

LÆNGE LEVE KALKMØRTLEN

Fire artikler om luftkalkmørtlers egenskaber

1 Om bindemidlerne og om luftkalkmørtlens arbejdsmæssige fordele og tekniske egenskaber

2 Om styrkemåling og styrkens tidsudvikling

3 Om beregning af bæreevnen i et parcelhus muret i kalkmørtel

4 Om luftkalkmaterialernes gode holdbarhed

1, 2 og 4 er skrevet af Anders Nielsen

3 er skrevet af Lars Zenke Hansen

Kgs. Lyngby, november 2013

Artikel 1, 2 og 3 er tidligere publiceret i
tidsskriftet TEGL 2013 nr. 1, 2 og 3

LÆNGE LEVE KALKMØRTLEN

Anders Nielsen er civilingeniør, tekn dr, Docent em. fra DTU – BYG og har undervist i byggematerialers egenskaber og anvendelse i byggeriet.

I Danmark har vi en lang og stadig levende tradition for at anvende vådlæsket kalk som bindemiddel i murværk. Dette i modsætning til vore nabolande, hvor cement, hydraulisk kalk og gips har trængt den rene kalk tilbage eller helt ud af byggeriet. Her i landet kan vi stadig købe læsket kalk, kalkfarver og vådkalkmørtel takket være en livskraftig industri. Det kan hænge sammen med, at der er blevet indført en bestemmelse i Eurocode-systemerne, som tillader salg af vådkalkmørtel uden styrkedeklaration det vil sige salg af de såkaldte receptmørtler. Kalkmaterialerne danner med deres mange gode egenskaber en vigtig forudsætning for smukt murerarbejde. Denne situation skal vi værne om. Imidlertid bliver vådkalkmørtel sjældent anvendt til opmuring. Den bliver blandet med cement eller hydraulisk kalk. Det skyldes, at der i mange årtier har hersket den opfattelse, at ren kalkmørtel ikke kan holde til noget. I Eurocode-sammenhæng har det resulteret i, at de funktionsmørtler, som er på markedet i øjeblikket af hensyn til styrkekravet alle indeholder større eller mindre mængder hydraulisk materiale. Det er uheldigt, fordi man derved ikke kan udnytte de mange fordele, som man får ved at bruge ren kalkmørtel.

Denne artikel er skrevet for at gøre opmærksom på vådkalkmørtels mange gode egenskaber. I en senere artikel fortælles om kalkmørtels styrkeforhold ud fra målinger udført i de seneste år på DTU – BYG. Disse målinger viser, at korrekt sammensat kalkmørtel kan opnå fugestyrker, som er sammenlignelige med KC-mørtlers styrke. I en tredje artikel beskrives, hvorledes kalkmørtel virker som fugtdiode, en egenskab som er baggrunden for denne mørtels gode holdbarhed.

BINDEMIDLERNE

De materialer, der anvendes til at binde tegl sammen til murværk er læsket kalk, hydrauliske bindemidler og rent vand. Det er vigtigt at skelne mellem disse tre materialer, fordi de processer, som binder murstenene sammen, er meget forskellige afhængigt af om der er tale om læsket kalk, hydraulisk bindemiddel eller vand.

Læsket kalk

Råmaterialet er kalksten (fx fra Faxe). Kalkstenen, CaCO_3 , brændes. Herved drives kuldioxid ud, og man har brændt kalk, CaO . Dette materiale vil meget gerne reagere med vand. Denne proces kaldes læskning. Læskning kan foregå på flere måder:

Tilsættes den kemisk korrekte mængde vand, dannes et fint, tørt pulver af calciumhydrat (Ca(OH)_2). Pulveret kaldes tør læsket kalk. Det anvendes i tørtmørtler. Den brændte kalk kan også læskes med overskud af vand og lagres i store kar, indtil den skal anvendes. Det er erfaringen, at denne vådlæskede kalk bliver mere finkornet end tør læsket kalk og at kvaliteten øges med lagringstiden. Nogle mørtelfabrikker læsker kalken, når den blandes med sand i blanderen. Denne type mørtel kaldes læskemørtel. Denne metode blev allerede anvendt i middelalderen. Hærdningen sker ved, at den læskede kalk optager kuldioxid, hvorved kalksten, CaCO_3 , gendannes i fugen eller i puds. Denne hærdeproces, karbonatiseringen, kan kun ske i luft, hvorfor læsket kalk også kaldes for luftkalk. Omdannelsen sker udefra og indefter. Hærdetiden er bestemt af, hvor længe kuldioxiden er om at trænge ind i materialet.

Hydrauliske bindemidler

Råmaterialet er her enten en blanding af kalksten og silikatholdige materialer, fx ler eller flyveaske, eller en kalksten, som i sig selv indeholder silikater. Afhængigt af råmaterialernes kemiske blandingsforhold og af brændingstemperaturen dannes hydraulisk kalk eller portlandcement.



Fælles for de to materialegrupper er, at de indeholder mineraler (klinkermineraler), som er i stand til at stivne, når de blandes med vand. (Under hærningen dannes hydratiserede calciumsilikater). Hærningen begynder straks, når pulveret kommer i kontakt med vand, og efter få timer er det stift. Tiden fra blandingen starter til materialet er stift kaldes i normerne for bearbejdelighedstiden. Hærningen kan fortsætte i måneder eller år, hvorved materialet bliver stærkere og stærkere. De hydrauliske kalktyper udgør en mellemting mellem cement og luftkalk, fordi de hærder både ved hydratisering og karbonatisering. Graden af de to hærdeformer afhænger af kalktypens kemi og brændingstemperatur.

Vand

Vand optræder som et bindemiddel i sig selv. Det virker på den måde, at der under opmuringen opstår kapillarsugning i porøvet vand, efterhånden som teglstenen suger vand ud af mørtlen. Dette fænomen er kendt af alle, som har prøvet at mure: Når stenen er lagt fast, må den ikke røkkes, for ellers brydes kapillarsuget, og man kan ikke presse stenen på plads igen. Det er kapillarsugning, der holder murværket sammen, indtil mørtlens bindemiddel er hærnet, hvad enten bindemidlet er luftkalk, hydraulisk kalk eller cement.

Anvendelse i tidens løb

Læsket kalk har været anvendt i byggeriet siden oldtiden. I Danmark kom kalk i brug i middelalderens teglbygninger. Datidens mørtler var meget fede. Man har målt at de indeholdt 25 - 30 % kalk. Mørtlerne blev fremstillet ved læskemørtelteknik. Efterhånden som landets skovarealer i løbet af 1700-tallet blev brugt op, blev kalken vanskeligere at producere, den blev dyrere og måtte strækkes. Det kan gøres ved at vådlæske kalken og blande den med en passende mængde sand. Dagens mørtler indeholder fra 6 til 15 % kalk (målt som massen af Ca(OH)_2 i forhold til den samlede masse). Et enkelt firma producerer i dag en 'middelaldermørtel', som er en læskemørtel med 20 % kalk.

Mørtel med vådlæsket kalk har været dominerende i opmuring helt op til anden verdenskrig. Særligt udsat murværk blev dog muret med hydrauliske kalktyper.

Siden midten af 1900-tallet er ren kalkmørtel imidlertid blevet fortrængt af mørtler, hvor kalken er blandet med cement eller hydraulisk kalk. Ved at blande bindemidlerne kan man kombinere luftkalkens gode bearbejdelighed med de hydrauliske materials styrke. Det er disse blandingsmørtler (bastardmørtler, KC-mørtler, KKh-mørtler) som anvendes til murværk i dag. Denne udvikling

skyldes, at tegl fra tidligere at blive anvendt i massivt murværk i dag anvendes i skalmure og hulmure, ofte med store vinduesåbninger. Derfor er der blevet fokuseret meget på den formelle styrke i anvendelsen.

Blandingsmørtler kan få langt højere styrker end rene luftkalkmørtler. Ren kalkmørtel har derfor fået ry for, at den ikke kan holde, trods det, at man har bygget huse og katedraler med den siden middelalderen.

Et andet forhold, som fremmer anvendelsen af cementholdige mørtler, er, hvem der har ansvaret for mørtlernes egenskaber. Hvis murermesteren bruger receptmørtel og selv blander cement i på pladsen, har han selv ansvar for mørtlens kvalitet. Bestiller han derimod en funktionsmørtel, ligger ansvaret for mørtelproduktets egenskaber hos mørtelproducenten.

