



# LUND UNIVERSITY

## Förstärkning av murade väggar genom ytarmering av stålnät

### Resultat från experimentella studier och beräkningar

Jönsson, Johan; Molnár, Miklós

2018

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Jönsson, J., & Molnár, M. (2018). *Förstärkning av murade väggar genom ytarmering av stålnät: Resultat från experimentella studier och beräkningar.* (TVBK; Nr 3069). Lunds tekniska högskola, Avdelningen för konstruktionsteknik.

*Total number of authors:*  
2

*Creative Commons License:*  
Ospecificerad

#### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

#### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



# Förstärkning av murade väggar genom ytarmering av stål nät

Resultat från experimentella studier och beräkningar



Johan Jönsson och Miklós Molnár



LUNDS TEKNISKA  
HÖGSKOLA  
Lunds universitet



Rapport TVBK-3069

ISBN 978-91-87993-08-4

Lunds tekniska högskola

Avdelningen för konstruktionsteknik

Box 118

221 00 LUND

2018

## Förord

Föreliggande rapport är framtagen inom forskningsprojektet "Energieffektiv renovering av massiva murade ytterväggar med omfattande frost- och korrosionsskador". Projektet genomfördes vid Lunds tekniska högskola under perioden 2016-2018, inom ramen för Energimyndighetens forsknings- och innovationsprogram E2B2.

Energieffektiv renovering av massiva murade ytterväggar med omfattande frost- och korrosionsskador är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av Miklós Molnár, Lunds tekniska högskola, och har genomförts i samverkan med Karling Fasad AB, Sveriges Murnings- och Putsentreprenörförening, Tegelmäster AB, Tomas Gustavsson Konstruktioner AB, Wienerberger AB samt Weber Saint Gobain Byggprodukter AB.

I projektet studeras och utvecklas renoveringsteknik för massiva murade ytterväggar där det yttre tegelskiktet har drabbats av omfattande frost- och korrosionsskador. Renoveringskoncept som innebär att teglet återskapas i fasaderna analyseras i samverkan med projektörer, entreprenörer och materialleverantörer. Speciellt studeras en teknik för förstärkning av de befintliga ytterväggarna genom armering av putsen. De studerade renoveringskoncepten bedöms kunna förbättra ytterväggarnas energiegenskaper så att väsentliga besparingar i energianvändning kan uppnås.

Ett stort tack riktas till finansiärerna samt alla de forskare och industrirepresentanter som har bidragit till genomförandet av projektet.

Lund i mars 2018

Johan Jönsson, Finja AB/ LTH Konstruktionsteknik  
Miklós Molnár, LTH Konstruktionsteknik

## Finansiering och organisation

Forskningsprojektet ”Energieffektiv renovering av massiva murade ytterväggar med omfattande frost- och korrosionsskador” har finansierats av Energimyndigheten genom projektanslag nummer 37582-2. Samfinansiering har tillförts genom följande företag och organisationer:

- Karling Fasad AB
- Sveriges Murnings- och Putsentreprenörförening (SPEF)
- Tegelmäster AB
- Tomas Gustavsson konstruktioner AB
- Weber Saint Gobain Byggprodukter AB
- Wienerberger AB

Forskningsprojektet genomfördes i form av två arbetspaket:

A. Experimentell undersökning av förstärkta väggars bärförmåga

B. Analyser av renoveringskoncept samt beräkningar av förstärkta väggars bärförmåga

Föreliggande rapport summerar resultat från experimentella studier som genomfördes i arbetspaket A samt delar i arbetspaket B som rör beräkningar av förstärkta väggars bärförmåga. Forskarna som genomfört projektet kommer från LTHs avdelning för konstruktionsteknik:

- Johan Jönsson (ansvarig för arbetspaket A)
- Per-Olof Rosenkvist (arbetspaket A)
- Erik Gottsäter (delar av arbetspaket 2)
- Miklós Molnár (delar av arbetspaket A, ansvarig för arbetspaket B, projektledare).

# Innehåll

## Innehåll

<b>1 Inledning</b> .....	6
1.1 Bakgrund .....	6
1.2 Nya renoveringskoncept .....	7
1.3 Ytförstärkning av murade väggar .....	8
1.4 Projektets syfte och målsättningar .....	8
1.5 Rapportens innehåll .....	8
<b>2 Experimentella undersökningar av förstärkta väggars bärförmåga</b> .....	9
2.1 Generellt om studien.....	9
2.2 Material .....	9
2.3 Försöksutrustning och testväggar .....	10
2.4 Utvärdering av murverkets elasticitetsmodul, tryckhållfasthet och gränstöjning.....	15
2.5 Utvärdering av armeringens mekaniska egenskaper i dragbelastning .....	16
2.6 Utvärdering av puts krympningens effekter .....	17
<b>3 Resultat från de experimentella undersökningarna</b> .....	19
3.1 Oarmerade testväggar.....	19
<b>3.2 Förstärkta testväggar</b> .....	21
3.2.1 Testväggar murade med svagt (M0.5) murbruk.....	21
3.2.2 Testväggar murade med starkt (M10) murbruk.....	23
3.3 Deformationer orsakade av putsens krympning.....	24
3.4 Analyser och diskussion.....	25
<b>4 Beräkning av bärförmågan hos enkelsidigt förstärkta väggar belastade av samtidig normalkraft och moment</b> .....	28
4.1 Experimentellt underlag .....	28
4.2 Beräkning av tvärsnittskapacitet för ensidigt ytförstärkt vägg utsatt för samtidig normallast och moment.....	29
4.3 Beräkning av bärförmågan för ensidigt ytförstärkt vägg utsatt för samtidig normalkraft och moment .....	31
4.4 Verifiering av beräkningsmodellen .....	31
4.5 Beräkningsexempel .....	34
<b>5 Sammanfattning och slutsatser</b> .....	37
<b>6 Referenser</b> .....	38

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Byggnader uppförda med bärande stommar av murverk från perioden 1940-1975 utgör idag en värdefull del av det svenska byggnadsbeståndet. De aktuella byggnaderna är uppskattade på grund av bland annat deras tekniska enkelhet, robusta byggnadsteknik och arkitektoniska kvalitéer, se Bild 1. Med tanke på dagens och morgondagens skärpta krav på effektiv energihushållning är dock den här typen av byggnader undermåliga. I lägen med rikliga mängder slagregn kan det dessutom förekomma att fullmurade ytterväggar är fuktiga, vilket kan ge dåligt inomhusklimat.



Bild 1 Flerbostadshus med fullmurade en och en halv sten tjocka ytterväggar, Lund.

Murade fasaders utsatthet för klimatfaktorer kan ofta avspeglas sig även i form av frostsador i teglet, vittring av fogarna samt sprickbildning som orsakas av korroderande armering. Renovering av murade fasader med korrosionssador kan genomföras genom fokuserade insatser innebärande borttagning av korroderande armering och efterlagning av fogarna. Beskrivning av problemet samt lämpliga reparationsmetoder presenteras i *Gustavsson med flera, 2017*.

Förekomst av frotskadat tegel i större delar av en fasad tyder på att teglets motståndskraft mot omväxlande frost-tö cykler kan ha nått en kritisk gräns. Processen startar ofta i fasadens mest slagregnsutsatta delar, såsom murkrön samt hörn, för att allteftersom sprida sig även mot mindre utsatta delar av fasaden. Frotskadade tegelstenar kan bytas ut men upprepade byten av skadade tegelstenar blir både ineffektivt och dyrt i ett längre perspektiv.

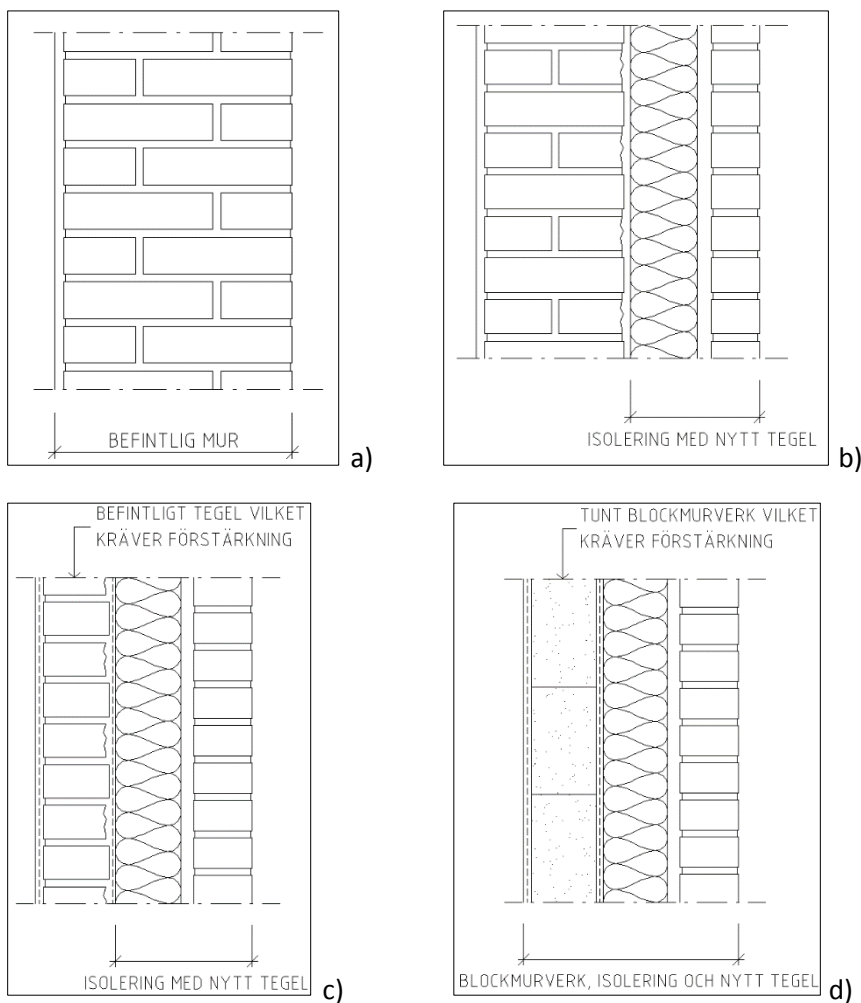
Byggnader med fasader som drabbats av omfattande frost- och korrosionssador kan åtgärdas genom till exempel tilläggsisolering med efterföljande putsning. Erfarenheter av att använda den här typen av renoveringsmetod presenteras i bland annat *Molnár med flera, 2013*. I situationer då en förändring av fasadernas arkitektoniska gestaltning inte är önskvärd, kan renovering genom invändig tilläggsisolering tillgripas. Invändig tilläggsisolering förbättrar ytterväggens energiprestanda men åtgärden medför samtidigt nackdelar som förlust av boyta och förhöjd risk för kondensation i gränsskiktet mellan befintlig vägg och tilläggsisolering.

## 1.2 Nya renoveringskoncept

Utgångspunkten i detta forskningsprojekt är att analysera och testa ett antal renoveringskoncept som kombinerar en förbättring av murade fullmurars energiprestanda med ersättning av det skadade tegelskiktet, utan de nackdelar som är förknippade med invändig tilläggsisolering.

Tre renoveringskoncept studeras med avseende på förbättring av energiprestandan, den tekniska genomförbarheten samt gestaltungs- och bevarandaspekter. Speciell uppmärksamhet ägnas åt de tekniska möjligheterna att förstärka murverket genom så kallad ytförstärkning, en åtgärd som bedöms kunna skapa förutsättningar för applicering av tjockare skikt av tilläggsisolering och eventuell påbyggnad med ytterligare våningsplan. De tre renoveringskoncepten, som visas i Figur 1, består i:

1. Rivning av det yttre, skadade tegelskiktet bestående av fasadtegel, eventuell förstärkning av kvarstående väggdel, tilläggsisolering från utsidan och avslutningsvis uppförande av ett tegelskal med nyproducerat eller återvunnet tegel.
2. Rivning av både det yttre tegelskiktet och delar av den inre bärande tegelväggen, enkel- eller dubbelsidig ytförstärkning, i övrigt som i koncept 1).
3. Ersättning av ytterväggen med ett tunt, förstärkt bärande skal av blockmurverk, i övrigt som i koncept 1) och 2).



Figur 1 a) Befintlig mur; b) Renoveringskoncept 1; c) Renoveringskoncept 2; d) Renoveringskoncept 3.

Frågeställningar som bedömdes vara viktiga att studera och analysera i samband med utarbetandet av de föreslagna renoveringskoncepten omfattar möjligheterna att förstärka väggarna efter den partiella rivningen, nödvändiga anpassningar av grundläggningen samt av genomföringarna och anslutningarna vid fönster och dörrar samt gestaltnings- och bevarandenaspekter. Även själva arbetsprocessen vid den partiella rivningen, förstärkningen och återuppbyggnaden av den tilläggsisolerade väggen är frågor som måste beaktas.

### 1.3 Ytförstärkning av murade väggar

Ytförstärkning innebär att armeringsnät av stål, glasfiber eller kolfiber bäddas in i ett lager av höghållfast puts eller betong som appliceras på murverkets ena eller båda sidor. Ytarmering har huvudsakligen använts för att förbättra murade konstruktioners motståndskraft mot jordbävningsslaster. Användning av tekniken har visat sig förbättra både bärförmågan och brottsegheten hos skjuvväggar, det vill säga hos väggar som belastas av horisontella laster i sitt eget plan och som därmed väsentligt bidrar till att byggnader kan motstå jordbävningar (*Papanicolaou med flera, 2011; Valluzzi med flera, 2014; Lin med flera, 2014*). Motsvarande positiva effekter när det gäller ökad bärförmåga och förbättrad brottseghet uppnås även för vertikalt bärande väggar (*Bernat med flera, 2013*).

