

Oplæg til møde i Raadvad 15. februar 2012 om styrkeforholdet i rene kalkmørtler
Anders Nielsen

Kalkmørtelen længe leve

I Danmark har vi en lang og stadig levende tradition for at anvende læsket kalk som bindemiddel i murematerialer. Dette i modsætning til vore nabolande, hvor cement og gips har trængt kalken tilbage eller helt ud af byggeriet. Her i landet kan vi stadig købe læsket kalk, kalkfarver og kalkmørtel takket være en livskraftig industri. Desuden har vi fået indført en bestemmelse i Euro-normerne, som tillader salg af kalkmørtel uden styrkedeklaration, de såkaldte receptmørtler. Kalkmaterialerne danner med deres mange gode egenskaber en vigtig forudsætning for smukt murerarbejde. Denne situation skal vi værne om.

I det følgende præciseres betegnelserne for murerfagets bindemidler, dagens situation beskrives og kalkmaterialernes fordele oplistes. Der vises en ny styrkeprøvningsmetode. Desuden redegøres for nogle af de resultater, som er opnået ved arbejder på DTU - Byg i årene 2007 - 2011. Afslutningsvis fremsættes en opfordring til producenterne om at fremme anvendelsen af kalkmørtel fx ved at få nogle af produkterne certificeret som funktionsmørtler.

Murerfagets bindemidler

Bindemidlerne i murerfaget er *læsket kalk* og *hydrauliske bindemidler*. Det er vigtigt at skelne mellem disse to typer, da deres hærdeprocesser er helt forskellige.

Læsket kalk dannes ved at brændt kalk reagerer med vand. Den hærder ved at kuldioxid trænger ind og omdanner den læskede kalk til kalciumkarbonat. Processer kan kun ske i luft. Derfor kaldes den læskede også for *luftkalk*.

Cement og hydraulisk kalk (NHL) hærder ved reaktion med vand. Det betyder, at de kan hærde, hvor luften ikke kan komme ind, fx under vand. Derfor kaldes cement og hydraulisk kalk samlet for *hydrauliske bindemidler*.

I dette notat behandles kun *luftkalk*.

Bindemidlers sammensætning og produktion er gennemgået af (Storgaard 2006) og (Nielsen 2008).



Dagens situation

Læsket kalk har været anvendt i byggeriet siden oldtiden. Den kan anvendes til overfladebehandling i form af ren hvidtekalk eller tilsat farver; tilsættes sand får man puds eller mørtel. Kalkpuds anvendes som beskyttelse mod vind og vejr. Puds kan få en uendelighed af overfladeudtryk, og puds kan danne underlag for kunstneriske udsmykninger, såsom kalkmaleri, stucco, intarsia og sgraffito. Kalkmørtel har været enerådende til opmuring af huse helt op til anden verdenskrig.

Siden midten af 1900-tallet er ren kalk imidlertid blevet fortrængt fra byggeriet.

Som overfladebehandling har plast- og silikatmalinger taget over, fordi disse materialer kan være lettere at påføre og fordi man har en - ofte ukorrekt - opfattelse af at en overfladebehandling med disse materialer holder længere. Kalkede overflader nedbrydes gradvis af den svagt sure nedbør. Dette må ses som en fordel, fordi overfladen herved hele tiden vil være hvid (eller hvilken farve man har tilføjet). Dette i modsætning til overflader af plast eller silikat, som har tilbøjelighed til at gråne, fordi de absorberer urenheder.

