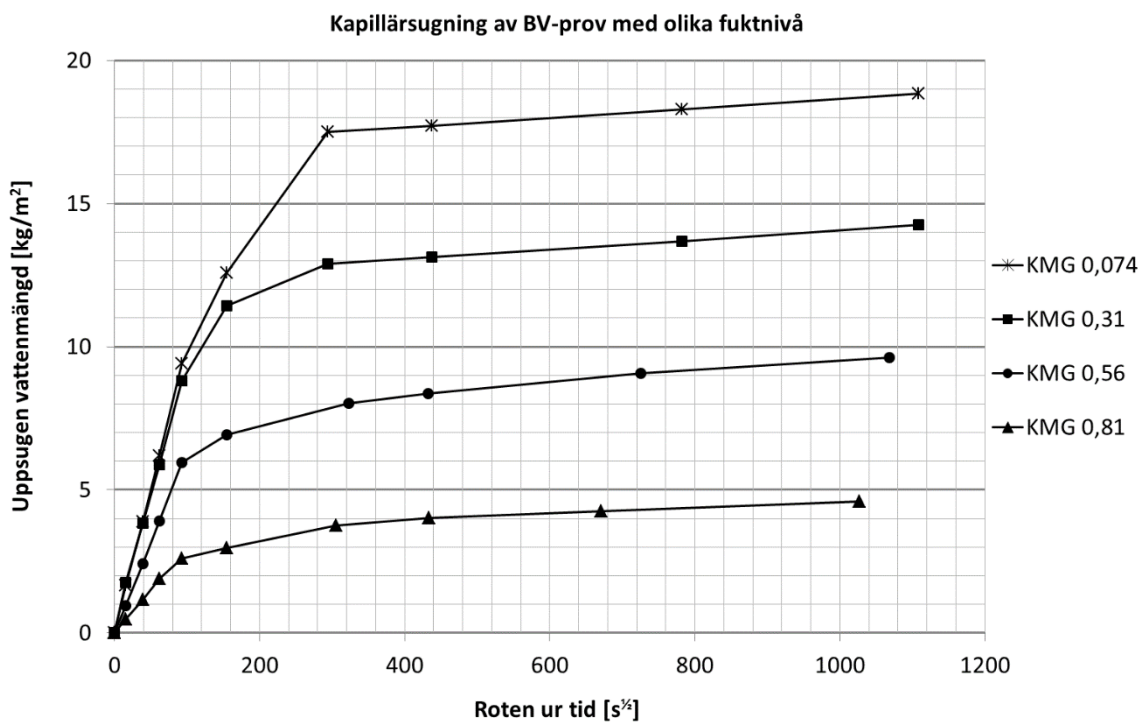


Diagram 6. Samband mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten ur tiden för några enskilda prover med bruket BV.