Mycket av utvecklingen inom området ytförstärkning har fokuserat på användning av textilarmering. Fördelarna med textilarmering är låg vikt och enkel inbäddning i putsen. I vissa fall används lim för att fästa textilarmeringen mot väggarna. Till textilarmeringens nackdelar räknas skadekänsligheten för mekanisk åverkan, till exempel avsågning i samband med reparationer, oklart brandmotstånd samt ökad risk för nedbrytning i alkalisk miljö som finns i icke karbonatiserad puts eller betong.

För att undvika nämnda risker med användning av textilarmering, inriktades undersökningarna i nuvarande projekt till förstärkning med hjälp av stålnät.

### 1.4 Projektets syfte och målsättningar

Projektet syftar till att utveckla kunskap om renovering och energieffektivisering av byggnader där ytterskalet av tegel måste bevaras. Till projektets huvudsakliga målsättningar hör att:

- Utvärdera tre koncept för energi- och yteffektiv renovering av fullmurade ytterväggar på ett sätt som möjliggör en sänkning av byggnadens energianvändning med upp till 50 %.
- Ta fram tekniskt underlag som belyser tekniska och gestaltningsmässiga aspekter förknippade med de studerade renoveringskoncepten.
- Utvärdera möjligheterna att öka murade väggars bärförmåga och brottseghet genom ytförstärkning.
- Sprida resultaten till yrkesgrupper involverade i renovering såsom konsulter, entreprenörer, materialleverantörer och fastighetsägare.

### 1.5 Rapportens innehåll

Denna rapport presenterar resultat från experimentella studier och beräkningar som belyser möjligheterna med användning av ytförstärkning i samband med renovering. Resultaten är användbara även i nybyggnadssammanhang.

## 2 Experimentella undersökningar av förstärkta väggars bärförmåga

### 2.1 Generellt om studien

I detta kapitel redogörs för ett experimentellt arbete inriktat på att undersöka murade väggars beteende under samtidigt verkande normallast och moment. Speciellt studeras ytförstärkning, en teknik som innebär att ett armeringsnät av stål appliceras på den dragbelastade sidan av väggen. Kapitlet presenterar detaljer om den experimentella studien uppläggning och erhållna resultat.

Totalt byggdes 10 provväggar med karakteristika enligt Tabell 1. Sex väggar murades med hydrauliskt murbruk i hållfasthetsklass M0.5 medan fyra väggar med Gullex murbruk i hållfasthetsklass M10. Hälften i varje hållfasthetsgrupp putsades respektive förstärktes genom armering som bäddades in i en cementrik puts av klass CS IV.

Tabell 1. Försöksschema.

Hydrauliskt kalkmurbruk M0.5		Murbruk av typen Gullex M10	
3 obehandlade väggar	3 förstärkta väggar	2 obehandlade väggar	2 förstärkta väggar

Väggarna uppförda med hydrauliskt kalkbruk M0.5 kommer i rapporten att omnämnas som väggar byggda med svagt murverk (M0.5). Väggarna uppförda med murbruk av typen Gullex M10 kommer att omnämnas som väggar byggda med starkt murbruk (M10).

### 2.2 Material

#### **Tegel**

Benämning: Håltegel, rött spånat SKT NF 19-h FT I, leverantör Wienerberger AB.

Format: 250x120x62 mm.

Tryckhållfasthet: 35 MPa, enligt leverantörens produktblad.

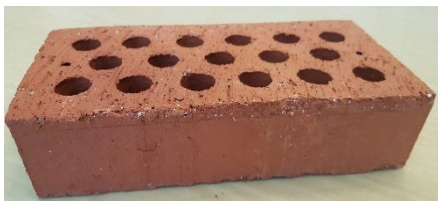


Bild 2. Tegel med format 250x120x62mm.

#### **Murbruk**

Hydrauliskt Kalkmurbruk M0.5, leverantör Weber AB.

Gullex Murbruk M10, leverantör Weber AB.

#### **Putsbruk**

Utstockningsbruk A, Base 101, klass CS IV, leverantör Weber AB.

#### **Putsspruta**

Tiger Pro V, återförsäljare Målarkalk AB.



Bild 3. Putsspruta, Tiger Pro V.

### Armering

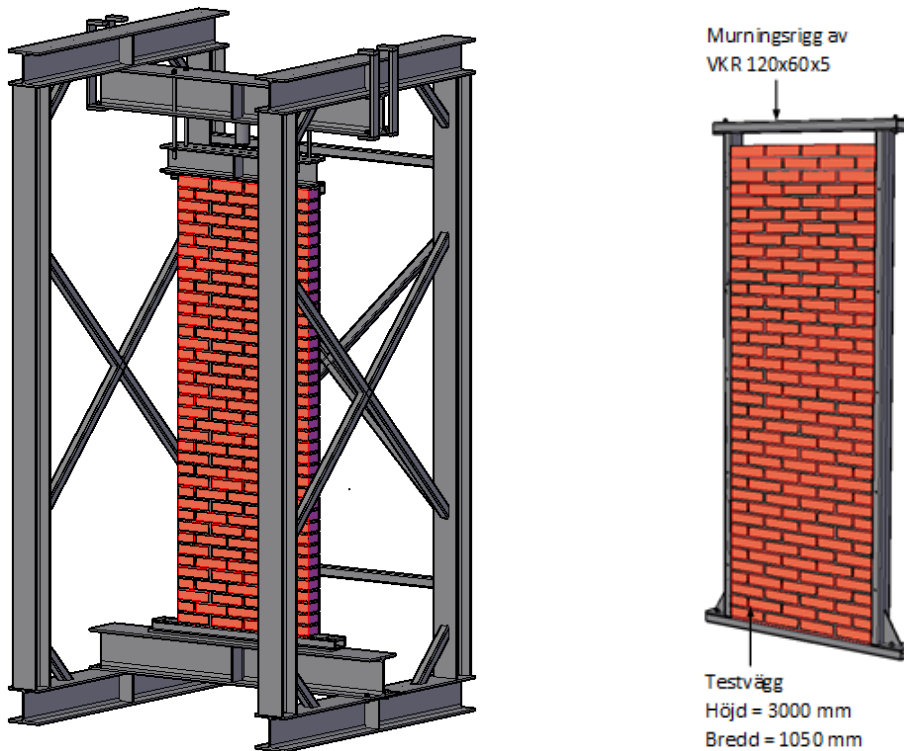
Benämning: Svetsade galler, leverantör Draht-Binder OHG (SPG-metall).

Tråddiameter: 4 mm

Rutnätsmönster (maskvidd): 40x40 mm

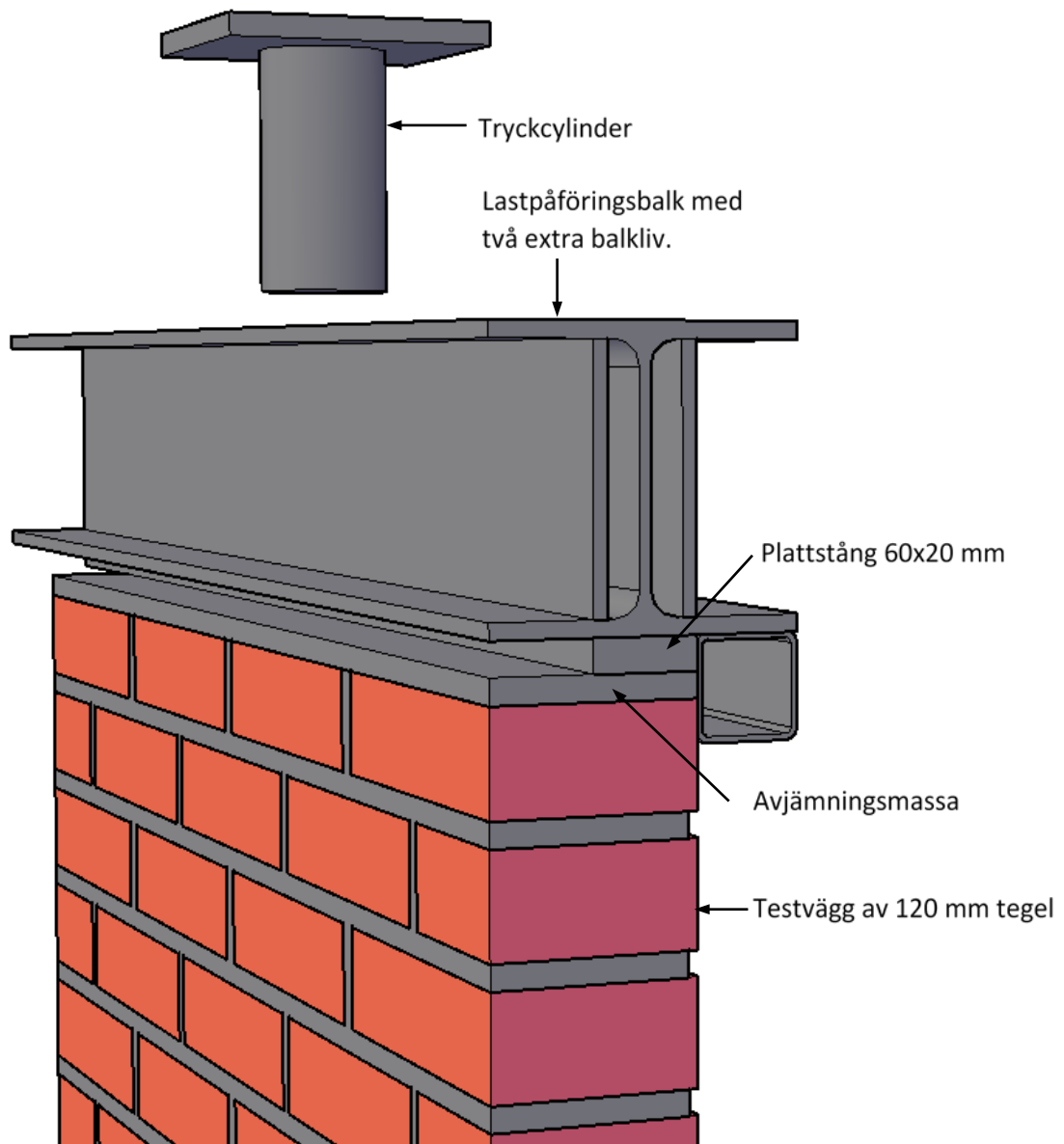
## 2.3 Försöksutrustning och testväggar

Försöksupställningen för bestämning av väggarnas bärförmåga består av en test- respektive en murningsrigg, se Figur 2. Försöksutrustningen är framtagen på LTH, avdelningen för konstruktionsteknik. Murningsriggen av fyrkantsprofiler (VKR-profiler 120x60x5 mm) tillverkades dels för att mura identiska testväggar dels för att underlätta förflyttning av testväggarna till testriggen.

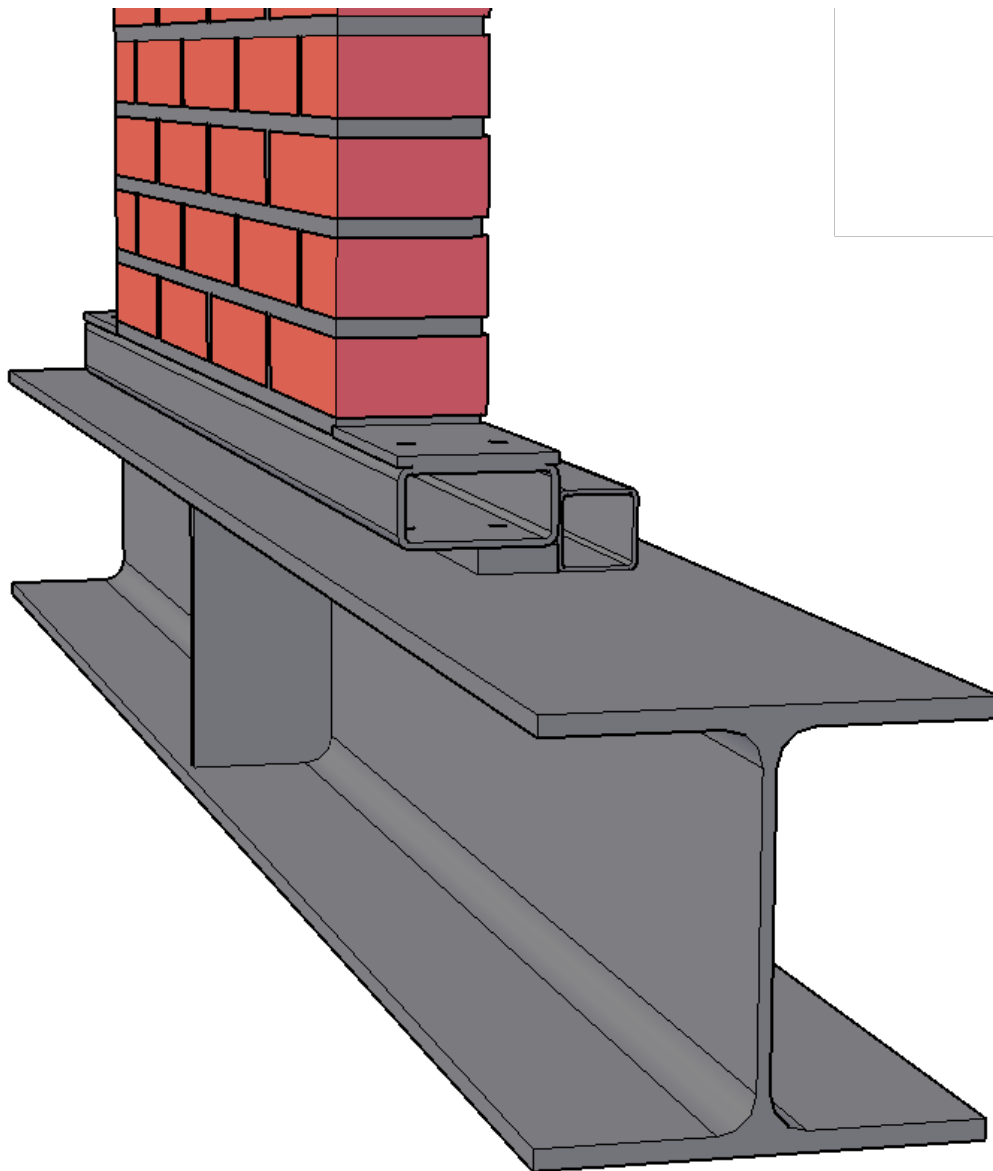


Figur 2. Vänster - testrigg med vägg som kan testas; höger – murningsrigg.