Alle de funktionsmørtler, der er på markedet i dag, indeholder cement. Udviklingen har ført til, at der i dag generelt anvendes meget stærke mørtler. Denne praksis har imidlertid nogle ulemper.



1

BLANDINGSMØRTLERNES ULEMPER

En cementholdig mørtel, fx KC50/50/750, kan blive så stærk i forhold til murstene, at bevægelser i murværket forårsager revner, som løber gennem murstene (figur 1). Anvendes kalkmørtel, vil den på grund af sin porestruktur, altid være så svag, at revnen dannes i fugen (figur 2). Dette er en stor fordel, hvis det pågældende murværk skal repareres; murstenene skal ikke hugges ud, man kan nøjes med at reparere fugerne (figur 3). Naturligvis skal man bruge stærkere mørtel, hvis konstruktionen kræver det, men også stærkere sten. Ren luftkalkmørtel med en korrekt sammensætning vil i mange tilfælde kunne anvendes også i bærende konstruktioner.

En anden ulempe ved mørtler som indeholder hydraulisk bindemiddel er, at de skal anvendes inden for bearbejdighedstiden (engelsk 'setting time', i limbranchen 'pot life'). Der bør ikke blandes mere mørtel op, end der kan bruges inden for bearbejdighedstiden, som kan variere fra en til tre timer. En KC-mørtel, som bliver stående i blandemaskinen, kan godt blandes op igen og igen i løbet af arbejdsdagen, men derved mistes den styrke, som cementen er tænkt at give. Cementens reaktionsprodukter slås hele tiden itu af omrøringen. Mørtlen kommer til slut til at virke som en kalkmørtel med den reagerede cement som filler.



2

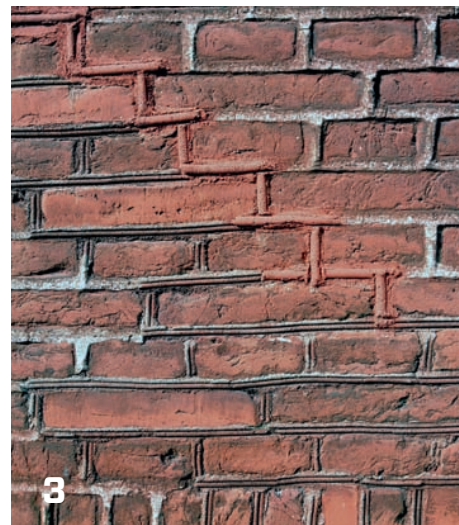
KALKMØRTELS FORDELE

Hærdet kalkmørtel vil altid være et meget porøst materiale. Porøsiteten fremkommer først og fremmest ved, at vandet, som giver mørtlen sin bearbejdighed under og efter opmuringen suges ind i teglstenene og efterlader hulrum. Desuden vil det vand, som dannes under karbonatiseringen også suges væk eller fordampe (figur 4).

Porøsiteten bevirker, at mørtlen ikke kan blive så stærk, at den kan trække teglstenene i en mur i stykker. Endvidere vil ren kalkmørtel altid være diffusionsåben. Hærtningsprincippet forhindrer, at den kan blive tæt. Den åbne porestruktur er også medvirkende til, at man ved indendørs arbejde får kortere udtørningstider, end når der bruges hydrauliske bindemidler.

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

En vigtig egenskab ved vådkalkmørtel er også, at bearbejdighedstiden er uendelig. Mørtlen kan ikke hærde, hvis luftens kuldioxid ikke kan komme til. Hærdeprincippet og partikelstørrelsen er årsag til, at rene kalkmørtler har en række fordele frem for mørtler, som er forstærket med cement eller andre hy-



3

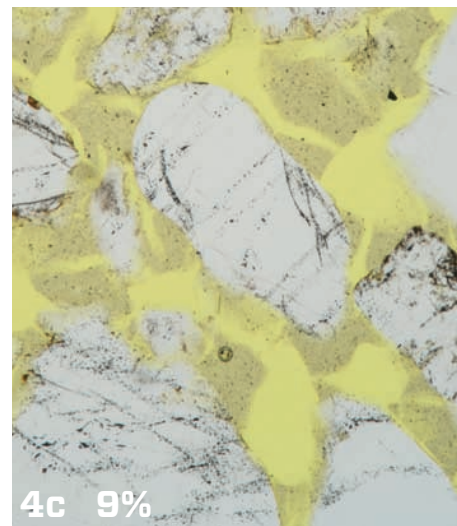
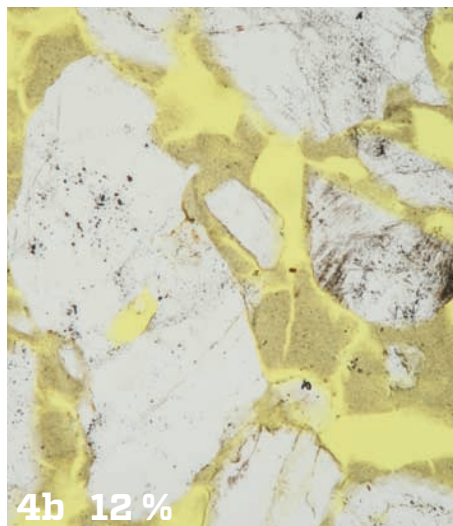
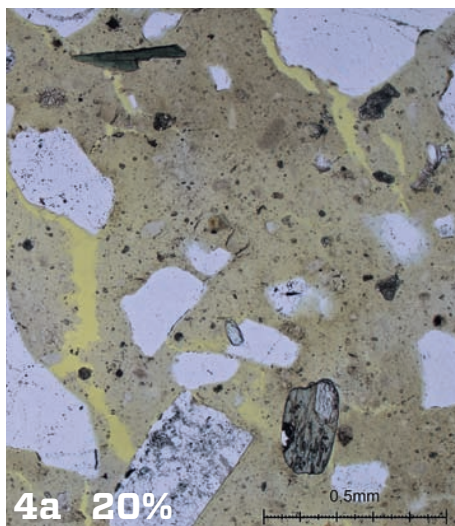
drauliske bindemidler. Fordelene kan resumeres som følger:

Arbejds-mæssige fordele

- Har god bearbejdighed og hænger godt fast på skeen.
- Hærder ikke, når den opbevares til-dækket. Det betyder, at den altid kan være klar til brug, og at opblandet mørtel ikke skal kasseres ved fyraft-en, som mørtel med cement skal.
- Der kan udføres mere ensartet murværk, fordi al mørtel kan blan-des på en gang og lagres afdækket, til den skal anvendes.
- Eventuelle revnedannelser under udtør-ringen kan presses sammen straks.
- Ved bygningsændringer eller ned-brydning behøver man ikke anvende slaghammer.

Fordele i færdigt murværk

- Små bevægelser i bygningen fra sætninger eller varmepåvirkninger optages i fugerne, uden at mur-stenene revner. Herved reduceres eller elimineres behovet for dilata-tionsfuger på lange murflader.



- Eventuelle reparationsarbejder lettes, fordi man ikke behøver at udskifte stenene.
- Mørtlen er garanteret diffusionsåben, dvs. at materialet kan 'ånde'.
- Afgiver vand hurtigere end cementholdige mørtler.
- Er ikke vandopløseligt.
- Indeholder ikke gips eller andre salte, som afsættes på murfladen.
- Mindre revner vil lukkes på grund af selvheling.
- Århundreders erfaringer har vist, at mørtlen er holdbar, takket være den vandafvisende effekt.

Miljømæssige fordele

- Genbrug af mursten lettes, da kalkmørtel er lettere at rense af end cementmørtel.
- Øget brug af ren kalkmørtel kan reducere brugen af cement og dermed CO₂-udslip.

AFSLUTNINGSVIS

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

BYG - DTU har målt luftkalkmørtlers styrke som funktion af sammensætning og tid, mere om det i en senere artikel.

Læs mere om kalk og kalkmørtel på www.kalkforum.org

Eksempler på mikrostrukturer i luftkalkmørtler. Gengivelser er ikke i mål; de gule partier er mørtlens indhold af luft.

