

Havemuren omkring Marienlyst Slotspark _____

Undersøgelser af ny puds på ældre murværk 2014 - 2020

Målinger på Sektionen for materialer og holdbarhed - BYG - DTU

Fysiske egenskaber og fugtmodellering

Anders Nielsen

I forbindelse med forsøgsprojektet på havemuren omkring Marienlyst slotspark er der blevet udført to diplomingeniørprojekter på DTU-Byg med det overordnede formål at vurdere risikoen for udvikling af frostskafer på muren ((1) og (2)).

I projekterne er der blevet målt på de anvendte materials fugtparametre, og det er blevet vist, at det ved hjælp af regneprogrammet DELPHIN er muligt at simulere indvirkningen af pudslagets tykkelse og klimaet på fugtbevægelserne.

Desuden er der blevet målt kapillarsugning på alle de pudsede overflader ved hjælp af den såkaldte Karsten tube ((3))

Til slut er vist en sammenstilling af betydningen af fugtledningstallene for fugttransporten i de forskellige felter.



Densitet og porøsitet

Der er blevet udtaget prøver af mursten og mørtelfuger fra en del af prøvefelterne, af referencemuren og fra bagsiden af muren ((1) og (2)).

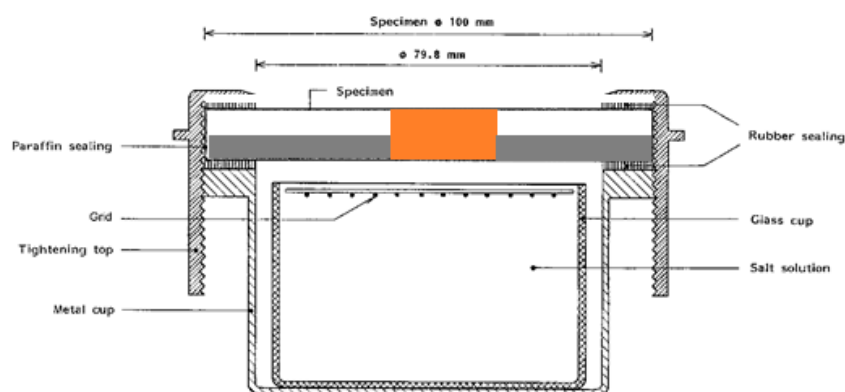
Teglstens og fugemørtels densitet og porøsitet				
Materiale	Densitet, kg/m ³		Åben porøsitet, %	
	Middelværdi	Spredning	Middelværdi	Spredning
Teglsten, 8 prøver	1825	58	31	2,4
Hårdbrændt tegl, 4)	1800	-	30	-
Fuger, kalkmørtel, 5 pr.	1943	50	26	1,9
Kalkmørtel, 4)	1850	-	30	

Tallene viser, at der er brugt teglsten af god kvalitet og kalkmørtel med højt kalkindhold.

Vanddamppermeabilitet

Der er blevet udtaget prøver af teglstenene og af pudsmaterialerne på en del af prøvefelterne og på referencefeltet til måling af materialernes vandpermeabilitetskoefficient.

Målingerne er blevet udført på udstyr på DTI Byg som opfylder DS/EN ISO 12572:2001, "Bestemmelse af vanddamprtransmissionsegenskaber", også kaldet kopmetoden. Prøvelegemet placeres som låg i en kop, hvori der er en mættet opløsning af kaliumnitrat (KNO_3), hvilket giver en relativ luftfugtighed (RF) på 93%. Koppen placeres i et klimaskab, hvor der er 23°C og 75% RF. Vandet fordamper ud gennem prøven drevet af damptryksforskellen. Vægttabet plottes i et diagram som funktion af tiden. Når vægttabet er blevet konstant anvendes hældningen til at beregne damppermeabilitetskoefficienten.



Snit gennem kop til bestemmelse af damppermeabilitetskoefficienten.



De udtagne prøver var mindre end 100 mm. Derfor var det nødvendigt at støbe dem ind i epoxy, så de kunne passe i kopperne. Arealet af den enkelte prøve blev målt op og brugt i beregningerne.