På puds- og mørtelområdet har mørtler med cement eller hydraulisk kalk taget over. Det skyldes, at disse materialer kan få langt højere styrker end luftkalkmørtler, og at man (ingeniører og arkitekter) har fokuseret meget på den formelle styrke i anvendelsen. Desuden er det laboratoriemæssigt enklere at måle styrken af mørtel af cement og hydraulisk kalk i forhold til at måle styrken af en mørtel af læsket kalk. Kalkmørtel har bl.a. derfor uberettiget fået ry for, at det ikke kan holde. I dag anvendes mørtler af ren kalk hovedsageligt til restaurering og vedligeholdelse af historiske bygværker og ældre huse. Den kalkmørtel, som sælges i dag, er beregnet til pudsning og underordnede arbejder. Hvis den skal anvendes til opmuring og pudsning, tilsættes cement for at få en styrkeforbedring. En cementholdig mørtel, fx KC 50/50/750, kan imidlertid blive så stærk

i forhold til murstenene, at hvis der sker bevægelser i murværket, så der dannes revner, vil revnerne løbe gennem murstenene. Anvendes kalkmørtel, vil denne på grund af sin porestruktur, altid være så svag, at revnen vil blive i fugen. Dette er en stor fordel, hvis det pågældende murværk skal repareres, fordi man ikke skal hugge stenene ud, men kan nøjes med at reparere fugerne. Naturligvis skal man bruge stærkere mørtel, hvis konstruktionen kræver det, men den skal følges med en stærkere sten. Ren luftkalkmørtel med en god sammensætning vil i mange tilfælde kunne anvendes også i bærende konstruktioner.

En indvending, som man ofte hører mod anvendelse af luftkalkprodukter er, at de ikke kan holde over for vejrliget. Dertil kan man overordnet sige, at historien har vist, at de korrekt opbyggede mørtler holder.

Pudsmaterials opbygningen skal vælges med korrekt hensyn til de forskellige lags styrke og porestørrelser, som det fx er vist i *Storgaard 2006*. Se også www.kalkforum.org.

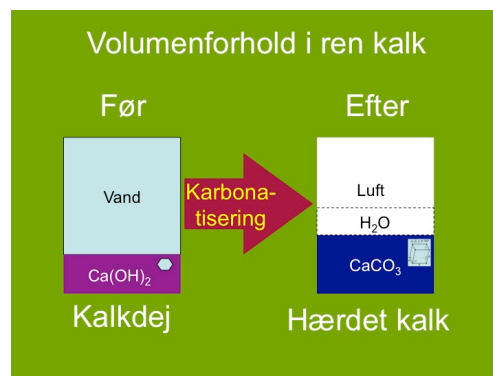
Kalkmørtels fordele

Ren kalkmørtel vil altid være et meget porøst materiale. Dette skyldes dels, at mørtlen altid af hensyn til bearbejdigheden indeholder meget vand, som suges ind i teglstenene og efterlader porer, dels at der under karbonatiseringen dannes vand, som også suges væk eller fordamper, jf. figur.

Porøsiteten bevirker, at mørtlen ikke kan blive så stærk, at den kan trække murstenene i en mur i stykker. Endvidere vil kalkmørtel altid være diffusionsåben. Hærtningsprincippet forhindrer, at mørtlen kan blive diffusionstæt. Den åbne porestruktur er også medvirkende til, at man ved indvendigt arbejde får kortere udtørningstider, end ved brug af hydrauliske bindemidler.

Partiklerne i læsket kalk er flade sekskantede krystaller af calciumhydroxyd. I vådlæsket kalk er de af størrelsesordenen helt ned til 1 my. Dette bevirker, at en mørtel med dette bindemiddel bliver let bearbejdelig.

Hærdeprincippet og partikelstørrelsen bevirker, at rene kalkmørtler har en række fordele frem for mørtler med cement og andre hydrauliske bindemidler. Fordelene kan resumeres som følger.



Arbejdsmæssige fordele ved luftkalkmørtel

- Har god bearbejdighed.
- Hærder ikke, når den opbevares tildækket. Det betyder, at den altid kan være klar til brug.
- Opblandet mørtel behøver ikke at blive kasseret ved fyraften, som mørtel med cement skal.
- Der kan udføres mere ensartet murværk, fordi al mørtel kan blandes på en gang og lagres afdækket, til den skal anvendes.
- Eventuelle revnedannelser under udtørringen kan presses sammen straks.
- Ved bygningsændringer eller nedbrydning behøver man ikke anvende slaghammer.