4a Mørtel med ca. 20 % kalk. Moderne 'middelaldermørtel' fra Wewers Mørtel A/S.
 4b Bakkesandsmørtel med 12 % kalk med standardkornkurve. (Mathiassen DTU-BYG 2010)
 4c Bakkesandsmørtel med 9 % kalk med standardkornkurve. (Mathiassen DTU-BYG 2010)

LÆNGE LEVE KALKMØRTLEN

I TEGL nr 1 2013 er der gjort rede for vådkalkmørtels mange fordele sammenlignet med meget stærke cementholdige blandingsmørtler; fordele som berettiger en mere udbredt anvendelse af kalkmørtel i murværk end tilfældet er i dag. I det følgende beskrives, hvorledes man talsætter styrken af vådkalkmørtler, så de kan sammenlignes med andre mørtler.

TIDLIGERE TIDERS BYGGERI

Før midten af 1900-tallet anvendtes vådkalkmørtel i så godt som alt murstensbyggeri. Arbejdet blev udført ifølge generationers overleverede viden om tradition og skik og brug. Murene var fortrinsvis massive, og der blev sjældent udført statiske beregninger. Reglerne var nedfældet i bygningsreglementer som f. eks. Københavns byggelov af 1889 og i lærebøger; materiale om og fra perioden er i løbet af de senere år blevet tilgængeligt på portalen 'DanskByggeskik.dk'. Der er udført undersøgelser af klassisk murværk bl.a. på Danmarks Ingeniørakademis Bygningsafdeling i 1977 og på Statens Byggeforskningsinstitut i 2011, og undersøgelserne viser, at trykstyrken af selv meget dårligt murværk opført i perioden er fuldt ud tilstrækkelig.

Efter 1950'erne øgedes kravene til bygnings udformning. Mængden af isoleringsmateriale øgedes, pladskravene voksede, de arkitektoniske udtryk forandredes, og kravene til konstruktioner og bygningsdeles bæreevne skærpedes.

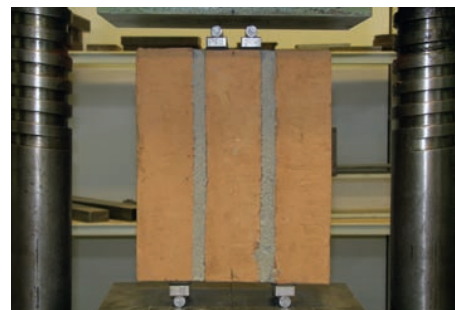
Også mørtler skulle være stærkere, og det 'klaredes' typisk med anvendelse af cementholdige vådkalkmørtler (KC-mørtler) og funktionsmørtler baseret på blandinger af cement og tørlæsket kalk. Resultatet af denne udvikling med-

førte, at der i dag typisk anvendes meget stærke cementholdige mørtler, også hvor det faktisk ikke er nødvendigt statisk set – og med uheldige virkninger til følge, som omtalt i artiklen i årets første udgave af Tegl.

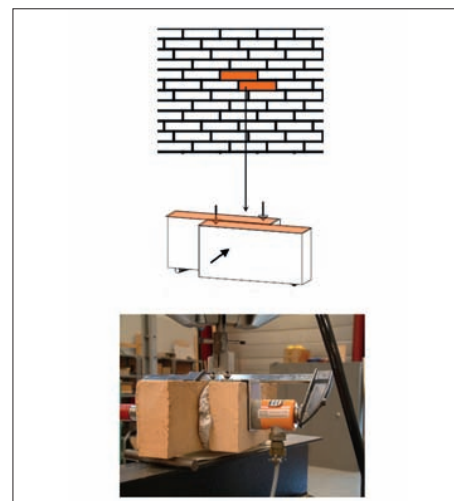
STYRKEMÅLING

Ved en normmæssig beregning af murværk er det i dag ikke tilstrækkeligt udelukkende at vurdere bæreevnen i forhold til trykpåvirkning. Ofte er murværket en skal, som kun bærer sin egen vægt, når den primært fungerer som klimaskærm. Murværket skal i dag også beregnes for bøjningspåvirkninger – først og fremmest opstået ved vindtryk.

Bøjning af murværkspladen giver forskydning i fugerne, og det er derfor nødvendigt at kende mørtlens forskydningsstyrke for at kunne fastlægge bæreevnen. Med en internationalt anerkendt prøvningsmetode (EN 1052-3) mures tre sten sammen, og forskydningsstyrken i den anvendte mørtel beregnes ud fra det tryk, som skal til, for at trykke den midterste sten 'forbi' de to yderste (figur 1).

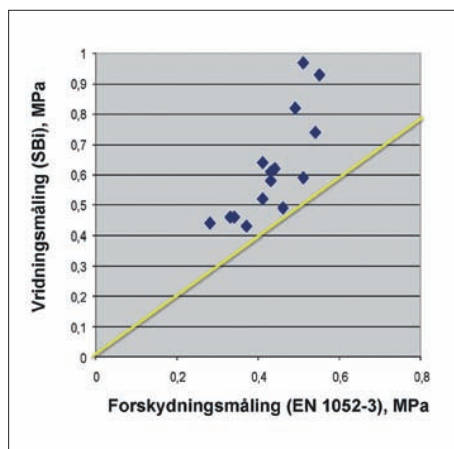


Figur 1. Teglstensprøvelegeme i henhold til DS/EN 1052-3



Figur 2. Princippet i SBI's vridningsprøvning. Under prøvningen er der med en skruetvinge påført et tryk på tværs, som skal efterligne trykket fra det ovenfor liggende murværk

For Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) har Klavs Feilberg Hansen i 2006 udviklet en alternativ prøvemethode, hvor to sten mures sammen og vrides i forhold til hinanden. Metoden efterligner påvirkningen i en væg udsat for en vindlast, som medfører trappeformet brud i fugerne (figur 2). Den kraft, som skal til for at vride prøvelegemet i stykker, kan omregnes til forskydningsstyrken af fugen.



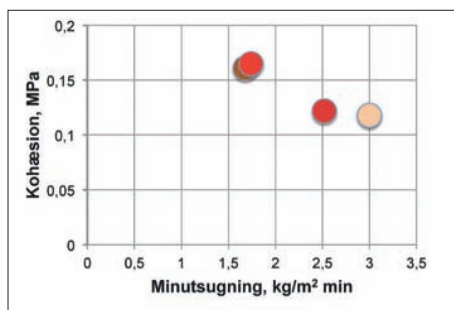
Figur 3. Sammenligning af forskydningsstyrke målt ved trestensprøvning og ved vridningsmetoden. Forsøget er udført på 5 typer mørtel KC50/50/750 kombineret med 3 typer mursten. Hvert punkt er midelværdi af 6 prøvninger

SBi har foretaget en sammenligning af de to metoder og af resultaterne (figur 3). Fem mørteltyper (KC 50/50/750) kombineret med tre murstenstyper afprøvedes med seks prøvelegemer for hver kombination. Punkterne i figur 3 angiver middelværdien af de seks resultater. Det ses, at resultaterne fra vridningsmetoden dækker et større talområde, end resultaterne fra trestensmetoden. Det betyder, at vridningsmetoden er mest følsom. Desuden er der mindre spredning på resultaterne fra vridningsmetoden inden for de enkelte prøveserier, og det betyder, at man med vridningsmetoden kan regne med større karakteristiske værdier for forskydningsstyrken. SBi har også påvist, at metoden giver resultater for forskydningsstyrken, som er af samme størrelsesorden, som dem man kan måle ved de såkaldte minivægsforsøg. Vridningsmetoden er endvidere praktisk, idet prøvelegemerne vejer mindre, og der bruges mindre kraft på at knække prøvelegemet.

Det er vigtigt at undersøge mørtlen sammen med den murstenstype, som tænkes anvendt i et givent byggeri, fordi stenenes sugsevne, minutsugning, har stor indflydelse på fugens forskydningsstyrke (figur 5). Ved at prøve sten og mørtel sammen, kan man desuden sikre, at den valgte mørtel ikke er så stærk, at den kan trække stenen i stykker (figur 6).



