

Materialgenskaper hos fogbruk till nygotiska murverk

Paulien Strandberg-de Bruijn | Avdelning Byggnadsmaterial | LTH |
Lunds universitet

&

Kristin Balksten | Kulturvård | Uppsala universitet Campus Gotland |

TVBM-7226



LUND
UNIVERSITY

Om inget annat anges är samtliga bilder tagna av författarna.

ISRN LUTVDG/TVBM—21/3188—SE(1-15)
ISSN 0348-7911 TVBM-7226
© Paulien Strandberg-de Bruijn & Kristin Balksten

Lunds Universitet
Avd Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund
www.byggnadsmaterial.lth.se

Innehållsförteckning

1	INTRODUKTION	4
1.1	Projektfinansiering	4
2	BAKGRUND	5
3	PROVYTOR PÅ ALFSHÖGS KYRKA	7
4	WORKSHOP FÖR MURARE I GÖTEBORG	13
5	MATERIAL & METODER	16
5.1	Krympning	18
5.2	Mekanisk hållfasthet	18
5.3	Densitet	20
5.4	Kapillärsugningsförmåga	22
5.5	Ånggenomgångsmotstånd (koppförsök)	23
5.6	Tunnslipsanalys	24
6	RESULTAT	25
6.1	Krympning efter 90 dagar	25
6.2	Mekanisk hållfasthet	26
6.3	Densitet	27
6.4	Kapillärsugningsförmåga	27
6.5	Ånggenomgångsmotstånd (koppförsök)	31
6.6	Tunnslipsanalys	31
7	DISKUSSION OCH SLUTSATS	34
7.1	Fortsatt forskning	35
8	TACK	35
9	REFERENSER	36

1 Introduktion

Den här rapporten är en sammanställning av projektresultat från ett forskningsprojekt där fogbruk undersöktes som producerades med olika kalksorter, från mer moderna kalksorter såsom KC-bruk och NHL, till mer traditionell kalk som Ölandskalk och Gotlandskalk. Mer kunskap om dessa fogbruk krävs inför restaureringar och renoveringar av kyrkobyggnader och andra nygotiska byggnader. Varje restaureringsinsats som genomförs med felaktiga material innebär en orimlig ekonomisk börda för fastighetsägaren, i detta fall Svenska Kyrkan och dess församlingar.

Under det sena 1800-talet och början på 1900-talet byggdes många byggnader, särskilt kyrkobyggnader, i den nygotiska stilen. Dessa byggnader hade oftast synligt fasadtegel eller synliga granitfasader. Många av dessa kyrkobyggnader ritades av arkitekten Adrian Crispin Peterson, även om liknande byggnader ritades även av andra arkitekter. För detta slags murverk var det inte ovanligt att man inom några få år stod inför fukt- och saltrelaterade problem. Dessa kännetecknas av invändiga saltutslag och urlakat murbruk vilket har ledd till omfattande reparationer och behov av kostsamma åtgärder.

Ända sedan deras uppförande har dessa byggnader ständigt krävt murverksreparationer. Många olika metoder har prövats över åren när det gäller valet av fogmaterial, inklusive cementfogar, kalkfogar, hydrauliska kalkfogar och silikonfogar. Dessutom har i vissa fall hydrofobering använts för att behandla skadade fasader. Många av dessa val har med tiden visat sig leda till förändrad estetik med förlust av kulturhistoriska och estetiska värden. De har även ofta lett till dålig beständighet av fogbruket, med vittring i fogbruk eller murverket bara några få år efter genomförd åtgärd.

Syftet med projektet har därför varit att ge en beskrivning av olika typer av kalkbaserade fogbruk som används till reparationer av historiska byggnader. Olika materialegenskaper har tagits fram för ett urval av bruk. För att göra välgrundade val av fogar krävs en detaljerad kartläggning av materialegenskaperna hos olika fogmaterial. Därför har detta projekt inriktats på att fastställa dessa egenskaper genom laboratoriestudier, där fokus legat på fuktegenskaper, hållfasthet och applicerbarhet. Även har hantverket varit en del av projektet, där fokus legat på kunskapsöverföring, beständighet och applicerbarhet. Förhoppningen är att denna samlade kunskap ska kunna bidra till val av fogbruk i samband med renovering som är kompatibel och beständig.

1.1 Projektfinansiering

Finansiär till projektet var Svenska kyrkan och medfinansiär var Balksten Byggnadsvård AB. Svenska Kyrkan har finansierat huvudparten av projektet genom sitt nationella program för kunskapsutveckling inom det kyrkliga kulturarvet (FKAE).

2 Bakgrund

I Sverige byggdes under sent 1800- och tidigt 1900-tal i Sverige många byggnader i nygotisk stil, särskilt kyrkobyggnader. Dessa kyrkobyggnader hade synligt murverk av tegel eller granit med ett kalk- eller cementbaserat fogbruk. Vanligt för denna typ av murverk är att det i ett tidigt skede uppstod fukt- och saltrelaterade problem på grund av salt i teglet. Detta har krävt, och kräver fortfarande, kostsamma reparationer av murverket. Orsaker till dessa fukt- och saltrelaterade problem var bl.a. en undermålig kvalitet i murtegel och användning av magra murbruk med hög porositet och låg frostbeständighet. Dessutom har ofta tegel som innehåller sulfater använts i murverkets kärna. Dessa material kan ha kombinerats med tätare fasadtegel och fogbruk av cement. Murverkens problem och deras orsaker har omfattande undersökts och beskrivits i tidigare studier av författarna men även av andra (Andersson 2010; K. Balksten 2017; K. Balksten, Lange & Lindholm 2012; K. Balksten, Lindholm & Lange 2014; K. Balksten, Lindholm & Rodin 2018; K. Balksten & P.B. Strandberg-de Bruijn 2021). Exempel på skador på nygotiska murverk visas i Figur 2.1–2.2.



Figur 2.1 Skadat fogbruk i nygotisk kyrka.



Figur 2.2 Djup fog med sandande murbruk i naturstensmurverk under renoveringsarbete.

I samband med att flera av dessa kyrkor som är placerade i Dalsland, Bohuslän och Halland har renoverats på senare tid har också kunskapsbehovet aktualiserats. Det har behövts fördjupade kunskaper om såväl fuktransport som nedbrytningsprocesser i den här typen av murverk som om hur de faktiskt är uppförda. Vid genomgång av restaureringshistoriken har det blivit tydligt att man aldrig riktigt arbetat med att förstå dessa murverk och deras material, vilket innebär att många tidigare renoveringar har utförts utan tillräckligt underbyggda kunskaper. Det har lett till renoveringar som dels har haft en alltför kort livslängd och ibland även till renoveringar där materialen som tillförts har kunnat bidra till ökad nedbrytningstakt.

Med utgångspunkt i ovan nämnda formulerades detta forskningsprojekt för att utreda materialegenskaper hos ett antal fogbruk som kan vara aktuella vid renovering och underhåll. Då forskningen under 2000-talet byggt upp mycket kunskap om historiska kalkbruk och den kalk som tillverkats i Sverige fanns det ett behov av att fastställa egenskaper hos de fogbruk som vi kan utläsa att man använt i Sverige från medeltid och framåt.

De materialegenskaper vi kan hämta ur svenska bygghandböcker är svåra att förlita sig på när det kommer till traditionella material avseende fog- såväl som murbruk. De är ofta utförda på ett begränsat antal material, med högt sandinnehåll och med kombinationer som sällan är tillgängliga idag. Det har därmed uppstått ett behov av att kartlägga materialegenskaper för de produkter som kan nyttjas för restaureringar på den svenska marknaden idag.

Generellt saknas beräkningsbara materialegenskaper för kalkbruk i den referenslitteratur som finns på svenska för svenska bruk. I en tid där det finns dataprogram som kan användas för att göra simuleringar behövs tillförlitliga ingångsvärden för att kunna göra realistiska bedömningar och simuleringar.

Som exempel ur den äldre litteraturen kan nämnas att Rothstein (1856) tar upp ett värde för tryckbelastning för murverk murade med kalkbruk där det inte alls framgår vilket blandningsförhållande som har testats. Men där står däremot att man testat bruk av fet kalk och sand (14 år gammalt), dålig kalk och sand samt hydrauliskt kalk och sand. Det ger inte några användbara värden. Dührkop m. fl. (1966) beskriver enbart fogbruk av KC-bruk eller C-bruk vilka alls inte motsvarar bruken i de historiska murverken. Likaså Burström (2021) tar översiktligt upp egenskaper för mur- och putsbruk enligt standarderna som råder. Där poängteras att rent kalkbruk inte ens finns med i det senaste regelverket som bygger på tryckhållfasthet.

En mycket noggrann genomgång av standarder som använts för att analysera tryckhållfasthet ingår i Eks examensarbete *Kalkbruk – styrka över tid* från 2023. Där har det blivit tydligt att standarderna som finns idag är anpassade efter cementbaserade bruk snarare än kalkbruk. Exempelvis provkropparnas utformning och storlek är en sådan faktor som skulle behöva anpassas bättre efter de material som undersöks för att motsvara ett verklighetsnära scenario. Eks examensarbete har genomförts i samverkan med detta projekt och fokuserat på att ta fram tryck- och böj-draghållfasthet för kalkbaserade murbruk som blandats likt bruken i denna studie. Där ingår även att i en uppföljning se på styrketillväxten efter ett respektive två år.

För vidare förståelse av porstrukturens betydelse för materialegenskaper och nedbrytningsprocesser hänvisas till Balksten (2005 & 2007).

3 Provytor på Alfshögs kyrka

Alfshögs kyrka i Falkenbergs kommun, se Figur 3.1., ritades av Adrian Crispin Peterson och Carl Crispin, och uppfördes 1901-1903 (Wikipedia 2023). Kyrkan har i likhet med andra kyrkor ritade av AC Peterson beständighetsproblem i murverket, bl.a. orsakat av salt- och frostsprängning, se Figur 3.2. Natriumsulfat har ledd till omfattande skador som uppstod redan några år efter att kyrkan uppfördes, vilket som regel har skett i övriga samtida kyrkor ritade av AC Peterson (Balksten & Strandberg-de Bruijn, 2021).



Figur 3.1 Alfshögs kyrka, Falkenbergs kommun.



Figur 3.2 Invändiga saltrelaterade beständighetsproblem i Alfshögs kyrka.



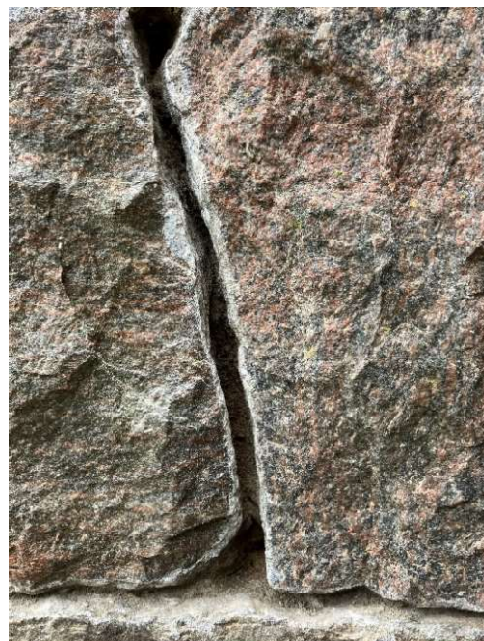
Figur 3.3 Applicering av fogbruk på provytorna.



Figur 3.4 Applicering av fogbruk genomfördes av Lörinc Kurko, augusti 2022.



