Nedbrydning af mure

Overvågning af nedbrydning af mure med henblik på genanvendelse af mursten efter adskillelse og rengøring

TEKNOLOGISK INSTITUT

3. april 2017

Titel:
Nedbrydning af mure
Overvågning af nedbrydning af mure med henblik på genanvendelse af mursten efter adskillelse og rengøring

Rekvirent:
Gamle Mursten
Att.: Mette T. Rasmussen
Skotlandsvej 16
5700 Svendborg

Udarbejdet af:
Teknologisk Institut
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Tlf. 7220 2000
Byggeri og Anlæg
Murværk
Mette Moesgaard

Kvalitetssikring:
Sagsansvarlig: Mette Moesgaard, tlf. 7220 1708, mstm@teknologisk.dk

Opgave nr.: 0109/719708rev1
Version nr.: 02
Dato: 03. april 2017

Den reviderede rapport 0109/719708rev1 erstatter tidligere fremsendte rapport af 24. marts 2017. Den reviderede rapport indeholder ingen kommentarer omkring revnedannelse mellem sten og mørtel i testvægge. Årsagen er, at denne revnedannelse primært blev observeret på murenes bagside frem for på murenes forside.

Resultater af Instituttets opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag.
Instituttets navn eller logo eller medarbejderens navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.

Indledning

Teknologisk Institut, Murværk har for **Gamle Mursten**, Svendborg, foretaget overvågning af nedbrydning af mure med efterfølgende optælling af adskilte og rengjorte sten. Nedrivningen er foretaget med henblik på genanvendelse af mursten efter adskillelse og rengøring. Der er desuden foretaget test af vedhæftningsstyrke af sammenmurede mursten samt minutsug for afvendte mursten.

Testmure

Gamle Mursten har oplyst, at de fire testmure er opmuret i perioden 24. til 28. oktober (uge 43) 2016. Murene er opbevaret i lagerhal under hærdningen.

Nedbrydning foretages 14. marts 2017. Dvs. nedbrydningen foretages 19-20 uger efter opmuring. Den anvendte mørtel har således fået lov at hærde knap 5 måneder forud for nedbrydning.

Hærdningen af mørtlen er undervejs fulgt ved test med phenolphtalein. Dette er en indikator, som i basisk miljø er rød, mens den i surt eller neutralt miljø er farveløs. Rødfarvning fortæller således, at mørtlen stadig indeholder uhærdnet kalk og således ikke er færdighærdet.

Den anvendte mørtel er en hydraulisk kalkmørtel. Forholdet mellem kalk (luftkalk, K) og hydraulisk kalk (K_h) er 20:80. Der er til opmuringen anvendt mørtel med to forskellige indhold af tilslagsmateriale hhv. KK_h 20/80/358 og KK_h 20/80/500.
Hydraulisk kalk fremstilles ved brænding af lerholdige kalksten. Dvs. hydraulisk kalk består både af en hydraulisk del, som hærder ved reaktion med vand tilsvarende cement samt en kalkdel, som hærder ved reaktion med CO_2 fra luften – deraf navnet luftkalk. Til den aktuelle mørtel er den hydrauliske kalk blandet med luftkalk i forholdet 80:20 (K_h:K).

Ved reaktion af hydraulisk kalk med vand dannes calciumhydroxid. Dette er det samme stof, som udgør kalkdelen af mørtlen, dvs. luftkalk. Calciumhydroxid er stærkt basisk. Ved reaktion med CO_2 fra luften omdannes calciumhydroxid til calciumcarbonat, som er en neutral forbindelse. Tilstedeværelsen af calciumhydroxid og dermed hydratiseringsgraden af mørtlen kan således testes med en syrebase-indikator, som skifter farve afhængig af pH. Da carbonatiseringen sker som følge af en reaktion med CO_2 fra den omgivende luft, vil carbonatiseringen starte fra mørtlens overflade (synsflade og bagside) og bevæge sig indad i mørtelfugen.

Den hydrauliske del af mørtlen vil have udviklet styrke allerede ved reaktion med vand inden færdigcarbonatisering, mens kalkdelen først udvikler styrke ved carbonatiseringen.

