



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

EKSPERIMENTEL OG TEORETISK UNDERSØGELSE AF ÆLDRE MURVÆRKS STYRKEEGENSKABER

SBI 2015:02



Eksperimentel og teoretisk undersøgelse af ældre murværks styrkeegenskaber

Klavs Feilberg Hansen
Erik Steen Pedersen

Titel Eksperimentel og teoretisk undersøgelse af ældre murværks styrkeegenskaber
Serietitel SBI 2015:02
Udgave 1. udgave
Udgivelsesår 2015
Forfattere Klavs Feilberg Hansen, Erik Steen Pedersen
Fagfælle-
bedømmer Lars German Hagsten
Sprog Dansk
Sidetal 32
Litteratur-
henvisninger Side 25
Emneord Etageejendomme, renovering, ombygning, sikkerhedsvurdering, murværk, hulsten, fuger, kalkmørtel, trykstyrke, forskydningsstyrke, bøjningsstyrke, elasticitetsmodul.

ISBN 978-87-563-1652-1

Fotos SBI
Omslag Ældre murværk. Foto: Jesper Engelmark

Udgiver Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV
E-post sbi@sbi.aau.dk
www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven



FAGFÆLLE-
BEDØMT

Indhold

Forord	4
Indledning	5
Trykstyrken af murværk muret med kalkmørtel (svage mørtler)	6
Forskydningsstyrke af murværk muret med kalkmørtel	14
Forskydningsstyrke	14
Murstens trykstyrke bestemt ved ultralydsmålinger	19
Målemetoden	19
Måleresultater	20
Litteratur	25
Bilag 1. Trykforsøg med murværk muret med delvist hærdet kalkmørtel	26
Bilag 2. Målte lyd hastigheder	29
Bilag 3. Murværksstyrker og E-moduler, forsøgsresultater	31

Forord

Fra omkring 1850 og ind til ca. 1950 er der i Danmark opført en stor bygningsmasse i murværk, især til boliger. Denne bygningsmasse indeholder mange arkitektoniske kvaliteter, men har behov for tilpasning til dagens behov. Murværket i bygningerne er som oftest opmuret med kalkmørtel. Styrkeegenskaberne er ukendte, da murværket er udformet ud fra rent geometriske krav til murtykkelserne.

Denne rapport beskriver, hvordan styrkeegenskaberne af murværket for disse ejendomme kan bestemmes. Rapporten er grundlag for SBI-anvisning 248, *Ældre murværks styrkeegenskaber* (Pedersen & Hansen, 2015).

Rapporten er udarbejdet af seniorforsker Klavs Feilberg Hansen og seniorrådgiver Erik Steen Pedersen, begge fra Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) ved Aalborg Universitet.

Fagfællebedømmelse er udført af civilingeniør, ph.d. Lars German Hagsten.

Arbejdet er finansieret af Grundejernes Investeringsfond (GI) og udført som et samarbejdsprojekt mellem Teknologisk Institut og Statens Byggeforskningsinstitut.

Viden om murværkets tilstand i eksisterende ejendomme er resultat af samarbejde med entreprenørfirmaet Altan.dk, som har muliggjort en undersøgelse af murstenene i en række ejendomme fra 1871-1948 i forbindelse med etablering af nye altaner.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Afdelingen for Byggeteknik og Sundhed
December 2014

Niels-Jørgen Aagaard
forskningschef

Indledning

Denne SBI-rapport beskriver en række undersøgelser, der er udført som grundlag for udarbejdelsen af SBI-anvisning 248, *Ældre murværks styrkeegenskaber* (Pedersen & Hansen, 2015).

Rapporten indeholder tre kapitler omhandlende:

- Trykstyrken af murværket
- Forskydningsstyrken af murværket
- Murstens trykstyrke bestemt ved ultralydsmåling.

Ud over disse tre kapitler indeholder rapporten to bilag:

- Bilag 1. *Trykforsøg med murværk muret med delvist hærdet kalkmørtel*, beskriver forsøg, som viser, at selv murværk med uhærdet mørtel har en betydelig trykstyrke.
- Bilag 2. *Målte lyd hastigheder* indeholder alle de resultater af ultralydsmålinger, der er foretaget på sten fra bygninger opført i perioden 1871-1948.

Trykstyrken af murværk muret med kalkmørtel (svage mørtler)

For murværk muret med svage kalkmørtler gælder, at trykstyrken primært er bestemt af stenenes styrkeegenskaber. Et trykbrud i murværk muret med svage mørtler (kalkmørtel) sker ved, at stenene trækkes over, når de ved forskydning søger at hindre mørtlen i at blive presset ud af fugerne. Ved denne udpresning er mørtlen i et plastisk trykforskydningsbrud, hvor trykstyrken er afhængig af det sidetryk, som stenene kan etablere ved sin fastholdelse af fugen. Det er derfor primært stenenes trækstyrke, i retninger parallelt med stenenes liggeflade, der er bestemmende for murværkets trykstyrke. Disse forhold er for eksempel beskrevet i Suenson (1951). Rent trykbrud i en kalkmørtelfuge kan kun ske mellem meget stærke sten ved meget høje normaltryk (Drdácký et al., 2008), se også *Bilag 1. Trykforsøg med murværk muret med delvist hærdet kalkmørtel*.

Teoretisk murværksstyrke for vægge

Mørtlen regnes at følge Mohr-Coulombs brudbetingelse, som i hovedspændingsformen er:

$$k\sigma_1 - \sigma_3 = f_{mc} \quad (1)$$

hvor

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

hvor φ er mørtlens friktionsvinkel, σ_1 og σ_3 er hhv. største og mindste hovedspænding i fugen, og f_{mc} er trykstyrken af mørtlen.

Det vandret virkende tryk (sidetrykket), som kan etableres i fugen, er i ligevægt med det maksimale træk, som kan etableres i stenene. Trykket er største hovedspænding i fugen og har størrelsen:

$$\sigma_1 = f_{bt} h / t \quad (2)$$

hvor h stenenes tykkelse, t er mørtelfugernes tykkelse, og f_{bt} er stenenes trækstyrke.

Ud fra formel (1) kan σ_3 og dermed murværkets trykstyrke $f = -\sigma_3$, fastlægges som:

$$f = f_{mc} + \frac{f_{bt} h k}{t} \quad (3)$$

Svage kalkmørtler har ofte en trykstyrke under 1 MPa, og dermed bidrager første led i formel (3) kun i ringe grad til bæreevnen. Det andet led i formel (3) er bidraget fra sidetrykket, som øger fugens styrke betragteligt i forhold til den formelle trykstyrke af mørtlen. Dette er demonstreret i *Bilag 1. Trykforsøg med murværk muret med delvist hærdet kalkmørtel*, hvor der refereres forsøg med kalkmørtelfuger, som er hærdet i hhv. 10 minutter, 3 timer, 1 dag og 5 uger. Selv i de tilfælde, hvor mørtlen er meget svag, opnås høje trykstyrker. Dette skyldes, at der etableres et stort sidetryk på grund af, at fugematerialet fastholdes af mursten og prøvemaskine. I murværk fastholdes fugematerialet kun af murstenene, som gennem deres trækstyrke dermed er bestemmende for murværkets styrke.

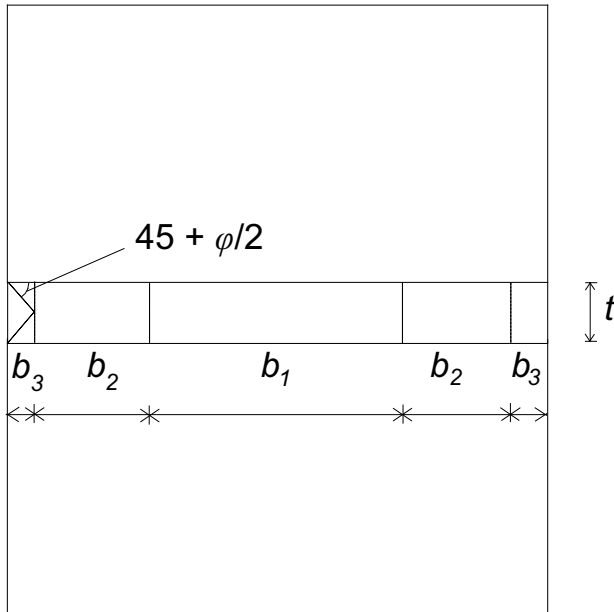
Ved en sten-trækstyrke på for eksempel 1 MPa og en friktionsvinkel på 30° bliver andet led i formel (3) mere end 10 gange større end første led.

Bæreevnen i formel (3) er kun gældende i en vis afstand fra fugens lodrette yderside, se figur 1. I den yderste del af fugen kan murværket kun bære svarende til mørtlens en-aksede trykstyrke, idet sidetrykket er nul. Udstrækningen af denne zone er (se figur 1):

$$b_3 = \frac{t/2}{\tan(45 + \varphi/2)} = \frac{t}{2\sqrt{k}} \quad (4)$$

Bæreevnen på delstrækningen b_3 er:

$$K_3 = \frac{tf_{mc}}{2\sqrt{k}} \quad (5)$$



Figur 1. Zone-opdeling af fugen over stenbredden.