Figur 4. På DTU - BYG er en prototype af en forholdsvis enkel, transportabel 'vridemaskine' udviklet. Det er tanken, at maskinen skal kunne anvendes på mørtel- eller teglværker, så det kan vurderes, om en mørtel passer sammen med en given sten ¹⁾



Figur 5. Minutsugningens betydning for forskydningsstyrken (kohæsion) målt efter 4 uger



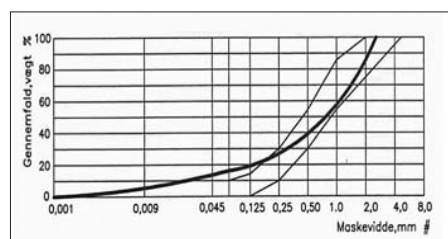
Figur 6. Brud i teglsten, fordi mørtelen er for stærk i forhold til stenen.

FORSØG MED RENE VÅDKALKMØRTER

På DTU - BYG er der siden 2007 arbejdet med undersøgelser af rene vådkalkmørtlers egenskaber. Arbejdet er udført i projektopgaver regi af diplom- og civilingeniørstuderende under vejledning og med følgegruppe.²⁾ Et gennemgående tema har været forsøget på at opnå

forbedringer ved at ændre på kornstørrelsesfordelingen – kornkurven, i det sand, der anvendes. Dette inspireret af en omfattende undersøgelse af vådkalkmørtler udført i Finland i 1990-erne af Thorborg von Konow³⁾. Von Konow ændrede på kornkurverne ved at tilsætte filler og finsand. Alle mørtler vurderedes ud fra tyndslib (figur 8), og på figur 7 ses en af de anbefalede kornkurver. Det ses, at kurven ligger højere end normkurverne i den fine ende. Mørtler med en sådan kurve vil have bedre porefyldning og dermed bedre tæthed, end mørtler med normkornkurve. Thorborg von Konow viste, at de tætte mørtler har særdeles god frostbestandighed, fordi de har mindre kapillarsugning.

Alle mørtlerne i forsøgene på DTU-BYG er også undersøgt med tyndslib, så kornkurveændringernes påvirkning af porerstrukturen har kunnet følges.



Figur 7. Thorborg von Konows anbefalede kornkurve sammenlignet med de traditionelle grænsekurver

I et første orienterende projekt blev det vist, at kalkfiller og kvartsfiller kan anvendes til at forbedre styrkeforholdene. Graden af forbedring kunne dog ikke påvises tilstrækkeligt klart, bl.a. fordi der blev anvendt trykstyrke som styrkemål. Trykprøvning er ikke følsom nok til at afspejle ændringer i styrken som følge af ændringer i kornkurven. I de følgende fem projekter er forskydningsstyrken derfor målt med SBI's vridningsmetode som kvalitetsmål. Og i det følgende refererer 'styrke' altså til forskydningsstyrke målt med denne metode.

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's. Som kuriosum skal det nævnes, at det allerførste prøvelegeme, som blev belastet, knækkede i stenen i stedet for i fugen (figur 6), fordi den anvendte KC50/50/750 var for stærk i forhold til stenen!

I de seks projekter er forsøgene udført med mørtler med 9 til 15 % kalk-indhold; der er arbejdet med kornkurverne, og forsøgene er udført på mursten med markant forskellige minutsugninger. Udviklingen af styrken er undersøgt over 17 uger, og samlet kan man drage følgende konklusioner:

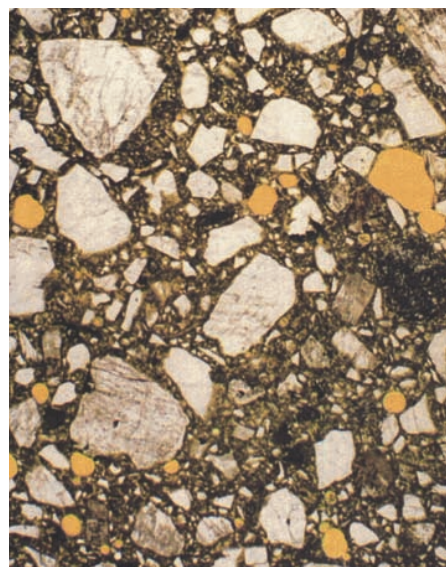
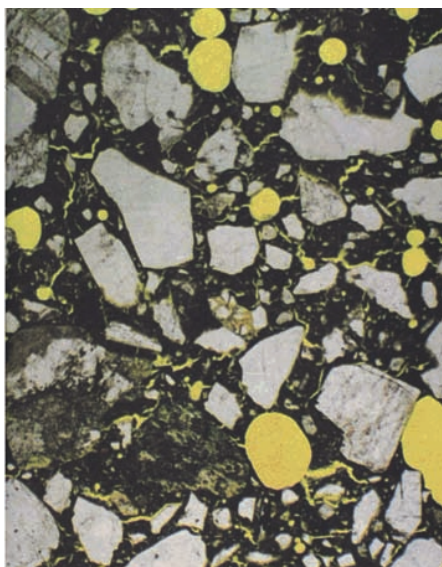
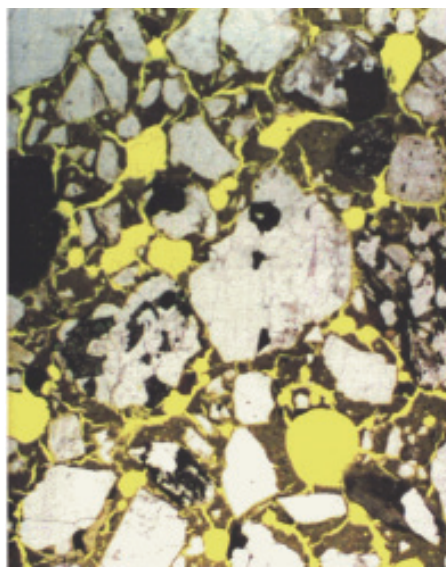


Foto TVK

Figur 8. Thorborg von Konow vurderede alle sine mørtler på tyndslib i mikroskop efter en personlig skala på 1 til 5, hvor 5 er bedste. Billederne viser mørtler på trin 1, 3 og 4

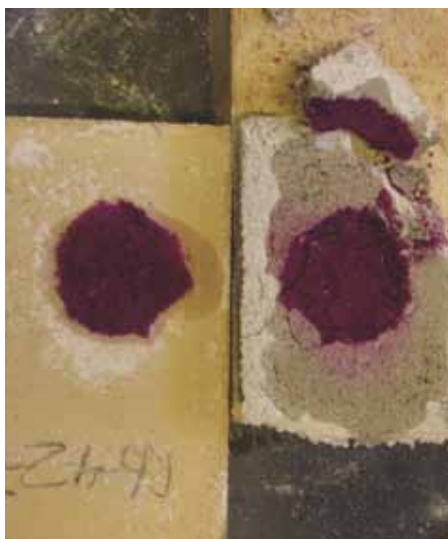
Forskydningsstyrken øges ved at anvende en kornkurve med mere fint materiale (figur 5).

En mørtel med 10 % kalk og velgraderet kornkurve kan opnå forskydningsstyrke svarende til en KC 50/50/750 mørtel efter 4 uger.

Murstenenes sugsevne har meget stor indflydelse. Forskydningsstyrken er markant lavere for sten med høj minutsugning (figur 5). Sammenhængskraften i mørtlen i de første uger skyldes det kapillære undertryk i mørtel og sten. Undertrykket bevirker, at forskydningsstyrken øges hurtigt. Efter 2 timer er den ca. 25 % af slutværdien. Slutværdien nås efter to til fire uger for sten med høj minutsugning. For sten med lav minutsugning kan styrken øge lidt frem mod 8 uger. Styrken synes ikke at øges yderligere med tiden i modsætning til, hvad der gælder for de cementholdige mørtler.

Karbonatiseringen er indtruffet efter 100 til 300 dage afhængig af kalkprocent og stentype. Karbonatiseringen fastlåser formen men synes ikke at øge forskydningsstyrken (figur 9 og 10).