Testväggarna murades med 39 tegelskift på höjden och med fyra stenar på bredden, vilket ger en höjd på 3000 mm och en bredd på 1050 mm. Murning skedde i labblokaler med normalt inomhusklimat. Testväggarna belastades excentriskt med excentriciteten=30 mm räknat från den tryckta kanten av väggarna. Den excentriska lastpåföringen åstadkoms genom att använda ett plattjärn med bredden 60 mm i ovan- och underkant av testvägg, se Figur 3 och 4. I Figur 3 ses även lastpåföringsbalken och placeringen av tryckcylindern. För att skapa en horisontell yta för påföringsbalken, utfördes en gjutning med cirka 15 mm avjämningsmassa på murkrönet. Före provning avlägsnades tre delar av murningsriggen medan bottenstycket lämnades kvar, se Figur 4. För att mäta utböjningen monterades två deformationsgivare, 200 mm in från väggkanten, på halva vägghöjden.



Figur 3. Detalj som visar murkrönet och lastpåföringsbalken.



*Figur 4. Detalj som visar testväggens botten sida och testriggens upplag.*

Vid murning skapades en fram- och baksida, det vill säga framsidan motsvarar en fasad där fogarna är väl fyllda och avjämnade medan baksidan har naturliga brister i utfyllnad av bruket, se Bild 4 och 5. Putsning påbörjades cirka fyra veckor efter murningen av testväggarna. Före grundningen förvattnades baksidan med en så kallad växtspruta med finspridarmunstycke. Grundningen är heltäckande med grov struktur där tjockleken varierar mellan 2-6 mm, se Bild 6. Grundningsbruket påfördes med en putsspruta kopplad till tryckluft. Putsbruket som användes till grundningen är samma som nästkommande lager, det vill säga utstockningsbruk A, Base 101, klass CS IV.

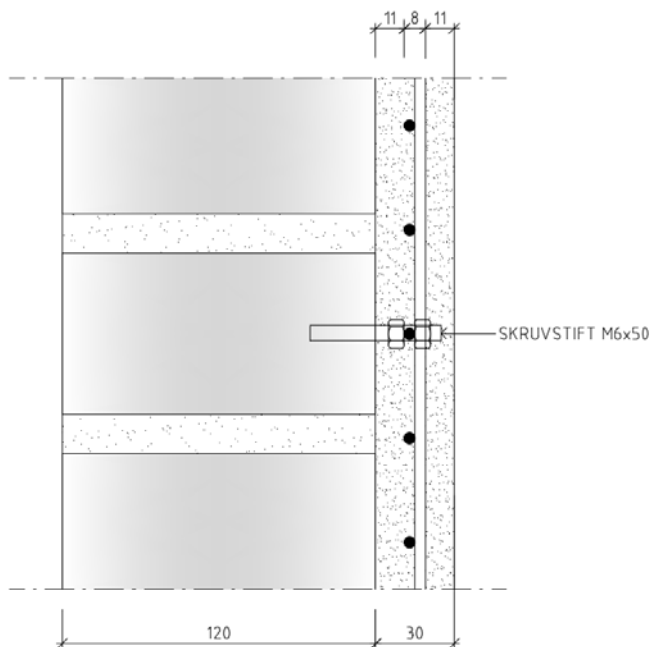
Efter grundningen monterades armeringsnätet, se Figur 5 samt Bild 7 och 8. För att centrera nätet i putsen, användes så kallade skruvstift med måttet M6x60. På den del av skruvstiftet som sticker ut, monterades två M6-muttrar med stålbrickor för att klämma fast nätet samt steglöst reglera detta för att uppnå rätt placering.



Bild 4. Testväggens framsida.



Bild 5. Testväggens baksida.



Figur 5. Infästning av nätarmeringen och dess placering i putsen.

Övrigt putsbruk sprutades på i omgångar dagen efter grundningen, se Bild 9 och 10. Då cirka hälften av putsbruket var påfört, komprimerades detta med ett avjämningsverktyg, se Bild 11. Därefter fortsatte sprutningen av putsbruket för att uppnå tillräcklig tjocklek, det vill säga tills överskottsbruket kunde dras av med hjälp av avdragsbanorna monterade på murningsriggen, se Bild 12. Slutligen jämnades putsen till ännu en gång och skurades till en jämn yta, se Bild 13 och 14. Putsens totala tjocklek var 30 mm.



*Bild 6. Grundning av testväggen.*



*Bild 7. Nätarmeringen är monterad.*



*Bild 8. Närbild på nätarmeringens infästning.*



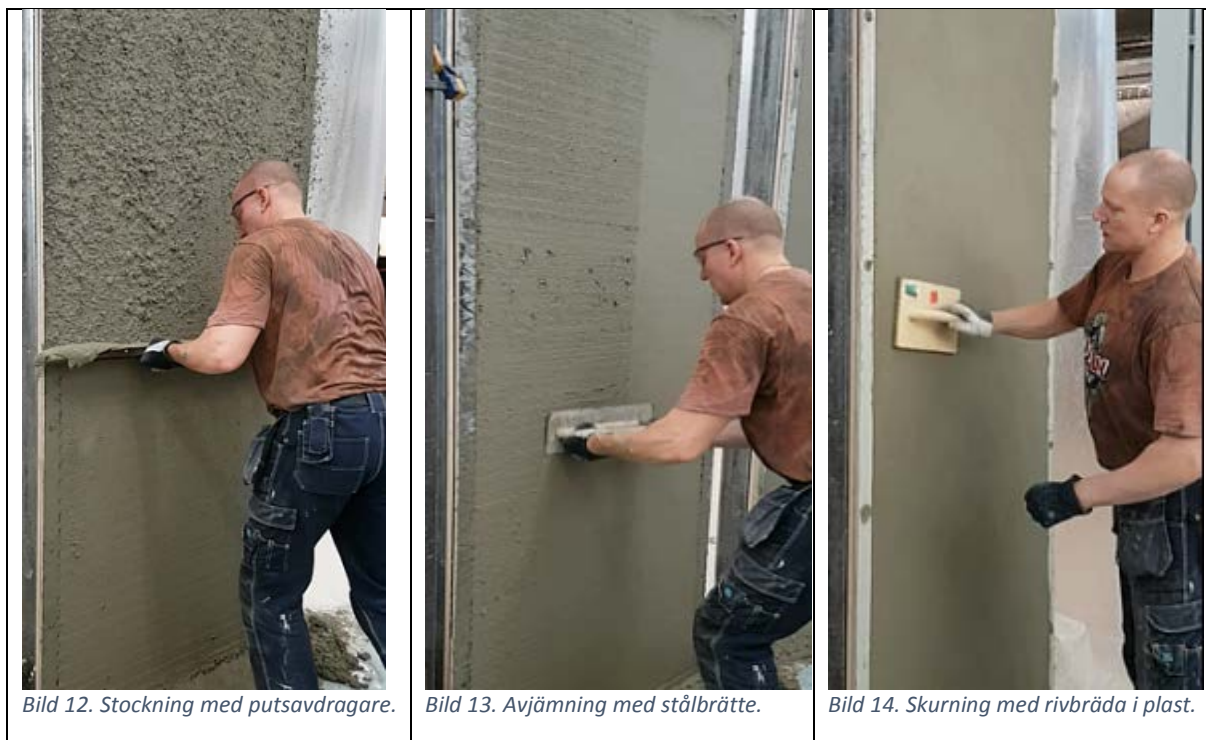
*Bild 9. Första lagret av utstockningsbruket påförs.*



*Bild 10. Andra lagret av utstockningsbruket påförs.*

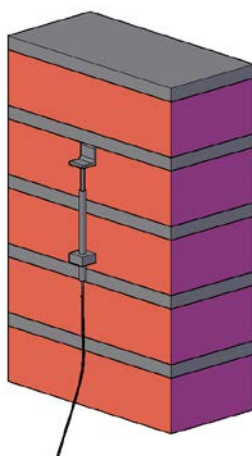


*Bild 11. Komprimering av utstockningsbruket.*



## 2.4 Utvärdering av murverkets elasticitetsmodul, tryckhållfasthet och gränstjöjning

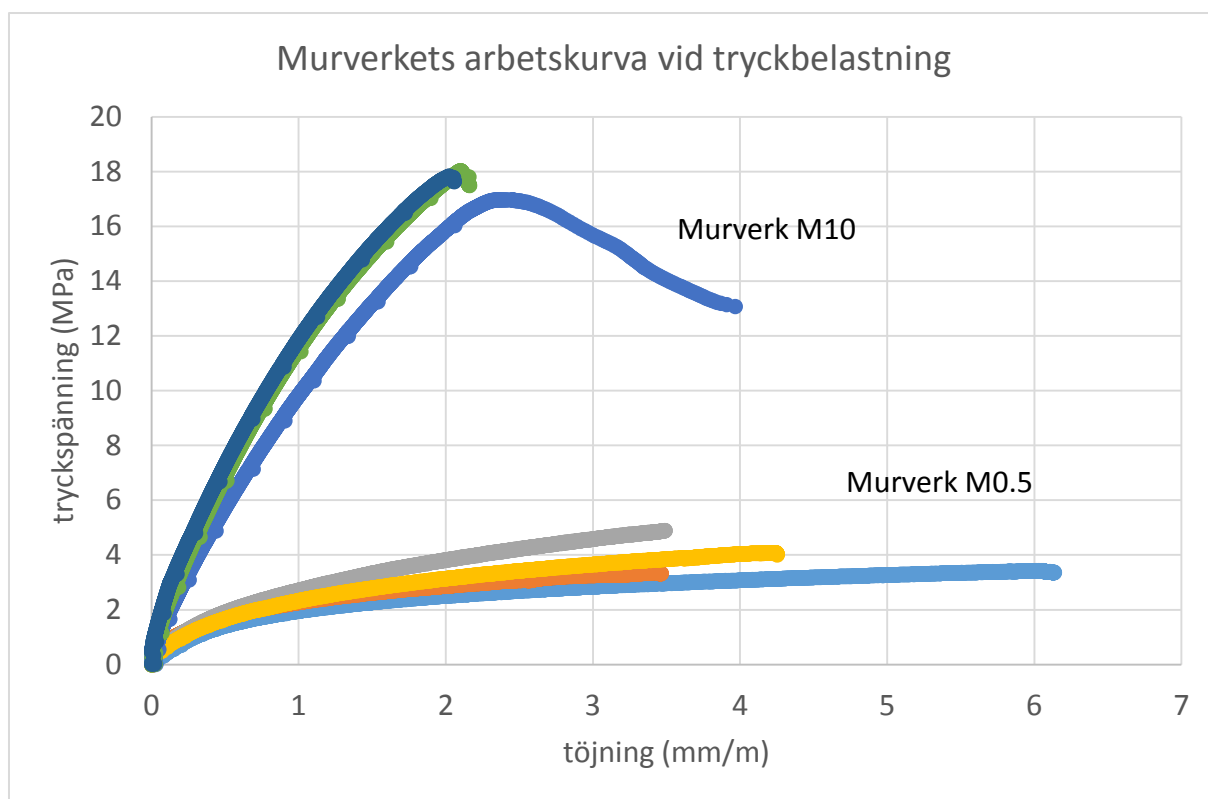
Murverkets elasticitetsmodul  $E_m$ , tryckhållfasthet  $f_m$  och gränstjöjning  $\varepsilon_{ult}^m$  utvärderades enligt SS-EN 1052-1. Totalt testades sju provkroppar, varav fyra murade med murbruk i hållfasthetsklass M0.5 och tre med murbruk i hållfasthetsklass M10. Provkroppen kan ses i Figur 6, där den övre ytan har försetts med 15 mm avjämningsmassa. Resultaten visas i Tabell 2 och Figur 7.



Figur 6. Provkropp använd vid bestämning av murverkets E-modul, tryckhållfasthet och gränstjukning.

Tabell 2. Murverkets E-modul och tryckhållfasthet – medelvärden (variationskoefficient i procent).