Den vandrette hovedspænding under forudsætning af plan tøjningstilstand opbygges i en overgangszone med udstrækningen b_2 , hvor spændingstilstanden kan beskrives ved et passivt cycloidefelt (Exner, 1983):

$$b_2 = \frac{c_0 \cos^2 \varphi}{\sin \varphi} \ln\left(\frac{f(k-1)}{f_{cm}k} + \frac{1}{k}\right) \quad (6)$$

hvor

$$c_0 = \frac{t/2}{\cos \varphi + \left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \sin \varphi}$$

Hvis $2b_3 + 2b_2$ er større end stenbredden b sættes $b_2 = (b - 2b_3)/2$

Lastoptaget på strækningen b_2 er:

$$K_2 = \frac{f_{cm}}{k-1} \left(\frac{c_0 k \cos^2 \varphi}{\sin \varphi} \left(\exp\left(\frac{b_2 \sin \varphi}{c_0 \cos^2 \varphi}\right) - 1 \right) - b_2 \right) \quad (7)$$

Idet den resterende bredde bærer en fordelt last, som fastlagt i formel (3), kan det samlede lastoptag på stenbredden b bestemmes:

$$K = 2K_3 + 2K_2 + f(b - 2b_2 - 2b_3) \quad (8)$$

svarende til en murværksstyrke på K/b .

Bæreevneudtrykket gælder for en væg, som er så lang, at forholdene ved enderne ingen betydning har for den samlede bæreevne.

Murværksstyrke baseret på forsøg

I figur 2 er afbildet murværksstyrker for forskellige sten. Forsøgsemnerne er 1/1-stens søjler med seks skifter undtagen for Holmelundsvej 39, som er 1/2-stens minivægge. Murværksstyrkerne er gengivet i *Bilag 3. Murværksstyrker og E-moduler, forsøgsresultater*.

Ovennævnte teori er kun gældende, når der optræder plan tøjningstilstand. Dette er ikke tilfældet i forsøgene med kvadratiske mursøjler, hvor der er mulighed for tværbevægelser. Det forhold, at stenene i to naboskifter er orienteret vinkelret på hinanden, bidrager også til en tøjningstilstand, som ikke er plan. For lavere stenstyrker, hvor overgangszonen er lille, vurderes dog, at teorien kan anvendes, idet der etableres overgangszoner langs hele søjle-tværsnittets omkreds. Murstens trækstyrke estimeres ofte som 1/20 af stensstyrken (Hansen 1998). Det forhold, at stenene i to naboskifter er orienteret vinkelret på hinanden, gør, at det effektive trækareal er reduceret. I formlerne (3) til (8) vælges derfor en trækstyrke på 1/30 af stentrykstyrken. Ud fra forsøg beskrevet i kapitlet *Forskydningsstyrke af murværk muret med kalkmørtel* er bestemt middelværdier for friktionskoefficient $\mu = 0,47$, og kohæsion $c = 0,11$ MPa, se figur 6. Når mørtlen regnes at følge Mohr-Coulombs brudbetingelse, kan mørtlens trykstyrke bestemmes til:

$$f_{mc} = 2c\sqrt{k} = 0,35 \text{ MPa} \quad (9)$$

hvor

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2,48$$

$$\varphi = \text{Arctan}(\mu) = 25,2^\circ$$

På basis af disse værdier er i figur 2 optegnet den teoretiske bæreevne for mursøjlerne. Med de valgte parametre fås et kurveforløb, som ligger midt i 'sværmen' af målte styrkeværdier.

Den teoretiske bæreevne for 1/2-stens minivægge er bestemt med samme parametre som for mursøjlerne. Idet minivæggene betragtes som vægge, benyttes ovenstående teori direkte. Derfor anvendes en stentrækstyrke på 1/20 af trykstyrken, svarende til at forbandtet ikke har betydning for brudformen. Herved fås en bæreevne på 17,0 MPa, hvilket er langt over middelforsøgsresultatet på 8,7 MPa. Noget af afvigelsen mellem teori og forsøg kan forklares ved, at der ved væggenes ender, qua den lave tværdimension, formentlig vil være en tøjningstilstand, som ikke kan betragtes som plan. Dette vil resultere i, at brud initieres i endezonerne, som derved aflastes og efterfølgende sætter resten af væggen i brud. Dette kan også forklare den lave bæreevne i forhold til mursøjlerne med lavere stenstyrker.

Den lave bæreevne kan også skyldes at 'reglen' om, at stenenes trækstyrke er en konstant brøkdel af stentrykstyrken, ikke gælder for høje stenstyrker. Forsøgene med mursøjler med stenstyrke 43 MPa indikerer samme tendens over for den teoretiske værdi.

I mangel af en teori, som ikke forudsætter plan tøjningstilstand, og en erkendelse af, at murstens trækstyrke og deres bidrag i et givet forbandt er ukendt, opstilles et mål for murværkets styrke ud fra et empirisk grundlag. Det empiriske grundlag kan kun benyttes på murværk af mindst 1/1-stens tykkelse. Da der kun er forsøg med 1/2-stens vægge for én stenstyrke, er der ikke basis for at opstille et empirisk udtryk for bæreevnen af 1/2-stens murværk.

Ovennævnte teori anvendes dog til at vurdere styrkeegenskaberne følsomhed over for variationer i sten- og fugetykkelser, se afsnittet herunder.

Jævnfør ovenstående teori vurderes stenenes trækstyrke at være langt den væsentligste parameter for murværkets bæreevne. Det antages, at der er en relation mellem stentrykstyrken og stentrækstyrken og dermed en relation mellem stentrykstyrken og murværksstyrken. På figur 2 er indtegnet en empirisk model for sammenhængen mellem sten-trykstyrke, f_b , og murværkets trykstyrke:

$$f = 0,625 f_b^{0,77} - 0,0015 f_b^2 \quad (10)$$

De indgående parametre er bestemt ved mindste kvadraters metode.

Modellen anses for værende konservativ, da andelen af overgangszoner (b_2 og b_3 på figur 1) med lavere bæreevne er høj for et kvadratisk tværsnit i forhold til andre tværsnitsformer.

For den valgte model er modelusikkerheden bestemt i forhold til de afbildede 40 forsøg. Modelusikkerheden bestemmes som usikkerheden i de 40 forsøg reduceret med usikkerheden, der stammer fra spredningen på stenstyrker. Dette gøres ved inden for hver gruppe af gentagne forsøg at anvende middelværdien af stenstyrken som input til den beregnede styrke og sammenligne denne med middelværdien af de eksperimentelle murværksstyrker. For samhörørende værdier af eksperimentelle og beregnede murværksstyrker bestemmes variationskoefficienten for estimeringsfejlen, s_{Δ} , ved hjælp af proceduren i DS/EN 1990, Anneks D, afsnit D.8.2.2.4 (Dansk Standard, 2007). Variationskoefficienten V_{δ} bestemmes herved til 16 % med korrektionsfaktor lig med 1. Værdierne anvendes ved bestemmelse af karakteristiske værdier for murværksstyrke ud fra aktuelle stentrykstyrker bestemt ved prøvning, se SBI-anvisning 248, *Ældre murværks styrkeegenskaber* (Pedersen & Hansen, 2015).

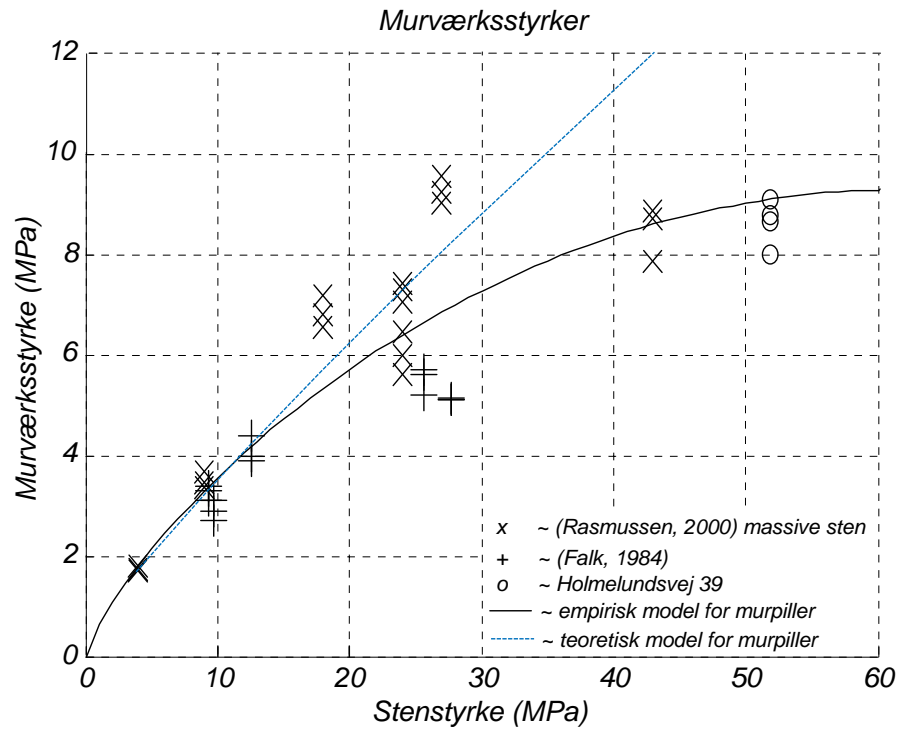
I stedet for at opdele usikkerheden på bidrag fra beregningsmodellen og bidrag fra spredningen på stenstyrken kan benyttes omskrivningen:

$$k = (0,625 f_b^{0,77} - 0,0015 f_b^2) / f_e \quad (11)$$

hvor k , som funktion af de målte murværksstyrker og f_e , betragtes som en stokastisk variabel. Den karakteristiske værdi for k bestemmes ud fra DS/EN 1990, afsnit D.7.2, til $k_k = 0,75$ for $n = 40$ og ukendt variationskoefficient. Den karakteristiske murværksstyrke for murværk muret med massive sten af normalformat og fugetykkelse 12 mm bliver dermed:

$$f_k = 0,75 \times (0,625 m_{fb}^{0,77} - 0,0015 m_{fb}^2) \quad (12)$$

hvor m_{fb} er middelværdien af de målte stenstyrker. Denne metode er brugbar for stenstyrker med en variationskoefficient op til 25 %. For større variationskoefficienter må anvendes metoden, som er beskrevet i SBI-anvisning 248 (Pedersen & Hansen, 2015).



Figur 2. Målte trykstyrker af murværk af massive sten muret med kalkmørtel (k100/1200) og resultatet af modellen (formel (10)). Rasmussen og Pedersen (2000) og Falk (1984) er forsøg med piller, og Holmelundsvej 39 er forsøg med minivægge alle udført af Teknologisk Institut Murværk, se bilag 3. Sidstnævnte serie er minivægge muret med kalkmørtel med sten udtaget i forbindelse med etablering af altaner på nævnte adresse.

Stenformat og fugetykkelse

Det empiriske udtryk (formel (10)) for styrken af murværk muret med svage mørtler gælder for murværk af mindst 1/1-stens tykkelse, hvor fugetykkelsen $t = 12$ mm og stentykkelsen $h = 55$ mm.

For murværk af mindre dimension ($\frac{1}{2}$ -sten og bredsten) må foretages en bestemmelse af murværkets trykstyrke ved laboratorieforsøg.

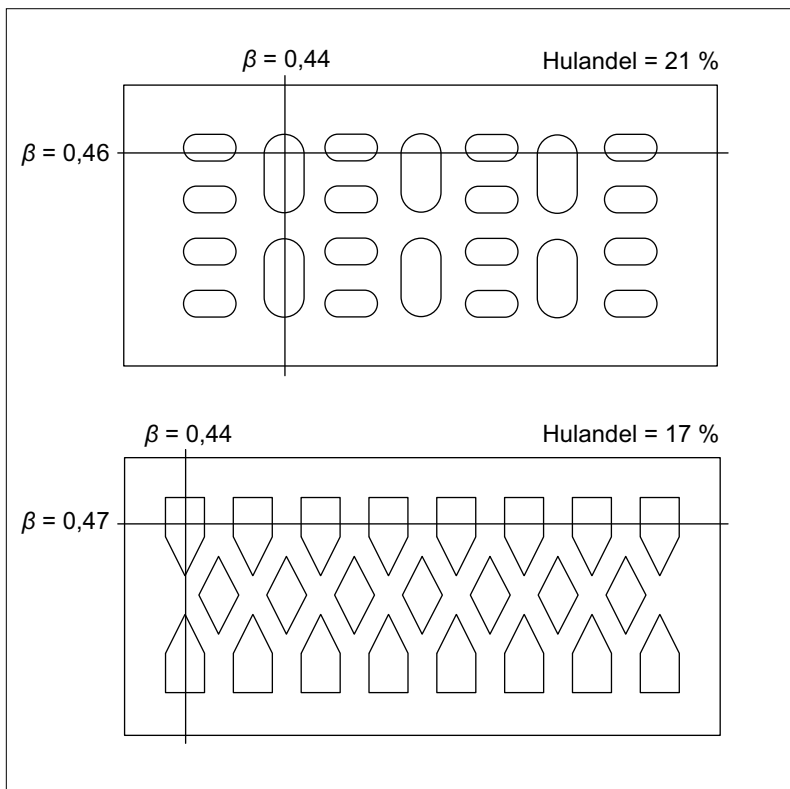
Ved brug af formlerne (3) til (8) kan vises, at en 9 mm fugetykkelse medfører en stigning i bæreevnen på mere end 30 %. En fugetykkelse på 15 mm medfører en reduktion på mindre end 30 %.

Samme teori viser, at for afvigelser i stentykkelsen inden for ± 3 mm kan murværkets styrke korrigeres med faktoren $h / 55$, hvor stentykkelsen h er angivet i mm.

Ved disse følsomhedsanalyser er anvendt kvadratiske søjletværsnit med overgangszoner langs hele omkredsen. I øvrigt er anvendt en mørteltrykstyrke på 0,35 MPa, friktionsvinkler i intervallet 20-30° og stenstyrker i intervallet 1-2 MPa.

Hulsten

I formel (10) er det nødvendigt at tage hensyn til, at hullerne i hulsten reducerer det stenareal, som kan overføre trækspændinger. På figur 3 er vist to hulsten med ikke rektangulære huller, hvor reduktionsfaktoren kaldet β for begge sten er 0,44.

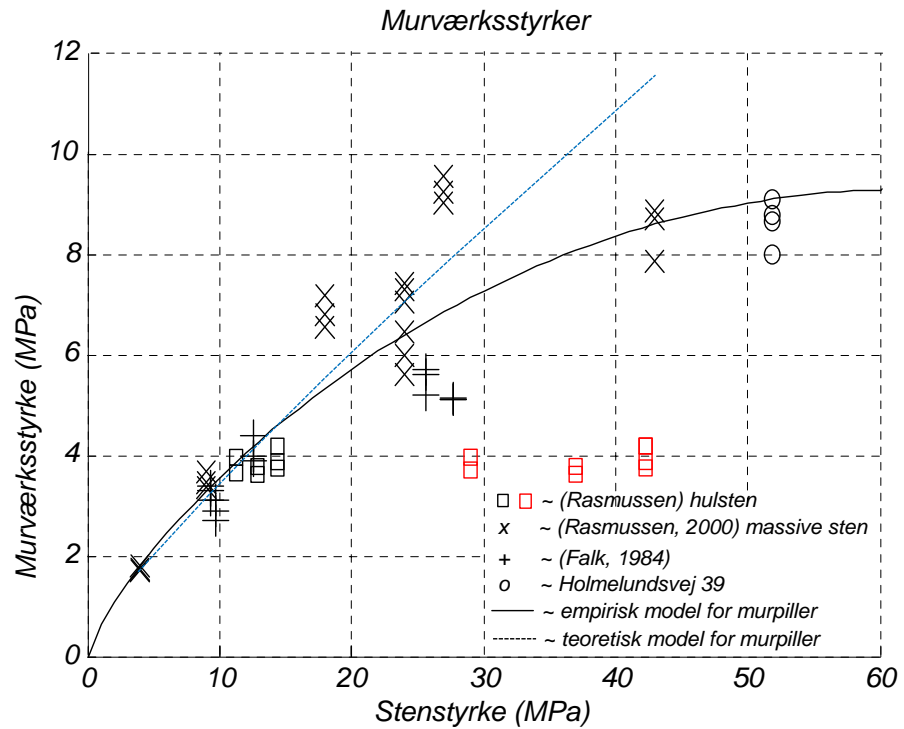


Figur 3. Plantegninger af to typer hulsten med ikke-rektangulære huller og angivelse af reduktionsfaktorer i kritiske lodrette snit.

Der er også udført forsøg med murværk af hulsten muret med kalkmørtel. På figur 4 er resultatet af disse forsøg vist uden hensyntagen til hullernes reduktion af stenenes trækcapacitet (rødt kvadrat) og med en reduktionsfaktor β på 0,44 (sort kvadrat) sammen med forsøgene med massive sten.

I Hansen (1998) er vist resultater af forsøg til bestemmelse af træk- og trykstyrken for mursten. For massive sten fås, at forholdet mellem træk- og trykstyrken med god tilnærmelse er $1/20$. For hulsten med hensyntagen til hullernes reduktion af stenarealet er samme forhold mere usikkert (forskellig hulgeometri og dermed følgende forskellig grad af kærnvirkning), og det anbefales derfor at reducere bæreevnen af murværk muret med hulsten ved at multiplicere med 0,8.

Bæreevnen, formel (10), multipliceres med faktoren $0,8(1 - \beta)$ for at tage hensyn til reduktionen af stenens trækcapacitet.



Figur 4. Trykstyrker for murværk af massive sten og hulsten muret med kalkmørtel. Rødt kvadrat er forsøgsresultater, hvor der ikke er korrigeret for virkningen af hullerne i stenene.