Figur 3.5 Sandigt murbruk bakom fog, augusti 2022.



Figur 3.6 Sandigt murbruk bakom fog, augusti 2022.

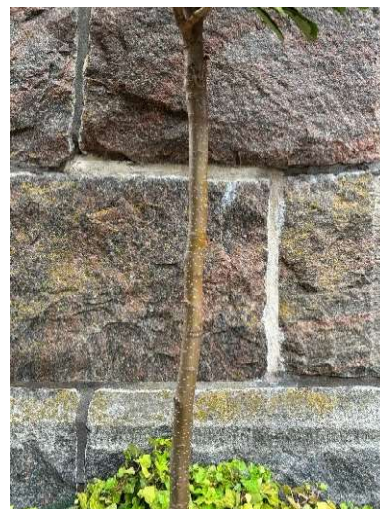
Samtliga fogbruk som ingick i projektet applicerades som provytor på Alfhögs kyrka i augusti 2022. Provytorna applicerades på kyrkans västra sida, alldeles intill huvudentrén, se Figur 3.3–3.4 samt Figur 3.16. Provytorna i form av en längre fog i vinkel, en fogyta per bruk applicerades i augusti 2022, se Figur 3.7-3.15. Dessa fogar besiktades okulärt i juli 2023.



Figur 3.7 Fogbruk 1, aug 2022.



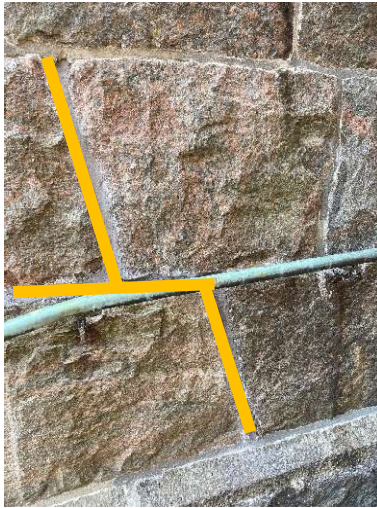
Placering fogbruk 1: KC.



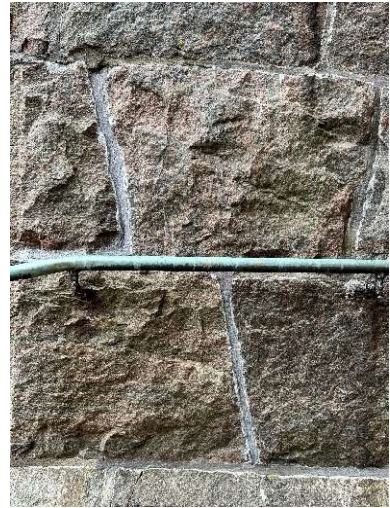
Fogbruk 1, juli 2023. I gott skick.



Figur 3.8 Fogbruk 2, aug 2022



Placering fogbruk 2: NHL2.



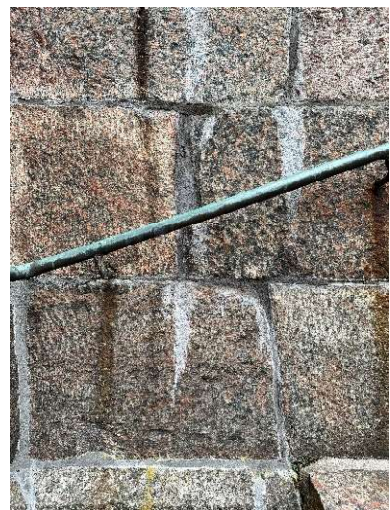
Fogbruk 2, juli 2023. I gott skick.



Figur 3.9 Fogbruk 3, aug 2022



Placering fogbruk 3: NHL3.5.



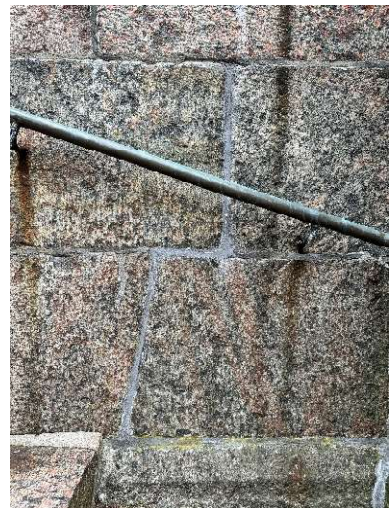
Fogbruk 3, juli 2023. I gott skick.



Figur 3.10 Fogbruk 4, aug 2022



Placering fogbruk 4: våtsläcket Götlands kalk.



Fogbruk 4, juli 2023. I gott skick.



Figur 3.11 Fogbruk 5, aug 2022



Placering fogbruk 5: hydraulisk Gotlands kalk.



Fogbruk 5, juli 2023. I gott skick.



Figur 3.12 Fogbruk 6, aug 2022



Placering fogbruk 6: Gotland 50/50



Fogbruk 6, juli 2023. Delvis vittrad.



Figur 3.13 Fogbruk 7, aug 2022



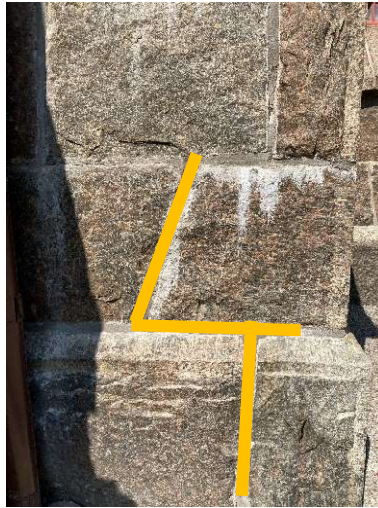
Placering fogbruk 7: våtsläckt Trilokalk.



Fogbruk 7, juli 2023. Delvis vittrad. Detta bruk härdade långsamt, vilket noterades vid studieresa i september 2022.



Figur 3.14 Fogbruk 8, aug 2022



Placering fogbruk 8: hydraulisk Ortokalk.



Fogbruk 8, september 2023. Delvis vittrad. Detta bruk härdade långsamt, vilket noterades vid studieresa i september 2022.



Figur 3.15 Fogbruk 9, aug 2022



Placering fogbruk 9: Trilo/Ortokalk 50/50.



Fogbruk 9, juli 2023. Delvis vittrad. Detta bruk härdade långsamt, vilket noterades vid studieresa i september 2022.

När den gamla fogen av NHL5 i blandningsförhållande 1:2 från 2015 bilades ur hade den generellt en hård skorpa ytterst och innanför ett par millimeters skorpa var den sandig och porös. Bakom fogen fanns blöt sand i murverkets som kan tolkas som ett äldre murbruk som brutits ner.

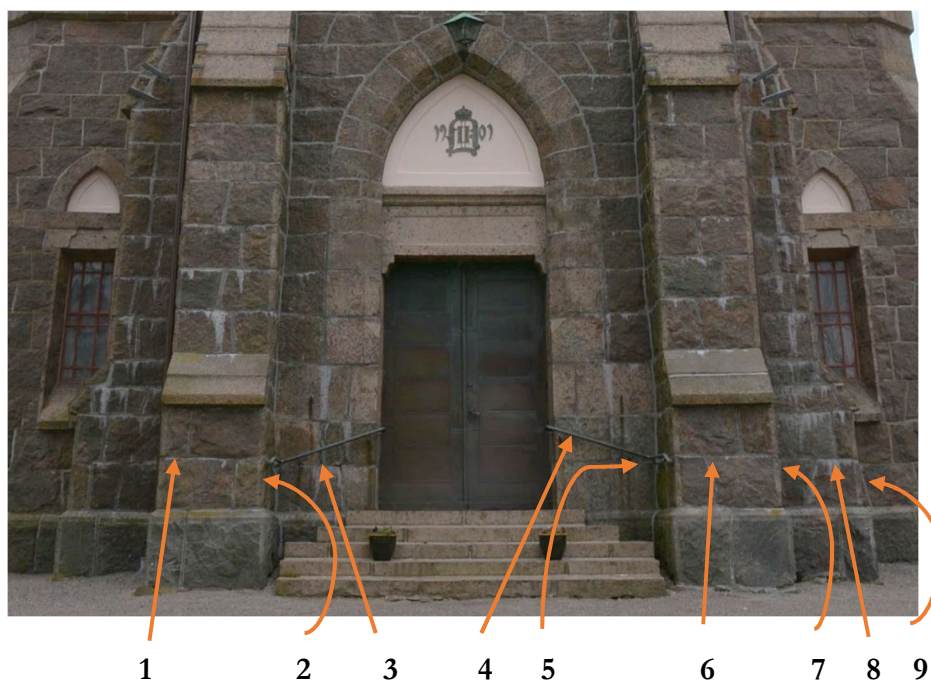
Vid appliceringen av provytorna var det en ljummen sommardag 18 augusti 2022 med vädermässigt goda förutsättningar. Murare var Lörinc Kurko från Sydskiffer AB som utförde provytor tillsammans med Kristin Balksten och Paulien Strandberg-de Bruijn. De olika bruken upplevdes mycket olika att applicera. De var olika korta, smidiga, klistriga eller sandiga. Detta har noterats i tabellen. Värt att notera är också att de olika bruken satte sig olika snabbt varav några av dem inte hann sätta sig alls under dagen som var avsatt till att göra provytorna. Detta är ofta en realitet när man just ska till att utföra provytor som man undkommer när man är på plats dagligen och fogar en större yta.

Först när bruket har satt sig kan man dra till fogen så att den blir helt öppen (utan att riskera att man får en bindemedelsfilm på ytan). Detta påverkar i sin tur dels hur jämnt fogen härdar och dels hur lätt den tar upp och avger fukt. Om en fog fryser sönder kan man ofta se att den varit bearbetad något för tidigt så att den fått en tät bindemedelsskorpa i ytan. Vid uppföljningsbesöket september

2022 kunde vi förvånat konstatera att brukena nr 7–9 inte hade härdat helt. De var ännu så öppna att de gick att dra till och öppna ytan ytterligare.

Tabell 1 Fogbruk till provfogning Alfhögs kyrka.

Nr	Bruk	Kommentar 2022	Noterat 2023
1	KC från Finja	Färdigbruk, utan pigment. Smidig och bra att arbeta med. Lätt att dra till.	I gott skick.
2	NHL 2 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Sandigt bruk som saknar klistighet.	I gott skick.
3	NHL 3.5 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Sandigt bruk som saknar klistighet.	I gott skick.
4	våtsläckt Gotlandskalk 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Klistrigt bruk som tar tid på sig att sätta sig.	I gott skick.
5	torrsläckt hydraulisk Gotlandskalk 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Påminner om nr 2 och 3 men upplevs fetare.	I gott skick.
6	50/50 Gotlandskalk (K/Kh) 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Perfekt konsistens, lätt att bearbeta, lagom klistrigt och smidigt.	Delvis vittrad.
7	våtsläckt öländsk kalk (Trilokalk) 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Upplevs blött utan klistighet, svårt att få till konsistensen trots att inget mer vatten har tillsats.	Delvis vittrad.
8	torrsläckt hydraulisk öländsk kalk (Ortokalk) 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Ett ovanligt kort bruk, utan klistighet. Vät-skar sig vid bearbetning, som att det har svårt att bära vatten.	Delvis vittrad.
9	50/50 öländsk kalk (Trilokalk/Ortokalk) 1:1,5, 0–2 mm sand, pigment	Lätt att bearbeta, lagom klistrigt och smidigt.	Delvis vittrad.