Provkropp	E-modul $E_m$ (MPa)	Tryckhållfasthet $f_m$ (MPa)	Gränstjöjning $\varepsilon_{ult}^m$ (mm/m)
Murverk med bruk M0.5	4279 (25)	4,04 (21)	4,3
Murverk med bruk M10	14538 (16)	17,61 (3)	2,2



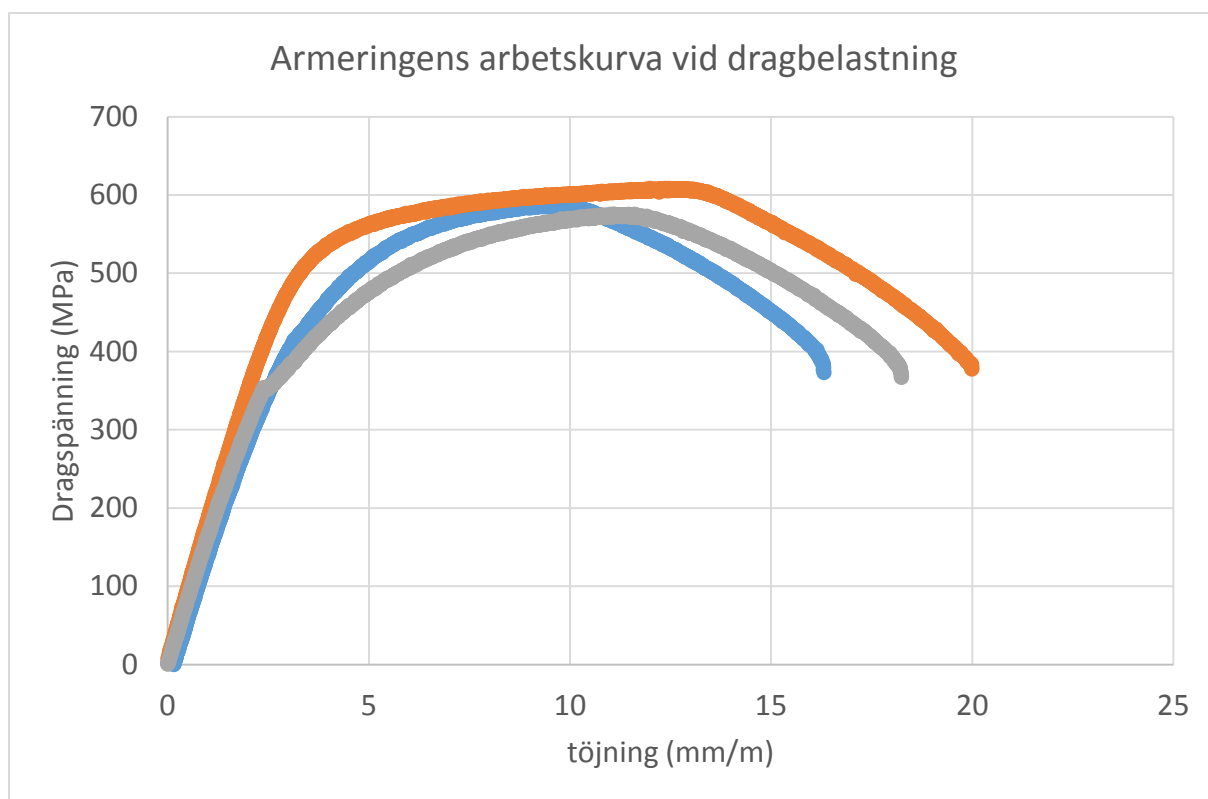
Figur 7. Arbetskurva för de använda murverken

Vid testning av provkropparna med murbruk M10 fick provtryckningen avslutas när provningsmaskinens maximala kraftkapacitet på 500 kN uppnåddes, detta utan att två av provkropparna uppnådde sin maximala lastkapacitet. Detta innebär att murverkets tryckhållfasthet kan vara högre än det valda värdet på 17,6 MPa. Av samma anledning underskattas även murverkets gränstöjning, som för denna serie bestämdes som medelvärdet av töjningarna då lasten uppnådde sitt maximala värde.

Vid testning av provkropparna med murbruk M0.5 avslutade provtryckningen när provkropparna började falla sönder på grund av omfattande sprickbildning. Murverkets gränstöjning bestämdes som medelvärdet av töjningarna då testningen avslutades på grund av provkropparnas kollaps.

## 2.5 Utvärdering av armeringens mekaniska egenskaper i dragbelastning

Armeringens mekaniska egenskaper bestämdes genom provdragning tills brott inträffade. Last och töjningar registrerades. Erhållna arbetskurvor presenteras i Figur 8.



Figur 8. Arbetskurvor för armeringen av stålnät

Från arbetskurvorna bestämdes armeringens draghållfasthet och gränstöjning genom direkt avläsning. Elasticitetsmodulen bestämdes som sekantmodul vid en spänningsnivå motsvarande 33 % av draghållfastheten, medan flytgränsen genom att använda Hooks lag. Resultaten visas i Tabell 3.

Tabell 3. Armeringens flytgräns, E-modul, draghållfasthet och gränstöjning – medelvärden (variationskoefficient i procent).

Flytgräns $\epsilon_s$ (mm/m)	E-modul $E_s$ (GPa)	Tryckhållfasthet $f_s$ (MPa)	Gränstöjning $\epsilon_{ult}^s$ (mm/m)
3,6	164 (13)	591 (2)	18

## 2.6 Utvärdering av puts krympningens effekter

För att utvärdera effekterna av puts skiktets krympning på murverket i de förstärkta väggarna, murades 8 provkroppar med murbruk M0.5. Provkropparna bestod av sex tegelskift och hade måtten 440x250x120 mm, se Bild 15.



*Bild 15. Provkroppar för utvärdering av putsens krympeffekter – provkroppen till vänster med armering, den till höger utan armering.*

Fyra provkroppar förstärktes med puts och armeringsnät på samma sätt och med samma material som testväggarna. Fyra provkroppar putsades med 30 mm puts utan att någon armering lades in i putsen. Hypotesen var att provkropparna som innehåller armering skulle deformeras mindre än provkropparna som var putsade men inte innehöll någon armering. Provkropparna putsades när de var fyra veckor gamla. Före putsningen försågs provkropparna med deformationsgivare på den oputsade sidan. Deformationerna registrerades under en sexveckorsperiod.

I parallella försök studerades även putsbrukets mekaniska egenskaper. För ändamålet tillverkades så kallade putsprismor, provkroppar med måtten 160x40x40 mm. Putsens tryckhållfasthet uppmättes till 17,8 MPa och dess dynamiska E-modul till 15,9 GPa. Förhållandet mellan betongs dynamiska och statiska E-modul har av *Aguilar med flera, 2016*, uppskattats till cirka 1,5, vilket indikerar att putsens statiska E-modul var cirka 10,6 GPa.

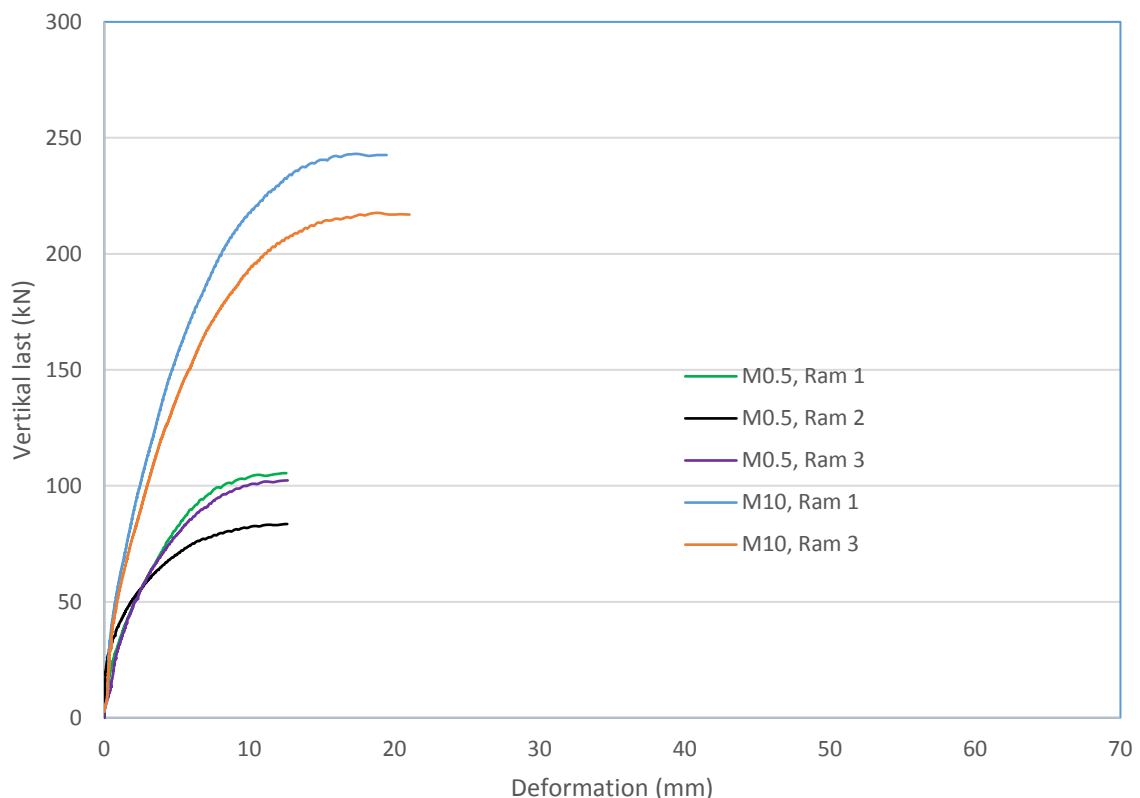
### 3 Resultat från de experimentella undersökningarna

#### 3.1 Oarmerade testväggar

Oavsett om testväggarna bestod av svagt eller starkt murverk, blev brottet sprött, med vilket menas att brottet inträffade plötsligt utan någon större utböjning eller sprickbildning. Nedan visas en sekvens av bilder (Bild 15 till 20) då brottet sker. Tiden mellan första och sista bilden är cirka 8-hundradels sekunder. Brottet sker i området runt halva höjden på testväggen.

Det som initierar brottet är att dragspänningarna vinkelrätt liggfogen i den dragna delen av muren överstiger vidhäftningen mellan stenar och murbruk, se Bild 21 och 22. Brottplanet kan avvika cirka 4-5 skift från halva höjden, vilket tyder på att utförandet av murningen och vidhäftningen har viss inverkan på vidhäftningen i fogarna.

I fallet med det svaga murverket (murbruk M0.5) uppmättes en maximal utböjning vid halva höjden på drygt 10 mm. Den maximala vertikala lasten var mellan 80-100 kN med ett medelvärde på 96 kN. För testväggarna med starkt murverk (murbruk M10) blev utböjningen före brott cirka 20 mm och den maximala vertikala lasten cirka 230 kN, se Figur 9.



Figur 9. Kraft-deformationskurva för testväggar utan puts och armering.



*Bild 15. Testväggen strax innan brottet sker.*



*Bild 16. Brottet har initierats.*



*Bild 17. Brottet har utvecklat sig.*



*Bild 18. Brottet har utvecklat sig ytterligare.*



*Bild 19. Brottet har utvecklat sig ytterligare.*



*Bild 20. Brottet har utvecklat sig ytterligare.*



Bild 21. Närbild på vidhäftningsbrott i liggfogen tagen under provningen.

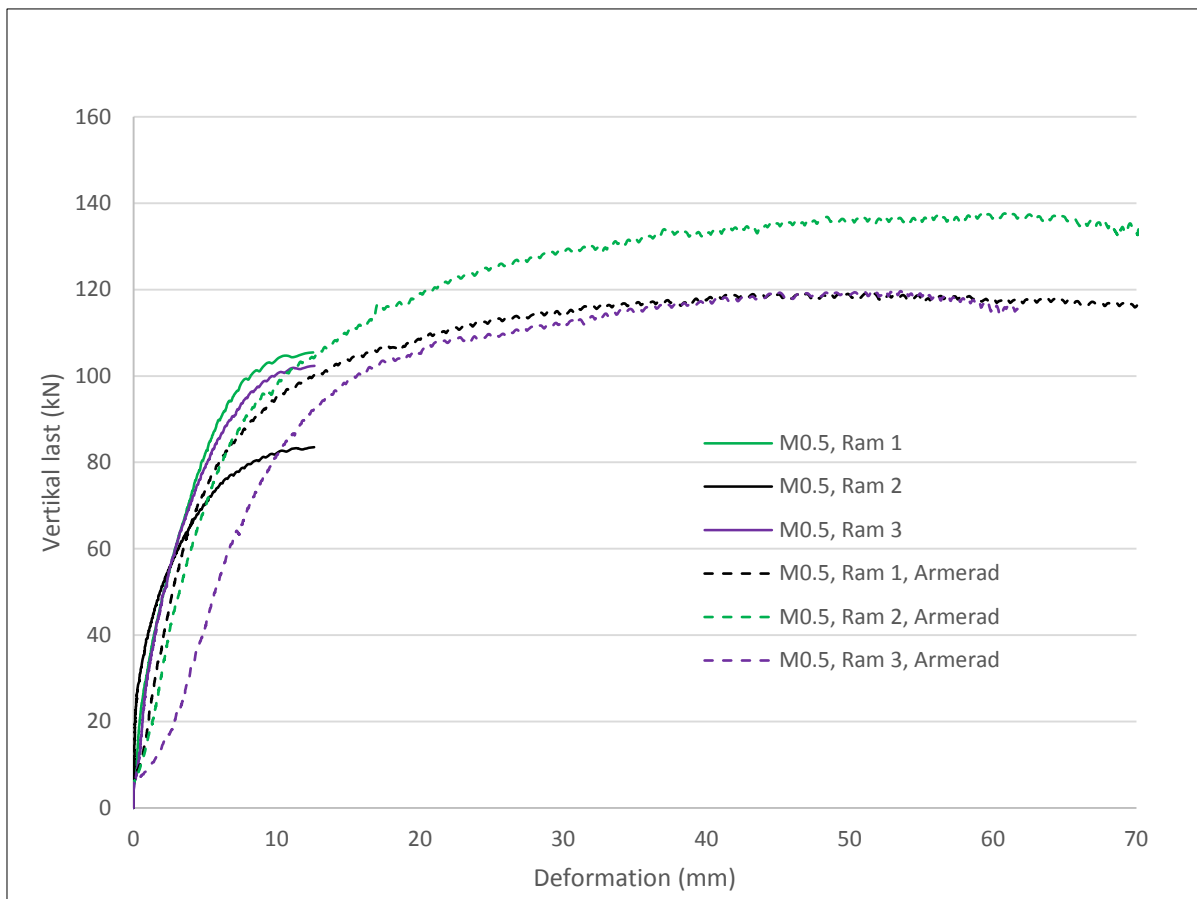


Bild 22. Närbild på den liggfog där brottet sker.

### 3.2 Förstärkta testväggar

#### 3.2.1 Testväggar murade med svagt (M0.5) murbruk

De förstärkta testväggarna murade med svagt (M 0.5) murbruk uppvisade ett utpräglat segt beteende vid brott, se Figur 10 som visar kraft-deformations samband för både de förstärkta och de icke-förstärkta testväggarna.