Damppermeabilitet						
	Felt-nummer	Kop-nummer	Materiale	Damppermeabilitet 10 ⁻¹² [kg/Pa.m.s]		
Hydraulisk kalk	1	1	St. Astier1, Hydraulisk Kalk,	8,7	8,0	8,1
	1	2	St. Astier1, Hydraulisk Kalk,	7,2		
	4A	9	Hydraulisk kalkmørtel 1 (KKh)	5,6	5,3	
	4A	10	Hydraulisk kalkmørtel 2 (KKh)	4,9		
Luftkalk	3 venstre	6	20% læskemørtel og filtsning med teglgrus, K 100/400	7,0	5,9	
	3 ved fugtm.pkt	7	20% læskemørtel, K 100/400	4,7		
	4B	11	12% kulekalksmørtel, K 100/750	18,9		
Kalk-cement-mørtel	Ref. for	16	Kalkcementmørtel 1	2,0		4,8
	Ref. for	17	Kalkcementmørtel 2	5,2		
	Ref. bag	18	Kalkcementmørtel 3	7,1		
Teglsten	5	20	Teglsten	11,4		11,3
	5	21	Teglsten	11,3		

Gennemsnittallene til højre i skemaet blev brugt til at vælge parametre til Delphin-fugtsimuleringen.

Kapillarsugning målt med Karsten tube

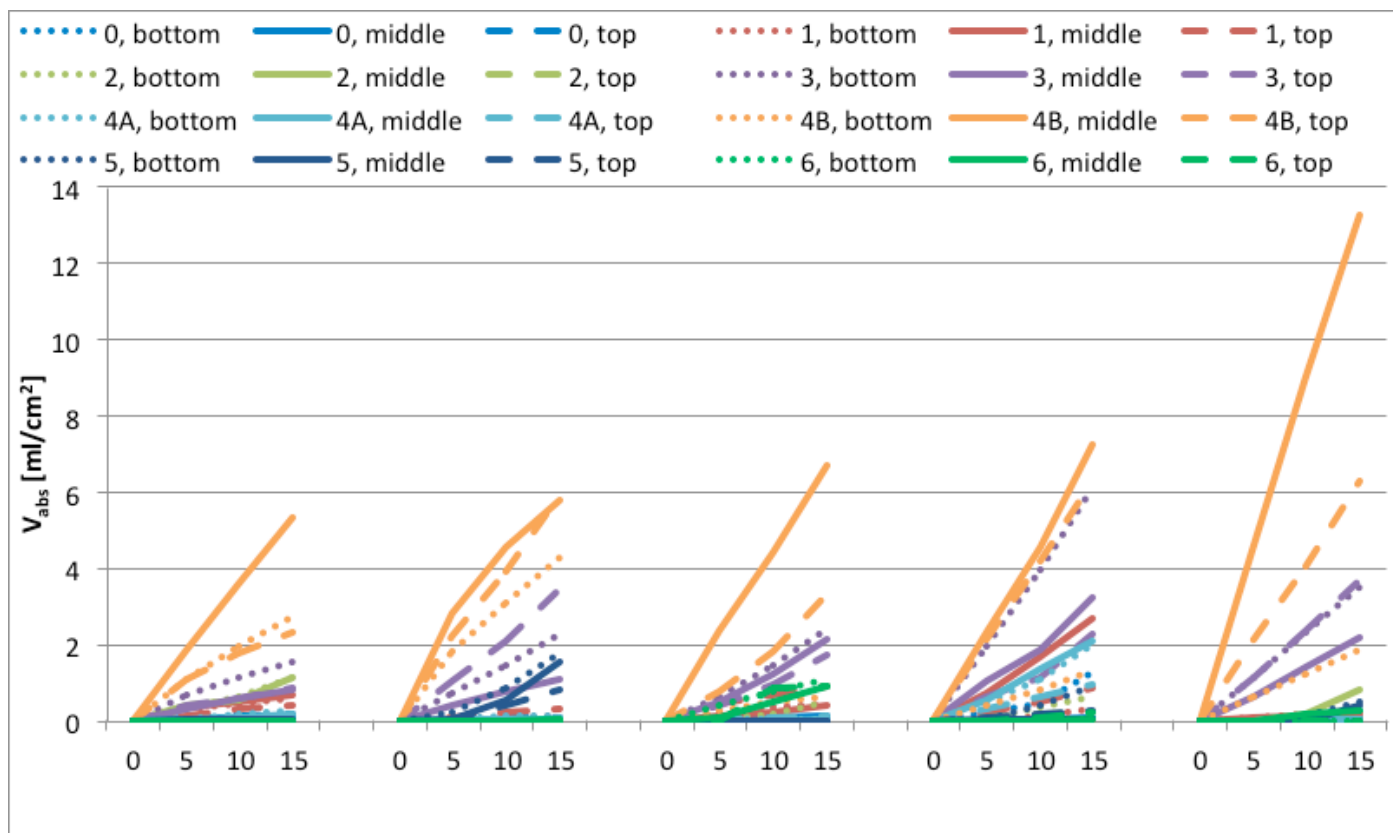
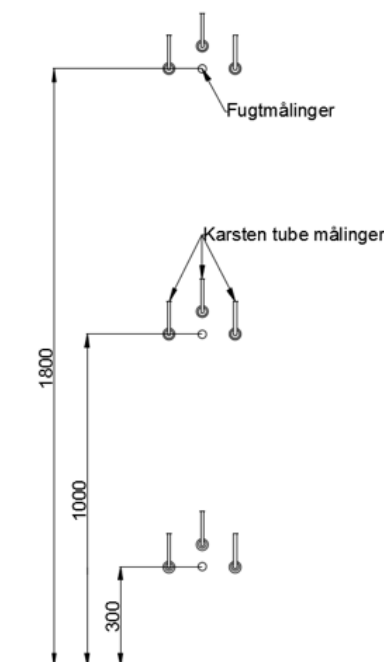
Prøvefelternes kapillarsugningsevne blev vurderet ved hjælp af den såkaldte Karsten tube (3)).