Murværkets elasticitetsmodul

Kalkmørtel har et meget lavt elasticitetsmodul i forhold til teglstenenes elasticitetsmodul. Murværkets elasticitetsmodul kan derfor regnes at være uafhængig af teglsten-typen. Sten af andre materialer kan dog have så lave stivheder, at det har indflydelse på murværkets stivhed.

Ud fra de gængsige forsøgsresultater i *Bilag 3. Murværksstyrker og E-moduler, forsøgsresultater* kan der for teglsten bestemmes en nedre karakteristisk værdi for murværkets elasticitetsmodul på 400 MPa. Med de sædvanlige mål for sten- og fuges tykkelse sammen med en betragtning om, at mørtelens elasticitetsmodul er 1 % af teglstens, jf. (Rambøll, Glarbo & Manniche, 1953), kan teglstens karakteristiske begyndelses-elasticitetsmodul da beregnes til 7600 MPa.

For sten af moler, gasbeton og klinkerbetonsten kan elasticitetsmodulet sættes til 10 % af værdien for teglsten, jf. (Rambøll, Glarbo & Manniche, 1953). Med de normale tykkelser af sten og fuger leder dette til et karakteristisk begyndelses-elasticitetsmodul på 300 MPa for denne type murværk.

Murværkets arbejdskurve

Forsøg viser, at murværk opført i kalkmørtel har en brudtøjning af størrelsesordenen 3,5 %, og at brudspændingen nås asymptotisk (Suenson & Dührkop, 1944; Suenson, 1951). Dette kan udtrykkes som, at tangent-elasticitetsmodulet, E , falder lineært med forholdet mellem spænding, σ , og trykstyrke, f_c :

$$E = E_0 \left(1 - \frac{\sigma}{f_c}\right) \quad (13)$$

hvor E_0 er begyndelses-elasticitetsmodulet.

Samme udtryk ligger til grund for Ritters søjleformel. Idet tøjningen kaldes ε , kan den viste sammenhæng udtrykkes ved arbejdskurven:

$$\sigma = f_c \left(1 - e^{-\frac{E_0}{f_c} \varepsilon}\right) \quad (14)$$

Flere stentyper i samme mur

Hvis en mur er muret med forskellige formurings- og bagmuringssten, som ikke er lige stærke og stive, er placeringen af deltværnsnittenes resultanter afhængige af tøjningstilstanden. Dermed er den centralt trykkede del af søjleværnsnittet ukendt, og Ritters formel kan ikke anvendes. I stedet beregnes muren som en bjælkesøjle baseret på en tværsnitsanalyse, hvor murtykkelsen opdeles i deltykkelser svarende til andelen af formuringssten og bagmuringssten. Hver deltykkelse tildeles hver sin arbejdskurve defineret ved de fastlagte styrke- og stivhedsegenskaber. Denne tværsnitsanalyse er beskrevet i SBI-anvisning 248, *Ældre murværks styrkeegenskaber* (Pedersen & Hansen, 2015).

Forskydningsstyrke af murværk muret med kalkmørtel

Forskydningsstyrke

Der er udført forsøg med forskydningspåvirkning af kalkmørtelfuger med sten fra to ejendomme på adresserne Holmelundsvej 39 og Ryesgade 73 i København. For hver ejendom er der fremstillet seks forsøgslegemer til vridningsprøvning, dvs. kombineret vridning og normalkraft, bestående af to sten sammenmuret med kalkmørtel.

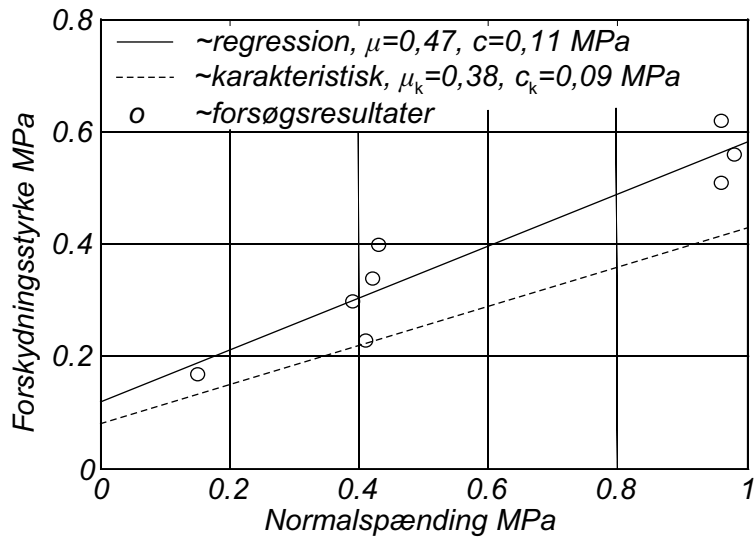
Forsøgsopstillingen er vist i figur 5.



Figur 5. Forsøgsopstilling til bestemmelse af forskydningsstyrken af kalkmørtelfuger.

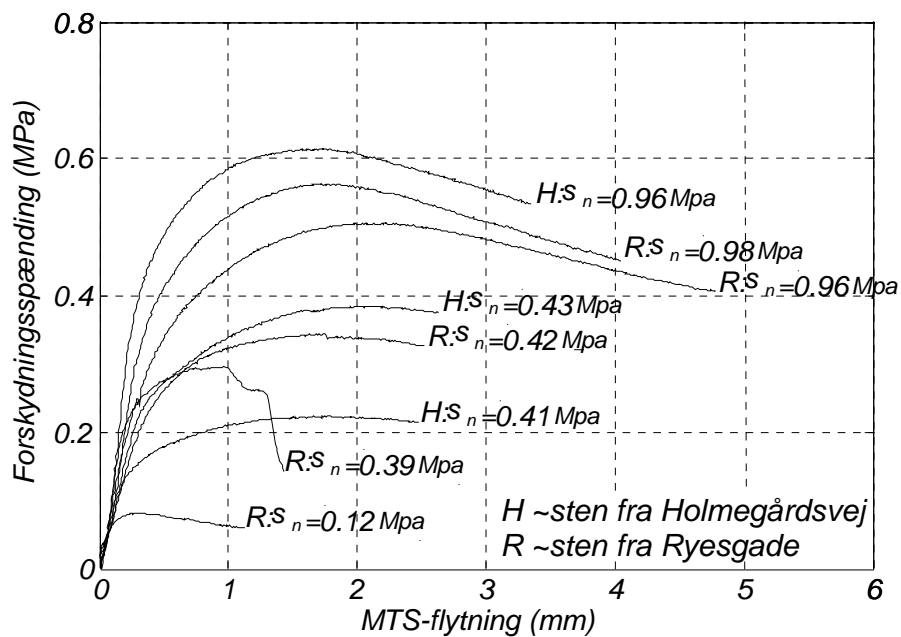
Forsøgsopstillingen er nærmere beskrevet i Hansen og Pedersen (2009), hvor det på den sikre side er forudsat, at forskydningsspændingen er konstant og i et hvert punkt har en retning vinkelret på en linje gennem fugens centrum og punktet. Metoden er sammenlignet med prøvningsmetoden i DS/EN 1052-3 (Dansk Standard, 2002).

Af de 12 forsøgsemner, der er fremstillet, er stenene gået fra hinanden ved uheldig håndtering i to tilfælde, i ét tilfælde er en sten gået i stykker under påføring af normalkraft, og i ét tilfælde har der været fejl i nulstillingen af kraftmålingen. Resultatet af de otte resterende forsøg i form af den maksimale styrke, der er målt under forsøget, er vist i figur 6.



Figur 6. Forskydningsstyrken af kalkmørtelfuge som funktion af normspændingen

De karakteristiske værdier bestemmes, jf. DS/EN 1052-3 (Dansk Standard, 2002), ved at gange værdierne fundet ved lineær regression med 0,8. Hermed fås kohæsionen $c_k = 0,09$ MPa og friktionskoefficienten $\mu_k = 0,38$. Arbejdslinjerne for forsøgene er vist i figur 7.



Figur 7. Arbejdslinjer for de otte vridningsforsøg. Normalspændingen i fugen er σ_n .

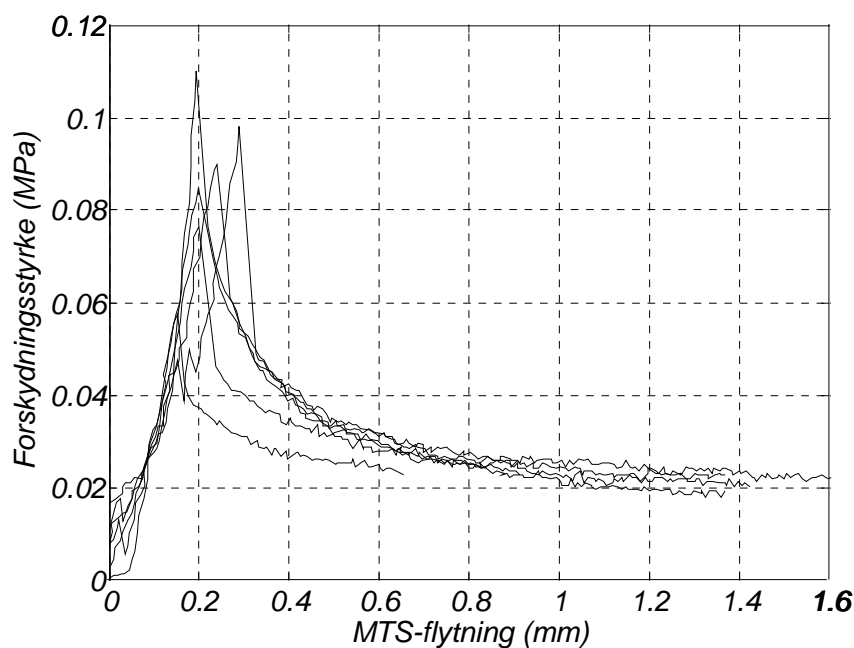
I alle forsøgene er bruddet i mørtlen sket stort set som vist i figur 8.