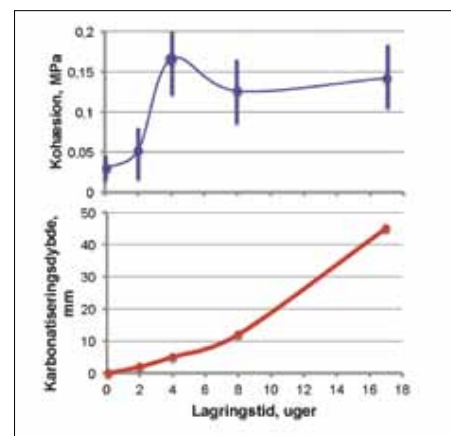
Den deformation, der optræder, efter at den maksimale spænding er nået, er meget stor (figur 11). Det betyder, at



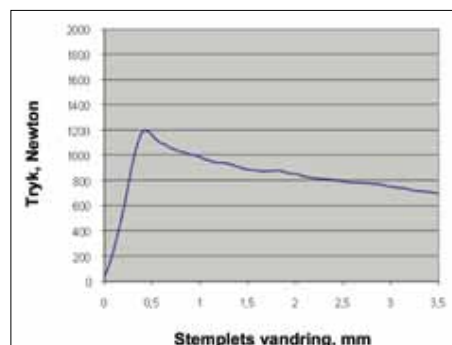
Figur 9. Karbonatiseringsdybde i prøverne blev målt efter brud ved påsprøjtningen af indikatoren phenolphthalein

murværk opført med de beskrevne mørtler går i stykker med et sejt brud, i modsætning til murværk opført med meget stærke mørtler, som knækker med et sprødt brud.

Nogle firmaer anvender mørtler med 25% kalkindhold til restaureringsformål inspireret af middelalderens teknik. For en sådan mørtel gælder reglerne om kornkurveforbedring ikke, da et stort pastaindhold holder gruspartiklerne væk fra hinanden.



Figur 10. Eksempel på styrkens tidsudvikling og karbonatisering. Puklen ved 4 uger skyldes, at virkningen af kapillarsuget er stærkest på dette tidspunkt



Figur 11. Forløbet af kraft og deformation i et vridningsprøvelegeme. Efter at brudlasten er nået, fortsætter deformationen for en stadigt aftagende last. Bruddets karakter er som i et plastisk materiale

FREMTIDEN

Der findes altså nu en prøvemethode, som nuanceret kan måle mørtlers styrkeegenskaber i fugen mellem de sten, som mørtlen anvendes sammen med. Med vridemetoden er det muligt at beskrive forskydningsstyrken, dvs. kohæsionen og friktionen; de størrelser, som skal indgå i beregning af bærende murværk, af skalmure, tegloverligger og tværbelastet murværk og i bestemmelse af dilatationsbevægelser ved temperaturudvidelse.

Rene vådkalkmørtler bør altså fremover – fordi de nu kan deklareres – kunne indgå i gode, sunde løsninger på nogle af de problemer, som det murede byggeri i dag står overfor, eksempelvis i forbindelse med vinduesoverligger eller i forbindelse med ønsker om at kunne mindske antallet af dilatationsfuger i skalmure.

I dag anvendes ren vådkalkmørtel mest til reparation og vedligeholdelse af ældre muret byggeri og i historiske bygværker.

På byggepladsen skal der ifølge normerne typisk altid tilsættes cement, hvis kalkmørtlen skal anvendes i bærende murværk, og det har haft afgørende betydning for, hvor og hvordan man ellers har anvendt kalkmørtlen.

For 'at være på den sikre side', tilsættes der altså typisk cement, også hvor det ikke er nødvendigt.

Det forhold bør der kunne laves om på, så ren kalkmørtel af god kvalitet fremtidigt kan anvendes både i skalmure og til eksempelvis indvendige arbejder. Mørtlernes egenskaber kan forbedres og styres gennem justering af kornkurven, tilsætning af filler, specifik kalktype og specifik kalkmængde, og styrke og bearbejdelse kan optimeres, så man med en nyudviklet mørtel også kan fuge færdigt i een arbejdsgang.

Producenterne skal derfor hermed opfordres til gennem målrettet udviklings- og oplysningsarbejde, at udvikle en kalkmørtel, som fremtidigt kan leveres som funktionsmørtel.

Civ.ing. PhD Lars Zenke Hansen, medlem af projektets følgegruppe, har bidraget til herstående og vil i en kommende artikel præsentere en række eksempler på bærende murværk, som med fordel kan opføres med vådkalkmørtel.

NOTER

1) Maskinen og dens anvendelse er beskrevet i artikler, der kan findes her: www.kalkforum.org/wip4/artikler/d.epl?id=1035935
sbi/vbn.aau.dk/files/33023887/SBi%202010-10.pdf

2) Artiklen bygger på følgende projekter: Proportionering af kalkmørtel (Laboratoriepraktik, efterår 2007): Joseph Quoc Thanh Nguyen, Mustafa Moussa El-Cheikh Hassan, Mads Johansen Nørgaard.

Luftkalkmørtelproportionering (Laboratoriepraktik 11761, efterår 2008): Jens Fogh, Lasse Juhl, Anders Kastberg.

Videregående luftkalkmørtelproportionering (13-ugers kursus, forår 2009): Jens Fogh, Lasse Juhl.

Forskydningsstyrke af fuger af ren kalkmørtel (Bachelorprojekt, forår 2010): Line Bundgaard Mathiasen.

Analyse af hærdningsforløbet i fuger af luftkalkmørtel (Bachelorprojekt, forår 2010): Jakob Thiesen, Maiken Bruun-Ringgaard.

Kalkmørtels kornkurve – Indflydelse på kvalitet (Masterprojekt, forår 2011): Sebastian Høstgaard-Brene, Morten Nielsen

3) Thorborg von Konows arbejde er beskrevet i doktorafhandlingen 'Restaurering och reparation med puts- och murbruk', Åbo 1997. TvK fremlagde et resumé af sit arbejde i København i 1998, rapporteret i Materiale-nyt 2:98. I denne publikation finder man også en teoretisk metode til talmæssigt at vurdere en porestrukturens kvalitet. Metoden underbygger TvK's skala.

LÆNGE LEVE KALKMØRTLEN

I årets to første udgaver af Tegl beskrives luftkalkmørtlers mange gode udførelses- og anvendelsesmæssige egenskaber. I nærværende artikel behandles den beregningsmæssige dokumentation for, at et hus muret med luftkalkmørtel kan holde. Artiklen tager afsæt i de to foregående artikler [1] [2] og i et netop afsluttet eksamensprojekt på BYG.DTU [3].

Med DTU projektet er det lykkedes at vise, at en bestemt luftkalkmørtel har egenskaber, der gør, at den vil kunne klassificeres som en funktionsmørtel (M0,5). Herved vil den kunne anvendes i overensstemmelse med DS/EN 1996-1-1. Dét er af betydning, fordi der derved åbnes mulighed for at man kan anvende svage mørtler i bærende murværkskonstruktioner. Det vil kunne blive afgørende både for valget af konstruktion – og dermed også for den arkitektoniske udformning af et byggeri – og for holdbarheden og levetiden af en konstruktion eller bygningsdel. Det skyldes, at murværk opført med luftkalkmørtel, alt andet lige, vil være mere plastisk – mere sejt – end murværk opført med meget stærk og dermed stiv mørtel. Anvendes luftkalkmørtel, vil eventuelle brud for det meste opstå i fugerne og ikke i stenene, hvilket ellers ofte er tilfældet, når der anvendes stærke mørtler. Man vil derfor med anvendelsen af luftkalkmørtel være i stand til at forebygge en række mulige skader, og opstår de alligevel, kan de som oftest uden videre udbedres på 'stiltfærdig' vis, uden brug af trykluftsværktøj eller borehammer.

Beregningerne, som her gennemgås, viser, hvorledes bæreevnen af de forskellige konstruktionselementer i et parcelhus med formur og bagmur opmuret med kalkmørtel kan dokumenteres. De viste formler gælder alment. Som eksempel er vist, hvad resultatet bliver med den på DTU undersøgte M0,5. Det er forudsat, at tagkonstruktionen er tung og udført af for eksempel teglsten.

MATERIALER OG FORUDSÆTNINGER

Det forudsættes i beregningerne, at huset opføres med en kalkmørtel M0,5 og med en mursten med en trykstyrke på 27 MPa. Murstenen har en minutsugning på 1,25 kg/m²/min, hvorfor kohæsionen bliver 0,082 MPa, friktionskoefficienten bliver 1,0, og bøjningstrækstyrken om liggefugen vil være 0,04 MPa. I beregningerne forudsættes konstruktionen at høre til normal konsekvensklasse med tilhørende partialkoefficienter på materialernes styrker. Forudsætningerne er fundet i DTU projektet [3] – murværk opmuret med type A sten – og i DS/INF 167, 2. udgave.