Figur 10. Kraft-deformationskurva för förstärkta och oförstärkta testväggar murade med svagt murbruk (M0.5)

Försöken avslutades innan kollaps uppstod, då provutrustningen till slut inte kunde registrera deformationerna. Den maximala utböjningen blev därför inte registrerad, men var större än 70 mm. Maximal kraft som registrerades ligger mellan 120-135 kN, med ett medelvärde på 125 kN. De förstärkta väggarna kollapsade varken under testningen eller i samband med borttagningen från testriggen, se Bild 23.

Den markanta förbättringen i seghet tillskrivs armeringen. I samband med att väggens dragna sida spricker, aktiveras armeringen som förhindrar fortsatt spricktillväxt. Kraften i den dragna armeringen och i det tryckta murverket kan på detta sätt fortsätta öka tills antingen stålet eller murverket uppnår sin drag- eller tryckhållfasthet. I föreliggande fall uppnåddes murverkets tryckhållfasthet först, vilket visas av att det på testväggarnas tryckta sida krossades och lossnade murbruk, se Bild 24. Detta förlopp bekräftas av analyserna i Kapitel 4 i denna rapport.

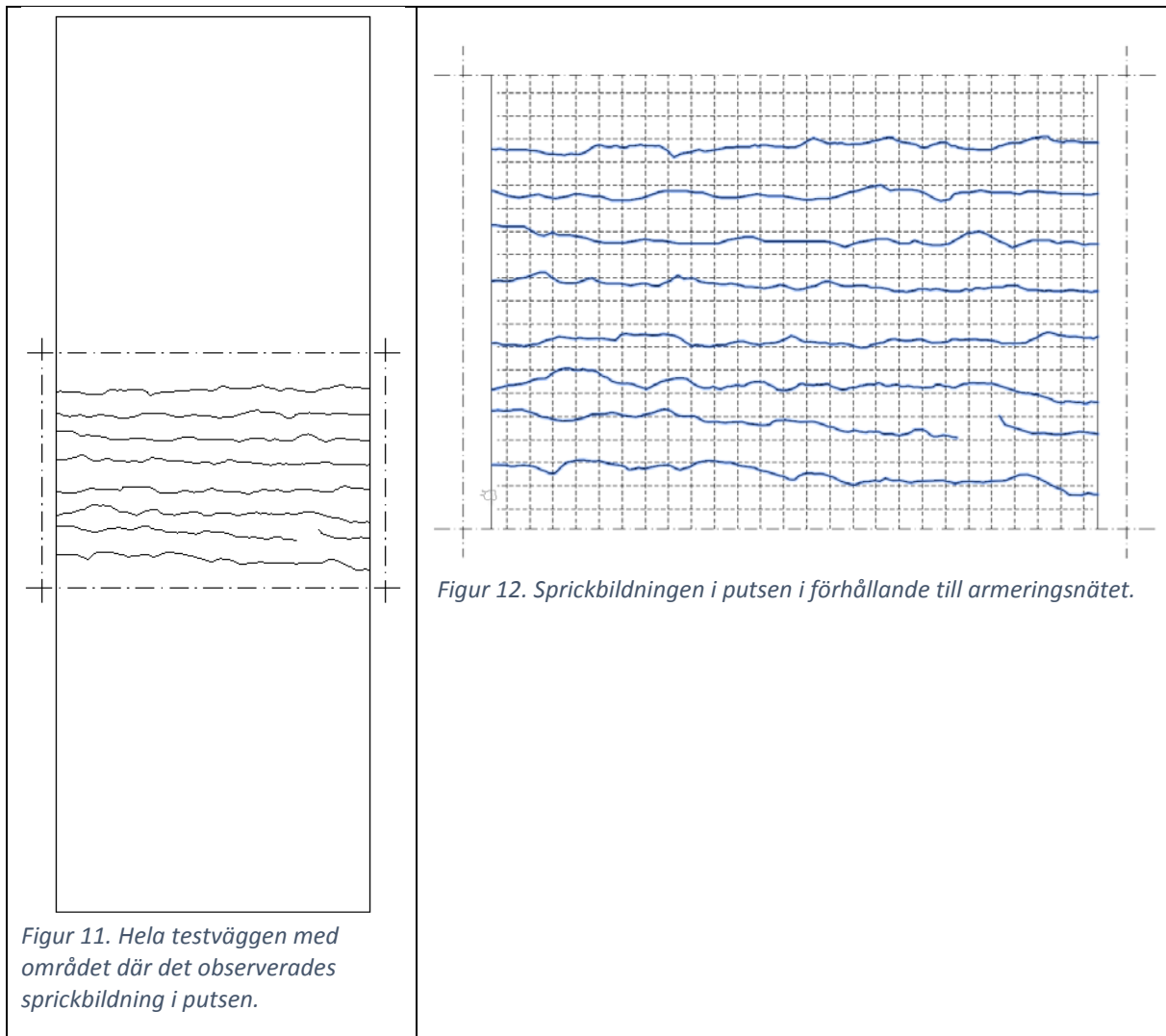
På testväggarnas förstärkta sida uppstod ett sprickmönster i putsen i området nära halva höjden på testväggarna. Avståndet mellan sprickorna i vertikalled var cirka två maskvidder dvs. cirka 80 mm, se Figur 11 och 12. Sprickvidden blev inte registrerad, men uppskattades till mindre än 0.1 mm.



*Bild 23. Cirka 60 mm utböjning för förstärkt testvägg murad med svagt murbruk (M0.5) – förstärkningen finns på väggens vänstra, putsade yta.*



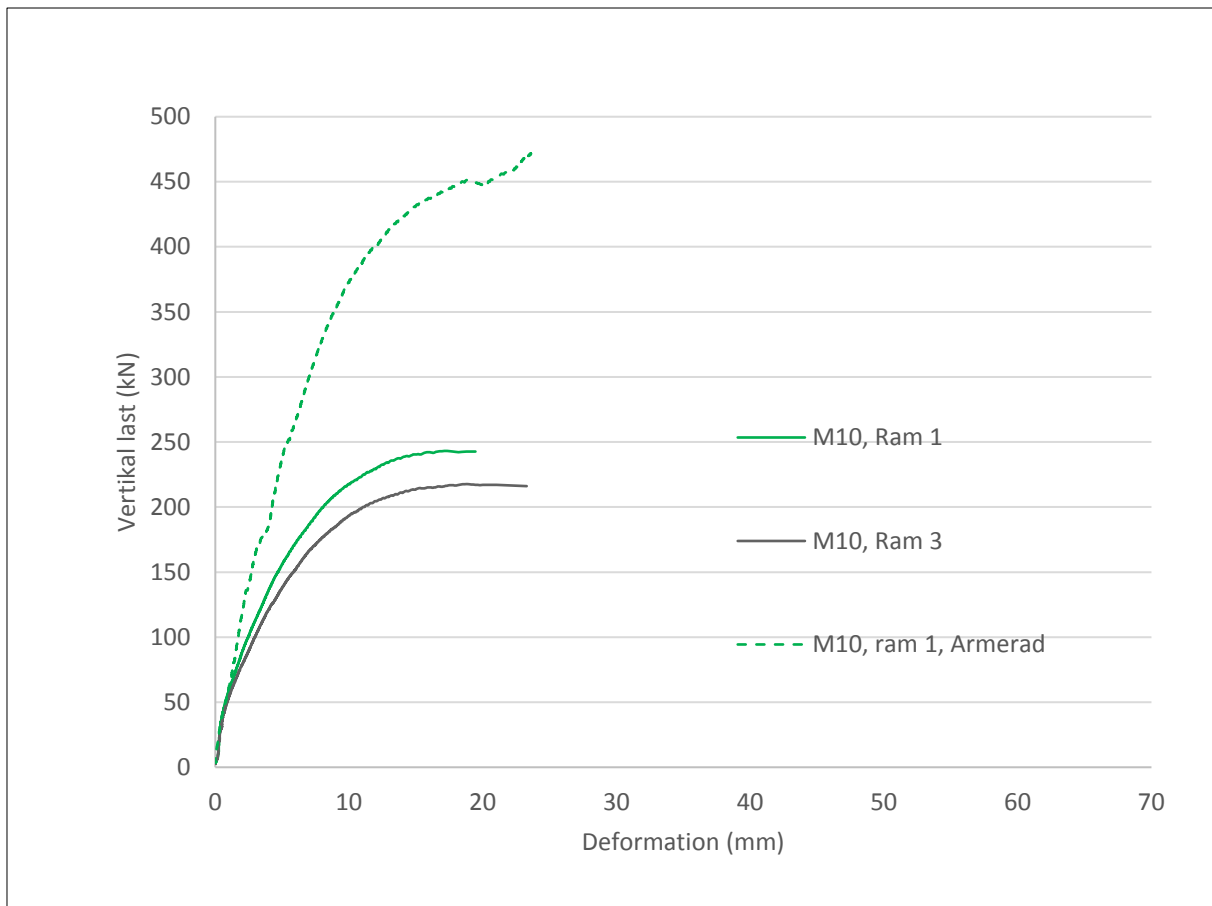
*Bild 24. Tryckta sidan av testväggen - vid höga lastnivåer krossas och lossnar det svaga murbruket (M0.5) i fogarna.*



### 3.2.2 Testväggar murade med starkt (M10) murbruk

Testningen av de förstärkta väggarna murade med starkt murbruk (M10) drabbades av en del tekniska problem, vilket gör att man för denna väggutformning kan redovisa resultat från endast en testvägg. Ett av de viktigaste problemen var att det i samband med planeringen av det experimentella arbetet underskattades murverkets förväntade tryckhållfasthet och styvhet. Varken upplagens eller den kraftalstrande tryckcylinderns kapacitet visade sig vara tillräckliga för att uppnå väggarnas maximala axiella lastkapacitet.

Resultatet från detta enda försök visas i Figur 13. Av denna figur framgår att testningen fick avbrytas vid en nivå på axiellasten motsvarande ca 470 kN, utan att väggens maximala axiella lastkapacitet har kunnat uppnås. Det var inte möjligt att se någon typ av skada/sprickbildning vare sig under eller efter provningen. Provkroppen var alltså intakt efter provningen. Begränsningen utgjordes i detta fall av tryckcylinders kapacitet, som hade en nominell övre gräns på 450 kN. Den transversella deformationen vid väggmitt då testningen avbröts uppmättes till cirka 23 mm.



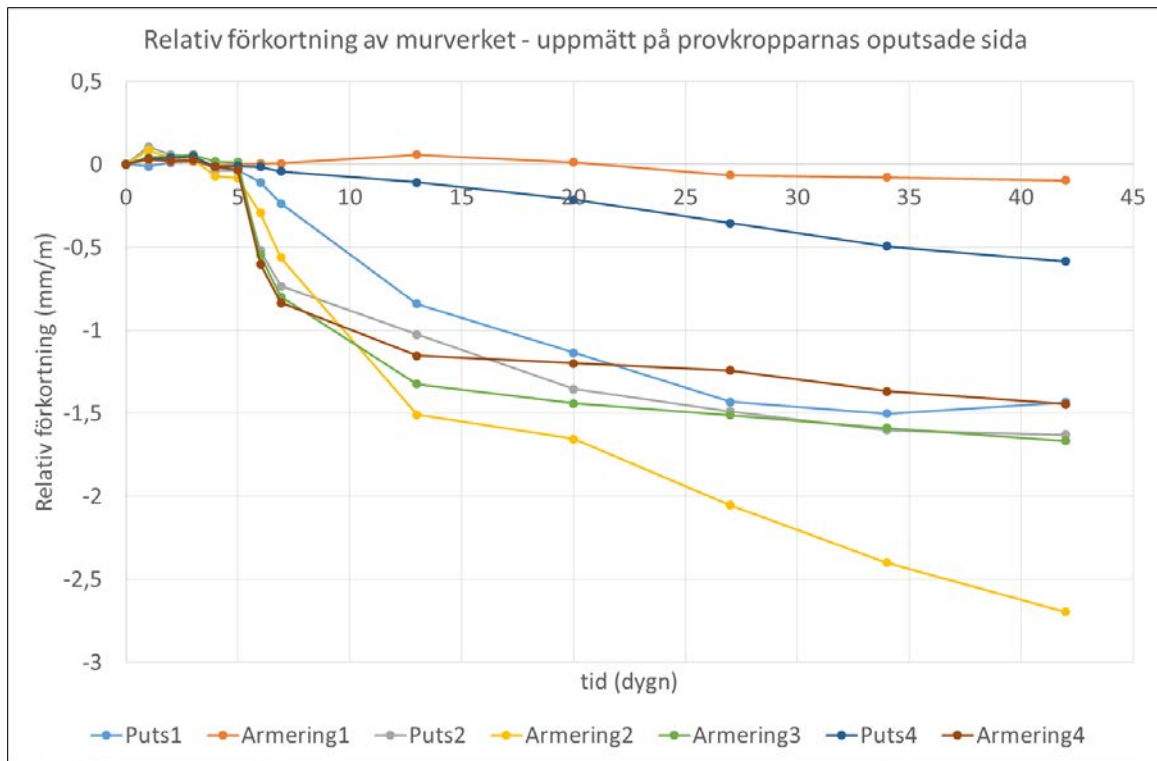
Figur 13. Kraft-deformationskurva för förstärkta och oförstärkta testväggar murade med starkt murbruk (M0.5).

### 3.3 Deformationer orsakade av putsens krympning

Tre veckor efter putsningen, det vill säga efter lika lång tid som förlöpte mellan väggarnas förstärkning och deras provning, registrerades en relativ förkortning av provkropparna på mellan 0,1 – 1,7 mm/m. Ingen skillnad kunde konstateras mellan provkroppar med eller utan armering - hypotesen att provkropparna som innehåller armering skulle deformeras mindre än provkropparna utan armering kunde inte bekräftas. Deformationerna i provkropparna byggda med svagt murbruk (M0.5) visas i Figur 14. Mätningarna på en av provkropparna har tagits bort, eftersom mätvärdena avvek med en storleksordning från övriga mätvärden.