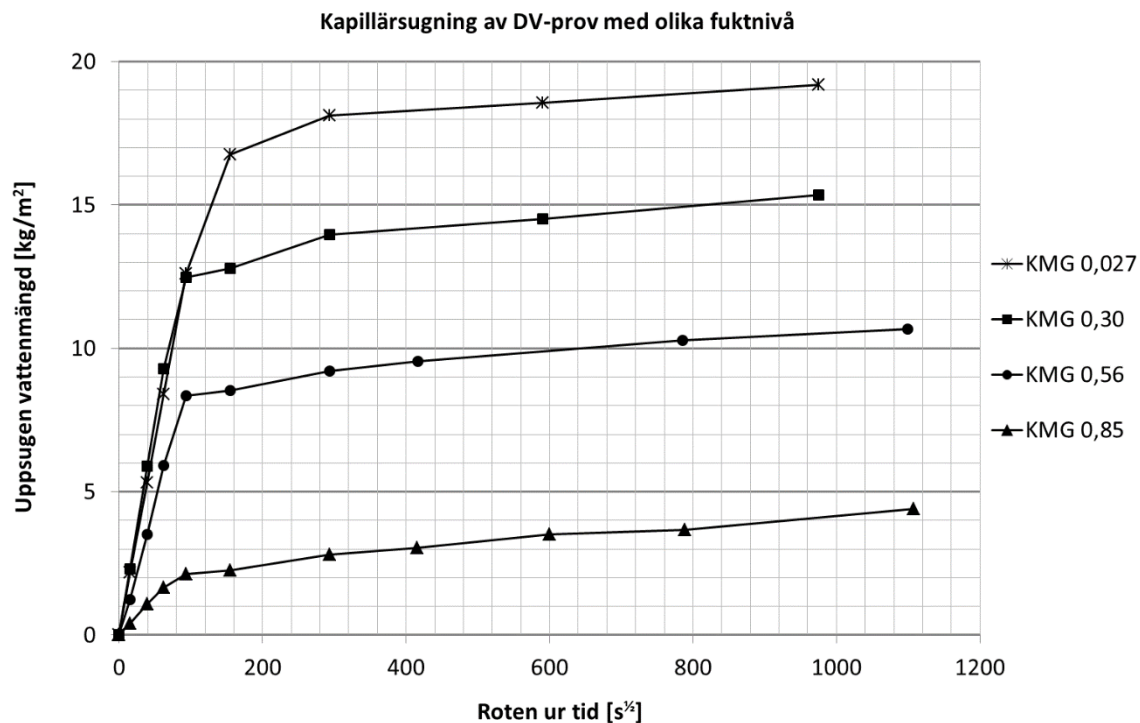


Diagram 7. Samband mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten ur tiden för några enskilda prover med bruket DV.

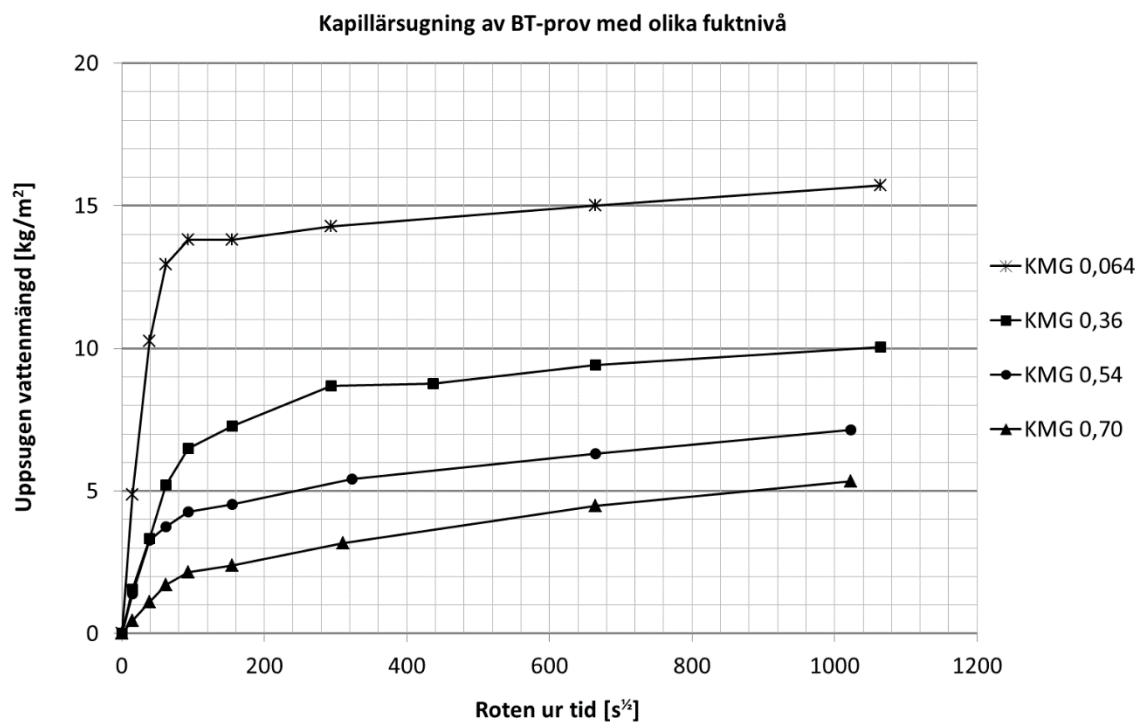


Diagram 8. Samband mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten ur tiden för några enskilda prover med bruket BT.