Karsten tube er et vinkelformet graderet glasrør, som hæftes til pudsoverfladen med modellervoks (t.v.). Der hældes vand i røret og indsugningen aflæses på det graderede rør efter 5, 10 og 15 minutter.

Målingerne udføres på alle 6 prøvefelter samt på den originale puds (0/reference). Prøvefelt 4 er opdelt i felt A og B. På alle prøvefelter udføres målinger i 3 højder; 0,3m, 1m og 1,8m; det er de samme højder, hvor der måles fugtprofil. I disse højder måles der 3 gange; resultaterne for hver højde er gennemsnit af disse tre målinger.

Der blev målt 3 gange i 2015 og to gange i 2016. Samtlige måleresultater ligger bag optegningen af figur 1. - Efter de fem målegange afsluttedes måleserien, idet det ikke var til at se nogen tidsmæssig ændring i måleresultaterne. Det virker, som om den klimamæssige påvirkning, som pudsoverfladerne er udsat for lige inden målingen, er bestemmende for udfaldet.

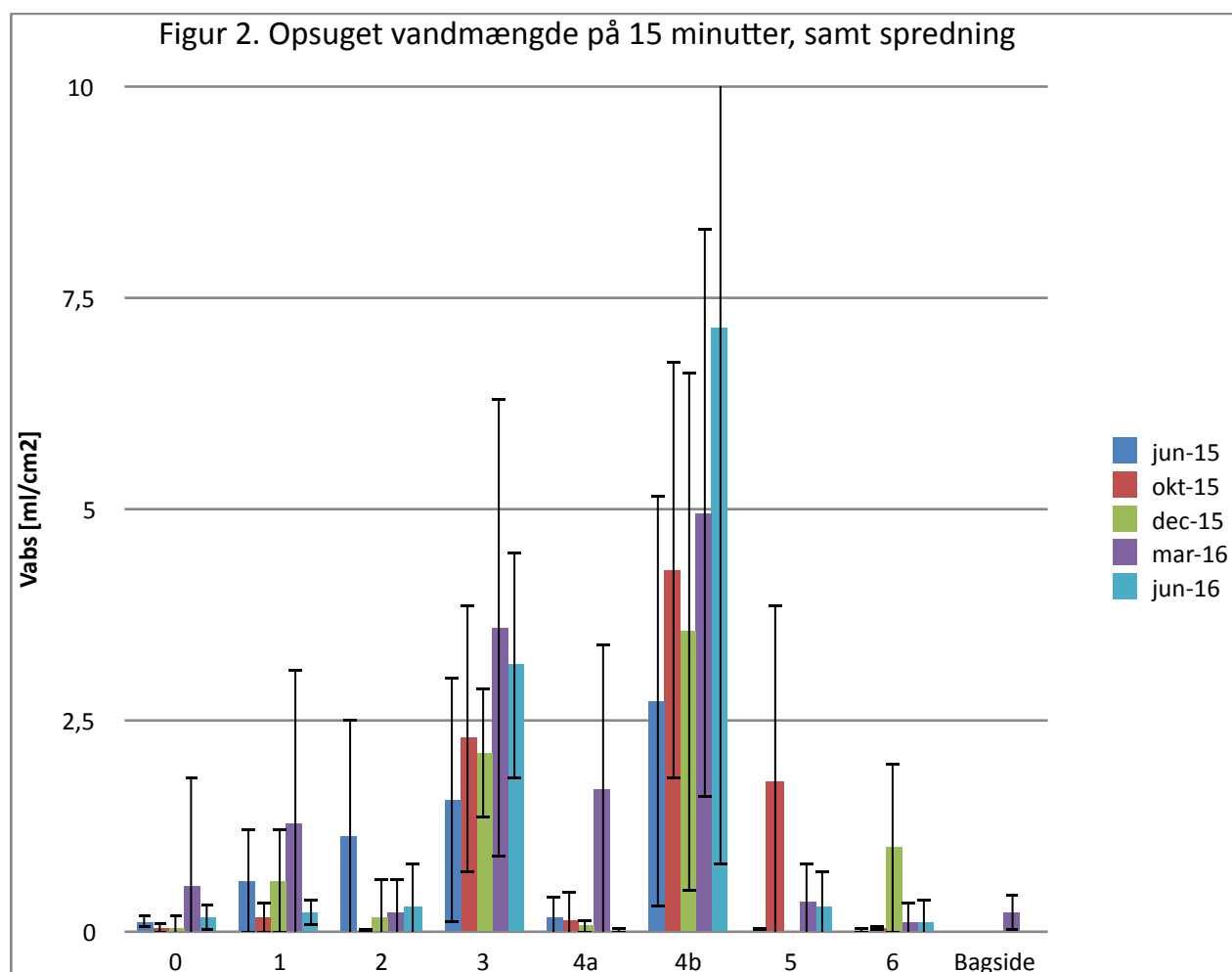


Figur 1. Resultatet af alle Karsten tube målinger.

For at sammenligne de enkelte pudstyper er opsigningen efter 15 minutter samlet i tabel 1 og optegnet i figur 2.

Tabel 1: Opsuget vandmængde på 15 minutter, samt spredning

Indsuget vandmængde på 15 min, V_{abs} [ml/cm ²]								