Figur 8. Fotografi af mørtelbrud i forsøgsemne 4H.

Det fremgår af figur 6 og figur 7, at der kun er forsøgsmæssig dækning for normalspændinger over 0,12 MPa. I dette område er deformationskapaciteten relativt stor, hvilket medfører, at der kan regnes med samvirke mellem flere fuger.

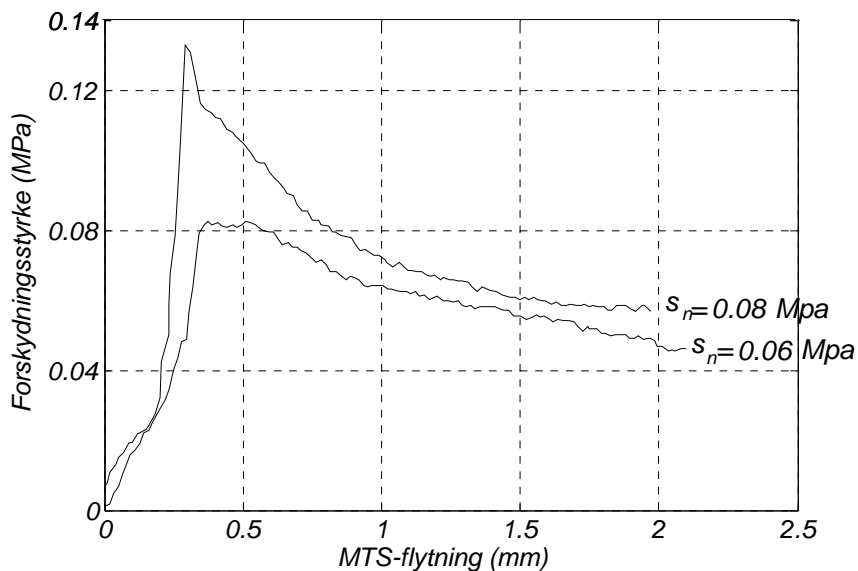
For at undersøge forholdene ved normalspændinger mindre end 0,12 MPa er der i dette område udført en række vridningsforsøg med nye sten, der er sammenmuret med en kalkmørtel. På figur 9 er vist arbejdslinjerne for seks vridningsforsøgsemner påtrykt en normalspænding på 0,02 MPa.



Figur 9. Arbejdslinjer for seks vridningsforsøgsemner påtrykt en normalspænding på 0,02 MPa.

Det ses, at hvis forskydningsstyrken baseres på den maksimalt målte forskydningsstyrke, kan der ikke forventes at få samvirke mellem flere fuger.

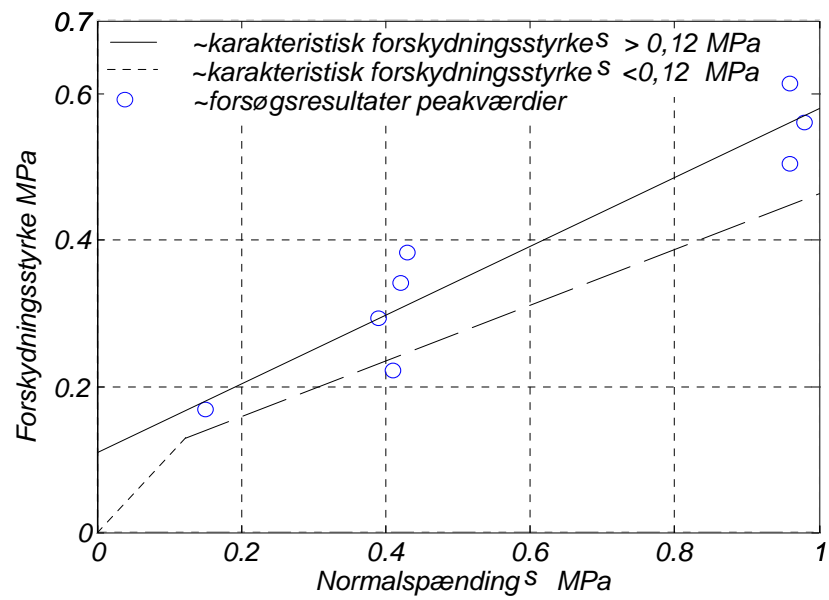
For normalspændinger større end 0,02 MPa fås arbejdslinjer, som mere og mere nærmer sig udseendet af arbejdslinjerne på figur 7, når normalspændingen nærmer sig 0,12 MPa. På figur 10 er vist arbejdslinjerne for forsøg med normalspænding 0,06 MPa og 0,08 MPa.



Figur 10. Arbejdslinjer for to vridningsforsøgsemner påtrykt en normalspænding på 0,08 MPa og 0,06 MPa.

Forskellen i formen på arbejdslinjerne afspejles i de brudformer, der kan observeres. For normalspændinger over 0,12 MPa fås et brud, der involverer mørtelfugen, mens for en normalspænding på 0,02 MPa sker bruddet kun i skillefladen mellem sten og mørtel. For mellemliggende normalspændinger fås brud, som delvis involverer mørtlen i fugen.

Som følge af disse forhold anbefales den på figur 11 viste sammenhæng mellem den karakteristiske forskydningsstyrke og normalspændingen i fugen. I ældre murværk er fugerne ofte revnede, og trækspændinger vil ikke kunne overføres. Med den viste sammenhæng sikres også, at der ikke regnes med trækspændinger i fugen.



Figur 11. Karakteristiske forskydningsstyrker for kalkmørtelfuger.

For den karakteristiske forskydningsstyrke for kalkmørtelfuger fås:

$$\sigma_n > 0,12 \Rightarrow \tau_k = 0,09 + 0,38\sigma_n$$

$$\sigma_n < 0,12 \Rightarrow \tau_k = 1,13\sigma_n$$

Murstens trykstyrke bestemt ved ultralydsmålinger

For ældre murværk indgår stenenes styrke som en afgørende parameter. På sten udtaget af murværk kan der bestemmes en relation i mellem ultralydshastighed og stenens trykstyrke. Ved efterfølgende at foretage mere omfattende ultralydsmålinger på bygningens overflader kan der ved hjælp af den fundne relation fås et billede af hele bygningens tilstand uden at foretage yderligere destruktive indgreb.

Målemetoden

En måling af hastigheden af en ultralydspuls i et fast materiale foretages ved at registrere den tid, som det tager lyd-pulsen at bevæge sig fra en sender til en modtager, der begge er forbundet til det materiale, der måles på. Ud fra den målte tid og afstanden mellem sender og modtager kan lyd-hastigheden i det pågældende materiale bestemmes.

Målingerne, der refereres til i det følgende, er udført med standard 'PUNDIT'-udstyr med cylindriske 54 kHz transducere med en diameter på 50 mm og en højde på 40 mm (C.N.S. Electronics, 2010).

Lyd-hastigheden i et fast materiale afhænger af forholdet mellem materialets stivhed og densitet. For elastiske materialer afhænger lyd-hastigheden, V , af materialets dynamiske elasticitetsmodul, E_d ; densitet, ρ , og Poissons forhold, ν , som:

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (15)$$

Formlen gælder for hastigheden i et elastisk kontinuum.

Teglsten kan betragtes som et skørt materiale, og ved trykprøvning vil materialet være intakt næsten ind til brud. Det betyder, at det dynamiske elasticitetsmodul repræsenterer forholdene i materialet lige ind til kort før et brud.