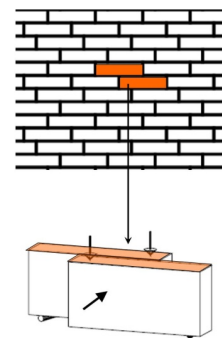
Fordele ved færdigt murværk med luftkalkmørtel

- Kan reducere eller eliminere behovet for dilatationsfuger på lange murflader.
- Har god vedhæftning og tilstrækkelig, ikke for høj styrke, så der kan produceres murværk, hvor små bevægelser i bygninger fra sætninger eller varmepåvirkninger optages i fugerne, uden at murstenene revner.
- Herved lettes senere reparationsarbejder.
- Er garanteret diffusionsåbent, dvs. at materialet kan "ånde".
- Afgiver vand hurtigere end cementholdige mørtler.
- Er ikke vandopløseligt.
- Indeholder ikke gips og andre salte, som afsættes på murfladen.
- Mindre revner vil lukkes på grund af selvheling.
- Nedbrydes ikke af UV-stråling.
- Har været anvendt i historisk lang tid, hvilket har givet god erfaring med holdbarheden.

Vridningsprøvemethoden

På Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) er der i 2006 udviklet en ny metode til at måle, hvor stærk en mørtelfuge i en teglmur er. Metoden går ud på, at man murer to sten sammen og vrider dem i forhold til hinanden. Metoden søger at efterligne påvirkningen i en væg udsat for en vindlast. Den kraft, som skal til for at vride prøvelegemet i stykker kan omregnes til forskydningsstyrken i fugen. Måleresultatet kan anvendes til beregning af murværks bæreevne.

SBI har vist, at metoden er enklere at anvende, end den EN-normerede 3-stensprøvning (EN 1052-3). I hosstående figur er en sammenligning af resultaterne for de to metoder. Punkterne angiver middelværdierne for prøvning af 5 mørteltyper (KC 50/50/750)



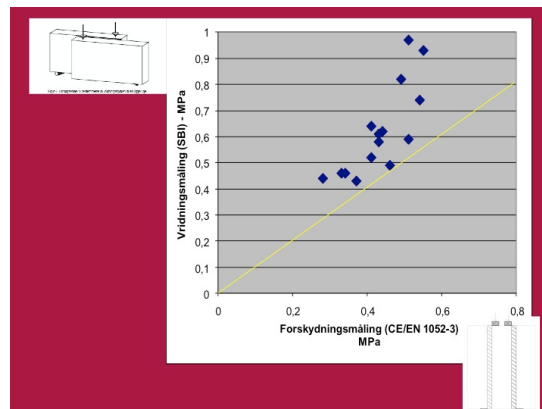
kombineret med 3 murstenstyper. Hver kombination blev prøvet med 6 prøvelegemer. Det ses, at vridningsprøvemethoden måler mere nuanceret end trestensmetoden. Desuden er der mindre spredning på resultaterne fra vridningsmetoden. Det betyder, at man med denne metode kan regne med større karakteristiske værdier for forskydningsstyrken. Endelig skal der bruges mindre kraft til at knække et prøvelegeme i denne metode.

Det er også vist, at metoden giver resultater for forskydningsstyrken, som er af samme størrelsesorden, som det man kan måle ved de såkaldte minivægsforsøg.

Metoden har den fordel frem for metoder, hvor man undersøger sten og mørtel hver for sig, at man her kan undersøge mørtelen sammen med de mursten, som skal anvendes i byggeriet. Herved kan man sikre sig, at mørtlen ikke bliver så stærk, at den kan trække stenen i stykker, hvis murværket skulle finde på at revne.