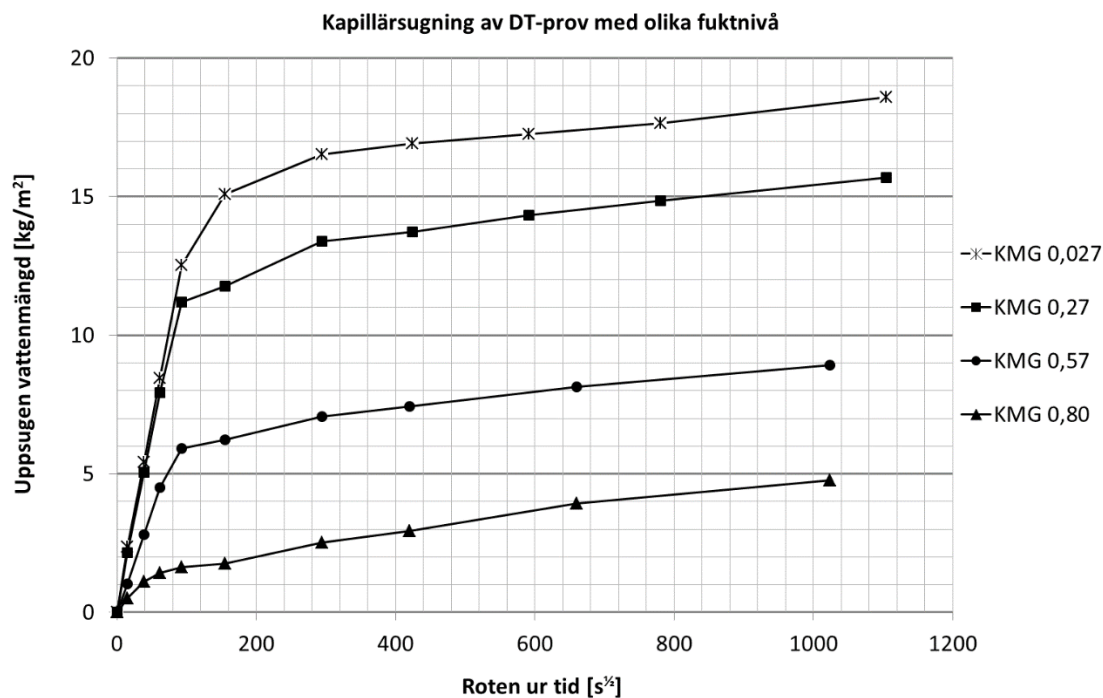


Diagram 9. Samband mellan uppsugen vattenmängd och kvadratroten ur tiden för några enskilda prover med bruket DT.

Härefter har kapillaritetskoefficienten bestämts som lutningen på den första räta linjen. Resultaten för samtliga prover redovisas i Diagram 10.