For teglsten er der bestemt sammenhørende værdier for trykstyrke og statisk elasticitetsmodul (Vermeltfoort, 2005). For trykstyrker mindre end 40 MPa er proportionalitet mellem trykstyrke og statisk elasticitetsmodul en rimelig antagelse. I PUNDIT-manualen er der angivet en sammenhæng mellem statisk og dynamisk elasticitetsmodul og pulshastighed (C.N.S. Electronics, 2010). For små variationer i pulshastighed er proportionalitet mellem statisk og dynamisk elasticitetsmodul en rimelig antagelse. Denne antagelse forudsættes også at gælde for teglsten og fører til følgende relation mellem stenenes trykstyrke, f_b , og pulshastigheden, V , opløftet til anden potens:

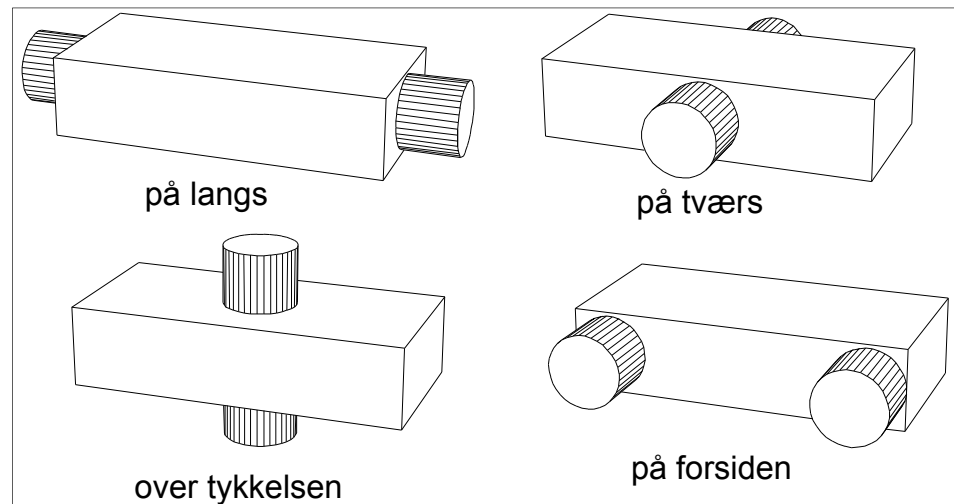
$$f_b = c_1 V^2$$

(16)

hvor c_1 er en konstant, der afhænger af murstenstypen.

Ultralydsmålingerne er udført på langs, på tværs, over stenenes tykkelse og på stenenes forside.

Som akustisk koblingsmedium mellem transducer og sten er anvendt brun sæbe med en passende konsistens. Transducernes placering ved de fire forskellige målinger er vist i figur 12. Bestemmelsen af lydhastigheden implicerer afstanden mellem sender og modtager. Når der måles på forsiden af en sten anvendes afstanden fra centrum til centrum af de to transducere. I de øvrige tilfælde anvendes stenens respektive dimensioner.

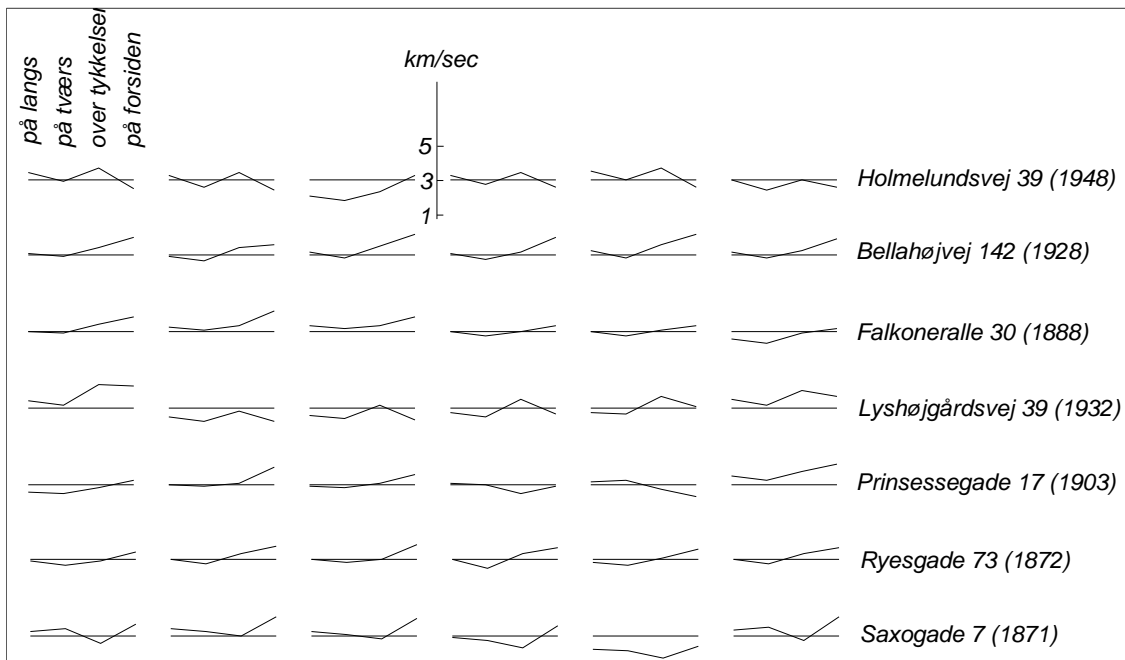


Figur 12. Placering af transducere på mursten.

Måleresultater

Til at bestemme sammenhængen mellem stenstyrke og ultralydshastighed, er der fra hver af syv ejendomme opført i perioden 1871-1948 udtaget seks sten, som først er undersøgt med ultralyd og derefter trykprøvet i overensstemmelse med DS/EN 771-1 (Dansk Standard, 2011). Alle de udtagne sten er massive teglsten, der er udtaget af formuringer. Sten, der udtages af bagmuringer, må forventes at have lavere styrker.

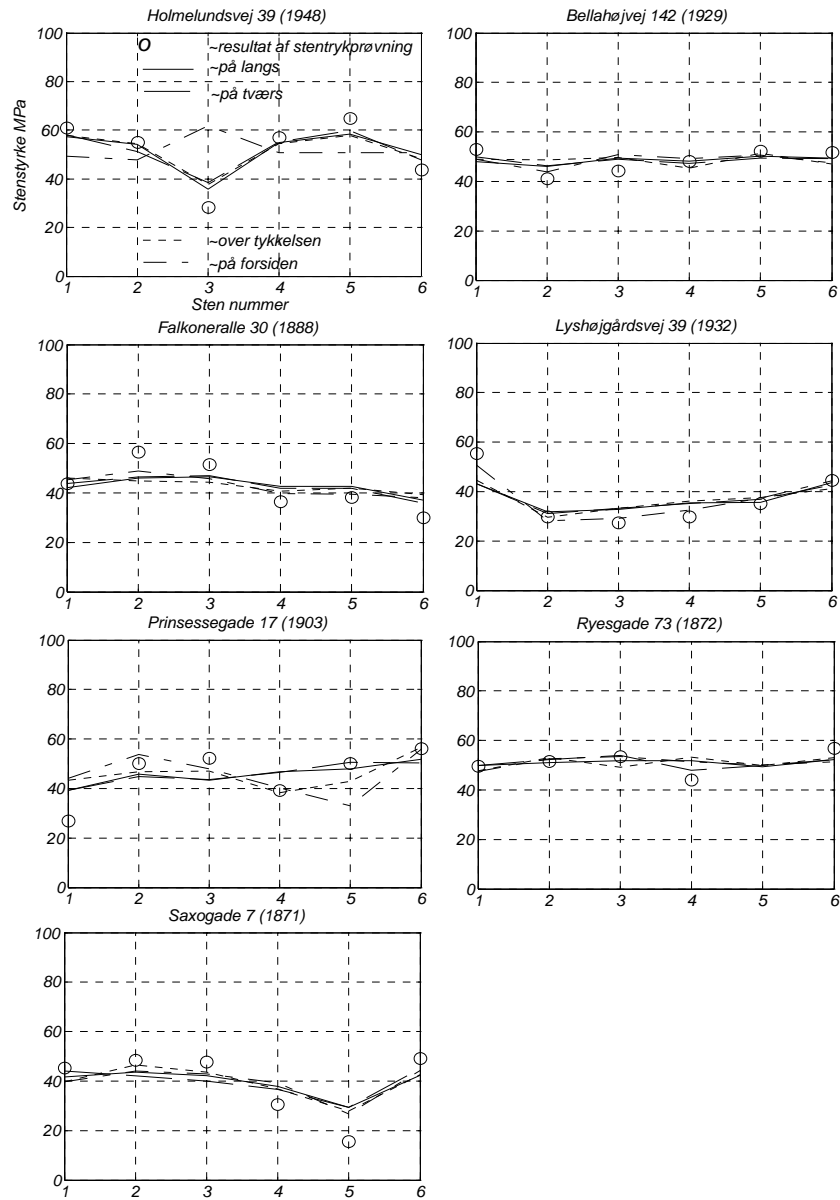
På figur 13 er vist resultatet af målingerne omregnet til lydhastighed i km/sekund. Stenene fra hver ejendom er nummereret fra 1-6, og de fire målte hastigheder for hver sten er afsat ud fra en akse, som svarer til 3 km/sekund. Tabeller med de målte lydhastigheder findes i *Bilag 2. Målte lydhastigheder*.



Figur 13. Målte Lydhastigheder på seks sten fra syv ejendomme.

Det ses, at for alle sten afhænger lydhastigheden af den retning, der måles i. Dette skyldes en anisotropi, som er opstået ved fremstillingen af stenene. De indbyrdes forhold, der i det følgende kaldes 'signaturen', mellem de enkelte måleretninger ses at være karakteristiske inden for det enkelte byggeri. Groft taget findes der to forskellige signaturer svarende til, at lydhastigheden målt på forsiden enten er større eller mindre end de øvrige lydhastigheder for stenene i den pågældende ejendom. Ultralydshastighed har under laboratorieforhold vist, at der fås uændrede værdier under mekanisk belastning.