Dato	Feltnummer							
	0	1	2	3	4a	4b	5	6
19-06-2015	0,11±0,08	0,6±0,62	1,13±1,37	1,56±1,44	0,18±0,24	2,73±2,45	0,03±0,02	0,02±0,04
02-10-2015	0,05±0,05	0,18±0,19	0,01±0,01	2,29±1,6	0,14±0,32	4,27±2,47	1,76±2,12	0,04±0,04
11-12-2015	0,05±0,13	0,6±0,62	0,16±0,48	2,11±0,78	0,07±0,08	3,56±3,07	0±0	0,99±1,02
04-03-2016	0,52±1,31	1,29±1,8	0,24±0,39	3,6±2,72	1,68±1,74	4,96±3,36	0,35±0,45	0,11±0,23
19-06-2016	0,17±0,16	0,23±0,17	0,3±0,5	3,15±1,34	0,02±0,03	7,14±6,37	0,29±0,44	0,1±0,29



På figur 2 er også plottet målinger fra (1) af sugningen på murens bagside, hvor der fra ældre tid er pudset med en meget cementsholdig puds, den samme, der er anvendt på referencefeltet. Målingerne de to steder er på samme lave niveau.

Af figuren ses, at det er materialerne på felt 3 og felt 4b, som suger mest. Det er begge pudstyper, hvor bindemidlet er luftkalk.

Simulering af fugtbevægelserne

DELPHIN er et simuleringsprogram til at beregne den kombinerede transport af varme, fugt og stof i porøse bygningsmaterialer. Programmet er udviklet ved instituttet Bauklimatik Dresden. Det kan anvendes til beregning af kuldebroer og optræden af kondens i eksisterende konstruktioner og til udvikling og dimensionering af nye konstruktioner.