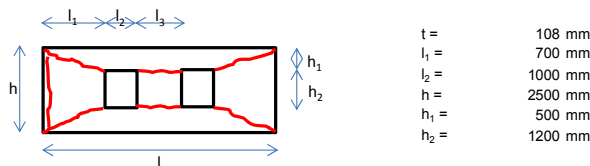
Det forudsættes, at murværk har en stivhed, som er 375 gange murværkets trykstyrke. Dette resultat er dokumenteret i [5], hvortil der henvises. Alle vægge er forudsat udført som ½ stensvægge.

I beregningerne er vindpåvirkning forudsat svarende til påvirkningen i et parcelhuskvarter, dvs. hørende til i terrænkategori III. Det betyder et samlet regningsmæssigt vindtryk på 0,743 kN/m² svarende til et hastighedstryk på 0,45 kN/m². Påvirkninger af konstruktionselementer benævnes i det efterfølgende med præfiks Ed og er i graferne angivet med sort signatur.

VÆGGE

Murede vægge skal modstå belastninger fra flere forskellige kilder og skal bære lasten ved forskellige statiske principper. Murede vægge skal modstå lodret last fra egenlast af bygningen, nyttelast fra personer og naturlaster som fx snelast, og det sker ved søjlevirkning i væggen. Murede vægge skal også modstå vandret påvirkning som ved belastning fra for eksempel vind. De vandrette påvirkninger optages som bøjning og for visse stabiliserende vægge også som skivevirkning. Tværbelastede vægge beregnes lettest ved hjælp af brudlinjeteorien. I [4] er en metode udviklet, som sammenlignet med

forsøg giver god overensstemmelse. Beregningsmetoden baserer sig på forskydning i diagonale brud i hjørnerne af de murede vægfelter og tillader ikke medregning af vandrette brudlinjer. Beregningerne foretages ud fra brudfiguren som vist nedenfor. Det antages, at vægten fra tagkonstruktionen giver en spænding i væggen på 0,03 MPa, hvilket svarer til 3,24 kN/m². Det bør sikres, at der fra fundamentet og op til remmen er opspændt trækbånd, så denne kraft kan etableres. Væggen regnes som en kombinationsvæg, hvor bagmur og formur forbundet med bindere bidrager til at overføre vindlasten til henholdsvis loftskiven og terrændækket.



Figur 1. Murfelt som undersøges for lodret og vandret bæreevne.

Bæreevnen af det samlede murfelt, hvor m_{px} og m_{py} er bestemt iht. [4] bliver:

$$p_{Rd,1} = \frac{4(2 \cdot h - h_2) \cdot \frac{m_{px}}{l_1} + 4 \cdot l_1 \cdot m_{py} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h - h_1 - h_2} \right) + 2 \cdot \sigma \cdot t^2 \cdot \frac{l}{h}}{h_2(l + l_2) + \frac{4}{3}(h - h_2)l_1 + (l - 2 \cdot l_1)(h - h_2)}$$

Bæreevnen af murpillen i midten bestemmes som:

$$p_{Ed,2} = \frac{4}{3} \left(2f_{tld} + \sigma \frac{l_2 + l_3}{l_3} \right) t^2 \cdot (h_2 + t)^2$$

Lasten fra ydervæggene fordeles af tagskiven til de stabiliserende vægge i huset – som regel vægge omkring køkken og toiletkerner – og til partier uden huller i facaden. Disse vægge fører ved hjælp af skivevirkning lasten videre ned i terrændækket.

Skivevirkning beregnes ud fra anvendelse af Coulombs friktionshypotese:

$$V_{Rd,1} = \left(c + \mu \left(\sigma + \frac{G}{t \cdot l} \right) \right) \left(l - 2 \cdot \frac{V_{Ed}h}{\sigma \cdot t \cdot l + G} \right) t$$

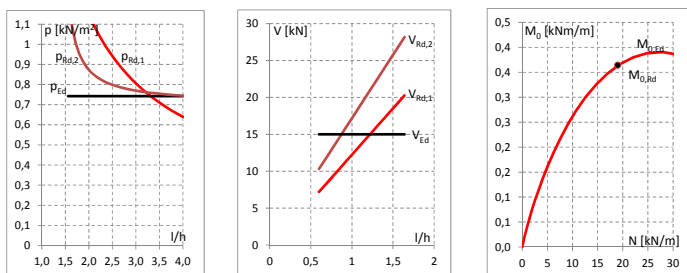
$$V_{Rd,1} = V_{Rd,2} = (c + \mu \cdot \sigma) t \cdot l$$

Centralt i bygningen og i facaden vil lodrette laster skulle føres til husets fundamenter. Det sker som lodret tryk på husets vægge. Styrken af en væg bestemmes under hensyntagen til stabilitetsfænomener, dvs. effekter, hvor konstruktionselementer uden vandret påvirkning uvarslet bøjer ud vandret.

Søjlebæreevne beregnes ud fra Ritter's søjleformel:

$$M_{0,Rd} = \frac{f_d}{1 + \frac{12 \cdot K_E}{\pi^2} \cdot \left(\frac{h}{t-2e}\right)^2} 0,9 \cdot (t - 2 \cdot e) \cdot e$$

De forskellige bæreevneudtryk er samlet i grafer nedenfor.



Bøjningspåvirkede vægge

Vægges skivebæreevne

Søjlebæreevne

Figur 2. Bæreevnekurver. Til venstre ses bæreevnekurven for den tværbelastede væg. Beregningerne er udført ved at variere l_3 , defineret i Figur 1. I midten ses beregningerne af den vandret påvirkede væg, som sikrer huset mod at vælte. Til højre ses den lodret bærende væg, hvor der er regnet med en $\psi_0 = 0,3$. Ønskes lasten øget fx i det bærende hovedskillerum er det naturligt at vælge anden stenkvalitet.

Det ses af graferne ovenfor, at et facadeparti med 8 m mellem tværafstivende vægge kan modstå trykket fra vinden. At murværket kan modstå 10 kN/m som belastning fra tagkonstruktionen, og at der kan optages vandrette laster i 2 m vægstykker på 15 kN. Dette er feltstørrelser og belastninger som for almindelige parcelhuse er tilstrækkelige til at sikre styrke og stivhed.

OVERLIGGERE

Overligger kan ikke iht. DS/EN 1996 udføres med ståltegl, da det som minimum kræver en mørtel med en trykstyrke på 2 MPa. Derfor må overligger udføres som stik, hvor buevirkningen udnyttes til at bære lasten af tagkonstruktionen.

Styrken af et stik kan eftervises efter følgende formler:

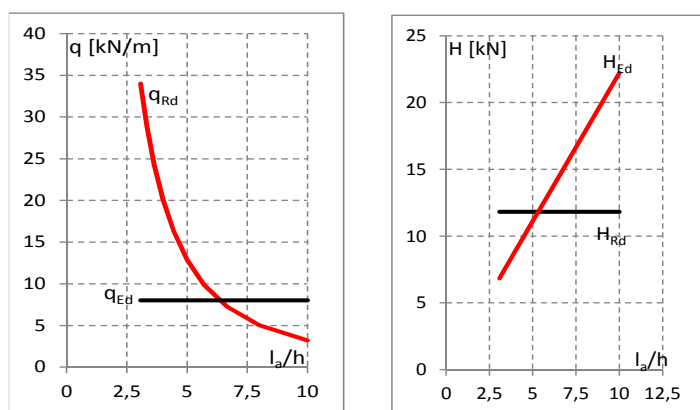
$$q_{Rd} = 8 \cdot f_d \cdot \frac{h}{10} \cdot t \cdot \frac{f}{\left(l_a + \frac{h}{10}\right)^2}$$

Stikket sikres mod at skride ud ved hjælp af Coulombs friktionshypotese:

$$H_{Rd} = c \cdot t \cdot a + \mu(q_{Ed} \cdot a + R_{Ed})$$

Hvor $a = 500$ mm (min. afstand mellem åbninger), R_{Ed} er reaktionen fra stikket, og q_{Ed} er den lodrette last, som belaster stikket.

Ovenstående bevirker, at man uden problemer og som vist nedenfor kan projektere med åbninger på 2 m i lysvidde (l_a). Der kræves i givet fald murpiller mellem åbningerne på min 500 mm for at sikre mod udskridning af det murede stik, og der kræves ligeledes en højde over vinduet på min 388 mm muret vægflade.