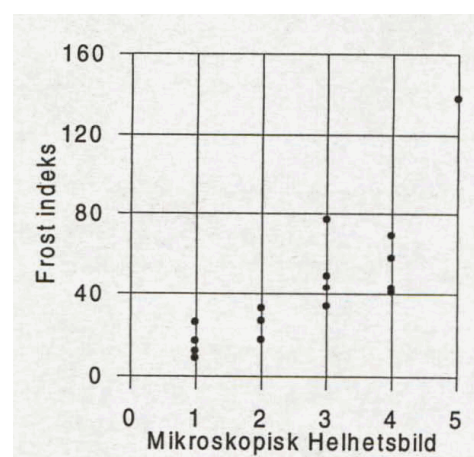
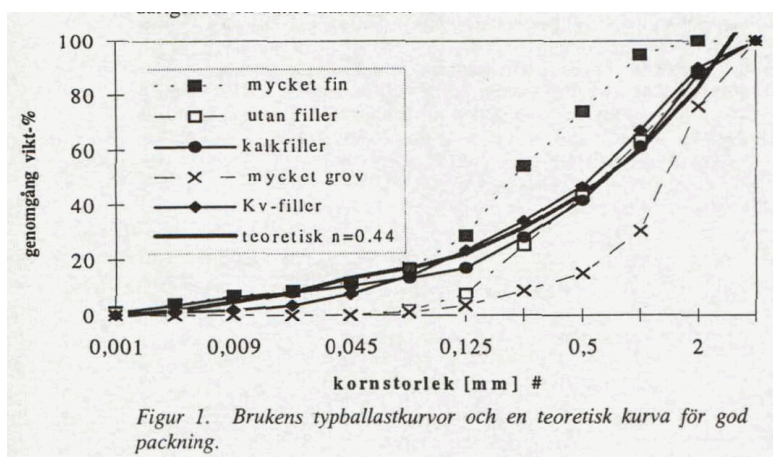
På DTU - Byg er der blevet udformet en prototype af en transportabel prøvemaskine, således at denne metode kan anvendes ude på mørtelfabrikkerne.

Metoden er beskrevet i bilagte notat "Vridemetoden"



Thorborg von Konows arbejde

Et gennemgående tema i arbejdet på DTU - Byg har været at opnå forbedringer ved at arbejde med mørtlernes kornkurve. Dette er inspireret af et arbejde, som blev udført i Finland af Thorborg von Konow, og som er beskrevet i doktorafhandlingen "Restaurering och reparation med puts- och murbruk", Åbo 1997. Thorborg fremlagde et resumé af sit arbejde i København i 1998, rapporteret i Materialenyt 2:98. Her kan man finde hendes anbefalede kornkurve. Hun vurderede alle sine mørtler på tyndslib i mikroskop efter en personlig skala på 1 til 5, hvor 5 er bedste. På figuren nederst til højre ses, hvorledes frostbestandigheden forbedres med bedre porestruktur opnået ved at forbedre kornkurven. - I Materialenyt 2:98 finder man også en metode til talmæssigt at vurdere en porestrukturens kvalitet. Metoden underbygger Thorborgs skala.



Undersøgelser på DTU

På DTU - Byg har vi siden 2007 arbejdet med at undersøge egenskaberne af rene kalkmørtler. Resultaterne er beskrevet i rapporterne [1] - [6]. Der er blevet anvendt tyndslibundersøgelser i alle projekterne.

[1] var en forundersøgelse. Det blev dog tydeligt vist, at kalkfiller og kvartsfiller kan anvendes til forbedre styrkeforholdene. Størrelsen af forbedringerne kunne dog ikke vises særligt klart, bl.a. fordi der blev anvendt trykstyrke som styrkemål. Trykstyrken er ikke følsom nok til at afspejle ændringer i styrken som følge af ændringer i kornkurven.