Den genomsnittliga relativa förkortningen tre veckor efter putsningen uppskattas till 1,0 mm/m. Efter ytterligare tre veckor uppskattas medelvärdet av den relativa förkortningen till 1,2 mm/m. För närvarande har rapportförfattarna inte någon förklaring till de stora skillnaderna mellan de olika provkropparnas beteende.

Det bör observeras att användning av begreppet relativ förkortning är ett medvetet val, eftersom deformationerna uppmätta i provkropparna antas bestå av en kombination av murverkets elastiska sammantryckning och krypning. Eftersom krypning är ett långsamt förlopp, förväntas den observerade relativa förkortningen fortsätta i flera månader eller rentav år.



Figur 14. Relativ förkortning av provkropparna murade med svagt murbruk (M0.5) orsakad av putsens krympning.

### 3.4 Analyser och diskussion

Den experimentella studien genomförd på fullskaleväggar i laboratoriemiljö visar att förstärkning av murade väggar genom ytarmering med stål nät är en genomförbar teknik. Hypoteserna att det är möjligt att uppnå både en förbättring av vertikalbelastade väggars bärförmåga och brottseghet bekräftas av de experimentella resultaten. Förbättringen i brottseghet kan betraktas som över förväntan – väggarna gick aldrig till brott i ordets egentliga mening. Detta kan hänga ihop med att armeringens dragkraftskapacitet inte fullt utnyttjades, de testade tvärsnitten var överarmerade.

Störst relativ förbättring i bärförmåga uppnåddes hos väggarna byggda med starkt murbruk (M10), där bärförmågan med avseende på vertikallast ökade med minst en faktor 2, troligtvis ännu mer. Osäkerheten beror på att denna grupp av väggar inte uppnådde maximal lastkapacitet när försöken måste avbrytas på grund av begränsningar i försöksriggens styvhet och den kraftalstrande hydrauliska cylinderns kapacitet.

Det är troligt att brottet även i detta fall skulle varit segt, men kan inte styrkas av de experimentella resultaten. I slutet av försöket kan det på kurvan ses en liten nedgång av kraften för att sedan öka igen, se Figur 13. Nedgången i vertikal last är orsakad av ett uppehåll i provningen - inte av att testväggen gav vika eller något gick sönder i testriggen.

Bedömningen görs att den uppnådda lasten i fallet med de starka väggarna (M10) motsvarar 80-90 % av den maximala lastkapaciteten. För dessa väggar går det inte heller att visa huruvida den maximala lastkapaciteten uppnås på grund av flytning i armeringen eller krossning av murverket på väggarnas tryckta sida.

Förbättringen i bärförmåga hos väggarna byggda med svagt murbruk (M0.5) stannade på cirka 30 %. Detta resultat var något oväntat. Misstankarna riktades mot möjliga negativa effekter av förstärkningsputsens krympning på murverkets tryckhållfasthet och i förlängningen på väggens bärförmåga. En kompletterande undersökning visar att förstärkt murverk med svagt murbruk tre till sex veckor efter förstärkningen genomgår en relativ förkortning på 1,0 – 1,2 mm/m. Denna relativa förkortning är av samma storleksordning som det svaga murverkets elastiska töjningsgräns ( $f_m/E_m=4 \text{ MPa}/4270 \text{ MPa} = 0,94 \text{ mm/m}$ ).

I sammanhanget måste dock beaktas att murverkets relativa förkortning under putskrympningens inverkan omfattar både en elastisk och en kryprelaterad deformation. En rimlig slutsats är att putsens krympning inte leder till att tryckspänningarna kommer upp i nivåer i närheten av murverkets tryckhållfasthet, men att fenomenet leder till en viss styrkeförlust hos murverket.

I avsaknad av experimentellt bestämd förlust i tryckhållfasthet, görs bedömningen att förstärkningsputsens krympning i fallet med det svaga murverket (M0.5) tar i anspråk 33 % av tryckhållfastheten. Motsvarande förlust i fallet med det starka murverket (M10) bedöms landa på 10 %. Detta innebär att i beräkningar som presenteras i Kapitel 4 i denna rapport används en reducerad tryckhållfasthet  $f'_m$  som för det svaga murverket blir 2,7 MPa (67 % av 4 MPa) medan det för det starka murverket 15,9 MPa (90 % av 17,6 MPa).

Det bör observeras att den föreslagna minskningen i murverkets tryckhållfasthet avser den typ av förstärkning som var aktuell i denna experimentella studie:

- Stark och styv cementrik puts (CS IV med tryckhållfasthet 17,8 MPa och E-modul cirka 10,6 GPa)
- Putsskikt med tjockleken 30 mm.

Svagare puts eller tunnare putsskikt resulterar rimligtvis i mer begränsade kryprelaterade effekter.

Användning av svagare puts är en fråga som bör undersökas i framtida projekt. Putsens egentliga funktion är att erbjuda erforderlig förankringskapacitet för armeringen och vidhäftning mot väggen. Det är troligt att även svagare puts, till exempel i tryckhållfasthetsklass CS II eller CS III, uppfyller dessa krav. En positiv bieffekt av att använda svagare puts kan uppstå på grund av att dessa i vanliga fall kräver mindre bindemedel (cement/kalk), vilket ger lägre koldioxidutsläpp.

Putsskiktets tjocklek i denna undersökning valdes utifrån resonemanget att med bred marginal säkerställa armeringens förankring. Ytterligare experimentella undersökningar kan genomföras för att utröna huruvida putstjockleken kan minskas utan att äventyra armeringens förankring.

Mängden armering som används till förstärkningen kan också bättre anpassas till behoven. Analyser bör göras på hur hårt det är rimligt att utnyttja armeringen utan att öka risken för förankringsbrott eller uppkomsten av breda sprickor. Eventuella slutsatser bör verifieras genom experimentella studier. Andra frågor som rör armeringen är huruvida armeringsnät med mindre eller större maskvidd kan användas och erforderlig kvalitet på armeringen med avseende på beständighet.

Förstärkning med andra material än stål, till exempel textilarmering, kan undersökas i framtiden. Innan en undersökning av den här arten genomförs, är det viktigt att det internationella kunskapsläget kartläggs. Det är inte minst viktigt att försöka ta reda på erfarenheter från användning av textilarmering i praktiska projekt.

Aktuellt projekt utgick från behov som finns inom renoveringsområdet. Ytförstärkning av väggar kan naturligtvis tillämpas även i nybyggnadssammanhang. Kraven på energiprestanda hos nybyggda

bostäder, i detta fall småhus, skärps stegvis, vilket skapar ett behov av att utveckla nya energi- och yteffektiva väggkonstruktioner. Bedömningen görs att tjockleken på bärande, ytförstärkta murade väggar kan bli så liten som 100 mm. Med minskad tjocklek på det bärande skiktet, kan välisolerade ytterväggar med rimlig total tjocklek byggas, vilket kan utgöra en konkurrensfördel för till exempel murade småhus. Tunna väggtvårsnitt kan samtidigt göra det svårare att åstadkomma anslutningar som fungerar bra ur statiskt och byggnadsfysikaliskt synpunkt.

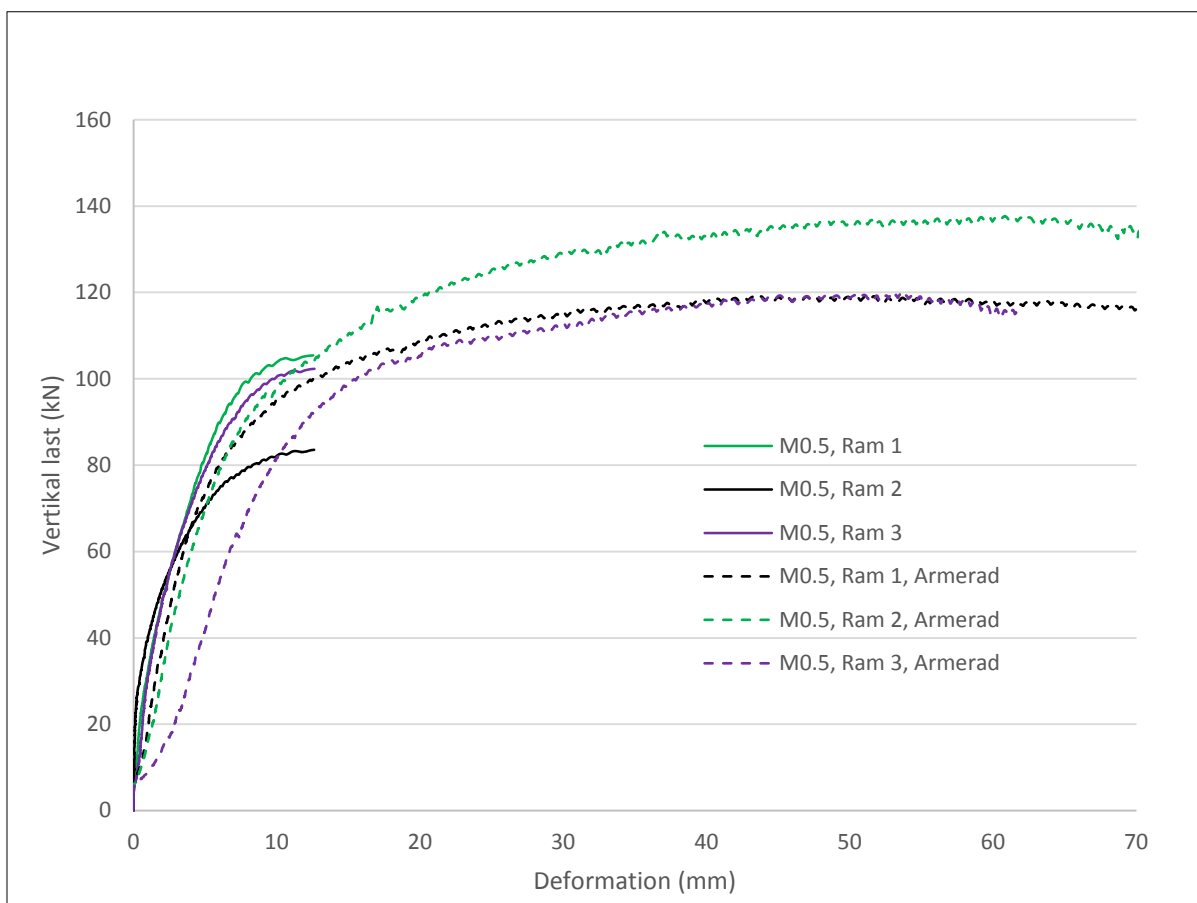
Undersökningarna i detta projekt utfördes på ensidigt förstärkta tegelväggar. Vid behov kan båda sidor av en vägg förstärkas, med det rimliga resultatet av en ännu större ökning i bärförmåga med avseende på vertikal belastning. Ytförstärkning har i andra studier visat sig radikalt kunna förbättra murade väggars bärförmåga med avseende på transversallast och horisontella laster i väggens eget plan, se till exempel *Valluzzi med flera, 2014* och *Lin med flera, 2014*.

## 4 Beräkning av bärförmågan hos enkelsidigt förstärkta väggar belastade av samtidig normalkraft och moment

Analyser görs av försöksresultaten för att undersöka om beräkningsmodeller inom betong- och murverksområdet lämpar sig för beräkning av förstärkta väggars bärförmåga när dessa belastas med excentrisk vertikallast och viss transversell last. Syftet med analyserna är att underlätta användningen av ytförstärkt murverk i praktiska situationer. Ett beräkningsexempel presenteras.

### 4.1 Experimentellt underlag

Resultaten från de experimentella studierna beskrivna i Kapitel 3 i denna rapport visar att det sker en tydlig förändring av vertikalbelastade väggars beteende när dessa förstärks med ett stål nät inbäddat i puts. Från att de oförstärkta väggarna har gått till brott på ett utpräglat sprött sätt, uppvisar förstärkta väggar ett segt beteende. De transversella deformationerna ökar markant med bibehållen nivå på normallasten, så som visas i fallet med väggarna byggda med svagt murbruk (M0.5) i Figur 10.



Figur 10. Kraft-deformationskurva för förstärkta och oförstärkta testväggar murade med svagt murbruk (M0.5)

De aktuella väggarna gick aldrig till brott i bokstavlig mening, utan kunde tas bort från provningsriggen hela. En viktig slutsats från den aktuella experimentella studien är att ytförstärkning med stål nät ger ett segt brottbeteende. Av detta följer också att bärförmågan hos väggar av den här typen kan analyseras med metoder etablerade för beräkning av armerad betong och armerat murverk.

I fallet med väggarna byggda med svagt murbruk (M0.5) uppnåddes väggarnas maximala lastkapacitet på grund av att murbruket krossades i fogarna på den tryckta sidan av provkropparna. I fallet med väggarna byggda med starkt murbruk (M 10) uppnåddes aldrig den maximala lastkapaciteten. Bedömningen görs att den uppnådda lasten i fallet med de starka väggarna motsvarar 80-90 % av den maximala lastkapaciteten. För dessa väggar går det därför inte att visa huruvida den maximala lastkapaciteten uppnåddes på grund av flytning i armeringen eller krossning av murverket på väggarnas tryckta sida. Det är dock troligt att brottbeteendet var segt även för dessa väggar.

Cement- och kalkhaltiga murbruk och putser krymper efter färdigställandet. Krympningen orsakas av en kombination av uttorkning och autogen krympning, vilket, om det sker obehindrat, kan uppgå till mellan 1.5 – 2 mm/m. Förhindrad krympning leder till att dragkrafter uppstår i det krympande murbruket/putsen och på motsvarande sätt tryckkrafter i den kropp som förhindrar den fria krympningen.

I denna studie förstärktes väggarna med ett armeringsnät som bäddades in i en cementrik puts av tryckhållfasthetsklass CS IV. Putsens E-modul och tryckhållfasthet visade sig vara av samma storleksordning som det starka murverkets (M10) E-modul och tryckhållfasthet. Motsvarande förhållande i fallet med det svaga murverket (M0.5) är cirka fyra gånger större E-modul respektive tryckhållfasthet.