Figur 3. Bæreevnekurver for et stik, hvor den lodrette last fra tagkonstruktionen er q , og de vandrette splitkræfter fra stikket er H .

KONKLUSION

De ovenstående beregninger viser, at man kan dokumentere styrkeforholdene for sten og luftkalkmørtel. *Det betyder altså, at man vil kunne opføre et muret parcelhus med luftkalkmørtel – og leve op til gældende krav og standarder når og hvis disse beregningsmetoder implementeres i den gældende lovgivning.* Det skal understreges, at beregningerne også viser, at det er en forudsætning, at bygningen opføres med murede skillevægge pr. ca. 8 m facade med henblik på vindafstivning, og at taget skal være tungt, således at bagmuren herigennem stabiliseres. Endelig viser beregningerne også, at vinduesåbninger skal mures med stik i stedet for overliggere, og det tyder måske alt i alt på en – også arkitektonisk – tilbagevenden til gode og gamle dyder – til en tradition og en byggeskik, som for en tid har været glemt, men som nu kan komme til ny ære og værdighed.

Artiklen er udarbejdet i samarbejde med Anders Nielsen, der har bidraget med nyttige kommentarer og tilføjelser. Anders Nielsen har skrevet de to første artikler i serien.

HENVISNINGER

- [1] Længe leve kalkmørtlen, Anders Nielsen, Tegl nr. 1. 2013
- [2] Længe leve kalkmørtlen 2, Anders Nielsen, Tegl nr. 2. 2013
- [3] Luftkalkmørtel som funktionsmørtel, Line Bundgaard Mathiasen og Lidija Dmitruk, MsC Speciale, BYG.DTU 2013
- [4] Unreinforced Masonry Walls Transversely and Axially Loaded, Lars Z. Hansen, Ph.D. Thesis BYG.DTU, 2004
- [5] Stability of masonry columns, Lars Zenke Hansen, R-055 BYG.DTU, 2003

LÆNGE LEVE KALKMØRTLEN 4

I tre tidligere artikler er vådkalkmørtlens egenskaber blevet behandlet. I [1] belyses materialets mange gode arbejdsmæssige og tekniske egenskaber. I [2] omtales styrkeforholdene og i [3] vises det, hvorledes bæreevnen af et muret hus kan dokumenteres. I denne artikel behandles baggrunden for det faktum, som også er den almindelige erfaring, at huse muret med kalkmørtel og kalkpudsede huse har en udmærket holdbarhed og er behagelige at bo i.

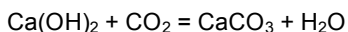


KALKHINDEN

Den gode holdbarhed af huse med kalkmørtel kan undre, når man betænker, at hærdet vådkalkmørtel er et ret porøst materiale med en sammenhængende porestruktur, som let suger vand op.

Årsagen til den gode holdbarhed skal findes i den måde, hvorpå de kalkbaserede materialer krystalliserer, når de er på plads i bygningen.

Bindemidlet i kalkmaterialerne er som bekendt calciumkarbonat, CaCO_3 , som dannes ved at den læskede kalk, calciumhydroxiden, Ca(OH)_2 , reagerer med luftens kuldioxid, CO_2 :



Reaktionen sker meget hurtigt. Det kan enhver overbevise sig selv om, ved at se på overfladen af en spand, hvori der står kalkholdigt vand, fx en murerbalje med vand over mørtelen. I løbet af et kvarters tid er der dannet en grå hinde på overfladen. Den består af fine calciumkarbonatkrystaller, som bryder lyset i polarisationsmikroskopet [se billede A]. Hinden på vandfladen får i løbet af en uges tid en tykkelse på 0,03 - 0,04 mm.

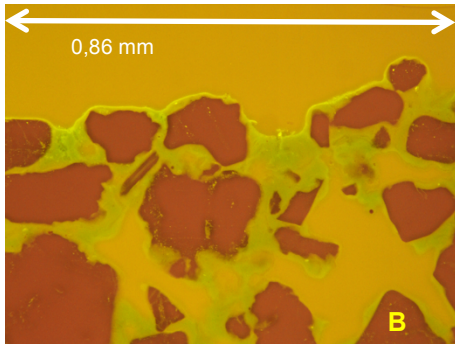
Denne hindedannelse sker lige så hurtigt på overfladerne af de våde fuger i en nyligt opført mur eller et netop færdigt vådt pudslag. Krystallerne er meget små og



kitter tæt sammen. Herved danner de et sammenhængende lag med meget mindre porer, end den bagved liggende mørtel har. [Billede B] Kuldioxiden kan stadig trænge gennem kalkhinden og får efterhånden resten af mørtlen til at hærde. Slutresultatet er, at man har et grovporøst materiale, dækket af en finporøs hinde af karbonatkrystaller.

Det er kendt fra fysikken, at et kapillarrør med lille diameter kan suge vand fra et rør med større diameter, mens det omvendte ikke kan finde sted. Det betyder for et kalkfuge eller et kalkpudslag med den oven for beskrevne struktur, at indsugningen af



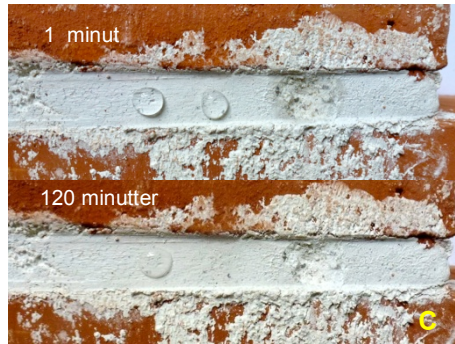


Mikroskopbillede af tværsnit af ydersiden af en fuge af 12 % kalkmørtel. Man ser et lysende gult bånd af calciumkarbonatkrystaller yderst. Herunder gruspartikler (rødbrunt) og kalkbindemiddel (gulgrønt). Baggrunden fremtræder gulbrun.

regnvand fra overfladen og ind forsinkes i forhold til indsugningen i en mørtel uden kalkhinde. Omvendt, når regnen ophører; så vil det vand, som er kommet ind i mørtlen, suges frem mod det finporøse overfladelag og diffundere ud i luften. Man kan sige, at kalkmørtlen virker som en ensretter (diode) over for regnvandet. Virkningen kan ses, hvis man tager et stykke af en god mørtelfuge og drypper vand på overfladen. Her vil vanddråben ligge som en perle. Vender man mørtelstykket om og drypper vand på bagsiden, vil det meget hurtigt opsuges. På billede C ses virkningen på en vandret liggende mørtelfuge.

SELVHELING

Men vil denne kalkhinde ikke opløses af den sure regn? For at forklare dette, må man tænke på, at en udendørs eksponeret mørtel ikke er et statisk materiale, således at forstå, at når først karbonatiseringen er sket, foregår der ikke mere. Der foregår en stadig transport af stof ud og ind af materialet og frem og tilbage i porerne. Vand suges frem og tilbage, kuldioxid diffunderer ind og møder calciumionerne fra den ukarbonatiserede kalk længere inde i fugen. Den svagt sure regn vil opløse kalkhinden udefra, men det opløste stof kan suges ind i materialet igen. Kalkhinden bliver ved med at være der, som vi kan konstatere på tyndslibsbilleder af gamle mørtler og puds. Det skyldes, at kalkmørtlen har en evne til at selvhæle, således at der



Fuge af 12 % kalkmørtel placeret vandret. Mørtlen er den samme som på billede B. Vand er dryppet på tre steder, hvoraf de to steder til højre på billedet var blevet beskadiget i overfladen. På det meget skadede sted blev vandet suget ind umiddelbart. Efter 120 minutter lå dråben på det ubeskadigede sted stadig perlede tilbage.

bygges på kalkhinden indefra.

Disse transportfænomener bør studeres nøjere for at øge forståelsen for indflydelsen af kalkprocenter, sol- og vindretning på kalkhindens tykkelse. Indtil videre må vi basere os på den erfaring, at en korrekt udført fuge eller puds med en god kalkprocent er bestandig udendørs, når vi ikke er helt ude ved havet.