I projektet "Fugt i havemur" (2)) anvendes DELPHIN 5 (version 5.8.3) til at modellere 1D simuleringer i horisontalt plan for fugt- og varmebevægelserne i en eksisterende havemur, med det formål at sammenligne med resultatet af Poul Klens Larsens fugtmålinger, og for at vurdere, om der er risiko for frostskafer i murværket.

DELPHIN-modellen opbygges som en mur bestående af massivt tegl, uden lodrette og vandrette fuger. Der tilføjes pudslag på begge sider af enten 3 mm eller 10 mm tykkelse. Muren står med luft på begge sider. Der er således ikke jord på halvdelen af den ene side. Modellen udsættes nu for klimaet, som det veksler i forhold til DMI's målinger.

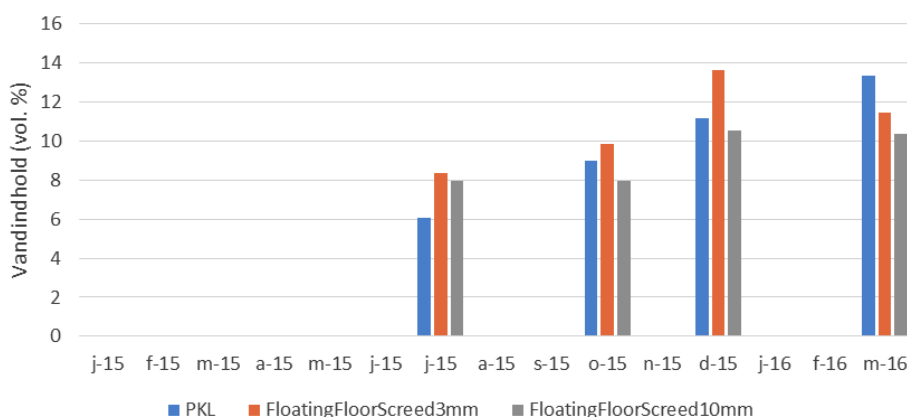
Af programtekniske grunde blev det valgt at arbejde med materialer, som allerede findes i i DELPHINs database. Her vælges tegl og mørtler, som mest muligt ligner materialerne i Marienlystmuren med hensyn til densitet, porøsitet og fugtparametre. I nedenstående tabel kan man sammenligne materialeparametrene for de virkelige og de i modellen anvendte materialer.

Udfaldet af simuleringen beregnes i m³ vand per m³ materiale, hvilket er den samme enhed, som anvendes i Poul Klens Larsens målinger.

Tabel. Sammenstilling af egne målinger af tørdensitet, porøsitet, μ -værdier og Martin Jensens (5)) målinger af kapillaritetstal mod Delphin-materialernes parametre.

Materiale	Densitet [kg/m ³]	Porøsitet [m ³ /m ³]	μ	Kapillaritetstal [kg/m ² s ^{0,5}]
Tegl [Marienlyst]	1825	0,31	17,35	0,195
Brick Joens [Delphin]	1790	0,36	14	0,227
Kalkmørtel [Marienlyst]	1943	0,26	24,06	-
Lime Plaster (historical) [Delphin]	1800	0,30	12	0,127
Kalkcementmørtel [Marienlyst]	1943	0,26	41,06	-
Floating Floor Screed [Delphin]	2060	0,265	25	0,08