Forud for nedbrydning er det ved test med phenolphtalein verificeret, at mørtlen er færdighærdet i overfladen. Der er ikke foretaget test længere inde i fugen. En sådan test kan foretages ved at bore et lille hul i mørtelfugen med boremaskine og derefter pådryppe phenolphtalein i hullet.

Der er opmuret 4 skalmure (½-stens bredde); 18 skifter høje og 5 stens bredde. Dette svarer til en højde på 1,2 m og en bredde på 0,6 m. Murene er opmuret i ½-stens løberforbandt (Figur 1). De fire testmure er opmuret på paller med et mørtellag nederst.
I murenes ene ende er muret et hjørne på en stens længde (Figur 2).

Der er til fremstilling af hver mur anvendt 90 hele sten og 18 halve sten. For mur nr. 1.1 er der anvendt en blanding af cellesten og massive sten, mens der for de 3 resterende mure udelukkende er anvendt massive sten.

Figur 1: De fire testmure. Foto til venstre viser mure opmuret med genbrugssten. Foto til højre viser mure opmuret med nye gule blødstrøgne sten.

Figur 2: I testmures ene ende er opmuret et hjørne på en stens længde.

Der er som nævnt anvendt to forskellige hydrauliske kalkmørtler til opmuring hhv. KK_h 20/80/358 og KK_h 20/80/500 jf. tabel 2. KK_h 20/80/358 er modtaget fra leverandøren, mens KK_h 20/80/500 er fremstillet ved blanding af KK_h 20/80/358 med genbrugssand i masseforholdet 3:1 (mørtel til genbrugssand).

To mure (ID 1.1 og 2.1 jf. tabel 2) er opmuret med blandede genbrugsmursten i gule nuancer. De anvendte sten er renset hos Gamle Mursten og har produktnummer MS0120 gul samt betegnelse Gul Maskinrenset facadesten.

To mure (ID 1.2 og 2.2) er desuden opmuret med nye gule blødstrøgne massive mursten af dansk normalformat.

Tabel 1 viser navngivning og karakteristika for de fire prøvemure.

Tabel 1

Mur ID	**1.1**	**2.1**	**1.2**	**2.2**
Sten	Genbrugssten MS0120 GUL	Genbrugssten MS0120 GUL	Nye gule BS massive sten	Nye gule BS massive sten
Mørtel	KK_h 20/80/358	KK_h 20/80/358 (75%) + genbrugssand (25%) = KK_h 20/80/500	KK_h 20/80/358 (75%) + genbrugssand (25%) = KK_h 20/80/500	KK_h 20/80/358

Nedbrydning

Nedbrydningen foretages ved fald af testmur fra 3 m (løftehøjde af truck, Toyota Tonero 25) højde på underlag af fast jord. Dette skal simulere fald af større murværksbrokker under nedrivning. De dannede mindre brokker, enkelte sten og mørtelrester samles herefter op med en gummiged og falder derefter ca. 1 m ned på metalunderlag i fødekassen af Gamle Murstens rensemaskine. Herefter gennemgår stenene samme vibrationsrensningsmetode efterfulgt at manuel rensning af vedhængende mørtel, som normalt foretages hos Gamle Mursten. De rensede sten sorteres herefter i hele sten, halve sten (kopper), skæresten (dvs. sten med en intakt synsflade til udskæring af skaller) samt ikke brugbare ødelagte og knuste sten. Her anvendes samme sorteringskriterier, som normalt anvendes af Gamle Mursten. Antallet af sten i de forskellige kategorier tælles.

Desuden foretages på brovægt en vejning af de intakte testmure forud for nedbrydning samt af rensede sten til slut. Vægten af rensede sten inkluderer ud over de ovennævnte 3 produktklasser også brudte og knuste sten uden genanvendelsespotentiale.