Fra [2] gik vi over til at anvende SBI's vridemetode på grund af metodens større følsomhed og på grund af, at man tydeligt kan aflæse virkningen af murstenenes sugeevne. (Når der i det følgende nævnes "styrke" henviser der til forskydningsstyrke og kohæsion målt med vridemetoden.) Forsøg [2] var en orienterende undersøgelse, hvor vi ville undersøge vridemetodens muligheder og mulighederne for at koble egenskaberne sammen med undersøgelse af mørtlernes mikrostruktur i tyndslib. Indledningsvis blev der foretaget en prøvning af prøvelegemer leveret fra SBI, og det blev konstateret, at DTU's udformning af prøvemethoden gav samme resultater som SBI fik. – Den første vigtige konklusion af denne undersøgelse var, at den deformation, der optræder efter at den maksimale spænding er nået, er meget stor, således at arbejdskurven får karakter af brud i et plastisk materiale. – Dernæst kunne det konkluderes, at der er stor spredning på måling af forskydningsstyrke med denne metode. Variationskoefficienterne ligger på 20 – 40 %. Det skyldes, at prøvemethoden afspejler variationer i stenenes sugeevne, kalkens egenskaber, blandingsforholdene, kornkurven og, ikke mindst, ujævnheden i den håndværksmæssige udførelse.

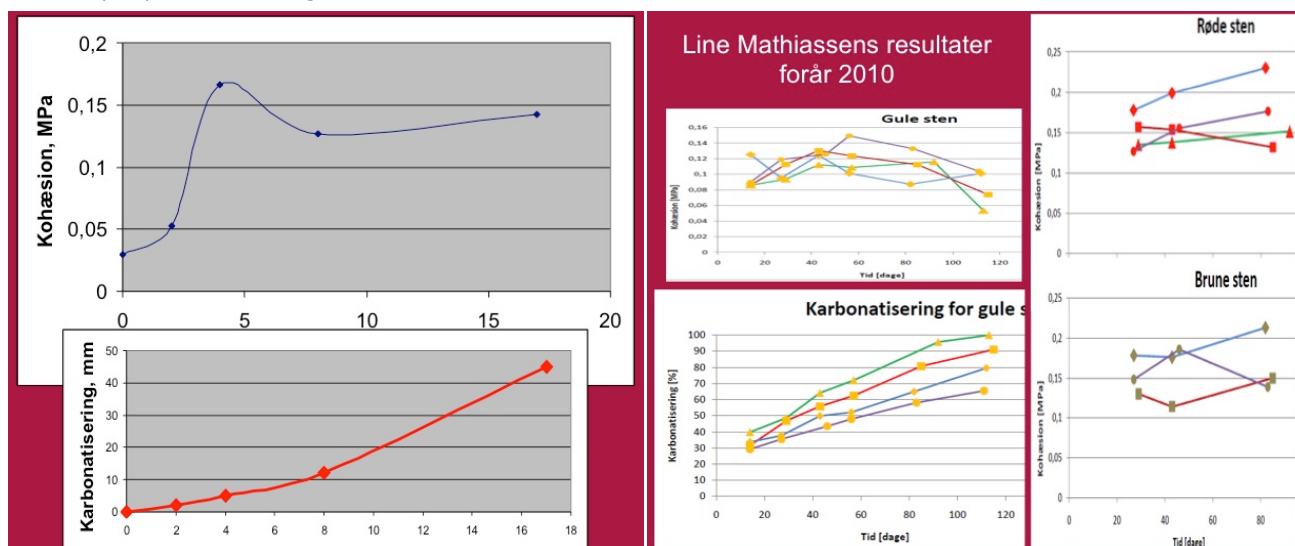
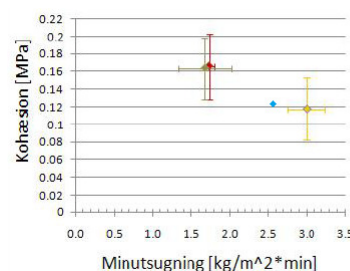
I [3] blev tidsforløbet for én mørteltype og en stentype studeret frem til 17 uger. Vi fik følgende indikationer: Styrken efter 2 timer er 25 % af styrken efter 4 uger. Styrken efter 4 uger er en anelse højere end styrken efter 17 uger.

Arbejderne rapporteret i [4] og [5] blev udført parallelt på de samme prøvelegemer. Der blev anvendt mørtel med 9, 12 og 15 % kalkindhold og med to forskellige kornkurver fra Skandinavisk Jurakalk. Kornkurverne fulgte normen, men ikke Thorborgs anbefalinger. Der blev brugt sten med tre forskellige minutsugninger.