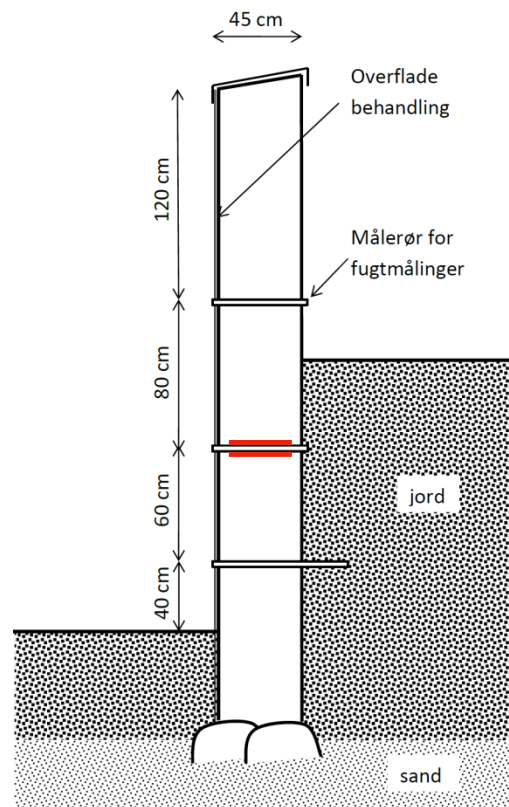
Der blev foretaget en sammenligning mellem DELPHIN-simuleringen og PKL's målinger på referencefeltet i 180 cm højde, 35 cm inde i muren. I den højde er fugten i murværket mere beroende på DMI's data, end af opsugningen fra jorden. I betragtning af de mange tilnærmelser og antagelser, der ligger bag opstillingen af beregningsmodellen, synes overensstemmelsen mellem måling og beregning af være tilfredsstillende. Der er simuleret med to tykkelser af den valgte puds, betegnet FloatingFloorScreed, 3 mm (rød) og 10 mm (grå). Det ses, som forventet, at den tynde puds lukker mest vand ind.



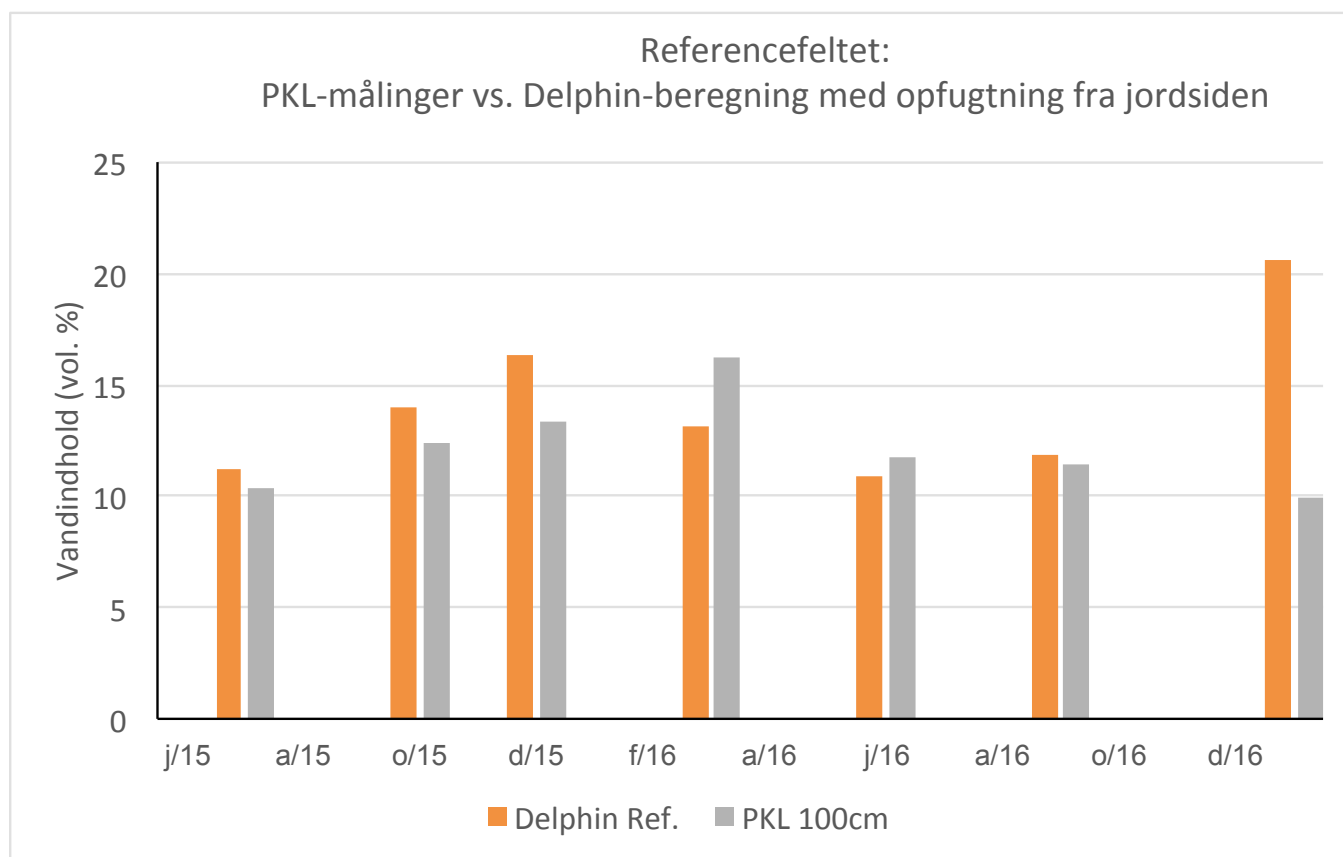
Efter at det blev klart fra PKL's målinger, at den største vandbelastning på muren kommer gennem jorden, har Qi de Zhao foretaget en Delphin-simulering på referencefeltet, hvor hele slagregnsbelastningen kommer fra bagsiden af muren, jf. figuren ovenfor.