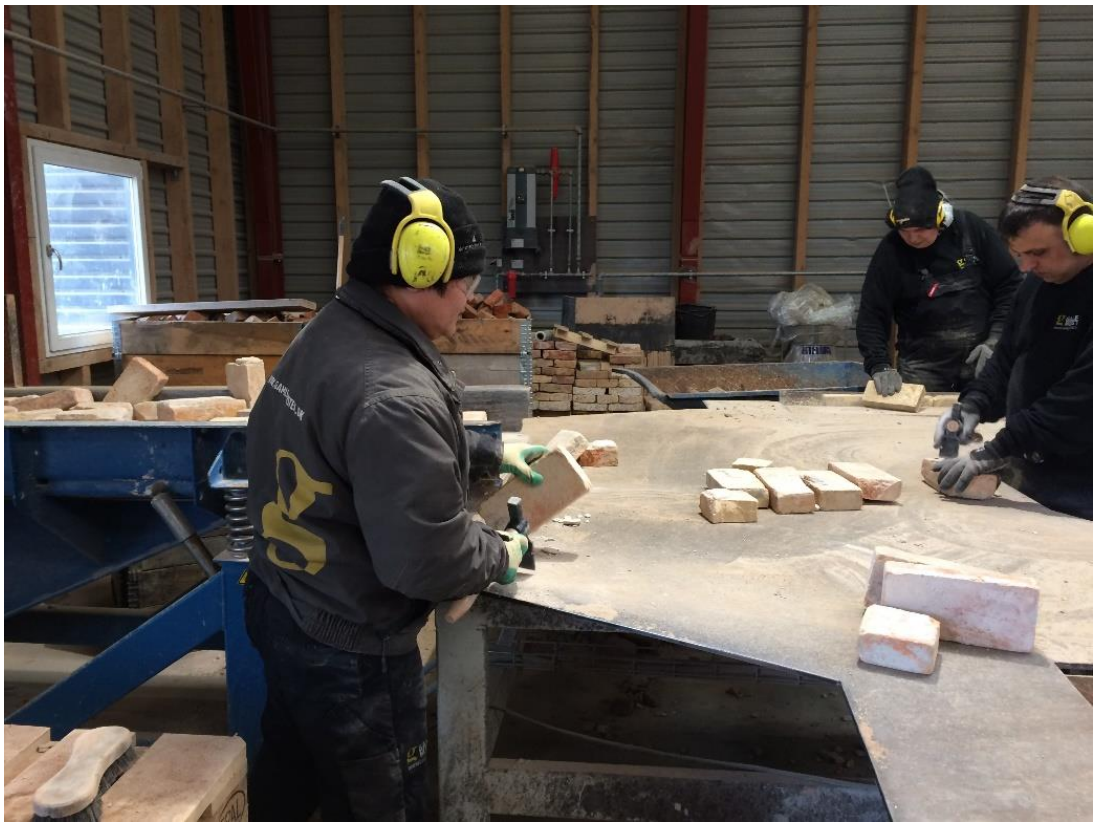
Figur 3-5 viser de forskellige trin i nedbrydningsproceduren. Alle mure gennemgår den samme nedrivnings- og renseprocedure. Under maskinrensningen frasorteres over en rist fint materiale i form af mørtelstøv og mindre stykker af mørtel og tegl (Figur 6). Desuden frasorteres sammenhængende sten, som ikke er adskilt under den første vibrationsproces. Enkelte sten, som ved en fejl frasorteres som sammenhængende brokker, medtages i den efterfølgende manuelle afrensning af de sidste mørtelrester.

Ved en egentlig nedrivning kan en hårdere behandling af det nedrevne murværk forventes bl.a. med yderligere løft og fald fra mindre højder f.eks. ved læsning i container samt

belastning fra kørsel af entreprenørmaskiner ovenpå det nedrevne murværk. Den øgede belastning kan både medføre større grad af adskillelse af sten og mørtel, men vil også øge risikoen for brud og skadedannelse på sten. Herved kan andelen af hele og halve sten blive reduceret i forhold til resultatet af dette forsøg.

Figur 3: Fald af mur fra 3 meters højde.

Figur 4: Venstre) Fald af murbrokker, sten og mørtel fra ca. 1 m ned i fødekasse. Højre) Vibrationsrensning af brokker.