I [6] blev der arbejdet med forskellige typer kornkurver. Styrken blev målt efter 4 uger.

Ud fra forsøgene kan vi drage følgende konklusioner.

- Forskydningsstyrken forbedres ved at anvende en velgraderet kornkurve.
- Murstenenes minutsugning har meget stor indflydelse. Forskydningsstyrken er markant lavere for sten med høj minutsugning.
- Sammenhængskraften i mørtelen i de første uger skyldes det kapillære undertryk i mørtel og sten. Dette bevirker, at forskydningsstyrken stiger hurtigt. Efter 2 timer er den ca. 25 % af slutværdien, som nås efter to til fire uger for sten med høj minutsugning. For sten med lav minutsugning kan styrken stige lidt frem mod 8 uger.
- Karbonatiseringen er slut efter 100 til 300 dage afhængigt af kalkprocent og stentype. Karbonatiseringen fastlåser formen, men synes ikke at forøge forskydningsstyrken for sten med høj minutsugning. For sten med lav minutsugning kan fås en svag stigning frem mod 8 uger.
- En 10 % mørtel med korrekt kornkurve kan opnå forskydningsstyrke på samme niveau som en KC 50/50/750 efter 4 uger.



Bærende murværk

Vi har nu en prøvemethode, som nuanceret kan måle mørtlers styrkeegenskaber i fugen mellem de sten, som mørtlen skal anvendes sammen med. Med vridemetoden er det muligt at beskrive kohæsion og friktion for rene kalkmørtler. Disse størrelser indgår i beregning af tegloverligger, tværpåvirket murværk mm. Afgørende for rene kalkmørtler er, at spredningen på forsøgsresultaterne ved anvendelse af vridemetoden er lav i forhold til andre metoder, således at rene kalkmørtler kan tilskrives bedre materialeegenskaber end tidligere. De materialeegenskaber som kan tilvejebringes vha. vridemetoden er af afgørende betydning i forbindelse med projektering af fx en skalmur, hvor der vil være brug for beregning af tegloverligger, tværbelastet murværk, samt bestemmelse af dilatationsbevægelser i forbindelse med temperaturudvidelse af skalmuren. Rene kalkmørtler bør kunne være med til at løse nogle af de problemer, som det murede byggeri står med i dag, bl.a. omkring vinduesoverligger. Anvendelse i skalmure kræver dog, at man får fastlagt styrken af metalbindere fastgjort i ren kalkmørtel. Man må også være opmærksom på, at murværk af kalkmørtel siges at kunne sætte sig ca. en fugetykkelse per etagehøjde.

Afslutning - Opfordring til branchen

I dag anvendes ren kalkmørtel mest til reparation og vedligeholdelse af ældre muret byggeri og historiske bygværker. På den almindelige byggeplads skal der ifølge normerne altid tilsættes cement, hvis kalkmørtlen skal anvendes til bærende murværk. Det har smittet af på andre anvendelser af kalkmørtel, således at der tilsættes cement, også hvor det ikke er nødvendigt. Det bør der kunne laves om på, således at ren kalkmørtel af god kvalitet i fremtiden kan anvendes i skalmure og til indvendige arbejder, hvor der stilles moderate eller ingen krav til styrken.

Mørtlernes kvalitet kan forbedres ved at arbejde med kornkurven, tilsætning af filler, kalktype og kalkmængde. Styrke og bearbejdelse skal optimeres. En nyudviklet mørtel skal kunne fuges færdig i en arbejdsgang.

Producenterne at ren kalkmørtel bør kunne levere et produkt, "som ikke bliver lavet om på byggepladsen" (citater af mørtelproducent). Det kan ske ved et målrettet udviklings- og oplysningsarbejde, så man når frem til, at kalkmørtler i fremtiden leveres som *funktionsmørtler*.

Litteratur

Thorborg von Konow: Restaurering och reparation med puts- och murbruk. Åbo Akademis Förl., Åbo 1997.