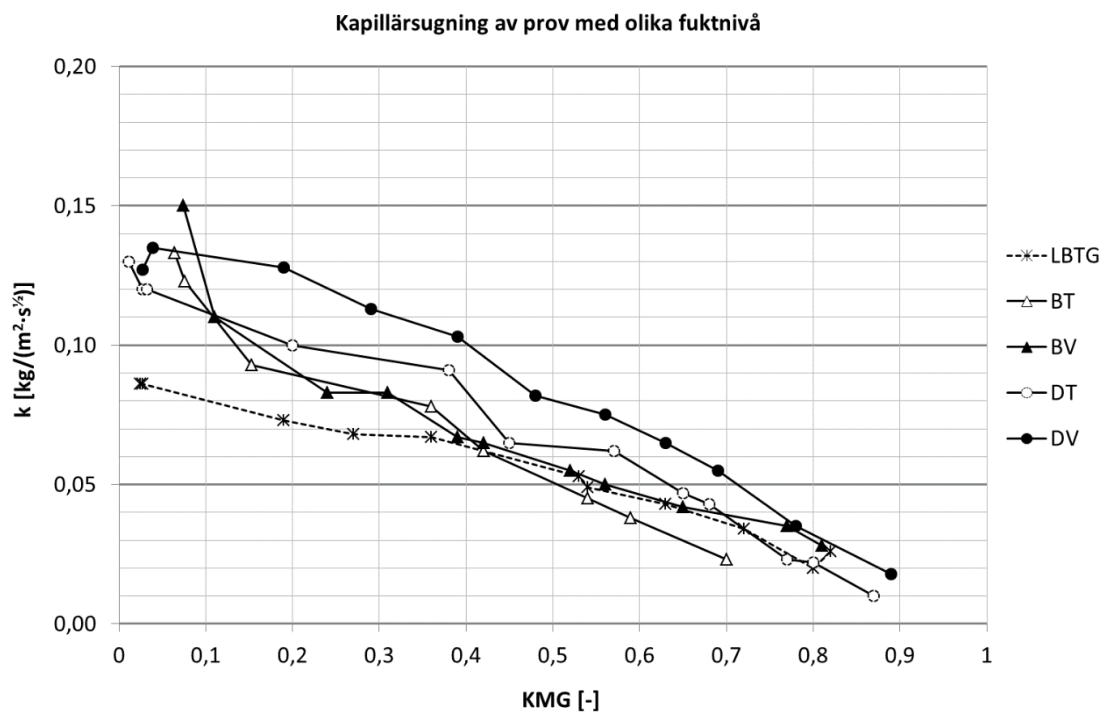


Diagram 10. Kapillaritetskoefficient som funktion av KMG för alla prover.

Det principiella utseendet på kurvorna i diagram 5-9 är helt förväntat, med ökande KMG avtar kapillaritetskoefficienten. Jämför man de båda putstyperna framgår att skillnaden är mycket liten.

Enligt diagram 10 ligger D-kurvorna högre än B-kurvorna, vilket också är förväntat. Skillnaden är dock relativt liten. Skillnaden mellan putser på våta underlag och torra underlag är liten.

Mätmetoden verkar bra och kommer att användas i fortsättningen på nyutvecklade bruk.

4.4 FUKTACKUMULATION VID CYKLISK FUKTBELASTNING/UTTORKNING

Resultaten för provningarna med 2 kg/m^2 alternativt 2 timmars vattenbelastning följt av 2 dygns uttorkning redovisas i Diagram 11. Motsvarande provning med 4 kg/m^2 alternativt 4 timmars vattenbelastning följt av 2 dygns uttorkning redovisas i Diagram 12.

Det ska påpekas att uttorkningstiden 2 dygn inte kunde följas av praktiska skäl.

Provningarna med 7 dygns uttorkning redovisas inte eftersom dessa i stort sett hann torka ut helt mellan uppfuktningarna.