Figur 5: Manuel rensning af mørtelrester fra sten.

Figur 6: Frasorteret mindre stykker af mørtel og tegl. Venstre mur 2.1. Højre mur 2.2.

Figur 7-10 viser desuden et foto af de løse sten og murbrokker efter det første fald fra 3 m højde for hver af de fire testmure. For de to mure opmuret med genbrugssten (mur 1.1 og 2.1) ses næsten fuldstændig nedbrydning til enkelte sten efter fald fra 3 m højde. For de to mure opmuret med nye sten (mur 1.2 og 2.2) ses flere mindre sammenhængende brokker efter fald fra 3 m. Disse sammenhængende brokker adskilles dog næsten alle sammen under den efterfølgende vibrationsproces. Kun for mur 1.2 frasorteres én sammenhængende brok på 1½ sten. For de resterende 3 mure er der intet spild grundet sammenhængende brokker som ikke adskilles under den udførte nedrivningsproces.

Figur 7: Mur 1.1 efter fald fra 3 m.

Figur 8: Mur 2.1 efter fald fra 3 m.

Figur 9: Mur 1.2 efter fald fra 3 m.

Figur 10: Mur 2.2 efter fald fra 3 m.

Figur 11 viser fotos af de rensede sten for de fire mure, mens tabel 2 viser en oversigt over optalte sten efter nedbrydning og rensning. Stenene er som nævnt sorteret i tre klasser hhv. hele sten, halve sten (kopper) og skæresten (dvs. sten med en intakt synsflade til udskæring af skaller). Tabellen viser desuden massen af mure før nedrivning samt rensede sten. I massen af rensede sten indgår foruden de tre produktgrupper massen af ikke brugbare dvs. ødelagte sten.

Af tabellen ses, at det med den pågældende præcision af vægten ikke har været muligt at detektere forskelle i vægt af de opmurede mure samt vægt af frasorterede tegl. For alle fire mure udgør den rene tegl 79 % af murens startmasse. For murværk gælder generelt, at mørtel udgør 20-25 % af murværkets masse. Fra figur 6 ses, at de under vibrationsrensningen frasorterede mindre stykker indeholder både mørtel og tegl, hvorved en andel af teglet ikke indgår i det opsamlede rene tegl. For de fire undersøgte mure kan mørtel således konkluderes at udgøre mindre end 20 % af de oprindelige mures masse.

Figur 11: Rensede sten fra de fire testmure. Venstre) Mur 1.1 øverst og mur 2.2. Højre) Mur 2.1 øverst og mur 1.2 nederst.

Tabel 2: Oversigt over antal rensede sten i de tre produktklasser; hele sten, halve sten og skæresten. Desuden ses masse af mur før nedrivning samt masse af rensede sten.

Mur ID	**1.1**	**2.1**	**1.2**	**2.2**
Hele sten	55[a]	74	62	48
Halve sten (kopper)	39[b]	25	40	56
Skæresten	3[c]	7	5	2
Masse hel mur (kg)	300	300	300	300
Masse rensede sten (kg)	236	236	236	236

[a] Heraf cellesten 13, [b] Heraf cellesten 19, [c] Heraf cellesten 1

Til bestemmelse af genanvendelsesprocenten anvendes følgende antagelser. Hele rensede sten vægtes med en faktor 1, halve rensede sten vægtes med en faktor 0,5, mens skæresten vægtes med en faktor 0,23 svarende til at skaller udskæres med en bredde på 25 mm ud af stenenes oprindelige bredde på 108 mm. Der kan udskæres én skal af hver skæresten.

De oprindelige mure består af 90 hele sten og 18 halve sten svarende til totalt 99 sten. Tabel 2 viser, hvor mange sten ud af de oprindeligt anvendte som kan genanvendes efter nedbrydning og rensning. På baggrund heraf beregnes en genanvendelsesprocent for sten. Tabel 3 angiver en total genanvendelsesprocent for rensede sten. Denne tager højde for alle tre produktklasser. Desuden angives en genanvendelsesprocent, som udelukkende tager højde for antallet af hele sten, som kan genanvendes.