På figur 14 er resultaterne fra lydmålingerne sammenholdt med resultaterne af trykprøvningerne af stenene, idet lydhastighederne i km/sekund opløftet til 2. potens, for hver ejendom for hver transducerplacering er ganget med en faktor c_1 (se formel (16)) således, at middelværdien af lydhastighederne opløftet til 2. potens er lig middelstenstyrken for stenene i den pågældende ejendom.



Figur 14. Stenstyrker og modificerede lyd hastigheder opløftet til 2. potens.

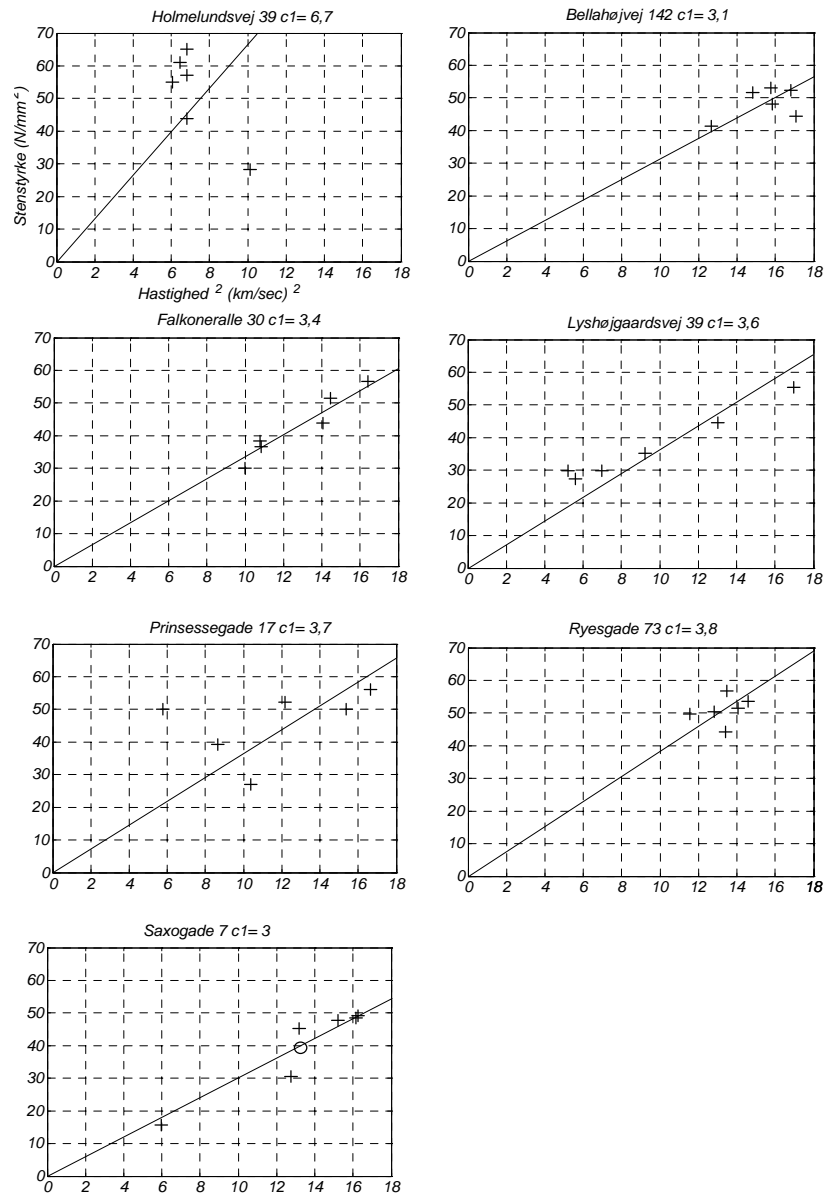
Faktorerne som lyd hastighederne i km/sekund opløftet til 2. potens skal multipliceres med for at få samme middelværdi som stenstyrkerne i MPa, er givet i tabel 1.

Tabel 1. Omsætningsfaktorer (c_1 -faktorer [MPa s² / km²]) fra lyd hastighed i 2. potens til normaliseret stenstyrke.

	På langs	På tværs	Over tykkelsen	På forsiden
Holmelundsvej 39 (1948)	5,49	7,53	4,92	7,21
Bellahøjvej 142 (1929)	4,96	6,00	4,20	3,13
Falkoner Allé 30	4,67	5,20	4,25	3,36
Lyshøjgårdsvej 39 (1932)	4,34	5,05	2,94	3,90
Prinsessegade 17 (1903)	4,98	5,23	5,06	3,98
Ryesgade 73 (1872)	5,67	6,75	5,02	3,83
Saxogade 7 (1871)	4,15	4,25	5,81	2,98
Middelværdi	4,89	5,72	4,60	4,06
Minimumsværdi	4,15	4,25	2,94	2,98

Af de fire måleretninger på langs, på tværs, over tykkelsen og på forsiden er det kun måling på forsiden, der kan foretages uden udtagning af sten. Ved måling på forsiden er det dog nødvendigt først at fjerne et eventuelt pudslag.

På figur 15 er vist sammenhængen mellem stenstyrke og hastighed i 2. potens for alle bygninger. Hastighederne er målt på stenenes forside.



Figur 15. Sammenhæng mellem stenstyrke og hastighed i 2. potens for alle undersøgte bygninger. Hastighederne er målt på stenenes forside. De enkelte værdier er markeret med '+' og middelværdien med 'O'.

En redegørelse for, hvordan usikkerhederne på omsætningsfaktoren, c_1 , og på selve stenstyrkerne tages i regning, findes i SBI-anvisning 248, *Ældre murværks styrkeegenskaber* (Pedersen & Hansen, 2015).

Den her angivne sammenhæng mellem lydmålinger og styrke er baseret på undersøgelser af massive teglsten. Det skønnes, at sammenhængen også kan anvendes på massive kalksandsten og på hulsten. I sidstnævnte tilfælde skal resultaterne behandles anderledes, som beskrevet i kapitlet, *Trykstyrken af murværk muret med kalkmørtel (svage mørtler)*.

I Suenson (1911) er der givet en tabel over stenstyrker (middelværdi af 10 prøvninger) fra forskellige teglværker. For bagmuringssten ligger styrkerne i intervallet 18-47 MPa og for formuringssten i intervallet 21-51 MPa. For kalksandsten er der i Ingeniøren (1907) refereret forsøg med styrker i intervallet 11-30 MPa. For cementsten er fundet styrker i intervallet 3-10 MPa.

Litteratur

- C.N.S. Electronics. (2010). *Pundit Manual for use with the portable ultrasonic non-destructive digital indicating tester, Mark V*. Durham.
- Dansk Standard. (2002). *Prøvningsmetoder til murværk – Del 3: Bestemmelse af begyndelsesforskydningsstyrke* (DS/EN 1052-3). Charlottenlund.
- Dansk Standard. (2011). *Forskrifter for byggesten til murværk – Del 1: Teglbyggesten* (DS/EN 771-1:2011). Charlottenlund.
- Drdácký, M., Masin, D., Mekonone, M. D., & Slizkova, Z. (2008). Compression tests on non-standard historic mortar specimens. *HMC08, Historical mortars conference*. Lisbon.
- Exner, H. (1983). *Plasticitetsteori for Coulomb-materialer* (Serie R no. 175). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Afdelingen for bærende konstruktioner.
- Falk, C. (1984). *Bæreevne for murværk opført af mangehulssten og massive sten*. Hasselager: Teknologisk institut.
- Hansen, K.F., & Pedersen, E.S. (2009). Shear and Torsion Testing of Brick-mortar Joints. *Masonry International, Vol. 22*.
- Hansen, K.F. (1998). *Dilatationsfuger i ydervægge af tegl* (SBI-rapport 291, p. 12). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Ingeniøren. (1907). Samlet i et bind, sept., Nr. 46, p. 170.
- Pedersen, E.S., & Hansen, K.F. (2015). *Ældre murværks styrkeegenskaber* (SBI-anvisning 248). København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Rambøll, B.J., Glarbo, O., & Manniche, K. (1953). *Beretning fra udvalget til forsøg over murværks styrke og elasticitetsforhold* (Beretning Nr. 14). København: Akademiet for de tekniske Videnskaber.
- Rasmussen, H.P., & Pedersen, C. (2000). *Forsøg til bestemmelse af mekaniske egenskaber af murværk opmuret med svage mørtler*. Hasselager: Teknologisk institut.
- Suenson, E. (1951). Teglstens-pillers trykstyrke og sammentrykkelighed. *Ingeniørvidenskabelige skrifter, Nr. 1*. København: Akademiet for de tekniske videnskaber og Dansk Ingeniørforening.
- Suenson, E. (1911). *Byggematerialer: Metaller, Træ, Natursten, Lervarer, Mørtler, Beton, Kunststen, Glas: Fremstilling, Egenskaber, Anvendelse, Prøvning*. København: P. E. Bluhmes Boghandel.
- Suenson, E., & Dührkop, H. (1944). *Forsøg med murværk af molersten og almindelige teglsten*. Ingeniørvidenskabelige tidsskrifter, nr. 01. København: Akademiet for de tekniske videnskaber og Dansk Ingeniørforening.
- Vermeltfoort, A.T. (2005). *Brick-mortar interaction in masonry under compression* (Bouwstenen 85). Eindhoven: University Press Facilities, Eindhoven University of Technology.