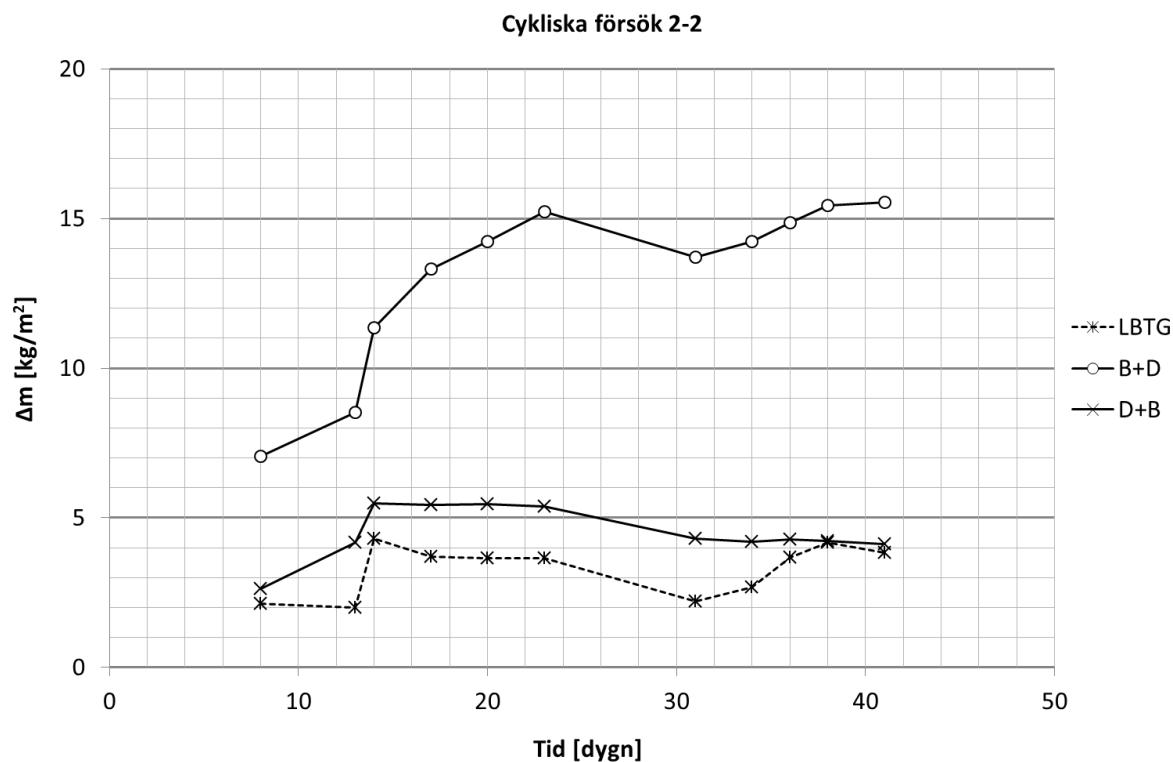


Diagram 11. Fuktupptagning vid cyklisk fuktbelastning 2 kg/m^2 alt 2 timmars kapillärsugning följt av 2 dygns uttorkning.