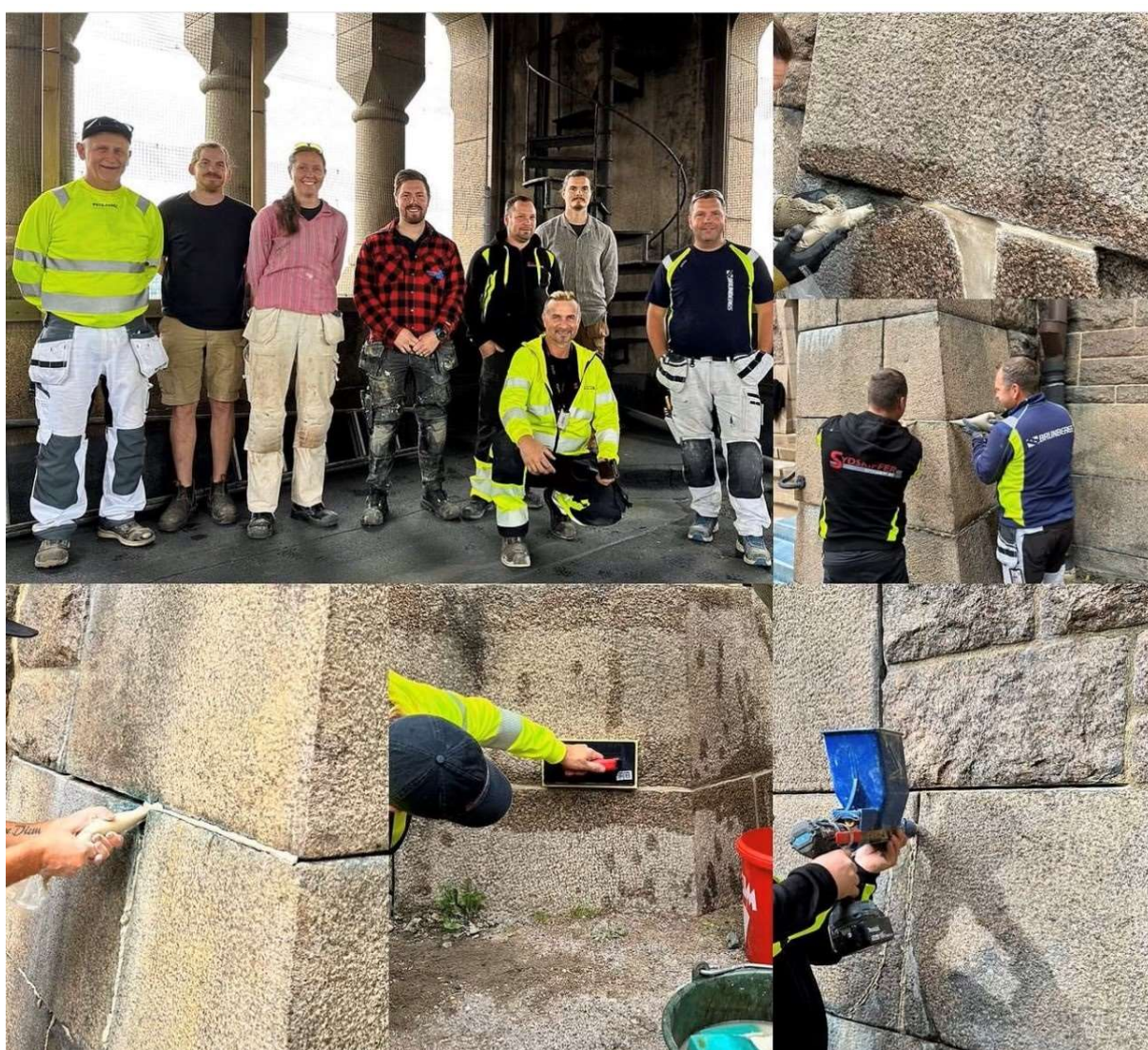


Figur 3.16 Placering av provytor

4 Workshop för murare i Göteborg

Den 17 och 18 augusti 2023 hölls en workshop för murare vid Vasakyrkan i Göteborg. Dagarna handlade om fogning av naturstensmurverk, med utgångspunkt i att finna restaureringsbruk lämpligt för Vasakyrkan. Kristin Balksten var workshopsledare. Totalt 6 olika typer av fogbruk applicerades på provtytor på kyrkans kontreforer på södersidan. En viktig del i denna workshop var erfarenhetsutbyte kring fogbrukets arbetbarhet och detaljer i utförandet.

De inbjudna murarna har alla under åren byggt upp kunskap kring omfogning av västsvenska naturstenskyrkor. Inbjudna murare kom från Pauls Byggtjänst i Munkedal, Brunbergs Entreprenad i Trollhättan, Puts och Tegel i Örebro, Sydskiffer i Halmstad samt Stiftelsen Tjolöholm i Kungsbacka. Samtliga inbjudna murare har de senaste åren arbetat med liknande objekt i västra Sverige och visat intresse för såväl material som appliceringsteknik. Erfarenhetsutbytet i denna workshop hade som syfte att fånga upp och utbyta erfarenheter för att framöver kunna genomföra renoveringar med långsiktig hållbarhet vid renovering av naturstenskyrkor med kalkbaserade fogbruk.



Figur 4.1 Kollage av foton tagna på workshop för murare, Vasakyrkan Göteborg, 17–18 augusti 2023.

Tabell 2 Sammanställning av de fogbruk som applicerades under workshopen.

<p>Nr 1a Prompt 2,5 kg prompt 2,5 kg sand 0–0,1 mm 14 g citronsyra 1100 g vatten Vattnet kan justeras med några procent om man vill ha det lite lösare. Öppettid på bruket är ca 15–20 min men kan vara längre i fuktigt väder.</p> <p>Nr 1b Prompt med pigment 52 g svart 70 g gult 60 g rött 2,5 kg prompt 2,5 kg sand 0–0,1 mm 14 g citronsyra 1100g vatten</p>	<p>Nr 3 NHL2 1:1</p> <p>6 l kalk + 6L sand + pigment 2tsk röd 2tsk svart 6 msk gult</p> <p>Upplevdes som mycket smidig och lätt att applicera utan att för den skull vara alltför klistrig och kletig.</p>	<p>Nr 5 Öländsk kalk 1:1:2 K:K_n:S</p> <p>(Målarkalks våtsläckta Ortokalk och torrsläckta hydrauliska Tri- lokalk)</p> <p>utan pigment</p> <p>Upplevdes som mycket smidig och lätt att applicera utan att för den skull vara alltför klistrig och kletig.</p>
<p>Nr 2 Finja KC Putsbruk B Fin 10 l + 2 l våtsläckt Gotlandskalk</p> <p>+ pigment: 2 msk gul, 1/2 tsk röd</p> <p>Mycket stor skillnad på upplevd klistrighet och smidighet när kalken tillsattes.</p>	<p>Nr 4 NHL3.5 1:1</p> <p>6 l kalk + 6L sand + pigment 1tsk oxidröd 1tsk oxidsvart 3msk oxidgul</p>	<p>Nr 6 Gotlandskalk 1:1:2 K:K_n:S</p> <p>(Byggnadshyttans våtsläckta luftkalk och torrsläckta hydrauliska kalk)</p> <p>3 l bruk + pigment: 1tsk oxidröd 1tsk oxidsvart 3msk oxidröd</p> <p>Upplevdes som klistrig men även något kletig vilket försvårar vid rengöring.</p>

För applicering av bruk testades fyra olika metoder som murarna brukar använda och som de blivit ombudda att ta med och förevisa. Det var dels för hand med fogslev från bräda, dels med spritspåse i plast, dels med fogspruta driven av skruvdragare och dels egenbyggd spruta för bredare fogar som driv av tryckluft. Detta blev ett mycket intressant moment och alla kunde konstatera att för tunna fogar som förekom här var spritspåsen ett mycket lyckat hjälpmedel. Den gav även fördelen av att den minimerade behovet av att rengöra efteråt.

Bruken nr 2–5 blev förhållandevis likartade att arbeta med och de var enkla och smidiga att hantera med kontrollerad öppettid innan behov av bearbetning, möjliga att dra till med konvex eller konkav fog och enkla att rengöra. KC-brukets smidighet ökade mycket när vi tillsatte lite våtsläckt kalk. Det var en erfarenhet som vi tog med oss från fogning av Bokenäs nya kyrka. Bruk nr 5 var välbekant från Gödestads kyrka och bruk nr 4 var välbekant från Gärdhems kyrka. Det faktum att alla bruken tillreddes som feta bruk 1:1 bindemedel/sand (utom nr 2), gav generellt mycket smidiga

bruk överlag vilket uppskattades av samtliga. Med så här tunna fogar uppstod heller ingen risk för krympsprickor vad vi kunde notera.

Bruk nr 1 skiljde sig mycket från övriga bruk. Framförallt så har det en ovanligt kort öppentid (15–20 minuter) som innebär att man måste tillreda mycket små satser åt gången. Det måste också rengöras mer eller mindre direkt eftersom det annars kommer vara kvar på stenen. Det härdar jämt vilket är en fördel när bruk måste injekteras på djupet men det har ett långsammare arbetsflöde än övriga bruk vilket man behöver ta hänsyn till om det nyttjas i produktion.

Bruk nr 6 skiljde sig också tydligt från övriga bruk genom att det var mycket mer klistrigt och något mer krympningsbenäget. Det är tillrett av en betydligt fetare kalk jämfört med övriga och den skulle behövt en ökad sandmängd (ca 1:1,5) för att ge ett likvärdigt bruk som övriga. Att den gotländska kalken är den fetaste och klistrigaste av kalksorter är känt sedan gammalt. Detta har noterats liknande i samband med provkroppstillverkning i labbet och är värt att titta vidare på vid fortsatta studier.

Vid summering av dessa två dagar kunde vi alla konstatera hur oerhört värdefullt det är med erfarenhetsutbyte som fokuserar på material och hantverk. Genom att få chansen att diskutera, jämföra och dela erfarenheter och kunskaper kan alla komma därifrån styrka i sin egen kunskap. Genom att plocka upp detaljer i utförande från kollegor kan man tydligt få tips kring hur man kan effektivisera utförandet. Det kan på sikt bidra till att såväl tidsåtgång som kvalitet på utförandet blir jämnare och bättre.

Att jämföra material och resonera om hur de på olika sätt kan bidra till att åstadkomma en viss konsistens i bruken ger också en ökad möjlighet för varje enskild murare att påverka det bruk som skall användas. Det visade en sådan enkel sak som att tillsätta en liten mängd smidig kalkpasta till ett annars kort KC-bruk, eller att jämföra ett magert med ett fett bruk avseende förhållande mellan bindemedel/sand. Det var mycket diskussioner kring detta; att man ofta får ut färdigblandande bruk som inte specifikt har anpassats efter sitt användningsområde och att man då som murare enbart har vattenmängden att justera konsistens med. Att enbart kunna justera konsistens med vatten upplevs otillräckligt och det är positivt att man ges möjligheten att själv justera konsistens och blandningsförhållande inom givna intervaller också med mängd och typ av kalk liksom med mängd och typ av sand. Konsulter och materialleverantörer som styr över materialval har sällan hantverkarperspektiv och detta märks i de bruk som ofta är föreskrivna. Här finns utvecklingspotential.