Thorborg von Konow: Bruk för restaurering - teori och praxis. Artikel i *Materialenyt* 2:98. "Ny viden om kalk og kalkmørtler". Dansk Selskab for Materialeprøvning og -forskning, 1998

Anders Nielsen: Mørtelegenskaber og billedbehandling. Artikel i *Materialenyt* 2:98. "Ny viden om kalk og kalkmørtler". Dansk Selskab for Materialeprøvning og -forskning, 1998

Artiklerne kan hentes på <http://ida.dk/netvaerk/idaforum/u0608a/Documents/Materialenyt/2-98.pdf>

Anders Nielsen: Uorganiske bindemidler, kap. D4 i *Materialebogen*, Nyt Teknisk forlag 2008.

Ole Storgaard: Kalk. Københavns Erhvervsakademi, Liniebyg forlag 2006, ISBN 87-91973-00-7. Teksten er delvis gengivet på www.kalkforum.org.

Klavs Feilberg Hansen: Murværk opmuret med vådmørtler. SBI Demonstrationsprojekt 2006:13.

Hansen, K. F. and C. M. Pedersen (2007). Torsion testing of bed joints. *Masonry International*, 21(1).

K.F.Hansen, E.S. Petersen: Shear and Torsion Testing of Brick-mortar Joints. *Masonry International* Vol. 22, nr. 2 2009 s. 31 - 38.

Hansen, L.Z. Design af murede konstruktioner. Alectia 2009.

Hansen, L.Z. Tværbelastede dobbeltspændene murede vægge. Alectia 2009.

[1] *Joseph Quoc Thanh Nguyen, Mustafa Moussa El-Cheikh Hassan, Mads Johansen Nørgaard*: Proportionering af kalkmørtel. Laboratoriepraktik, efterår 2007.

[2] *Jens Fogh, Lasse Juhl, Anders Kastberg*: Luftkalkmørtelproportionering, Laboratoriepraktik 11761, efterår 2008.

[3] *Jens Fogh, Lasse Juhl*: Videregående luftkalkmørtelproportionering, 13-ugers kursus, forår 2009.

[4] *Line Bundgaard Mathiasen*: Forskydningsstyrke af fuger af ren kalkmørtel. Bachelorprojekt, forår 2010.

[5] *Jakob Thiesson, Maiken Bruun-Ringgaard*: Analyse af hærdningsforløbet i fuger af luftkalkmørtel, forår 2010.

[6] *Sebastian Høstgaard-Brene, Morten Nielsen*: Kalkmørtels kornkurve – Indflydelse på kvalitet. Forår 2011.

Om forfatteren:
Anders Nielsen, civ.ing. tekn. dr.
Docent emeritus.
Har undervist og forsket i bygningsmaterialer
ved Ingeniørakademiet, Lunds Tekniske
Högskola og DTU - Byg

TORSION TESTING OF MASONRY BED JOINTS

The strength of tile masonry depends upon the strength of the joints, which again depends upon the composition of the mortar and the water transportation properties of as well the mortar as the tiles. So, if you want to know the strength, it is necessary to measure this quality on specimens, which are mortared together. Measuring shear strength is a rather sensitive method to study the properties of mortar joints. The method described below is rather elegant and more easy to use than the 3-stone method described in EN1052.3 - The method models the conditions in brickwork bent around the vertical joints. The method is developed on the Danish Building Research Institute [1, 2]. In the shape described here it has been used at the Dep. of Civil Engineering at the Danish Technical University to study joints of pure lime mortar.

Practice

In short: Two tiles are mortared together. After suitable conditioning they are twisted in relation to each other. The force needed to swivel the tiles apart can be calculated to shear strength and to the cohesion of the material.

As described here, the method is for use with Danish bricks, $L \times B \times H = 228 \times 108 \times 54$ mm, but it can easily be transformed to other formats. Two stones are mortared together over a length of $a = 135$ mm (1). The mortaring is done in a gauge to ensure the correct measures. A clamp is put on to ensure against damage before testing, and the specimens are stored in 20°C , 65 % RH, until testing (2).