Effekterna av putsens krympning belystes i en kompletterande studie i detta projekt. Resultaten visar att murverk med svagt murbruk (M0.5) som putsas med CS IV puts i en tjocklek av 30 mm genomgår en relativ förkortning på cirka 1 mm/m. Denna relativa förkortning är av samma storleksordning som det svaga murverkets elastiska töjningsgräns ( $f_m/E_m=4 \text{ MPa}/4270 \text{ MPa} = 0,94 \text{ mm/m}$ ).

I sammanhanget måste dock beaktas att murverkets relativa förkortning under putskrympningens inverkan omfattar både en elastisk och en kryprelaterad deformation. En rimlig slutsats är att putsens krympning inte leder till att tryckspänningarna kommer upp i nivåer i närheten av murverkets tryckhållfasthet, men att fenomenet leder till en viss styrkeförlust hos murverket.

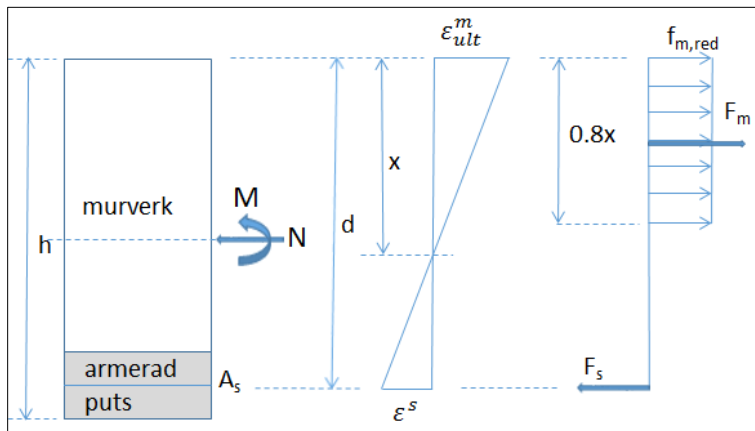
I avsaknad av experimentellt bestämd förlust i tryckhållfasthet, görs bedömningen att förstärkningsputsens krympning i fallet med det svaga murverket (M0.5) tar i anspråk 33 % av tryckhållfastheten. Motsvarande förlust i fallet med det starka murverket (M10) bedöms landa på 10 %.

Detta innebär att i beräkningarna i detta kapitel används en reducerad tryckhållfasthet  $f'_m$  som för det svaga murverket blir 2,7 MPa (67 % av 4 MPa) medan det för det starka murverket 15,9 MPa (90 % av 17,6 MPa).

#### 4.2 Beräkning av tvärsnittskapacitet för ensidigt ytförstärkt vägg utsatt för samtidig normallast och moment

Beräkningen av en ytförstärkt väggs tvärsnittskapacitet i brottgränstillståndet genomförs enligt metod som används vid dimensionering av betongtvärsnitt utsatt för samtidig normallast och moment. Denna metod är i linje med föreskrifter för dimensionering av armerat murverk enligt Eurokod 6 (EK6), avsnitt 6.6.2. För en mer utförlig beskrivning av tillvägagångssättet, se till exempel *Isaksson med flera, 2017, kapitel 9 samt Molnár och Gustavsson, 2016. Töjnings-spänningsfördelning*

som kan användas för att analysera ett enkelsidigt förstärkt tvärsnitts kapacitet för samtidigt verkande normallast ( $N$ ) och moment ( $M$ ) visas i Figur 15.



Figur 15. Töjnings-spänningsfördelning i enkelsidigt förstärkt väggvärsnitt belastat av samtidig normalkraft och moment i brottgränstillståndet.

Beräkningarna genomförs med hjälp av jämviktsekvationerna (1) och (5), där uppställningen utgår ifrån att tvärsnittets maximala kapacitet uppnås genom krossbrott i murverket, se ekvation (2) och (4). Detta innebär att ekvationerna visar fallet då stålarmeringen inte har uppnått flytspänningsnivå samt att linjär töjningsfördelning antas råda över tvärsnittet, se ekvation (3).

$$N + F_s - F_m = 0 \quad (1)$$

$$F_s = \varepsilon_s E_s A_s \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x} \varepsilon_{ult}^m \quad (3)$$

$$F_m = 0.8xbf_m \quad (4)$$

$$M + N(d - h/2) - F_m(d - 0.4x) = 0 \quad (5)$$

I ekvationerna (1) – (5) har följande beteckningar använts:  $h$  är tvärsnittshöjden;  $d$  är effektiv höjden;  $x$  är avståndet från tryck kant till neutrallagret;  $A_s$  är armeringsarean;  $N$  är normallasten;  $M$  är moment av transversallast, inklusive moment från excentrisk normallast  $N$  (i förekommande fall);  $f_m$  är murverkets tryckhållfasthet;  $\varepsilon_{ult}^m$  är murverkets gränstöjning;  $F_m$  är kraften i murverket;  $\varepsilon_s$  är töjningen i stålarmeringen;  $E_s$  är stålets elasticitetsmodul;  $F_s$  är kraften i armeringen.

Antalet obekanta storheter är ofta större än antalet jämviktsekvationer. Materialegenskaper som murverkets och armeringens hållfasthet, gränstöjning och E-modul kan inhämtas från materialleverantören, uppskattas från tabeller eller bestämmas genom försök. Till exempel, om normallasten och momentet är givna, kan neutrallagrets läge  $x$  och den erforderliga armeringsmängden  $A_s$  beräknas.

### 4.3 Beräkning av bärförmågan för ensidigt ytförstärkt vägg utsatt för samtidig normalkraft och moment

Vid beräkning av ensidigt ytförstärkta väggars bärförmåga när dessa belastas av samtidig normallast och moment måste effekterna av väggens slankhet samt imperfektioner beaktas.

En armerad väggs slankhet  $\lambda$  beräknas enligt EK6, avsnitt 5.5.2.1, genom att dividera väggens effektiva höjd  $h_{ef}$  med väggens effektiva tjocklek  $t_{ef}$ . Slankhetstalet bör inte överstiga 27. Om den armerade väggens slankhet är större än 12, bör enligt EK6, avsnitt 6.6.2(7), andra ordningens effekter beaktas genom ett tilläggsmoment  $M_a$

$$M_a = \frac{N h_{ef}^2}{2000 t} \quad (6)$$

där  $N$  är normallasten;  $h_{ef}$  är väggens effektiva höjd;  $t$  är väggens tjocklek.

Imperfektioner som i förekommande fall bör beaktas är initialexcentricitet (EK6, 5.5.1.1(4)) och oavsiktlig lutning (EK6, avsnitt 5.3). Initialexcentriciteten  $e_{init}$  beräknas som

$$e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} \quad (7)$$

med beteckningar enligt tidigare. Initialexcentriciteten ger upphov till ett tilläggsmoment lika med  $Ne_{init}$ . I mitthöjd på en ledat upplagd vägg halveras detta moment, se till exempel *Molnár och Gustavsson, 2016*, avsnitt 4.1.

Beräkning av en ytförstärkt väggs bärförmåga genomförs med hjälp av ekvationerna (1) – (5). I ekvation (5) beaktas alla relevanta moment. Om både tilläggsmoment på grund av slankhet och initialexcentricitet ska beaktas, ställs momentjämvikt upp som

$$M + M_a + 0.5Ne_{init} + N \left( d - \frac{h}{2} \right) - F_m(d - 0.4x) = 0 \quad (8)$$

med beteckningar enligt tidigare.

### 4.4 Verifiering av beräkningsmodellen

Resultaten av de experimentella undersökningarna i detta projekt används för att verifiera modellerna för beräkning av ytförstärkta väggars bärförmåga med avseende på samtidigt verkande normallast och moment. Beräkningsförutsättningar och materialparametrar sammanfattas i Tabell 4. För att möjliggöra en jämförelse mellan beräkningsresultat och experimentella resultat, genomförs beräkningarna med medelvärden på materialparametrarna.

Tabell 4. Parametrar som används i de verifierande beräkningarna av ytförstärkta väggarnas bärförmåga

Förutsättning/parameter	Vägg murad med murbruk M0.5 (svagt murverk)	Vägg murad med murbruk M10 (starkt murverk)
Väggens höjd*bredd*tjocklek (mm)	3000*1000*150	3000*1000*150
Randvillkor ovkant/underkant	Ledad	Ledad
Lastexcentricitet $e$ i förhållande till tvärsnittets symmetrilinje (mm)	45	45
Tvärsnittshöjd $h$ (mm)	150	150
Effektiv höjd $d$ (mm)	135	135
Medelvärde maximal experimentell vertikallast $N_{exp}$ (kN)	125	500 -
Reducerad tryckhållfasthet $f_m^t$ (MPa)	2,7 (67 % av 4 MPa)	15,9 (90 % av 17,6 MPa)
Gränstörning murverk $\varepsilon_{ult}^m$ (mm/m)	4,3	2,2
Area armering svetsat galler (mm <sup>2</sup> )	314	314
Draghållfasthet armerings $f_s$ (MPa)	591	591
Elasticitetsmodul armering $E_s$ (GPa)	164	164
Flytgräns armering $\varepsilon_{sy}$ (mm/m)	3,6	3,6

Vi börjar beräkningen med att kontrollera väggens slankhet. Ledat fasthållna väggers effektiva höjd är densamma som den faktiska höjden, i vårt fall 3000 mm. Väggtvärsnittet är rektangulärt, vilket gör att den effektiva tjockleken är densamma som den faktiska, det vill säga 150 mm. Väggnas slankhet  $\lambda$  kan nu beräknas

$$\lambda = \frac{h_{ef}}{t_{ef}} = \frac{3000}{t_{ef}150} = 20$$

Väggnas slankhetstal 20 är större än gränsvärdet 12 (EK6, 6.6.2(7)), vilket betyder att ett tilläggsmoment måste tas med i beräkningen av väggarnas bärförmåga. Tilläggsmomentet  $M_a$  beräknas med hjälp av ekvation (6)

$$M_a = \frac{N h_{ef}^2}{2000 t} = \frac{N * 3^2}{2000 * 0.150} = 0.03N$$

Initialexcentriciteten  $e_{init}$  beräknas med hjälp av ekvation (7)

$$e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} = \frac{3000}{450} = 6.7 \text{ mm}$$

Initialexcentriciteten ger upphov till ett tilläggsmoment  $0.5Ne_{init}$

$$0.5Ne_{init} = 0.003N$$

Jämviktsekvationerna ställs först upp på allmän form, sedan med värden som avser väggar byggda med svagt murverk (M0.5). I beräkningarna antas att spänningarna i armeringen inte uppnår flytgränsen, det vill säga att töjningen i armeringen är mindre än 3,75 mm/m.

$$N + F_s - F_m = 0 \quad (\text{kraftjämvikt})$$

$$M + M_a + 0.5Ne_{init} + N \left( d - \frac{h}{2} \right) - F_m(d - 0.4x) = 0 \quad (\text{momentjämvikt runt armeringen})$$

$$N + \frac{0.135-x}{x} * 0.0043 * 164 * 10^9 * 314 * 10^{-6} - 0.8x * 1.0 * 2.7 * 10^6 = 0$$

$$0.045N + 0.03N + 0.003N + N \left( 0.135 - \frac{0.150}{2} \right) - 0.8x * 1.0 * 2.7 * 10^6 * (0.135 - 0.4x) = 0$$

De två ekvationerna med  $N$  och  $x$  som två obekanta ger för väggarna murade med svagt murverk (M0.5) lösningen  $x = 0.102 \text{ m}$  och  $N = 144 \text{ kN}$ .

Motsvarande beräkning för väggarna med starkt murbruk blir (M 10) ger  $x = 0.060 \text{ m}$  och  $N = 565 \text{ kN}$ . Resultaten från beräkningarna visas tillsammans med de experimentella värdena i Tabell 5.

Tabell 5. Bärförmåga hos ytförstärkta väggar belastade med excentrisk vertikallast

Väggtyp	N <sub>experimentell</sub> (kN)	N <sub>beräknad</sub> (kN)	N <sub>beräknad</sub> / N <sub>experimentell</sub>
Vägg murad med svagt murverk (M0.5), lastexcentricitet e = 45 mm	125	149	1,19
Vägg murad med starkt murverk (M10), lastexcentricitet e = 45 mm	ca 500	565	1,13

Beräkningarna ger för båda väggtyperna en bärförmåga som är cirka 15 procent högre än de experimentellt erhållna medelvärdena. Med tanke på spridningen i egenskaper hos de ingående materialen är resultaten tillfredsställande. Försiktighet måste dock iaktas på grund av att beräkningarna ger resultat på osäkra sidan.

Det faktum att beräknad bärförmåga överskattas lika mycket för både starkt och svagt murverk, tyder på att beräkningsmodellen ger konsistenta resultat. Möjliga förklaringar till avvikelsen mellan beräknade och experimentella värden kan bero på att:

- Puts krympningens negativa inverkan på murverkets tryckhållfasthet har underskattats.
- Puts krympningen kan även ha bidragit till att minska murverkets gränstöjning. Denna möjlighet har inte beaktats i beräkningarna.

Kompletterande experimentella undersökningar bör utföras för att belysa effekterna av:

- Putsens krympning på murverks tryckhållfasthet och gränstöjning.
- Putsskiktets tjocklek på murverkets tryckhållfasthet och gränstöjning; på förmågan att skapa erforderlig vidhäftning mot underlaget; på armerings förankringskapacitet.