5 Material & metoder

I projektet har totalt 9 olika kalkbaserade fogbruk undersökts. Dessa var som följande;

- KC-bruk B, färdigblandat bruk med sand 0-3 mm
- NHL2
- NHL3.5, färdigblandat bruk med sand 0-4 mm
- Öländsk våtsläckt kalk
- Öländsk torrsläckt kalk
- en blandning av 50% våtsläckt öländsk och 50% torrsläckt öländsk kalk
- Gotländsk våtsläckt kalk
- Gotländsk torrsläckt kalk
- en blandning av 50% våtsläckt gotländsk och 50% torrsläckt gotländsk kalk

Bruken blandades med sand 0-2 mm i förhållande 1:1 (kalk:sand), med undantag för KC-bruket samt NHL3.5 (1:1,5) då dessa bruk var färdigblandade. Provkroppar i form av cylindrar, se Figur 5.1., och i form av prismor togs fram inför materialförsöken.



Figur 5.1 Provkroppar till koppförsök som togs fram i BML-labbet, februari 2023.

Följande materialegenskaper togs fram genom försök i byggnadsmateriallabbet (BML-labb) på Lunds Tekniska Högskola:

- krympning
- böjdraghållfasthet
- tryckhållfasthet
- densitet
- kapillärsugningsförmåga
- ånggenomgångsmotstånd

Därutöver utfördes tunnslipsanalys på samtliga bruk. Tunnslipsanalyser genomfördes av Balksten Byggnadsvård AB.

Fogbruken blandades med hjälp av en Hobart mixer, se Figur 5.2. För att fastställa brukens konsistens användes en Vicat-kolv som var anpassad till mätning av kalkbruk, se Figur 5.3. Den släpptes på ett kalkbruksprov. Djupet av genomträngningen användes som en indikation av brukets konsistens. Ett genomsnitt av två konsistensmätningar togs fram och värden mellan 35 och 40 accepterades. Dessa värden hade ingen enhet, det användes endast för att kunna få en indikation på om konsistensen var likvärdig för alla kalkbruk.



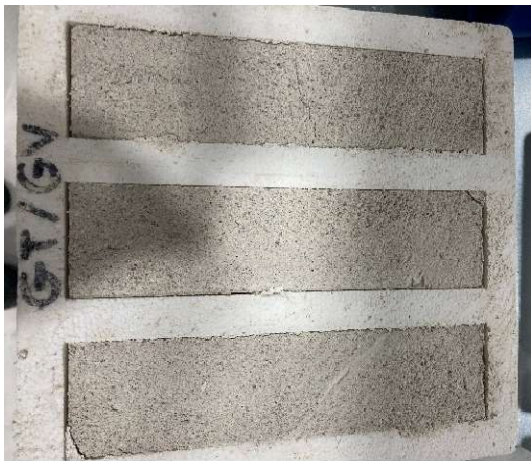
Figur 5.2 Fogbruk blandas med Hobart mixer, t.v. Paulien Strandberg, t.h. Malin Ek.



Figur 5.3 Vicat-kolv för mätning av brukets konsistens. Foto: Malin Ek.

Vid framtagning av provkropparna följdes i stor utsträckning standarden SS-EN 1015–11 (Svenska Institutet för Standarder (SIS) 2019). Enligt den standarden bör särskilda stålformar användas för att tillverka prismor 40x40x160. Dessa stålformar fanns dock inte i tillräckligt stort antal för att kunna tillverka tillräckligt många prismor vid samma tillfälle. Därför användes istället formar av plast (frigolitformar), tillhandahållna av Uppsala universitet Campus Gotland, se Figur 5.4.

Prismor med dimensioner 40x40x160 mm tillverkades samtidigt som cylindrar (skivor) med diameter 63 mm och höjd 8 mm, se Figur 5.5. Cylindrarna användes sedan till koppförsök för att fastställa ånggenomgångsmotstånd. Prismorna användes för att undersöka krympning, mekanisk hållfasthet (böjdraghållfasthet och tryckhållfasthet), densitet, kapillärsugningsförmåga samt tunnslipsanalys.



Figur 5.4 Prismor av kalkbruk i frigolitformar.



Figur 5.5 Cylindrar av kalkbruk i formar.

Tabell 3 Sammanställning av de ingående kalkbruken.

Kalkbruk	Produkt	Bindemedel [g]	Sand [g]	Vatten [g]
KC	Finja KC-B, sand 0–3 mm	6352	-	880
NHL 2	St Astier NHL2 Téréchaux®	1950	5220	1297
NHL 3.5	St Astier NHL 3,5, sand 0-4 mm	7000	-	1260
OT	Torrsläckt Ölandskalk Ortokalk	1960	5922	1365
OV	Våtsläckt Ölandskalk Trilokalk	3840	5220	45
OTOV	50/50% Ortokalk/Trilokalk	2785	5220	524
GT	Torrsläckt hydraulisk kalk, byggnadshyttan	1836	5460	1382
GV	Våtsläckt hydraulisk kalk, Byggnadshyttan	5568	5220	-
GTGV	50/50% torrsläckt/våtsläckt Gotlandskalk	3665	5220	600

Sammanställningen av kalkbruken visas i Tabell 3. Efter tillverkning placerades provkropparna i klimatrum med 60% RF och 20°C. Materialegenskaper fastställdes ca 90 dagar efter tillverkning.

5.1. Krympning

Krympning på grund av härdning och torkning uppmättes ca 90 dagar efter gjutning av proverna. Provkroppslängd mättes med ett skjutmått som hade en noggrannhet på 0,5 mm. Två mätningar gjordes per provkropp. Mätning gjordes på tre provkroppar per kalkblandning. Krympningen ε [%] beräknades sedan som följande;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100\%$$

med $\Delta L = L - L_{90}$ [mm],

där L_{90} är provkroppslängd efter 90 dagar [mm],

L är provkroppslängd direkt efter tillverkning [mm],

ε är krympning av provkroppen [%].

5.2. Mekanisk hållfasthet

Böjdraghållfasthet

Mekaniska egenskaper testades till stor del enligt standarden SS-EN 1015-11. Tre prismor (40x40x160 mm) per kalkbruk användes. Provkropparna förvarades i ett klimatrum med RF 60%. I standarden anges RF 65±5 %. Proverna härdades under längre tid än vad som krävdes enligt standarden; 90 dagar, istället för de 28 dagar som krävs enligt standarden. Denna längre tid för härdning

och karbonisering valdes så att kalken i provkropparna fick tillräckligt med tid för att härda och karbonisera.

För böjdraghållfasthetsförsöken användes en MTS 810. Provkroppen lades på två stödrullar, med diameter 10 mm, som placerades 100 mm ifrån varandra. En tredje rulle med diameter 10 mm placerades centralt mellan de andra två rullarna, ovanför provkroppen, se Figur 5.6. Denna översta rulle kunde vippa något för att möjliggöra en jämn fördelning av belastningen över provkroppen. Stödrullarna under provkroppen var fixerade och kunde inte vippa. Innan provning gjordes försök med andra, liknande provkroppar för att bestämma lämplig belastningshastighet. Den belastningshastigheten som till slut valdes var 0,4 mm/min.



Figur 5.6 Provkropp placerad i MTS-apparat inför böjdraghållfasthetsförsök.

Böjdraghållfasthet, f , [N/mm²] beräknades med hjälp av formeln från SS-EN 1015-11;

$$f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

där F är den maximala belastningen som applicerades på provkroppen [N]

l är avståndet mellan stödrullarna [mm]

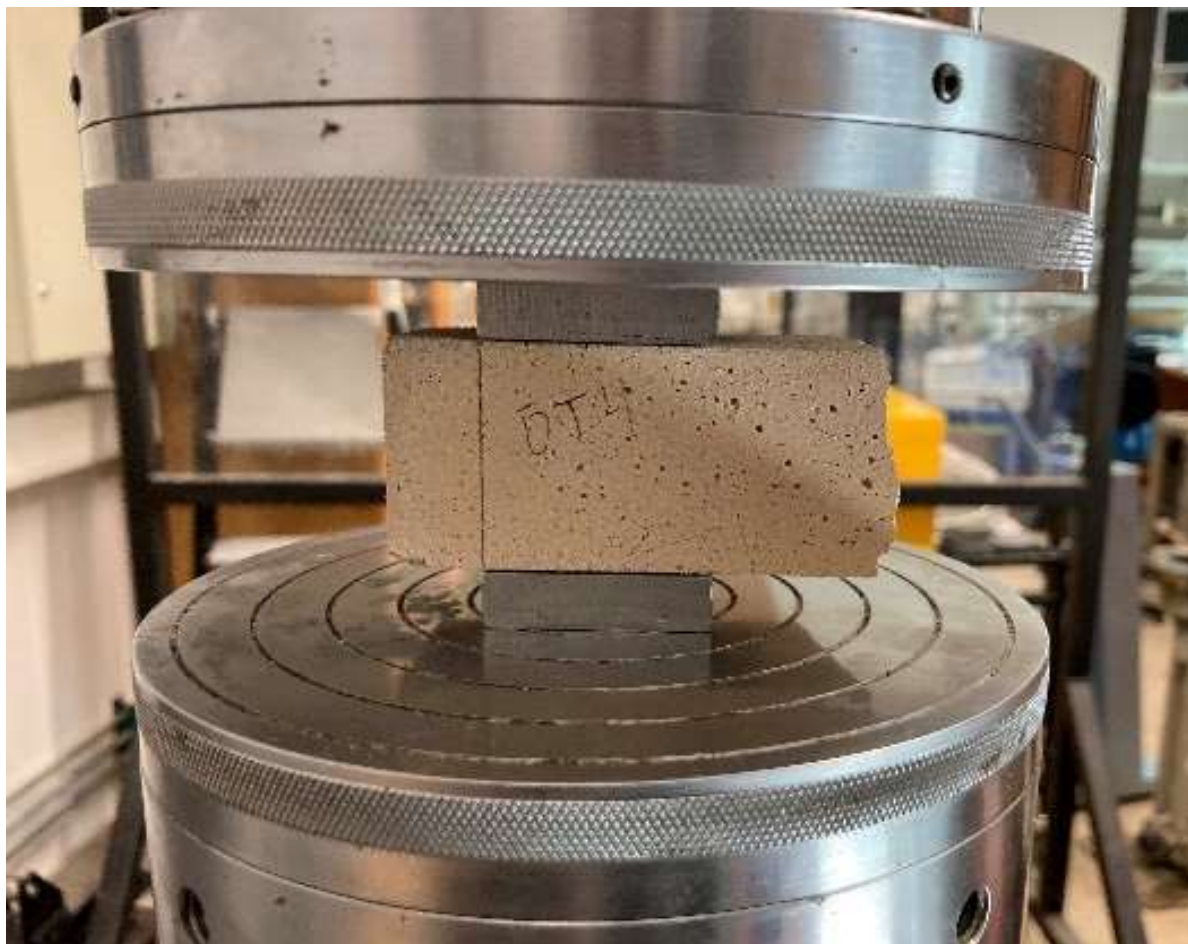
b är bredden på provkroppen [mm]

d är djupet på provkroppen [mm]

Tryckhållfasthet

De provkropparna, halva prismor, som var kvar efter de genomförda böjdraghållfasthetsförsöken användes för att utföra tryckhållfasthetsförsöken. Därför utfördes tryckhållfasthetsförsöken efter något mer än 90 dagar. Prismorna (ca 40x40x80 mm) placerades mellan två stålplattor med tjocklek

10 mm och yta 40x40 mm, se Figur 5.7. Den övre plattan kunde i enlighet med SS-EN 1015–11 röra sig fritt vid kontakt med provkroppen. Provkroppen placerades mellan stålplattorna, i enlighet med anvisningarna i standarden. Den applicerade belastningshastigheten var 0,4 mm/min. Tryckhållfastheten [N/mm^2] beräknades sedan som den maximala belastning [N] som provkroppen kunde utsättas för, dividerat med stålplattornas yta [mm^2].