Det bemærkes, at der i genanvendelsesprocenterne ikke er taget højde for mørtelrestproduktet, som i dag udelukkende genanvendes til vejfyld ofte efter yderligere knusning. Som tidligere nævnt udgør mørtlen normal 20-25 % af murværkets masse.

Tabel 3: Genanvendelsesprocenter for mursten. Der er udregnet en total genanvendelsesprocent, som tager højde for sten i alle tre produktklasser samt en genanvendelsesprocent, som udelukkende tager højde for antallet af hele sten til genanvendelse.

Mur ID	**1.1**	**2.1**	**1.2**	**2.2**
Total, sten oprindelig mur	99	99	99	99
Total, rensede sten	75,2	88,1	83,2	76,5
Total genanvendelsesprocent for sten (%)	76	89	84	77
Hele sten oprindelig mur	90	90	90	90
Hele rensede sten	55	74	62	48
Genanvendelsesprocent hele sten (%)	61	82	69	53

Tabel 3 viser, at den totale genanvendelsesprocent for sten efter nedrivning og rensning af murstenene ligger i intervallet 76-89 % for de fire testmure. Hvis der kun tages højde for genanvendelsen af hele sten fås genanvendelsesprocenter i intervallet 53-82 %.

Ved sammenligninger af testresultaterne to og to ses, at anvendelsen af mørtel med lavest bindemiddelindhold og med genbrugstilslag (mur 2.1 og 1.2) giver anledning til højere genanvendelsesprocenter for teglet end anvendelsen af mørtel med højere bindemiddelindhold. Der ses ingen entydig tendens til enten højere eller lavere genanvendelsesprocenter for enten genbrugssten eller nye sten. Forsøget viser således, at det er muligt at foretage nedbrydning og rensning af genbrugssten på lige fod med nye sten med anvendelse af de pågældende mørtler. Det er således muligt at adskille murværk opmuret med genbrugsmursten med henblik på endnu en genanvendelse af de samme sten. Forud for genanvendelse for anden gang anbefales det dog at foretage test af stenenes egenskaber.

Test af vedhæftningsstyrke

For hver af de fire forsøgsserier jf. tabel 1 er der i tillæg til testmuren opmuret 7 nødder af to sammenhængende sten. Disse er i forbindelse med nedrivningen hjemtaget til laboratoriet hos Teknologisk Institut og vedhæftningsstyrken er testet 15. marts 2017, dvs. dagen efter selve nedrivningen. Testresultaterne fremgår af vedhæftede akkrediterede testrapport 0308/719708 A. Hovedresultaterne er desuden opsummeret tabel 4.

Tabel 4: Vedhæftningsstyrke (middelværdi og karakteristisk værdi) for de fire sæt af forsøgsbetingelser.

Mur. ID	**Antal nødder knækket ved modtagelse i laboratoriet**	**Middel vedhæftningsstyrke og standardafvigelse (MPa)**	**Karakteristisk værdi for vedhæftningsstyrken ($f_{m,xk1}$) (MPa)**
1.1	2	0,141±0,085	0,075
2.1	1	0,351±0,179	0,201
1.2	0	0,201±0,065	0,129
2.2	2	0,104±0,063	0,057

DS/INF 167:2010, Supplerende vejledning for murværk i forbindelse med brug af Eurocode 6, angiver værdier for den karakteristiske vedhæftningsstyrke ($f_{m,xk1}$), som kan anvendes, såfremt disse ikke bestemmes eksperimentelt. For mørteltyperne KC 50/50/700,

K_h 100/400 og KK_h 20/80/475 angives $f_{m,xk1}$ = 0,10 MPa. Denne værdi må opfattes som en konservativ værdi. Ved sammenligning med de opnåede værdier for vedhæftningsstyrken ses, at der for mur 1.1 og 2.2 opnås vedhæftningsstyrker, som ligger under denne konservative værdi angivet i DS/INF 167:2010. De lave værdier opnås på trods af, at den anvendte mørtel (KK_h 20/80/358) har et højere bindemiddelindhold end den normale recept som er KK_h 20/80/475. De opnåede vedhæftningsstyrker for disse to mørtler vurderes således som lave. For mur 2.1 opnås en karakteristisk vedhæftningsstyrke på 0,201 MPa. Denne værdi vurderes som værende en middel vedhæftningsstyrke.