A mortar joint is always exposed to a perpendicular pressure from the brickwork above the joint. So, such a pressure is established on the test specimen by means of a clamp. A pressure of $\sigma = 0,1$ MPa corresponds to 5 m brickwork above the joint (3).

The test specimen is placed in the testing machine on a roller and a ball. The force from the testing machine is lead to the specimen through a beam and two balls (4). The distance between the swivelling forces on each brick is $l = 0,173$ m.

The load may be applied in a rather simple hydraulic device, where the ultimate load is read on a display (5). The force necessary to break most mortar joints is less than 10 kN. Using a deformation controlled testing machine (e.g. Instron) the connection between the force and the deformation can be drawn. In this way one get an impression of the plasticity of the joint.

Calculations

The *ultimate shear strength*, τ [MPa], is calculated from the following formula

$$\tau = 2M_v / (B^2(a - B/3)) = 2 \cdot 1/2 \cdot P \cdot l / (B^2(a - B/3)) = P \cdot l / (B^2(a - B/3))$$

Here M_v [Nm] is the ultimate moment, P [N] is the ultimate force, which is read on the testing machine, l is the arm for the moment (0,173 m), B is the width of the brick (0,108 m) and a is the length of the joint (0,135 m). a and B can be put into the formula as measured values. If the mentioned standard values are used one get

$$\tau = P \cdot 149,8 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}$$

To get the material parameter, *the cohesion*, c , τ must be reduced according to the influence from the pressure perpendicular to the joint, σ . If the so-called *friction angle*, φ , of the mortar is 30° , one gets

$$c = \tau - \sigma \cdot \tan \varphi = \tau - \sigma \cdot 0,577$$

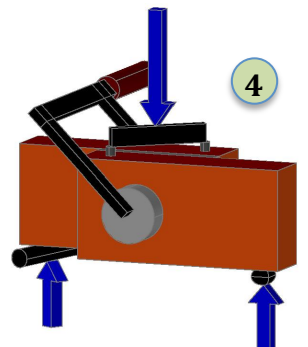
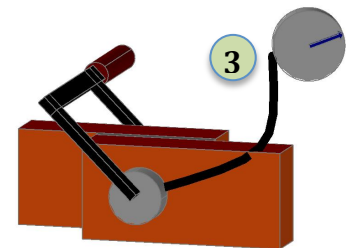
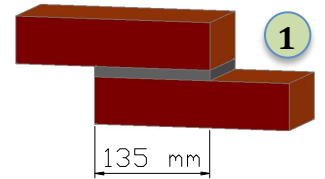
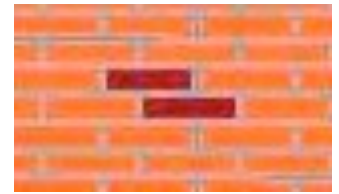
Thus, for bricks with Danish standard measures one gets

$$c = \tau - \sigma \cdot \tan \varphi = P \cdot 149,8 \cdot 10^{-6} - \sigma \cdot 0,577 \text{ MPa.}$$

Example. A specimen consisting of yellow tiles joint with a 9 % lime mortar is given a perpendicular pressure of $\sigma = 0,1$ MPa. An ultimate force of $P = 1021$ N is measured. One gets the cohesion

$$c = 1021 \cdot 149,8 \cdot 10^{-6} - 0,1 \cdot 0,577 = 0,095 \text{ MPa}$$

Pure lime mortar joint can have cohesion values between 0,05 and 0,25 MPa.



Anders Nielsen, June 2011



Technical University of Denmark

Department of Civil Engineering

References

- [1] Hansen, K.F. & Pedersen, C.M.: Torsion testing of bed joints. Masonry Int. 21(1) 2008
- [2] Hansen, K.F. & Petersen, E.S.: Shear and Torsion Testing of Brick-mortar Joints. Masonry Int. 22(2) 2009

Contact to the author kiogan@webspeed.dk