Figur 5.7 Provkropp placerad i MTS 810 inför tryckhållfasthetsförsök.

5.3. Densitet

Den torra skrymdensiteten bestämdes för provkropparna ca 90 dagar efter tillverkning, efter det att böjdraghållfasthetsförsöken hade avslutats. Försöken utfördes i enlighet med standard SS-EN 1015-10 (Svenska Institutet för Standarder (SIS) 2000). Tre prover per kalkbruk (ca 40x40x80 mm) som var kvar efter böjdraghållfasthetsförsöken togs från klimatrummet och placerades i ett värmeskåp där de torkades vid 60 °C. De ansågs ha nått konstant massa när två efterföljande vägningar med två timmars mellanrum inte skilde sig åt mer än 0,01 % av massan hos det torra provet ($m_{s,dry}$) (observera att krav enligt SS-EN 1015-10 var en skillnad på maximalt 0,2 %, dvs en större felmarginal tilläts enligt standarden). Därefter placerades proverna i en vakuumsäckator och vakuummättnades under 24 timmar, se Figur 5.8. (vakuummättning var inte ett krav enligt SS-EN 1015-10, enligt standarden räcker det med vattenmättnad). Sedan vägdes provkropparna, och massan vid vakuummättning ($m_{s,sat}$) fastställdes. Därefter placerades de en i taget i en upphängningsanordning för att vägas under vatten ($m_{s,i}$).

Volymen hos provkroppen [m³] kunde sedan bestämmas enligt följande;

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w}$$

där $m_{s,i}$ är massan av den vattenmättade härdade provkroppen som är nedsänkt i vatten [kg]

$m_{s,sat}$ är massan av den vattenmättade härdade provkroppen [kg]

ρ_w är vattnets densitet vid 20°C [kg/m³]

V_s är volymen av den härdade provkroppen [m³]

Torr skrymdensitet [kg/m³] kunde då beräknas som följande;

$$\rho = \frac{m_{s,dry}}{V_s}$$

där $m_{s,dry}$ är massan av den torkade härdade provkroppen [kg]

ρ är provkroppens torra skrymdensitet [kg/m³]

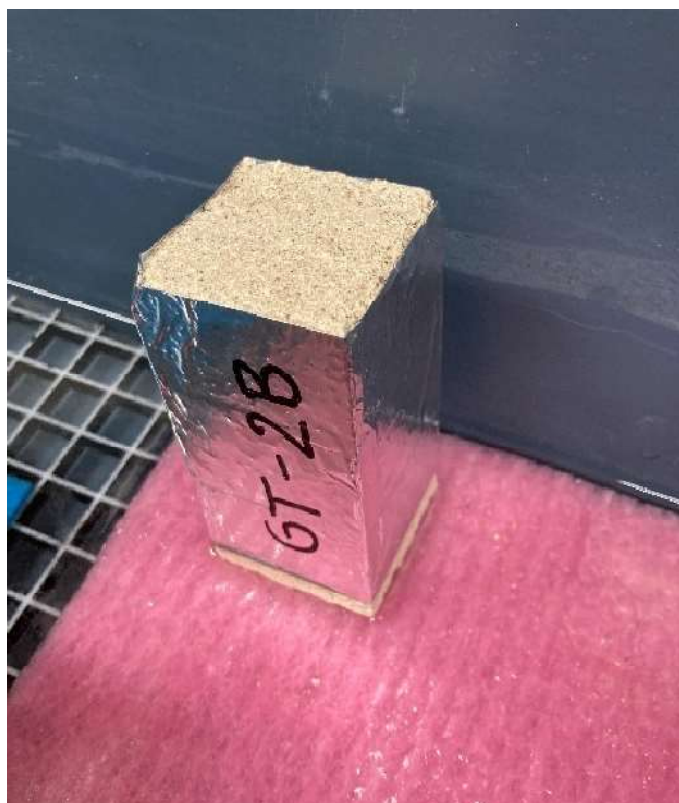


Figur 5.8 Provkroppar placerade i vakuumtorkare inför vakuummätning.

5.4. Kapillärsugningsförmåga

Kapillärsugningskoefficient för hårdnat bruk bestämdes i enlighet med standarden SS-EN 1015-18 (Svenska Institutet för Standarder (SIS) 2003). Prismor med dimensionerna 40x40x160 mm tillverkades och härdades i cirka 90 dagar. Provkropparna användes sedan i böjdraghållfasthetsförsöken, varefter en del av de återstående halva prismorna sedan användes för bestämning av kapillärsugningskoefficienten. Tre halva prismor användes per kalkblandning. Innan försöken börjades torkades provkropparna i ett värmeskåp vid 60 °C tills skillnaden i massan mellan två på varandra följande vägningar med 24-timmarsintervaller var mindre än 0,2 % av den totala massan. Efter torkning förseglades proven och placerades i klimatlådor med molekylsikt (absorptionsmedel) över natten. Detta gjordes för att låta provkropparnas temperatur återgå till rumstemperatur samtidigt som de behölls torra. Aluminiumtejp användes för att försluta provkropparnas långsidor. Tejpens vikt dokumenterades för varje provkropp.

Provkropparna placerades i en klimatlåda på en mättad cellulosa-baserad duk ovanpå ett galler nedsänkt i vatten till ett djup av 5–10 mm, se Figur 5.9. Provkropparna vägdes vid följande intervaller: 0 min, 10 min, 90 min, 4 timmar, 24 timmar.



Figur 5.9 En provkropp placerad på ett galler och en mättad cellulosa-baserad duk, nedsänkt i vatten till ett djup av 5-10 mm.

Enligt standarden SS-EN 1015–18 bestäms kapillärsugningskoefficienten genom att ta lutningen på den raka linjen som förbinder mätningarna som utförts efter 10 och 90 minuter, här kallad C_1 ;

$$C_1 = 0.1(M_2 - M_1) \quad [kg/(m^2 \cdot min^{0.5})]$$

där M_1 är provkroppens massa efter kapillärsugning i 10 minuter [g]

M_2 är provkroppens massa efter kapillärsugning i 90 minuter [g]

För renoveringsbruk rekommenderar standarden att man beräknar kapillärsugningen efter 24 timmar, här kallad C_2 , med hjälp av följande formel;

$$C_2 = 0.625(M_3 - M_0) \quad [kg/m^2]$$

där M_0 är provkroppens torra massa [g]

M_3 är provkroppens massa efter kapillärsugning i 24 timmar [g]

Enligt standarden avrundas därefter individuella värden för vattenabsorptionskoefficienterna C_1 och C_2 till närmaste $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$ eller närmaste $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$. Medelvärdena för vattenabsorptionskoefficienterna beräknas från de individuella värdena. Detta medelvärde avrundas sedan till närmaste $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$ eller närmaste $0,05 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Kapillaritetskoefficienten A [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0,5})$] för intervallet mellan 10 min och 90 min har räknats ut i enlighet med följande ekvation från boken Byggnadsmaterial (Burström 2021);

$$G = A \cdot \sqrt{t} \quad [kg/m^2]$$

där G är den uppsugna vattenmängden per kvadratmeter sugyta [kg/m^2]

A är kapillaritetskoefficienten [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}^{0,5}$]

t är tid [s]

5.5. Ånggenomgångsmotstånd (koppförsök)

Koppförsök genomfördes för att bestämma ånggenomgångsmotståndet för de olika kalkbruken. För detta försök användes en cylinderformad provhållare, en s.k. kopp. Provkroppen som skulle testas användes som lock för att försegla provhållaren. Specialtillverkade plastformer användes för att tillverka provkropparna, se Figur 5.10. Provkropparna hade en diameter på 63 mm och en tjocklek på 8 mm. Inuti den cylinderformade provhållaren placerades en liten behållare med en mättad saltlösning. Mättade saltlösningar användes för att kunna skapa en viss relativ fuktighet inuti varje behållare, se Tabell 4.

Tabell 4. De använda mättade saltlösningar och deras relativa fuktighet vid 20°C .

Mättad saltlösning	Relativ fuktighet vid 20°C
NaCl	75.5% (Greenspan 1977)
KNO ₃	94.6% (Greenspan 1977)
H ₂ O (avjoniserat vatten)	100%

Tre koppar per kalkbruk och relativ luftfuktighetsnivå förbereddes; totalt 81 koppar. Dessa placerades i en klimatkammare med en kontrollerad miljö med RF 60 % och $T=20^\circ\text{C}$, se Figur 5.11. Över tiden diffunderade vattenånga genom materialet ut från kopporna och in i klimatrummet. Förändringen i vikt hos kopporna uppmättes under en period av cirka 6 månader.



Figur 5.10 Mall med provkroppar för koppförsök.



Figur 5.11 Koppar placerade i klimatrum.

Ånggenomgångsmotståndet hos materialet beräknades med hjälp av följande formel:

$$Z_v = \frac{\Delta v}{g}$$

där Z_v är provkroppens ånggenomgångsmotstånd p.g.a. en ånghaltsskillnad över provkroppen [s/m]

g är fuktflödestäthet genom provkroppen [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

Δv är skillnad i ånghalt mellan klimatrum och kopp över provkroppen [kg/m^3]

$$g = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t}$$

där Δm är skillnad i koppens massa [kg]

A är provkroppens sarea [m^2]

Δt är tidsperiod [s]

Ångpermeabiliteten av varje provkropp beräknades med hjälp av följande formel:

$$\delta_v = \frac{d}{Z_v}$$

där d är provkroppens tjocklek [mm]

δ_v är ångpermeabilitet genom provkroppen p.g.a. en ånghaltsskillnad över provkroppen [m^2/s]

5.6. Tunnslipsanalys

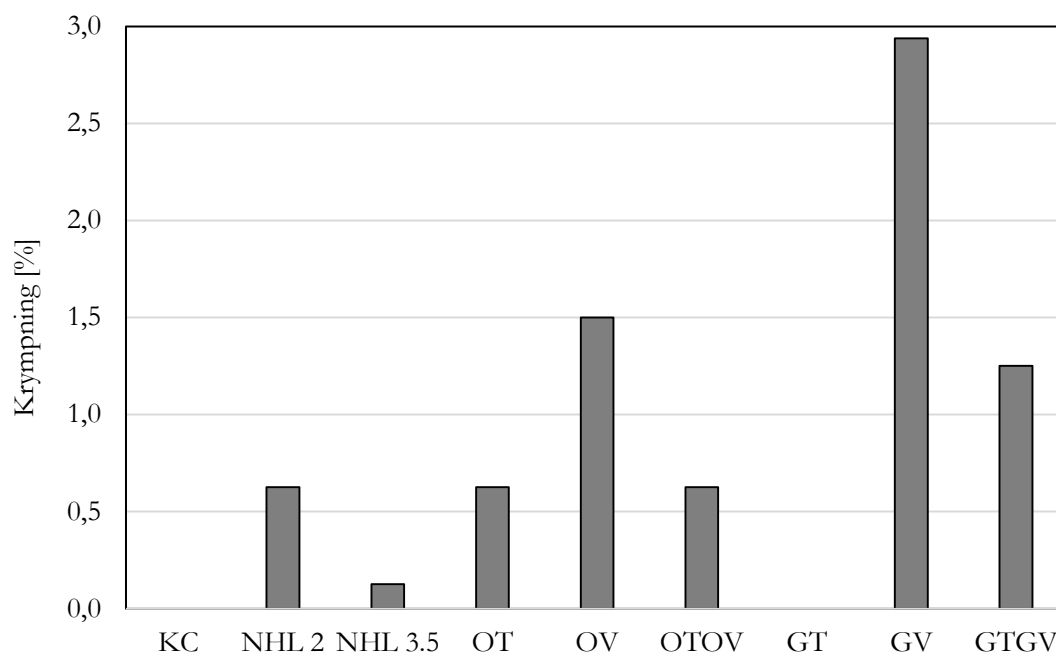
Tunnslipsanalys genomfördes på samtliga kalkbruk. Material skickades till ABC A HEAD Geology Research Company i Warszawa, Polen, för tillverkning av tunnslipsprover. Tunnslipsproverna analyserades av Balksten Byggnadsvård AB, i ett polarisationsmikroskop av modell *Brunel SP1500XP*. Fotona är tagna av Björn Regnér genom 4x okular. Bilderna motsvarar en yta om 2,68*2,01 mm.