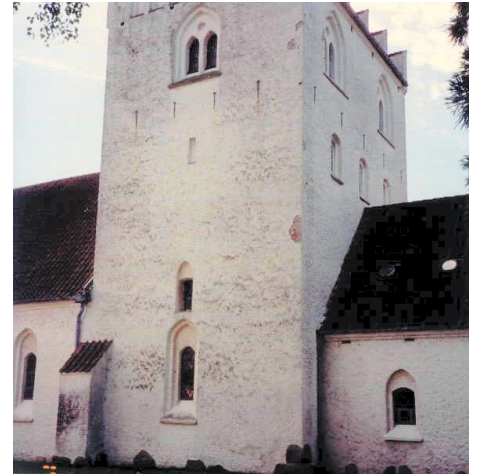
KALKVANDSDISKUSSIONEN

Kalkvand, dvs. vand som er mættet med calciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, har i mange år været anvendt som efterbehandling af pudsede og kalkede overflader. (Behandlingen blev fremmet og anbefalet i nyere tid af kalkteknikkens danske nestor Curt von Jessen (1925 - 1999)). Der er imidlertid en del teknikere, som er skeptiske over for behandlingen, og som mener, at det er lige så godt at bruge rent vand til vådholdelsen.

Med henvisning til ovenstående må det udledes, at kalkvandet, når det fordamper, efterlader den opløste $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i overfladens mindste porer, hvor det kan reagere med CO_2 . Herved styrkes kalkhinden og dermed den vandafvisende evne, og holdbarheden forbedres.

KIRKEKALKNING

Som eksempel på bygninger med god holdbarhed skal nævnes de mange kirker, som bliver vedligeholdt med kalkning.



Lundtofte kirke.

Øverst: Kirkens nordside i 1994 med gummihudsmaling.

Nederst: Kirkens sydside, sep. 2013.



I den forbindelse bliver det ofte diskuteret hvor længe en kalkning kan holde. Som eksempel vil jeg nævnte kalkningen af Lundtofte kirke nord for København. Det er en historicistisk kirke indviet 1921. Den er pudset og kalket. I 1986 blev menighedsrådet forledt til at male kirken med "gummihudsmaling", for så ville der vare meget længe, inden den skulle behandles igen. - Det tog otte år(!) I 1994 var pudsen under malingen sønderfrosset, og malingen var sort af fastsiddende snavs. Den eneste løsning var at hugge al puds af ind til murstenene og bygge et korrekt pudslag op med udkast og finpuds. Til slut blev der kalket.

Første lag kalk blev påført som sandkalk. Herefter blev påført to gange hvidtekalk.



Billede D. Kirketårn skadet på grund af fugning med mørtel med for lille kalkindhold. Den lyse farve på stenene skyldes, at brændhuden er frosset af.

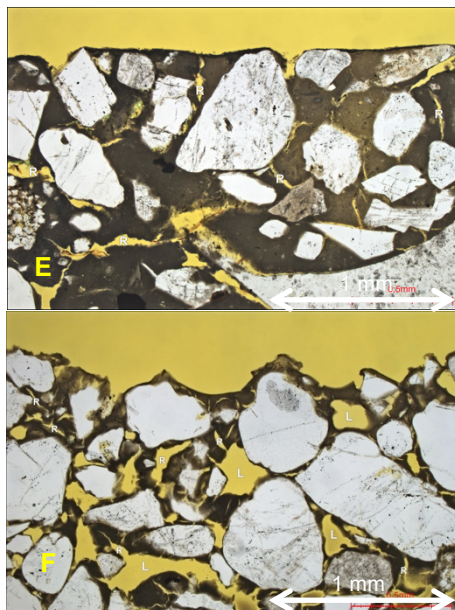
(1 del kalkdej + 5 dele vand). Der blev afsluttet med kalkvand. Kalkningen blev udført vådt i vådt, umiddelbart efter at pudsen var hærdet i overfladen. Man ventede således ikke på, at pudsen skulle blive gennemtør. Da arbejdet var færdigt fremtrådte hele kirken jævnt hvid.

Kirken er "ældet med ynde". Der har ikke været afskalninger af nogen art. Under tårnets glamhuller blev der efterhånden dannet mørke striber under sålbænkene. Kamtakkerne, som er mest udsat for vejrliget blev efterhånden mørkere. Som helhed virkede bygningen dog hvid også i 2005, hvor den igen blev kalket.

Der blev påført to gange hvidtekalk og afsluttet med påsprøjtning af kalkvand. Arbejdet blev udført fra lift, hvilket nogen anser for at resultere i dårligere arbejde, end hvis der bliver kalket fra stillads. Indtil videre har der dog ikke været noget at klage over. I skrivende stund (2013) fremtræder kirken igen "slidt" på samme måde, som ovenfor beskrevet. Levetiden for kalkbehandlingen kan i dette tilfælde sættes til 8 - 10 år.

ET SKADETILFÆLDE

En undtagelse fra kalkmørtlens gode holdbarhed skal omtales. I 1980-erne blev et kirketårn på en middelalderkirke repareret. Fugerne i den øverste del af tårnet blev kradset ud og fuget om med



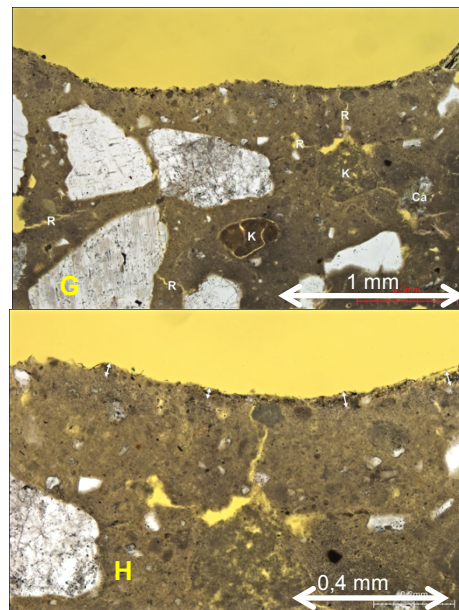
Billede E. Mikrostruktur af oprindelige fugemørtel. Billede F. Mikrostruktur af reparationsmørtel med for ringe kalkindhold.

kalkmørtel. Men efter nogle år begyndte både mørtel og sten at fryse i stykker og skalle af [Billede D].

Tyndslibundersøgelser viste, at der oprindeligt har været anvendt en meget fed mørtel med 20 - 30 % kalk [Billede E]. Ved reparationen blev der imidlertid brugt 6,6 % mørtel [Billede F]. I en sådan mørtel er der ikke bindemiddel nok til at fylde ordentligt ud mellem gruspartiklerne. Der bliver huller i overfladen, som kalkhinden ikke kan spænde over, regnvand kan trænge ind med de deraf følgende ødelæggelser. - Der bliver nu fuget med en til dette arbejde af muremester Ole Jensen udviklet middelaldermørtel med 25 % bindemiddel [Billede G og H].

IGANGVÆRENDE FORSØG

Ved DTU-Byg har vi netop igangsat forsøg, hvor det skal undersøges, hvilke faktorer, som påvirker dannelsen af kalkhinden. Der skal måles på effekten af den, og der skal foretages sammenligninger med cementholdige mørtler. En af de metoder, som vandoptagelsen skal måles med er den såkaldte Karsten tube.



Billede H er et udsnit af billede G. Kalkhinden er markeret med hvide pile. Billede E - H: Foto Torben Seir.

SLUTNING

Kalkpuds, kalkmørtelfuger og kalkning er i stand til at modstå vejrliget, trods materialets ringe mekaniske styrke. Det skyldes en hinde af kalkkrystaller, som dannes på overfladen straks efter arbejdets udførelse. Dette fænomen er så vidt vides ikke beskrevet tidligere.

Luftkalkmørtel bør ikke være en historisk kuriositet. Den er et godt bindemiddel og virker samtidig som ensrettermateriale til at holde huse af porøse materialer tørre.

HENVISNINGER

[1] Længe leve kalkmørtlen, Anders Nielsen, TEGL 2013:1, side 30 - 33.

[2] Længe leve kalkmørtlen 2, Anders Nielsen, TEGL 2013:2, side 34 - 39.

[3] Længe leve kalkmørtlen 3, Lars Zenke Hansen, TEGL 2013:3, side 34 - 37.

Anders Nielsen, civilingeniør, tekn dr
Hjortekærbakken 7, DK-2800 Lyngby
kiogan@webspeed.dk
Docent em. fra DTU - Byg
Har undervist i bygningsmaterialer.