Modellen beregner det samlede vandindhold i muren. Derfor er de beregnede vandindhold sammenstillet med gennemsnittet af PKL's målinger fra målestedet 100 cm over jorden, jf. figuren til højre.

Igen må det konstateres, at i betragtning af de mange tilnærmelser og antagelser, der ligger bag opstillingen af beregningsmodellen, synes overensstemmelsen mellem måling og beregning af være tilfredsstillende, bortset fra januar 2017. Der viser Delphin et højt vandindhold, hvad man må forvente da simuleringen er foretaget ud fra DMI's standarddata. - PKL's målinger viser den laveste værdi af alle de viste. Det skyldes, at klimaet i månederne forud for målingen i december 2016 har været mere tørre end normalen.



Område for sammenligningen mellem PKL-målingen og Delphin-simuleringen



Frostbestandighed

Frostbestandighed af et byggemateriale kan vurderes ved hjælp af den såkaldte kritiske vandmætningsgrad, S_{KR} , som defineres som det maksimale vandindhold (volumenprocent), målt i forhold til porøsiteten, som et porøst materiale kan indeholde uden at fryse i stykker. S_{KR} bestemmes ved forsøg. For hårdbrændt tegl har Göran Fagerlund målt S_{KR} til 0,75 á 0,76 (6).

Hvis den kritiske vandmætningsgrad overstiges og der samtidig er frostgrader, er der høj sandsynlighed for at der vil forekomme frostskaader.

Der er foretaget tre simuleringer, en uden puds og to med to forskellige pudstyper. Beregningen er kørt for fem år. Herefter er det maksimale vandindhold i teglmaterialet fundet, og S beregnet. Det ses, at den ligger langt fra den kritiske værdi. Der er dog for mange tilnærmelser i forudsætningerne til, at man bør stole på dette resultat, men det er alligevel medtaget for at vise, at simuleringsmetoden med mere præcise materialeparametre også lukker op for denne type vurderinger.

	Max. vandindhold i tegl volumen%	Porøsitet, %	Vandmætningsgraden, S
Tegl: Brick Joens	23,3	36	0,65
Puds: Lime plaster, 3 mm	23,0	36	0,64
Puds: Floor Screed, 3 mm	22,0	36	0,61
PKL-måling, højeste værdi. Målt 1. marts 2016, højde 100 cm dybde 25 cm	23,4	31	0,76

Tabel. Maksimal vandindhold og vandmætningsgrad i Delphin simuleringerne og i den højeste af PKL-målingerne.

For den højeste PKL-måling fås en vandmætningsgrad på 0,76. Dvs at der er risiko for frostskaader på det tidspunkt. Men der har åbenbart ikke været tilstrækkeligt lav temperatur, for der er ikke konstateret nogen skader.

Fugtledningstallet

Indflydelse af pudstype og pudstykkelse på fugtbevægelserne

Den mængde vand, der til enhver tid bindes i murværket i havemurens felter, vil være afhængig af hvilken type puds, der er påført, og i hvilken tykkelse.

Pudsens evne til at lade vanddamp passere udtrykkes med det såkaldte damppermeabilitet, her benævnt D . Den måles i $[kg/Pa \cdot m \cdot s]$. Den er målt for en del af pudstyperne, som beskrevet ovenfor. Puds med hydrauliske kalktyper har lav damppermeabilitet, puds med luftkalk har høj damppermeabilitet.