6 Resultat

Här redovisas för resultaten från de olika materialförsöken. Vid framtagning av provkropparna följdes i stor utsträckning standarden SS-EN 1015–11. Dock visade det sig svårt att kunna följa dessa anvisningar till punkt och pricka. Malin Ek som jobbade på sitt examensarbete på Kulturvård, Uppsala Universitet Campus Gotland, under våren 2023 har utöver en studie av kalkens hållfasthet över tid kartlagt hur standarden för kalkbruk har förändrats över tid (Ek 2023). Senare versioner av standarden tillåter inte något luftutbyte mellan prov och omgivning under de första 7 dagarna. Antagligen försämrar det förfarandet luftkalkens härdningsprocess då koldioxid från luften inte kan nå provytan den första veckan efter produktion.

6.1. Krympning efter 90 dagar

Krympning som inträffade efter 90 dagars härdning var mindre för de torrsläckta kalkbruken än för de våtsläckta kalkbruken. Där våtsläckt kalk visade en krympning på 1,5 % respektive 2,9 % för våtsläckt kalk från Öland respektive våtsläckt kalk från Gotland, visade deras torrsläckta motsvarigheter endast mycket lite krympning; 0,6 % för torrsläckt kalk från Öland och ingen krympning för den torrsläckta kalken från Gotland. Skillnaden mellan de torrsläckta och våtsläckta kalkbruken från Gotland var mycket stor. Kombinationen av en våtsläckt gotlandskalk och en torrsläckt gotlandskalk gav en krympning som var genomsnittet mellan krympningen för våtsläckt gotlandskalk och torrsläckt gotlandskalk. Jämför t.ex. GT och GV med GTGV i Figur 6.1. I fallet med kalkbruken från Öland gav dock kombinationen av våtsläckt och torrsläckt en kalkblandning med liknande krympning som den torrsläckta kalken.



Figur 6.1 Krympning efter 90 dagar, genomsnitt för tre provkroppar per kalkbruk.

6.2. Mekanisk hållfasthet

Böjdraghållfasthet

Böjdraghållfasthet för de olika kalkbruken redovisas i Tabell 5.

Tabell 5 Böjdraghållfasthet av de ingående kalkbruken efter 90 dagar, genomsnitt av tre provkroppar per kalkbruk.

Kalkbruk	Böjdraghållfasthet [N/mm ²]	Standardavvikelse
KC	3.5	0.2
NHL 2	1.4	0.1
NHL 3.5	1.1	0.0
OT	2.1	0.2
OV	0.5	0.0
OTOV	0.8	0.0
GT	0.8	0.1
GV	0.5	0.1
GTGV	0.7	- *)

*) bara 1 provkropp

Tryckhållfasthet för de olika kalkbruken redovisas i Tabell 6.

Tabell 6 Tryckhållfasthet av de ingående kalkbruken efter 90 dagar, genomsnitt av tre provkroppar per kalkbruk.

Kalkbruk	Tryckhållfasthet [N/mm ²]	Standardavvikelse
KC	7.6	1.7
NHL 2	3.4	0.8
NHL 3.5	2.1	0.2
OT	5.3	0.3
OV	1.0	0.0
OTOV	1.5	0.1
GT	1.3	0.2
GV	1.1	0.1
GTGV	1.6	0.1

Störst mekanisk hållfasthet hade KC-bruket. Av de rena kalkbruken var det den torrsläckta Ölands-kalken (OT) som också visade en relativt hög mekanisk hållfasthet. Därefter följer de naturliga hydrauliska kalkbruken NHL2 och NHL3.5. Överlag var den mekaniska hållfastheten för de ingående kalkbruken ganska låg, med en tryckhållfasthet på lite mer än 1 MPa och en böjdraghållfasthet som i de flesta fall inte kommer upp över 1 MPa.

Lindqvist m.fl. (1999) bestämde tryckhållfasthet för sju olika prover av historiska kalkbruk och fann värden mellan 3,2-7,4 MPa, vilket är något högre än de värden som togs fram i den aktuella studien. Det ska tas i beaktning att de ingående kalkbruken i den aktuella studien blandades 1:1, vilket högst troligt har påverkat deras hållfasthet. Andra blandningsförhållanden hade sannolikt gett en annan hållfasthet.

6.3. Densitet

Resultaten för densitetsmätningar av kalkbruk visas i Tabell 7. Torr skrymdensitet för de olika kalkbruken skiljde sig inte mycket åt. Båda traditionella våtsläckta kalkbruken hade en relativt låg densitet, där den våtsläckta kalken från Gotland hade den lägsta densiteten (1640 kg/m³). Även KC-bruket hade en relativt låg densitet (1790 kg/m³). Den högsta densiteten hade de torrsläckta kalkbruken (OT samt GT) och de naturligt hydrauliska kalkbruken (NHL2 och NHL3.5).

Den våtsläckta kalken från Öland visade en mycket hög standardavvikelse. Fler provkroppar hade behövts för att fastställa den exakta densiteten för detta kalkbruk. Man hade förväntat sig att kombinationen av 50 % våtsläckt och 50 % torrsläckt kalk (OTOV) skulle leda till en densitet som är genomsnittet av de våtsläckta (OV) och torrsläckta (OT) kalkbruken som den består av, vilket verkar vara fallet.

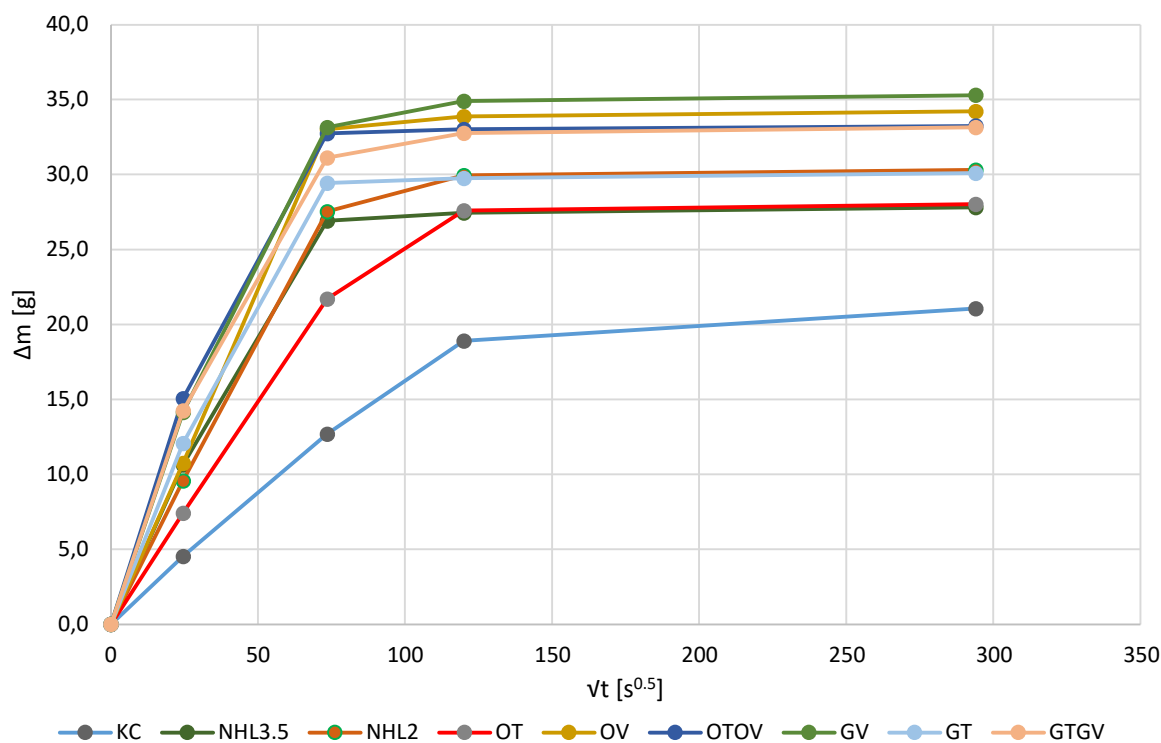
Tabell 7 Torr skrymdensitet för de ingående kalkbruken, genomsnittligt värde för 3 provkroppar.

Kalkbruk	Densitet [kg/m ³]	Standardavvikelse [kg/m ³]
KC	1790	5.5
NHL 2	1880	5.4
NHL 3.5	1850	6.1
OT	1930	7.0
OV	1740	111.2
OTOV	1820	4.0
GT	1840	10.0
GV	1640	7.5
GTGV	1720	5.7

6.4. Kapillärsugningsförmåga

Kapillärsugningskoefficienter C_1 (mätning vid 10 och 90 minuter) och C_2 (mätning vid 0 och 24 timmar) bestämdes i enlighet med standarden SS-EN 1015–18 för hårdnat bruk, ca 90 dagar efter tillverkning. Resultat från kapillärsugningsförsöken visas i Figur 6.2. samt Tabell 8 och 9.

Kapillärsugningsförmågan är intressant för att förstå frostresistensen hos ett bruk men även fukttransportförmågan. Fagerlund (1972) har tidigare visat hur man kan utläsa risken för frysning genom att tolka diagrammet som presenteras i Figur 6.2. då man kan avläsa information om materialets porstruktur genom att studera kapillärsugningsförloppet. Enligt Fagerlund (1972) fylls porer med diameter mindre än 10 µm omedelbart med kapillärt vatten. Större porer däremot fylls bara delvis under den här första fasen. Den första fasen handlar om hur snabbt det öppna porsystemet i ett material fylls genom kapillärtransport. Den andra fasen handlar om hur snabbt innesluten luft byts ut mot vatten. Om innesluten luft kan bli kvar i systemet en längre tid innebär det att vattnet har någonstans att expandera vid frysning och det är då viktigt att materialet inte fylls över den kritiska vattenmättnadsgraden. Generellt har dessa bruk en låg porositet vilket innebär att de inte kan ta upp så stor mängd vatten. Jämför med tunnslipsfotografierna i Figur 6.12-6.20.



Figur 6.2 Kapillärsugningsförloppet för de olika kalkbruken.

Genomsnittlig kurva för 3 mätningar per kalkbruk. De fyra bruken som innehåller våtsläckt kalk är närliggande, de fyra bruk som har torrsläckt hydraulisk kalk som bindemedel är närliggande och KC-bruket skiljer sig helt för övriga.