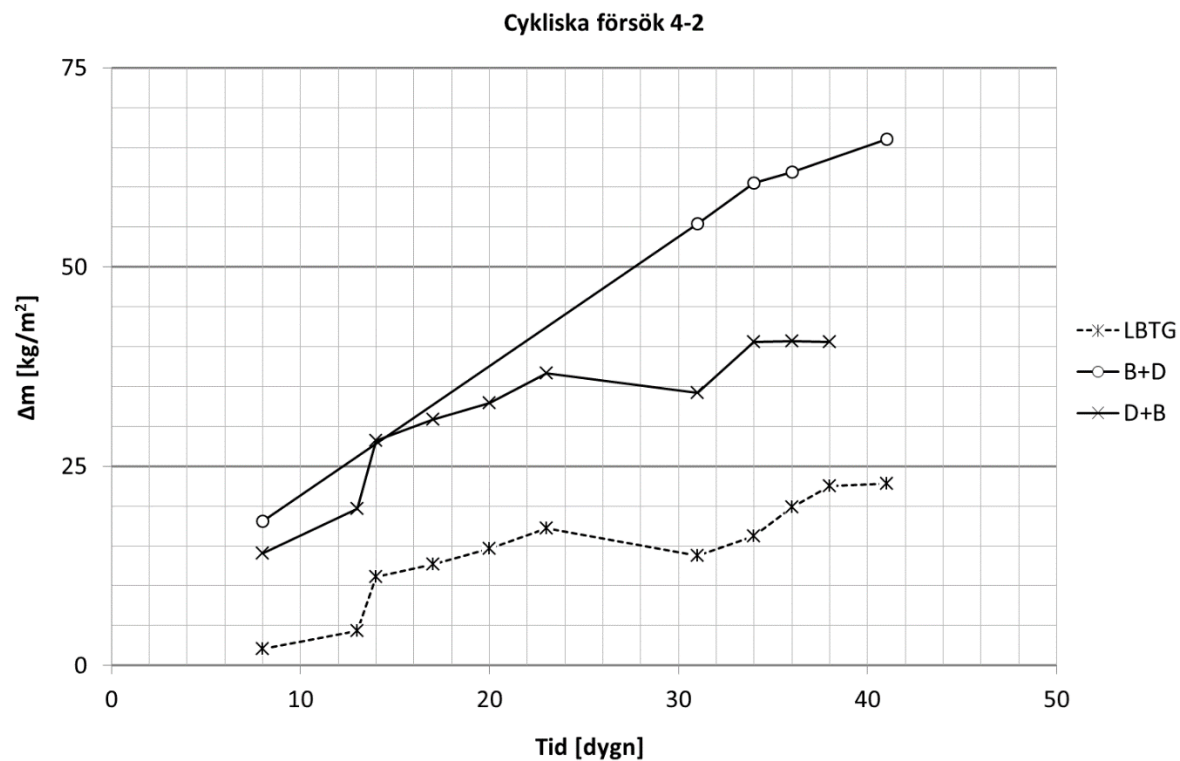


Diagram 12. Fuktupptagning vid cyklisk fuktbelastning 4 kg/m^2 alt 4 timmars kapillärsugning följt av 2 dygns uttorkning.

Efter 1½ månad avbröts de cykliska försöken och fuktprofilerna bestämdes genom uppsågning och uttorkning vid 105°C . Resultaten redovisas i Diagram 13-14.