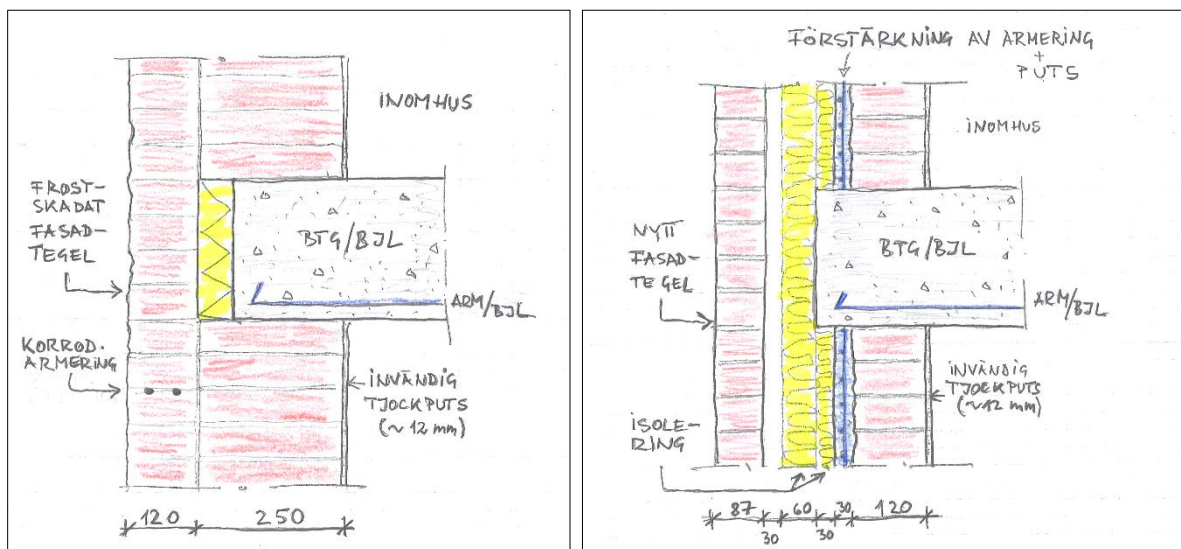
- Putsens tryckhållfasthetsklass. Till exempel bör även puts i klass CS II och CS III undersökas som möjligt alternativ.

#### 4.5 Beräkningsexempel

Förstärkningsbehov i vägg i samband med renovering och energieffektivisering.

En fyra våningar hög kontorsbyggnad med fullmurade, en och en halv sten tjocka, ytterväggar av tegel med omfattande frostsador och sprickbildning orsakad av korroderande armering, är i behov av renovering. Fastighetsägaren vill undersöka huruvida ytterväggarna kan renoveras och uppgraderas med avseende på energiprestanda enligt koncept utvecklat i forskningsprojektet "Energieffektiv renovering av massiva murade ytterväggar" som genomfördes vid Lunds tekniska högskola under 2016-2018.

Konceptet som analyseras innebär att det yttre skiktet bestående av en halv stens fasadtegel och cirka halva delen av den inre, en sten tjocka, väggen rivs, varefter den kvarstående väggen förstärks genom armering som bäddas in i ett putsskikt på väggens utsida. Se avsnitt 1.2 för en mer i detaljerad beskrivning av konceptet. Kvarlämnad vägg kommer att ha en tjocklek på cirka 120 mm, se Figur 16. Störst behov av förstärkning finns i fönsterpelarna som spänner mellan bjälklaget på bottenplan och bjälklaget på våning 2.



Figur 16 Vertikalsektion genom yttervägg före (vänster) och efter (höger) renovering

Murverkets tryckhållfasthet kan utläsas från konstruktionsritningarna. Om uppgifterna saknas, kan murverkets tryckhållfasthet bestämmas genom metod beskriven i Eurokod 6, avsnitt 3.6.1.2. I beräkningsexemplet antas att murverkets karakteristiska tryckhållfasthet är 11,1 MPa, vilket motsvarar ett murverk bestående av tegel i hållfasthetsklass 55 och murbruk M10. Den reducerade tryckhållfastheten, det vill säga tryckhållfastheten som beaktar den negativa effekten av förstärkningsputsens krympning, sätts till 10 MPa. Detta motsvarar en styrkeförlust på 10 %. Murverkets dimensionerande tryckhållfasthet beräknas med en partialkoefficient som är lika med två. Det antas vidare att murverkets gränstjuning är 3,5 mm/m.

Förstärkningen genomförs genom att ett svetsat armeringsgaller med tråddiameter på 4 mm och maskvidden 40 mm bäddas in i 30 mm puts av kvalitet CS IV, det vill säga samma förstärkningslösning som användes i nämnt LTH-projekt. Stålets dimensionerande draghållfasthet bestäms till 455 MPa, genom att dividera den karakteristiska draghållfastheten på 591 MPa med murverksarmeringens partialkoefficient på 1,3. Stålets flytgräns beräknas genom att dividera den dimensionerande draghållfastheten med elasticitetsmodulen. Konstruktiva förutsättningar, laster och erforderliga parametrar redovisas i Tabell 6.

Tabell 6. Konstruktiva förutsättningar, laster och parametrar för beräkning av förstärkningsbehovet

Förutsättningar/laster/parametrar	Värde
Väggens höjd*bredd*tjocklek efter förstärkningen (mm)	3000*1000*150 mm
Randvillkor ovkant/underkant	Ledad
Tvärsnittshöjd $h$ (mm)	150 mm
Armeringsnätets inbäddningsdjup i putsen (mm)	15 mm
Effektiv höjd $d$ (mm)	135 mm
Dimensionerande vertikallast $N_{Ed}$ (kN)	243 kN
Lastexcentricitet $e$ i förhållande till tvärsnittets symmetrilinje (mm)	25 mm
Dimensionerande last av vind $M_{Ev,d}$ (sug)	0,8 kNm
Reducerad dimensionerande tryckhållfasthet $f'_{md}$ (MPa)	5 MPa
Gränstjörning murverk $\varepsilon_{ult}^m$ (mm/m)	3,5 mm/m
Dimensionerande draghållfasthet armering $f_{sd}$ (MPa)	455 MPa
Elasticitetsmodul armering $E_s$ (GPa)	164 GPa
Flytgräns armering $\varepsilon_{sy}$ (mm/m)	2,8 mm/m

Beräkningen genomförs för ett väggavsnitt med bredden 1 meter och avser bestämning av armeringsbehovet  $A_s$  i brottgränstillståndet i enlighet med EK6. För detaljer kring tillvägagångssättet, se tidigare avsnitt i detta kapitel.

Vi börjar med att bestämma det dimensionerande momentet  $M_{ed}$  som samverkar med normallasten  $N_{ed}$ . Den excentriska normallasten ger upphov till dragspänningar på väggens utsida. Momentet av excentrisk last betecknar vi  $M_{Ee,d}$  och beräknar som

$$M_{Ee,d} = N_{Ed}e = 243 * 0.025 = 6.1 \text{ kNm}$$

Den aktuella väggen har höjden 3000 mm och tjockleken 150 mm, vilket i likhet med tidigare exempel ger ett slankhetstal på 20. Detta värde på slankhetstalet är större än gränsvärdet 12 i EK6 6.6.2(7), vilket innebär att vid beräkning av väggens bärförmåga bör ett tilläggsmoment  $M_{Ea,d}$  beaktas

$$M_{Ea,d} = \frac{N_{Ed} h_{ef}^2}{2000 t} = \frac{243 * 3^2}{2000 * 0.150} = 7.3 \text{ kNm}$$

Initialexcentriciteten  $e_{init}$  beräknas med hjälp av ekvation (7) som 450-del av väggens effektiva höjd på 3000 mm, vilket ger att  $e_{init} = 6.7$  mm. Moment av  $e_{init}$  i väggens mitthöjd beräknas som

$$M_{Einit,d} = 0.5N_{Ed}e_{init} = 0.5 * 243 * 0.0067 = 0.8 \text{ kNm}$$

Beräkning av den erforderliga armeringsmängden  $A_s$  sker genom att lösa jämviktsekvationerna (1) och (5), där den andra obekanta variabeln är läget för neutrala lagret  $x$ , se Figur 15

$$N_{Ed} + F_{sd} - F_{md} = 0 \quad (\text{kraftjämvikt})$$

$$M_{Ev,d} + M_{Ee,d} + M_{Ea,d} + M_{Einit,d} + N_{Ed} \left( d - \frac{h}{2} \right) - F_{md}(d - 0.4x) = 0 \quad (\text{momentjämvikt runt } A_s)$$

Antagandet görs att armeringen har uppnått flytgränsen. Efter insättning av aktuella siffervärden ser ekvationerna ut som följer

$$243000 + 455 * 10^6 * A_s - 0.8x * 1.0 * 5 * 10^6 = 0 \quad (\text{kraftjämvikt})$$

$$800 + 6100 + 7300 + 800 + 243000 \left( 0.135 - \frac{0.150}{2} \right) - 0.8x * 1.0 * 5 * 10^6 * (0.135 - 0.4x) = 0 \quad (\text{momentjämvikt runt } A_s)$$

Som lösning fås  $x = 69$  mm. En kontroll av töjningarna enligt ekvation (3) visar att armeringen flyter, vilket överensstämmer med antagandet som gjorts före beräkningen. Erforderlig armeringsarea beräknas till  $A_s = 73$  mm<sup>2</sup>.

Den föreslagna armeringen av svetsat stål-galler med tråddiameter på 4 mm och maskvidden 40 mm kan användas även om den tillförda armeringsmängden är större (314 mm<sup>2</sup>) än den som är nödvändig enligt ovan beräkning.

## 5 Sammanfattning och slutsatser

En experimentell undersökning har genomförts i labbmiljö med syfte att öka kunskapen om förstärkning av murade väggar med avseende på samtidigt verkande normallast och moment. Förstärkningen bestod av ett stål nät inbäddat i cementrik puts som applicerades på den dragbelastade sidan av väggarna. För att åskådliggöra förstärkningens effekter på väggarnas bärförmåga och brottbeteende, testades även traditionella, oarmerade väggar. Testväggarna uppfördes med två olika typer av murverk – ett svagt med murbruk M0.5 och ett starkt med murbruk M10.

En beräkningsmetod för dimensionering av de förstärkta väggarnas bärförmåga med avseende på samtidigt verkande normallast och moment i brottgränstillståndet har testats. Beräkningsmetoden består av en kombination av etablerade metoder för beräkning av tvärsnittskapaciteten hos armerade betong och beräkning av bärförmågan hos väggar av armerat murverk. Resultaten från den experimentella studien användes för att verifiera metodens användbarhet.

Slutsatser från den experimentella undersökningen:

- Bärförmågan efter förstärkning ökade med cirka 30 % för väggarna uppförda med svagt murverk (M0.5) och cirka 100 % för väggarna uppförda med starkt murverk (M10).
- Förstärkning bidrog till en markant ökning av väggarnas brottseghet. Väggarna byggda med svagt murverk (M0.5) gick aldrig till brott. I fallet med väggarna byggda med starkt murverk (M10) fick försöken avbrytas innan väggarnas bärförmåga var uttömt.
- Den höghållfasta förstärkningsputsens (CS IV) krympning i kombination med putsens förhållandevis stora tjocklek (30 mm) bidrar till en viss nedsättning av murverkets tryckhållfasthet. Den negativa effekten förväntas vara störst när stark puts kombineras med svagt murverk.
- Tekniken bedöms vara användbar i praktiska renoverings- eller nybyggnadsprojekt.

Slutsatser från beräkningarna:

- Ytförstärkta väggars bärförmåga med avseende på samtidigt verkande normallast och moment kan beräknas med dimensioneringsmetoder som är allmänt tillgängliga inom betong- och murverksområdet.
- Effekterna av förstärkningsputsens krympning måste beaktas genom en minskning av muverkets beräkningsmässiga tryckhållfasthet. Fler undersökningar behövs för att kunna dra säkra slutsatser om hur denna justering ska göras.

Framtida forsknings- och utvecklingsinsatser kan belysa:

- Huruvida andra kombinationer av putsbruk och armering kan bidra till att minska material- och arbetsbehovet vid ytförstärkning.
- Huruvida det uppstår några vinster med att förstärka båda sidor av en vägg.
- Hur effekterna av putsens krympning kan uppskattas på ett sätt som gör beräkningar av förstärkta väggars bärförmåga mer träffsäkra.

## 6 Referenser

- R. Aguilar, E. Ramírez, V. G. Haach, M. A. Pando - *Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control*. Construction and Building Materials 104 (2016) 181–190.
- E. Bernat, L. Gil, P. Roca, Ch. Escrig - *Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading*. Construction and Building Materials 44 (2013) 35–47.
- CEN/SIS – *Eurokod 6 – Dimensionering av murverkskonstruktioner. Del 1-1 och del 2*, SIS Förlag, 2012.
- T. Gustavsson, J. Jönsson, M. Molnár – *Reparation av murade fasader med korrosionsskador*. Svensk Byggtjänst, ISBN 978-91-7332-870-7, 2017.
- T. Isaksson, A. Mårtensson, S. Thelandersson, E. Frühwald Hansson, M. Fröderberg, O. Larsson Ivanov - *Byggkonstruktion*. Studentlitteratur, ISBN 9789144118369, 2017.
- Y. Lin, L. Wotherspoon, J. Ingham, D. Biggs - *In-plane strengthening of unreinforced concrete masonry wallettes using ECC shotcrete*. Engineering Structures 66 (2014) 57–65.
- M. Molnár, J. Jönsson, K. Sandin, C-M. Capener - *Energieffektivisering av miljonprogrammets flerbostadshus genom beständiga tilläggsisoleringsystem*. Rapport TVBK-3064, Lunds tekniska högskola, 2013.
- M. Molnár och T. Gustavsson – *Utformning av murverkskonstruktioner enligt Eurokod 6*. Svensk Byggtjänst, ISBN 978-91-7333-794-6, 2016.
- C. Papanicolaou, T. Triantafillou, M. Lekka - *Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels*. Construction and Building Materials, 25 (2011) 504–514.
- T. Tägil, T. Gustavsson, K. Bergkvist, B. Magnusson Staaf - *Modernismens tegelfasader*. Arkus Förlag, ISBN 978-91-978957-3-6, 2011.
- M.R. Valluzzi, F. Da Porto, E. Garbin, M. Panizza - *Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials*. Materials and Structures, 47 (2014) 2131-2145.