I Tabell 8 redovisas kapillärsugningskoefficienter C_1 för intervallet 10–90 minuter, den första fasen i vilken kapillärporer $<10 \mu\text{m}$ fylls, se ovan. Även redovisas C_2 för intervallet 0–24 timmar. Båda dessa kapillärsugningskoefficienter har tagits fram i enlighet med standard SS-EN 1015–18. Bara mindre skillnader uppmättes mellan de olika bruken. KC-bruket skiljde sig något åt, då det bruket hade relativt låga värden för såväl C_1 som C_2 . Detta bruk har en avvikande porstruktur i jämförelse med övriga vilket ger avvikande värden. Jämför tunnslipsfotografierna i kap 6.6.

Tabell 8 Kapillärsugningskoefficienterna C_1 och C_2 för de ingående kalkbruken.

Kalkbruk	C_1 [kg/(m ² ·min ^{0.5})]	C_2 [kg/m ²]
KC	0.8	13.20
NHL 2	1.8	18.95
NHL 3.5	1.6	17.40
OT	1.4	17.50
OV	1.9	21.40
OTOV	1.8	20.75
GT	2.1	18.80
GV	1.9	22.05
GTGV	1.7	20.75

Tabell 9. Kapillaritetskoefficient A [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$] för de ingående kalkbruken, genomsnittligt värde för 3 provkroppar och standardavvikelse.

Kalkbruk	A [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$]	Standardavvikelse
KC	0.11	0.01
NHL 2	0.25	0.02
NHL 3.5	0.22	0.02
OT	0.19	0.02
OV	0.31	0.01
OTOV	0.24	0.05
GT	0.23	0.01
GV	0.28	0.05
GTGV	0.22	0.02

Kapillaritetskoefficienterna (A i $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$) beräknade för intervallet 10–90 minuter redovisas i Tabell 9. Dessa värden kan jämföras med värden från Byggnadsmaterialboken (Burström 2021), där följande kapillaritetskoefficienter nämns;

- 0.25 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ för ett kalkbruk med densitet $1700 \text{ kg}/\text{m}^3$,
- 0.05 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$ för ett cementbruk med densitet $1900 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Dessa värden är inom samma storleksordning som de kapillaritetskoefficienter som visas i Tabell 9, med något högre värden för de våtläckta kalkerna och ett relativt lågt värde för KC-bruket.

Efter avslutade kapillarsugningsförsök noterades en färgskillnad på provkropparna, vilket antas bero på olika karbonatiseringsgrad, se Figur 6.3-6.11.



Figur 6.3 KC



Figur 6.4 NHL2



Figur 6.5 NHL3.5



Figur 6.6 OT



Figur 6.7 OV



Figur 6.8 OTOV.



Figur 6.9 GT



Figur 6.10 GV



Figur 6.11 GTGV

Detta resultat kan jämföras med liknande resultat som för Ek (2023). Intressant är att det finns en allmän uppfattning om att karbonatisering i kalkbruk skulle ske betydligt snabbare men då antar författarna att detta baseras på att mätningar gjorts tidigare på magra och porösa bruk. Karbonatiseringshastigheten är av stor vikt för att få bruket att hålla de första vintrarna och detta visar tydligt att karbonatiseringshastigheten är en faktor att ta hänsyn till vid planering av arbeten med (om)fogning.

6.5. Ånggenomgångsmotstånd (koppförsök)

Resultat från koppförsöken visas i nedanstående tabeller. I tabell 10 visas ånggenomgångsmotstånd för de ingående kalkbruksprovkroppar i de olika RF-intervaller. I tabell 11 visas fukttransportkoefficienter för de ingående kalkbruken i de olika RF-intervaller. Inga större skillnader uppmättes mellan de ingående kalkbruken.

Tabell 10 Sammanställning av ånggenomgångsmotstånd Z_v (10^3 (s/m)) för de ingående kalkbruksprovkroppar med tjocklek 8 mm, för varje RF-intervall.

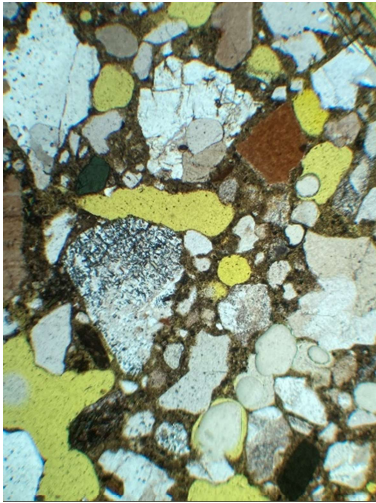
Kalkbruk	60–75% RF	60–95% RF	60–100% RF
KC	5.6	5.8	5.7
NHL 2	7.2	7.5	7.1
NHL 3.5	6.4	5.9	5.9
OT	6.6	6.6	7.3
OV	6.0	5.6	5.6
OTOV	6.2	6.4	6.4
GT	6.1	6.3	6.4
GV	6.1	6.6	6.1
GTGV	6.6	6.4	6.1

Tabell 11 Sammanställning av fukttransportkoefficient δ_v (10^6 m²/s) för de ingående kalkbruken, för varje RF-intervall.

Kalkbruk	60–75% RF	60–95% RF	60–100% RF
KC	1.4	1.4	1.4
NHL 2	1.1	1.1	1.1
NHL 3.5	1.3	1.4	1.4
OT	1.2	1.2	1.1
OV	1.3	1.4	1.4
OTOV	1.3	1.3	1.3
GT	1.3	1.3	1.2
GV	1.3	1.2	1.3
GTGV	1.2	1.3	1.3

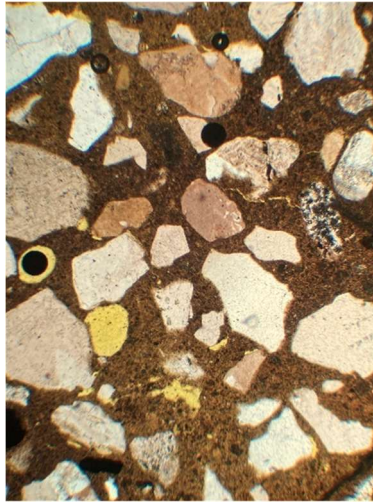
6.6. Tunnslipsanalys

I mikroskopifotografier av tunnslip syns bindemedelsmassan i bruna nyanser och luft- och kapillärporer i gult (de är fyllda av fluorescerande epoxi). Bindemedlet sammanbinder sandkornen som består av olika mineraler i olika färger och strukturer. I de två färdiga bruken KC och NHL3.5 syns tydligt att de innehåller en högre andel ballast och där förekommer därmed en högre andel porer. I de övriga, NHL2 och samtliga Ölands- och Gotlandskalkbruk som blandats med samma sand och samma blandningsförhållande dvs. 1:1 kan man se att sanden fyllts upp mycket väl av bindemedlet och att det enbart förekommer en låg andel porer.



Figur 6.12 Fogbruk KC

Ett magert bruk där luftporerna har bildat ett delvis kollapsat porssystem. Bindemedlet binder samman ballasten väl.



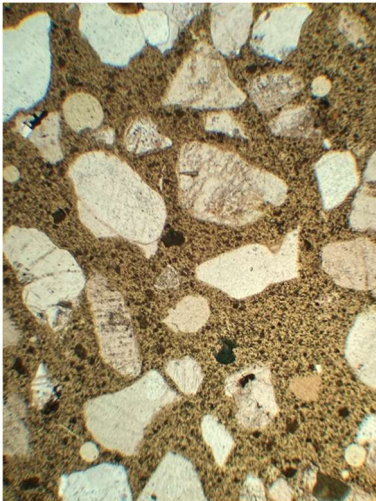
Figur 6.13 Fogbruk NHL2

Ett fett bruk där kalken väl fyller ut i sanden. Enbart angränsade luftporer som innesluter luft. Inga krymp-sprickor förekommer.



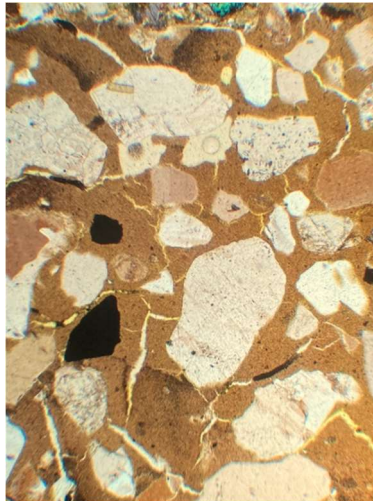
Figur 6.14 Fogbruk NHL3.5

Ett något magrare bruk än NHL2 där större luftporer bildats. Inga krympsprickor förekommer.



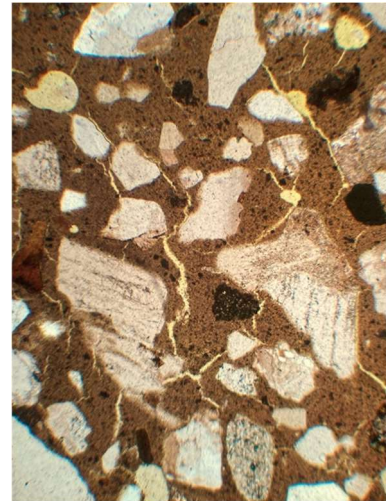
Figur 6.15 Fogbruk OT

Ett kompakt bruk med bindemedel väl fördelat i ballasten. Förfördelade hydrauliska komponenter i kalken. Enstaka luftporer förekommer.



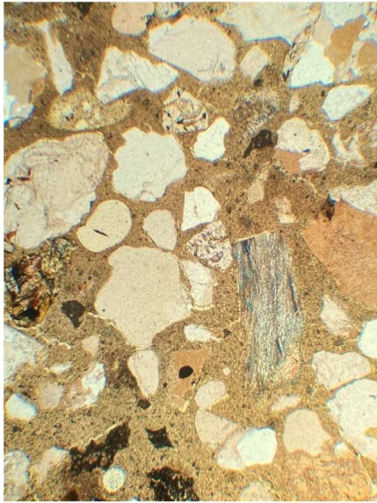
Figur 6.16 Fogbruk OV

Ett fett bruk med distinkta krymp-sprickor typiska för våtsläckt kalk-pasta. Luftporer sammanbinds av kapillärporer.



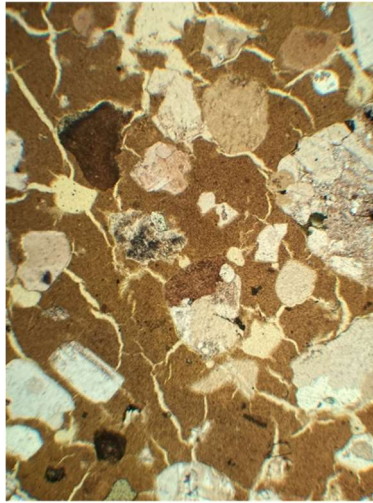
Figur 6.17 Fogbruk OTOV

Kombinationen av de båda kalkerna ger mindre krympsprickor men de är fullt utläsbara. Inneslutna luftporer förekommer.



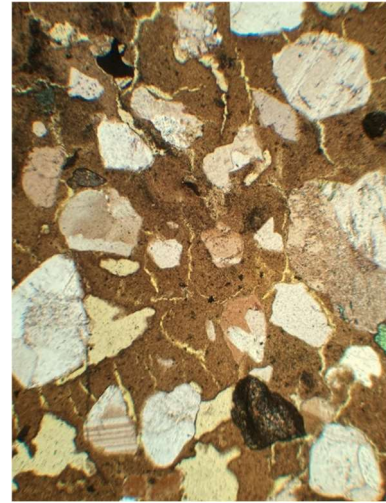
Figur 6.18 Fogbruk GT

Ett kompakt bruk med bindemedel väl fördelat i ballasten. Kalken är relativt grynig med hydrauliska kalkpartiklar urskiljbara.