Ud over mørteltype afhænger vedhæftningen også af minutsug for de anvendte sten. Ved sammenligning af vedhæftningsstyrke for de to serier 1.2 og 2.2, hvor samme nye stentype er anvendt, bemærkes det, at den laveste vedhæftningsstyrke opnås hvor mørtlen med det højeste indhold af bindemiddel er anvendt (2.2) (KK_h 20/80/358 mod KK_h 20/80/500). Dette kan umiddelbart ikke forklares.

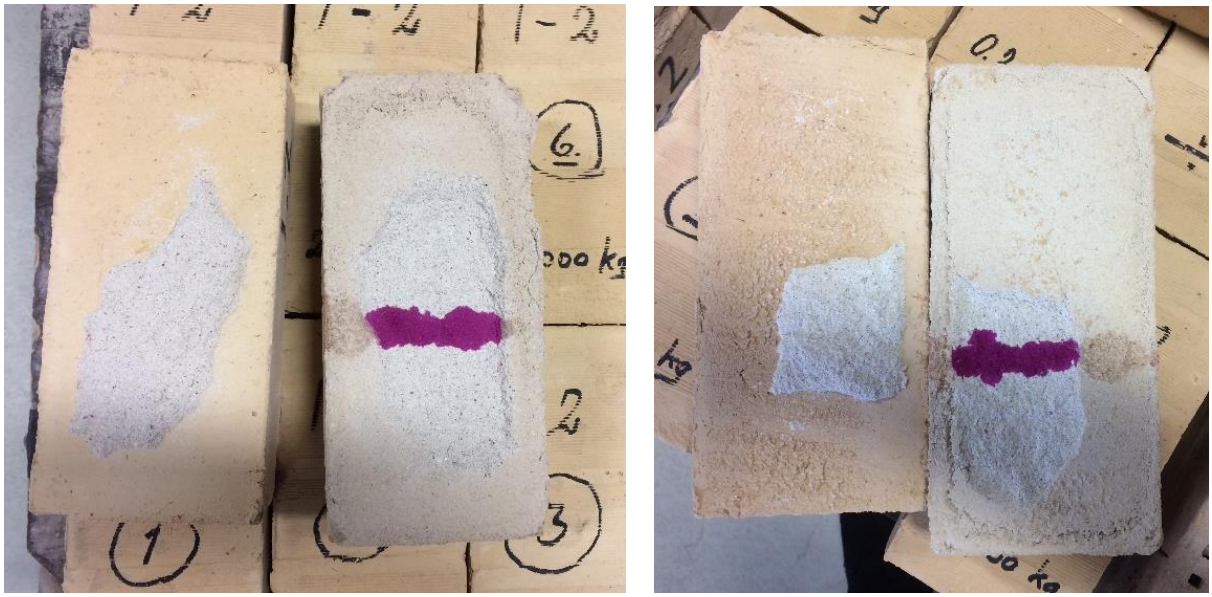
Da belastningen oven på de opmurede nødder til test af vedhæftningsstyrke er begrænset under hærdningen, kan de opnåede resultater ikke betragtes som udtryk for murværkets bøjningsbæreevne. Og det vil således ikke være muligt at projektere et byggeri på baggrund af de udførte test af vedhæftningsstyrke.

De udførte test viser dog, at der *er* opnået vedhæftning mellem sten og mørtel. Dvs. vedhæftningsstyrken er større end 0,0 MPa, og bruddet går for flertallet af de udførte test til dels inde i mørtlen og ikke udelukkende i grænsefladen mellem sten og mørtel. Dette bekræftes også af observationer under nedrivningen, hvor der efter vibrationsrensning af adskilte sten stadig var fastsiddende mørtel på stenene, som måtte fjernes manuelt. Da vedhæftning *er* opnået, er det således meningsfyldt at forholde sig til resultatet af nedbrydningsforsøget.