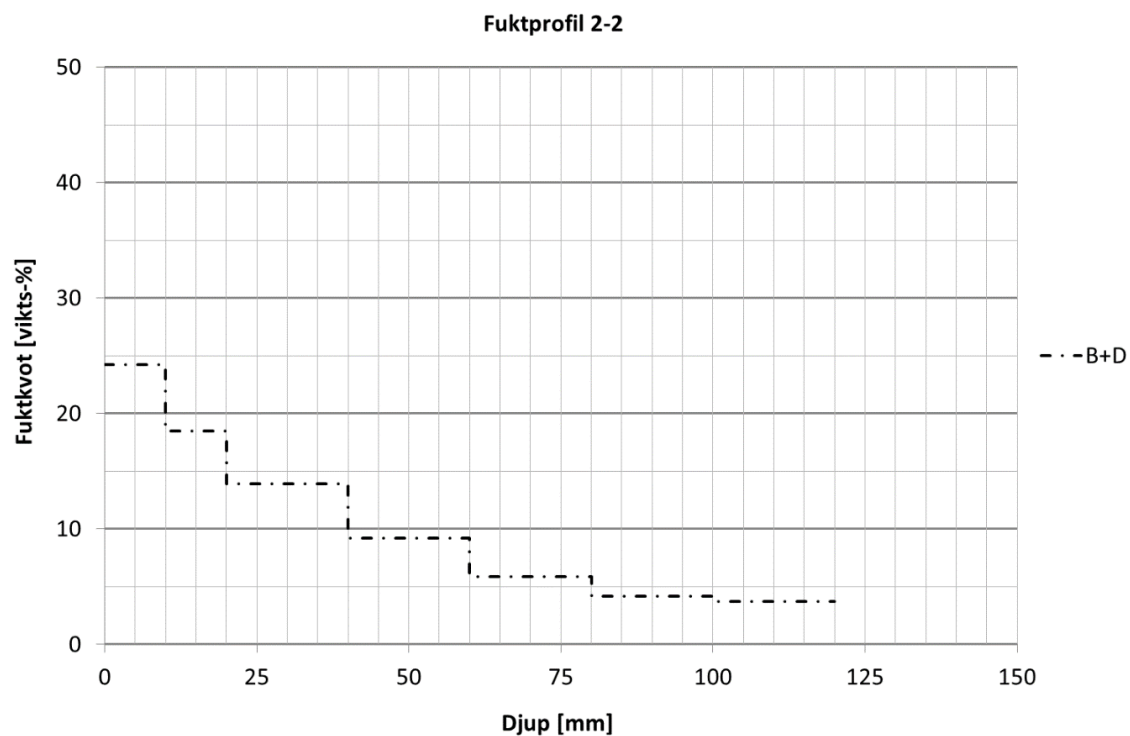


Diagram 13. Fuktprofil när försöken avslutades, fuktbelastning 2 kg/m^2 alt 2 timmars kapillärsugning följt av 2 dygns uttorkning.

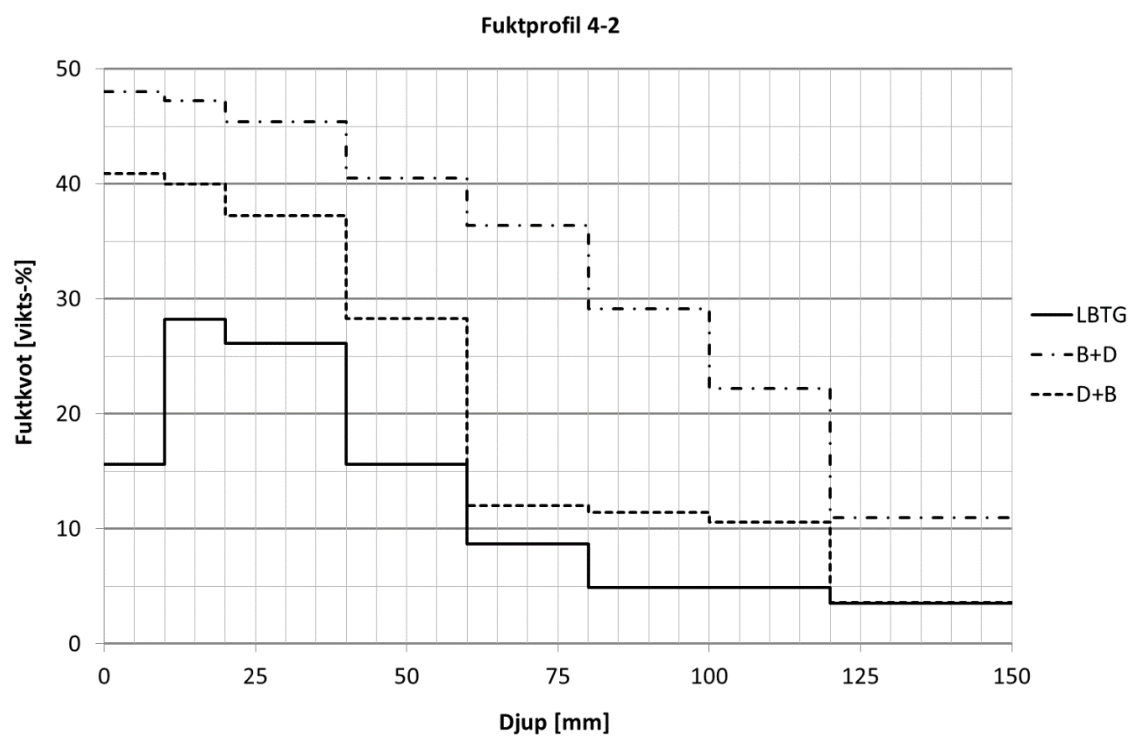


Diagram 14. Fuktprofil när försöken avslutades, fuktbelastning 4 kg/m^2 alt 4 timmars kapillärsugning följt av 2 dygns uttorkning.

Resultatet visar att tankarna bakom hela projektet är riktiga. Lättbetong utan puts förblir torrast. Putssystemet med den grovporösa putsen närmast underlaget medför att underlaget förblir väsentligt torrare än med det traditionella systemet med en finporös puts längst in och en grovporös puts längst ut. Trots att skillnaderna i fuktegenskaper är mycket små mellan de båda bruken blir skillnaden i fuktackumulation mycket stor. Som exempel kan nämnas att enligt diagram 11 ligger slutvärdena för B+D 4 gånger högre än för D+B. I diagram 12 har B+D inte nått jämvikt utan ökar ständigt. D+B är däremot i stort sett i jämvikt. När försöken avslutades var fuktupptagningen i B+D dubbelt så stor som i D+B. Vid jämvikt kan skillnaden förväntas vara väsentligt större.