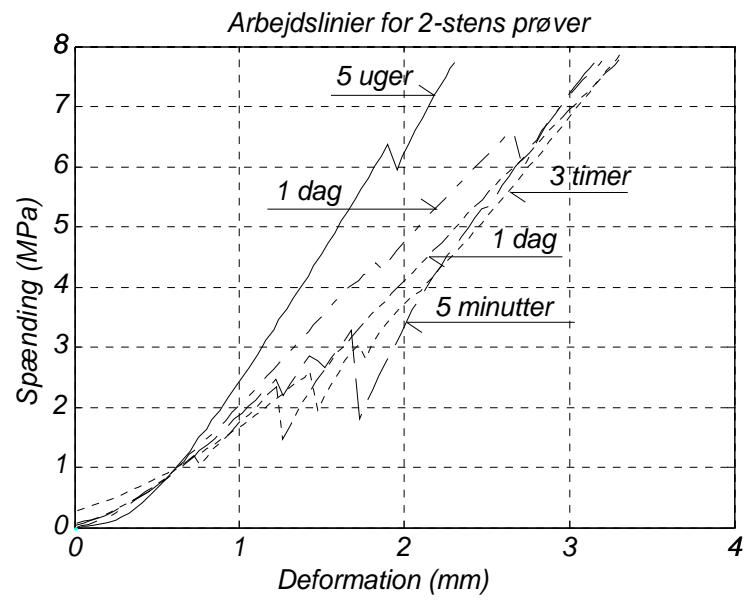
Bilag 1. Trykforsøg med murværk muret med delvist hærdet kalkmørtel

For at vise, at en fuger, der er udført med mørtel af selv en meget ringe styrke, er i stand til at overføre store laster, er der udført fire forsøg med to sammenmurede halve sten, se figur 1.1. Forsøgene er udført med kalkmørtler med alderen 10 minutter, 3 timer, 1 døgn (to forsøg) og 5 uger. Samhørende værdier af last og deformation er vist på figur 1.2.

Det fremgår, at fugen er i stand til at overføre et tryk på mere end 8 MPa, idet denne grænse er sat af prøvemaskinens kapacitet. Dette indikerer, at selv en meget svag mørtel er i stand til at optage spændingerne, så stenens trækstyrke bliver afgørende for minimumsværdien af bæreevnen. Figur 1.2 viser også, at stivheden af fugen øges med alderen. De forbigående aflastninger, som optræder, når der sker lodret revnedannelse i stenene, ses at forekomme ved en mindre belastning, når mørtlen er ung.



Figur 1.1. Lastopstilling. Totale deformationer registreres.



Figur 1.2. Sammenhæng mellem trykspænding og totale deformationer afhængigt af mørtlens alder.

Bilag 2. Målte lyd hastigheder

Tabel 2.1. Lyd hastigheder i sten fra Holmegårdsvej 39 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	3,37	3,18	2,09	3,23	3,42	2,94
På tværs	2,92	2,57	1,93	2,77	3,00	2,40
Over tykkelsen	3,60	3,38	2,35	3,38	3,60	3,00
På forsiden	2,54	2,46	3,18	2,61	2,61	2,61

Tabel 2.2. Lyd hastigheder i sten fra Bellahøjvej 142 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	3,09	2,97	3,18	3,11	3,23	3,18
På tværs	2,93	2,71	2,87	2,77	2,90	2,88
Over tykkelsen	3,42	3,41	3,48	3,17	3,60	3,29
På forsiden	3,97	3,56	4,13	3,98	4,10	3,85

Tabel 2.3. Lyd hastigheder i sten fra Falkoner Allé 30 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	2,97	3,25	3,28	3,01	3,01	2,61
På tværs	2,93	3,10	3,14	2,80	2,79	2,39
Over tykkelsen	3,41	3,31	3,28	3,02	3,10	2,90
På forsiden	3,75	4,05	3,80	3,29	3,28	3,16

Tabel 2.4. Lyd hastigheder i sten fra Lyshøjgårdsvej 39 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	3,38	2,49	2,56	2,76	2,78	3,41
På tværs	3,13	2,26	2,41	2,55	2,68	3,10
Over tykkelsen	4,24	2,81	3,16	3,43	3,57	3,91
På forsiden	4,12	2,28	2,37	2,64	3,04	3,61

Tabel 2.5. Lyd hastigheder i sten fra Prinsessegade 17 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	2,59	3,02	2,87	3,08	3,16	3,42
På tværs	2,52	2,89	2,80	2,99	3,25	3,24
Over tykkelsen	2,83	3,05	3,06	2,49	2,79	3,69
På forsiden	3,22	3,92	3,49	2,94	2,40	4,08

Tabel 2.6. Lydhastigheder i sten fra Ryesgade 73 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	2,93	3,01	3,05	3,04	2,90	3,07
På tværs	2,69	2,81	2,91	2,58	2,69	2,81
Over tykkelsen	2,98	3,31	3,07	3,33	3,12	3,31
På forsiden	3,40	3,75	3,82	3,66	3,58	3,67

Tabel 2.7. Lydhastigheder i sten fra Saxogade 7 [km/s].

	Sten 1	Sten 2	Sten 3	Sten 4	Sten 5	Sten 6
På langs	3,23	3,38	3,26	2,93	2,28	3,29
På tværs	3,38	3,22	3,05	2,79	2,24	3,44
Over tykkelsen	2,59	3,03	2,84	2,41	1,82	2,78
På forsiden	3,63	4,02	3,90	3,57	2,44	4,03

Bilag 3. Murværksstyrker og E-moduler, forsøgsresultater

Tabel 3.1. Murværksstyrker for murværk muret med kalkmørtel (K 100/1200). (Tabel fortsættes)

Kilde	Stenstyrke [MPa]	Murværksstyrke [MPa]	E-modul [MPa]
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	4	1,81	810
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	4	1,70	790
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	4	1,72	620
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	9	3,45	520
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	9	3,67	580
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	9	3,36	470
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	18	7,18	460
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	18	6,79	450
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	18	6,56	440
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	5,97	470
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	5,60	450
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	6,44	470
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	7,04	530
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	7,30	500
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	24	7,43	570
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	27	9,54	690
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	27	9,01	650
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	27	9,23	640
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	43	8,71	780
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	43	7,85	730
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	43	8,85	740
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	29*1	3,98	480
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	29*1	3,68	510
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	29*1	3,66	500
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	37*2	3,63	410
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	37*2	3,80	440
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	37*2	3,79	470
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	42*3	4,21	530
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	42*3	3,90	600
(Rasmussen & Pedersen, 2000)	42*3	3,78	560

Tabel 3.1. Murværksstyrker for murværk muret med kalkmørtel (K 100/1200). (Tabel fortsat).

Kilde	Stenstyrke [MPa]	Mueværksstyrke [MPa]	E-modul [Mpa]
(Falk, 1984)	9,3	3,1	
(Falk, 1984)	9,3	3,4	500
(Falk, 1984)	9,3	3,3	
(Falk, 1984)	9,7	3,1	
(Falk, 1984)	9,7	2,9	500
(Falk, 1984)	9,7	2,7	
(Falk, 1984)	12,6	4,4	
(Falk, 1984)	12,6	3,9	600
(Falk, 1984)	12,6	4,0	
(Falk, 1984)	25,6	5,7	
(Falk, 1984)	25,6	5,2	1000
(Falk, 1984)	25,6	5,6	
(Falk, 1984)	27,7	5,11	
(Falk, 1984)	27,7	5,13	700
(Falk, 1984)	27,7	5,1	
Holmelundsvej 39	51,8	8,02	
Holmelundsvej 39	51,8	9,11	
Holmelundsvej 39	51,8	8,79	

1) Hulsten med 49 % effektivt tværsnitsareal.

2) Hulsten med 43 % effektivt tværsnitsareal.

3) Hulsten med 42 % effektivt tværsnitsareal.

Fra omkring 1850 og ind til ca. 1950 er der i Danmark opført en stor bygningsmasse i murværk, især til boliger. Denne bygningsmasse indeholder mange arkitektoniske kvaliteter, men har behov for tilpasning til dagens behov.

Ejendommene er opført efter datidens forskrifter, som for murværkets vedkommende har bestået af krav til murtykkelser.

Denne rapport indeholder en række undersøgelser af murværkets styrkeegenskaber i disse ejendomme, således at det er muligt at bedømme konstruktioners sikkerhed i forhold til vore dages sikkerhedsregler.

Rapporten er grundlag for SBI-anvisning 248, Ældre murværks styrkeegenskaber.

1. udgave, 2015
ISBN 978-87-563-1652-1