I forbindelse med test af vedhæftningsstyrke laves desuden en test af mørtlens hærdningsgrad for én nød fra hver testserie. Hærdningsgraden testes ved pådrypning af phenolphtalein på tværs af den brudte fuge. Rødfarvning fortæller, at mørtlen ikke er færdighærdet. Resultaterne ses af nedenstående figur 12-13.

For alle fire mørtler ses kraftig rødfarvning af mørtlen, hvor bruddet går inden i mørtlen. Hvor bruddet går i skillefladen mellem sten og mørtel ses ikke rødfarvning. Dette fortæller, at mørtlen på tidspunktet for nedbrydningen er færdigcarbonatiseret i overfladen, mens der ikke er sket færdigcarbonatisering blot få millimeter under overfladen. Det kan dermed konkluderes, at mørtelfugen ikke er færdighærdet på tidspunktet for nedbrydningen af testmurene. Mørtlen har således ikke udviklet sin fulde styrke ved nedbrydningen.

Figur 12: Test af mørtlens hærdningsgrad med phenolphtalein for prøverne 1.1 og 2.1 begge opmuret med genbrugssten.



Figur 13: Test af mørtlens hærdningsgrad med phenolphtalein for prøverne 1.2 og 2.2 begge opmuret med nye sten.

Test af minutsug

Efter test af vedhæftningsstyrke bestemmes minutsug for stenene anvendt til nødder (to sammenhængende sten) til test af vedhæftningsstyrken. Test af minutsug foretages på den side, som ikke har været i kontakt med mørtelfugen. Testen skal således give et ind-

tryk af stenenes minutsug forud for opmuring. Inden test fjernes støv fra stenenes overflade med en børste. For hver af de fire serier (1.1, 2.1, 1.2 og 2.2) er der udvalgt 10 tilfældige sten til test af minutsug.

Resultaterne fremgår af akkrediterede prøvningsrapport 0308/721803 prøveemner A. Tabel 5 giver desuden en opsummering af de gennemsnitlige resultaterne for sten fra hver testmur.

Tabel 5: Minutsug for sten anvendt til de fire testmure. Minutsug er bestemt for liggeflader, som ikke har været i kontakt med opmuringsmørtel.

Mur. ID	**Middel minutsug og standardafvigelse (kg/m^2)**
1.1	3,06±1,83
2.1	1,21±0,52
1.2	2,53±0,09
2.2	2,62±0,11

Af tabellen ses, at de nye massive gule sten anvendt i murene 1.2 og 2.2 har middel minutsug på 2,6 kg/m^2. For de nye sten ses lave spredninger for de 2 gange ti målinger. For genbrugsstenene anvendt til murene 1.1 og 2.1 ses derimod noget højere spredninger på resultaterne. For mur 1.1 ses resultater som spænder fra minutsug på 0,87 kg/m^2 til 5,91 kg/m^2, mens der for mur 2.1 ses minutsug som spænder fra 0,37 til 2,06 kg/m^2.

For de til nye gule massive sten er der desuden foretaget test af minutsug på 2 x 6 sten efter nedrivning af murene samt adskillelse og rengøring af sten. Disse test skal tjene til undersøgelse af effekten på minutsuget, når indmurede sten adskilles og renses. Forud for test af minutsug er løst mørtelstøv fjernet med en børste. Vedhængende mørtel er ikke fjernet. Resultaterne for disse test fremgår af akkrediterede prøvningsrapport 0308/721803 prøveemner B. Tabel 6 angiver desuden en opsummering af de gennemsnitlige resultater.

Sammenligning af resultaterne i tabel 6 og 7 viser, at der for de til dette forsøg anvendte materialer og hærdningsbetingelser ikke ses nogen effekt på minutsug som følge af opmuring, hærdningsperiode, nedrivning og rensning af sten.

Tabel 6: Minutsug for gule BS massive sten indkøbt som nye til forsøget efter opmuring og efterfølgende rensning.

Mur. ID	**Middel minutsug og standardafvigelse (kg/m^2)**
1.2	2,59±0,10
2.2	2,63±0,07