I samtliga fall är fuktupptagningen mindre i lättbetong utan puts. Genom att utveckla nya bruk med större skillnad i fuktegenskaper torde det vara möjligt att åstadkomma torra väggar även med puts.

Det är en stor utmaning för brukstillverkarna att ta fram bruk med större skillnad i fuktegenskaper. Det torde inte krävas speciellt omfattande tester i detta sammanhang. Det torde i ett initialskede räcka med jämviktsfuktkvoter och fukttransportkoefficienter. Omfattningen behöver inte vara lika stor som i den nu gjorda undersökningen. Mindre än hälften torde med råge vara tillräcklig.

I de fortsatta undersökningarna ska ytterligare försök göras med cyklisk uppfuktning/uttorkning. Dessa kommer att begränsas till en fuktbelastning och en uttorkningstid. En rimlig kompromiss är en fuktbelastning 3 kg/m^2 eller 3 timmars kapillärsugning och 2-3 dygns uttorkning. När jämvikt nåtts kan cykeln ändras. Enbart prover som applicerats på vått underlag testas. Orsaken till att provningarna begränsas är att de är mycket tidskrävande och "stressande".

4.5 FULLSKALEFÖRSÖK

Fullskaleförsöken har inte startat på allvar ännu. Putsningen har inte gjorts. Hittills har väggarna bara murats upp och fukttillståndet har registrerats genom mätningar med de inmonterade elektroderna. För att få ett mer exakt fukttillstånd måste dessa värden kalibreras genom uttagning av prover för bestämning av fuktkvot. Vidare måste erhållna värden korrigeras med hänsyn till temperaturen. Detta har inte gjorts hitintills. I framtida mätningar ska detta ske.

En logger har installerats för att i detalj kunna registrera fuktförloppen i samband med regn. Dessa mätningar ska sedan jämföras med teoretiska beräkningar.

5 SAMMANFATTANDE KOMMENTARER

Resultaten visar att tankarna bakom hela projektet är riktiga och att finns en stor potential för att utveckla putssystem som ger en torr vägg. Putssystemet med den grovporösa putsen närmast underlaget medför att väggen blir väsentligt torrare än med det traditionella systemet med den finporösa putsen närmast underlaget.

Trots att skillnaderna i fuktegenskaper är mycket små mellan de båda bruken blir skillnaden i fuktackumulation mycket stor. Med större skillnad i fuktegenskaper blir skillnaden i fuktackumulation ännu större. Det ultimata är ett system som ger en helt torr vägg. Detta är en stor utmaning för brukstillverkarna.

I fortsättningen planeras ytterligare cykliska försök med samma putser som använts i hittills genomförda försök. Andra fuktbelastningar och uttorkningstider ska då väljas.

Vidare planeras att utveckla andra bruk där skillnaderna i fuktegenskaper kan förväntas vara större. De fuktegenskaper som främst ska analyseras är pressure plate och kapillärsugning vid olika KMG. Att vi till en början endast testat dessa egenskaper beror på att vi vill testa flera bruk. Att mäta alla egenskaper på många bruk skulle bli helt ohanterligt. I ett senare skede väljs ett mindre antal bruk ut för en fullständig bestämning av alla fuktegenskaper. Vidare bör antal provningar begränsas genom att enbart ha prover som applicerats på våta underlag.

När ovanstående är klart bör 2 bruk med stora skillnader väljas för att genomföra cykliska försök.

Samtidigt med ovanstående genomförs parameterstudier och fullskaleförsöken fortsätter. Väggarna ska putsas med de i hittills utförda undersökningar använda bruken.