Vanddampgennemtrængeligheden vil mindske med øget pudstykkelse, t .

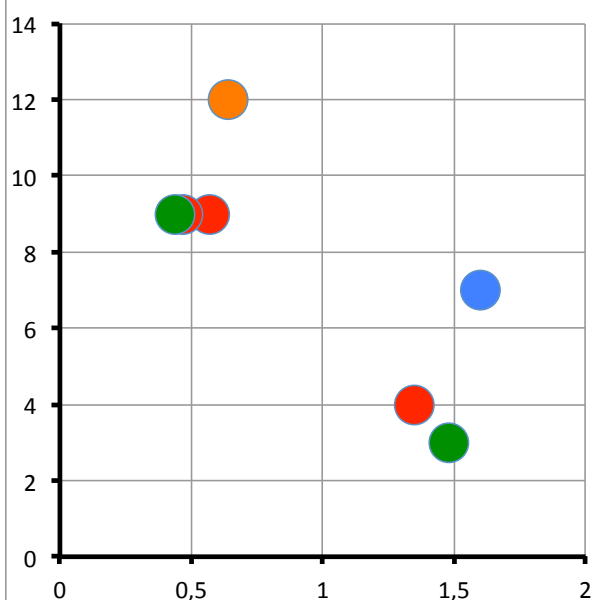
Effekten af de to parametre kan vurderes ved beregning af en parameter, fugttransporttallet, her benævnt $V = D/t$.

Et tal for et pudslags evne til at slippe vandet igennem muren kan fås fra diagrammerne for Nationalmuseets fugtmålinger. For hvert felt vurderes grafisk et gennemsnitligt vandindhold for de fem års målinger i højden 100 cm (jordhøjden).

De forskellige parametre er vist i tabellen nedenfor. D i parentes er skønnede værdier. Sammenhængen mellem vandindhold og fugttransporttallet fremgår af diagrammet.

Felt-nummer	Pudsbindemiddel	Tykkelse, t	D	$V = D/t$	Gns.vandindhold
		mm	10-12 kg/Pa m s	10-9 kg/Pa m ² s	Volumen%
0	Kalk-cement	0,9	4,8	5,33	11
1	K Kh	14	8	0,57	9
2	K Kh	17	(8)	0,47	9
3	Læskemørtel	4	5,9	1,48	3
4A	Kalk	12	5,3	0,44	9
4B	K Kh	14	18,9	1,35	4
5	Læskem. K Kh	11	(7)	0,64	12
6A	Kh	5	(8)	1,6	7

Gennemsnitligt vandindhold,
Volumen%



Fugttransporttal, $V = D/t$, 10⁻⁹ kg/Pa m² s

Felt nummer 0, referencefeltet, er ikke medtaget i grafen, fordi der er store afskalninger på feltet, hvilket påvirker vandindholdet.

Bindemiddeltyperne er markeret med farver:

Røde: Kalk-hydraulisk kalk

Grønne: Kalk og læskemørtel.

Blå: Hydraulisk kalk

Orange: Blanding

Tendensen i figuren er som forventet, at højere fugttransporttal, V , giver lavere vandindhold, fordi vandet kan slippe hurtigere gennem muren.

Referencer

- (1) Mejdahl, Nina B.: Vurdering af risikoen for skader på puds på havemur - Diplomingeniørprojekt - DTU, Byg 2016.
- (2) Zhao, Qi de: Fugt i havemur. Udvikling af metode til vurdering af fugtbevægelser i fritstående udendørs konstruktioner. Diplomingeniørprojekt - DTU, Byg 2017.
- (3) Hansen, Tessa, og Anders Nielsen: Marienlyst slotsmur - Karsten tube. Sektionen for Bygningsdesign, DTU Byg, 2016
- (4) Gotfredsen og Nielsen: Bygningsmaterialer - Grundlæggende egenskaber, Lyngby, 2006
- (5) Martin Jensen: Moisture properties os air lime mortar in joints and rendering, MsC thesis Sektionen for Bygningsdesign, DTU Byg 2014
- (6) Göran, Fagerlund: Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material. Institutionen för Byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund, 1972.