Figur 6.19 Fogbruk GV

Ett fett bruk med distinkta krymp-sprickor typiska för våtsläckt kalkpasta. Luftporer sammanbinds av kapillärporer.



Figur 6.20 Fogbruk GTGV

Kombinationen av de båda kalkerna ger mindre krympsprickor men de är fullt utläsbara. Inneslutna luftporer förekommer.

I tunnslipsbilderna syns framför allt en skillnad mellan porsystemen när dessa bruk jämförs. Här förekommer helt avgränsade runda luftporer som är bra för frostbeständigheten då de innesluter luft. Där syns även kollapsade porsystem där flera luftporer bildat ett sammanhållande nät av porer vilka fylls upp av vatten vid regn. Där syns också trådfina kapillärporer som bidrar till såväl uppfuktning som uttorkning genom kapillärtransport. Här syns i mikroskala det som upplevs i bruken i makroskala, t.ex. så har GV varit krympningbenägen, vilket också syns i tunnslipet med alla krympsprickor. De båda bruken OTOV och GTGV som kombinerar våtsläckt och torrsläckt hydraulisk kalk är tydligt en mix av de båda kalksorterna vilket innebär viss förekomst av krympsprickor men ändå i betydligt mindre skala än i de rena våtsläckta kalkerna.

De torrsläckt hydrauliska kalkbruken NHL2, NHL3,5, OT och GT är mest närliggande i porstruktur. De är mycket kompakta med enbart avgränsade luftporer. Här syns bara NHL3,5 som avviker då det innehåller 1,5 volymdel sand jämfört med 1 sand till 1 kalk.

Genom att vi nu har materialdata för dessa olika bruk så kan tunnslipsanalysen användas som analysmetod på fler bruk där dessa kan användas som referensmaterial.

7 Diskussion och slutsats

Många byggnader i nygotisk stil, särskilt kyrkobyggnader, har ett synligt murverk med kalk- eller cementbaserat fogbruk. Dessa byggnader har genom åren krävt upprepade renoveringar och reparationer av murverket, där bl.a. fogarna har varit i behov av omfogning. Som regel har det utförts med ett standardbruk som i respektive tid funnit på marknaden, utan att det har anpassats och utformats med utgångspunkt i respektive murverks specifika förutsättningar och åtgärdsbehov.

För att kunna välja ett bruk som är kompatibelt med murverket krävs kunskap och kända materialegenskaper. Det gäller då såväl **egenskaperna i det färska bruket** som ger förutsättningarna för hantverkare att utföra ett gott arbete, som egenskaperna i det härdade och åldrande bruket för att kunna förutspå funktion och nedbrytning över tid. Här är det således viktigt att ta med kunskap kring klistrighet, krympningsbenägenhet, bearbetbarhet samt möjligheten för det färska bruket att bära vatten. Likaså behövs kunskap om optimala blandningsförhållanden för respektive kalk och sand samt en kännedom om förväntad karbonatiseringshastighet. Det behövs även att vissa materialegenskaper såsom hållfasthetsegenskaper och fuktegenskaper är kända för det valda bruket om man önskar kunna utföra simuleringar och beräkningar. Här är beständigheten av murverket och kalkbruket den röda tråden.

Projektet har syftat att åstadkomma båda delar, där fastställande av tekniska materialegenskaper har kombinerats med praktiska försök i fält och en workshop för hantverkare där hantverksmässigt kunskapsutbyte har kunnat ske. För de feta kalkbruken som tillretts av gotländsk respektive öländsk kalk har det varit mycket tydliga skillnader i det färska bruket, men mindre skillnader i det härdade brukens egenskaper. För KC-bruken och NHL-bruken har de färska bruken varit mer likvärdiga medan de härdade bruken haft betydligt större skillnader i materialegenskaper. Provkropparnas utformning har generellt fungerat bäst för KC-bruket och mindre bra för de våtsläckta kalkbruken med krympningsbenägenhet. Även för härdningsförloppet har detta påverkat då ren luftkalk karbonatiserar i kontakt med koldioxid i luften och då de generellt gjorts kompakta har detta tagit en längre tid än vad som varit känt och förväntat. Detta är också något som Ek (2023) noterat och det är tydligt att standarderna för mätning är utformade utifrån KC-brukens egenskaper.

Tryckhållfastheten samt **böjdraghållfastheten** hos bruken efter 90 dagar har haft en tydlig koppling till de hydrauliska bindemedlens härdning och styrketillväxt och resultatet har blivit som förväntat med KC-bruket som starkast följt av NHL2, Torrsläckt Ölandskalk och NHL3,5. Här kan man urskilja att blandningsförhållandet som skiljer mellan NHL2 (1:1) och NHL3,5 (1:1,5) har stor inverkan på hur kompakt och därigenom hur starkt ett bruk blir. Det skulle således vara intressant att utföra nya mätningar när full genomkarbonatisering skett för att få en uppfattning om det härdade kalkbrukets faktiska egenskaper.

Krympningen hos bruken har kunnat visa tydligt hur blandningsförhållandet mellan kalk och sand inverkar och där det är känt att alltför feta bruk kan krympa mer än önskvärt. Men där har det också blivit tydligt att olika kalksorter (främst i skillnad mellan torrsläckt och våtsläckt) har en stor inverkan på krympning. Detta är känt sedan gammalt (Sjöbladh & Engeström 1750) och är en viktig faktor att arbeta vidare med för att finna hur respektive blandning kan utföras med optimala förutsättningar. Här finns ett fortsatt behov av att veta hur mycket sand som varje typ av kalk kan bära (optimalt blandningsförhållande) för att både ge kompakta bruk och minskad krympningsbenägenhet. Detta är extra viktigt i det färska bruket och styr bland annat när och hur man bearbetar fogen efter applicering. Ett krympningsbenäget bruk kan behöva väntas ut på ett annat sätt vilket är en osäkerhetsfaktor idag när hantverkare är vana med färdiga bruk utan tillgänglig kunskap om justering av blandningsförhållanden.

Både **ånggenomgångsmotstånd/ångpermeabilitet** och **kapillärsugning** kan jämföras med tunnslipsfotografierna och det porsystem som kan utläsas i dessa. De uppmätta värdena för samtliga

kalkbruk är mycket likvärdiga och enbart KC-bruket med sin större porositet men tätare bindemedelsmassa skiljer sig åt.

Ångpermeabilitet är intressant när man vill beräkna och simulera fukttransport i ångfas i väggar. **Kapillärsugning** är intressant när det handlar hur vatten transporteras genom kapillärtransport (ut-torkning och uppfuktning) samt huruvida bruken blir vattenmättade över den kritiska vattenmättnadsgraden vid regn och om de därigenom blir benägna att sprängas sönder vid frysning. Kalkbruken av öländsk kalk, gotländsk kalk och NHL2 är generellt mycket kompakta och i teorin därmed frostresistenta, under förutsättning att de hunnit karbonatisera innan frostrisk råder.

7.1 Fortsatt forskning

Att utföra laborationstester på många bruk är tidskrävande varför en begränsning behövde göras i antal blandningar och blandningsförhållande. Önskvärt skulle vara att utföra prov med fler olika blandningsförhållande för att finna det optimala blandningsförhållandet för varje specifik kalk-sand-blandning.

Uppföljning av karbonatiseringshastigheter är av yttersta vikt för att kunna planera arbeten och för att kunna förutse behov av användning av väderskydd m.m. Likaså uppföljning av konsistens i det färska bruket för att se vilka bruk som både är lätta att applicera och bearbeta, härdar bra samt erhåller kompatibla egenskaper i form av hållfasthet och fukttransportförmåga. Här har den aktuella studien ringat in ett snävare spann av bruk att arbeta vidare med.

Uppföljning av prover i fält (Alfshög kyrka och Vasakyrkan) skulle behöva göras under en längre tid, förslagsvis ca 5–10 år.

8 Tack

Det laborativa arbetet i denna studie utfördes i samarbete med forskningsingenjörerna Stefan Backe och Martin Gunder, Lunds Tekniska Högskola. Provkroppstillverkningen i labb gjordes i samarbete med Malin Ek. Applicering av provtytor på Alfshögs kyrka genomfördes i samarbete med Lörinc Kurko. Härmed vill vi gärna tacka dem för deras skickliga hjälp och goda råd.

Malin Ek har fått god hjälp av Bo Nitz och Elyse Canosa vilket indirekt bidragit även till denna studie varför vi vill tacka även dem. Även hantverkarna som ställt upp på workshoparna – stort tack för er medverkan; Lucas Degerborg, Peter Ivarsson, Viktor Johansson, Lörinc Kurko, Magnus Strömbäck, Marcus Svensson, Sebastian Thåqvist, Mihai Toot och Gregory Wyszynski. Dessutom vill vi yttra ett tack till Mikael Fredriksson som ställde upp med att anordna workshopen vid Vasakyrkan.

9 Referenser

- Andersson, E. (2010) *Fuktproblematik i Oputsade Sten- och Tegelkyrkor i Göteborgs Stift: Projektrapport 2010*. Göteborg: Göteborgs stift.
- Balksten, K (2005) *Kalkputs – Porstrukturens betydelse för beständighet*. Licentiatavhandling. Göteborg: Chalmers.
- Balksten, K. (2007) *Traditional lime mortar and plaster – Reconstruction with emphasis on durability*. Doktorsavhandling. Göteborg: Chalmers
- Balksten, K. (2017) *Högsäters Kyrka; Fördjupad Förundersökning av Fukt- och Saltskadat Tegelmurverk*. Munkedal: Balksten Byggnadsvård
- Balksten, K., Lange, J. & Lindholm, M. (2012) *Fuktproblem i Salt Och Frostskadat Tegelmurverk - Fördjupad Analys Av Örgryte Nya Kyrka*. Göteborg: Göteborgs stift.
- Balksten, K., Lindholm, M & Lange, J. (2014) “Increased Salt and Frost Damages in Solid Neo-Gothic Brickwork Masonry Due to Low Permeable Restoration Materials of the 20th Century.” In *9th International Masonry Conference*, Guimarães, Portugal.
- Balksten, K., Lindholm, M. & Rodin, A. (2018) *Gödestads Kyrka. Förundersökning & Åtgärdsprogram för Underhåll*. Munkedal & Göteborg.
- Balksten, K., & Strandberg-de Bruijn, P.B. (2021) “Internal Retrofitting with Hemp-Lime on Brick Masonry - a Study to Prevent Damage Caused by Sodium Sulphate.” In *SWBSS 2021 : Fifth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, Delft, Nederländerna.
- Balksten, K. & Strandberg-de Bruijn, P. (2021) “Understanding Deterioration Due to Salt and Ice Crystallization in Scandinavian Massive Brick Masonry.” *Heritage* 4(1): 349–70. <https://www.mdpi.com/2571-9408/4/1/22>.
- Burström, P.G. (2021) *Byggnadsmaterial - Tillverkning, Egenskaper och Användning*. 4:e upplaga. Lund: Studentlitteratur AB.
- Dührkop, H. (1966). *Bruk - murning - putsning*. Stockholm: Svensk byggtjänst.
- Ek, M. (2023) *Kalkbruk - Styrka över Tid*. MSc thesis. Uppsala universitet Campus Gotland. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1778019/FULLTEXT02.pdf>.
- Fagerlund, G. (1972) *Kritiska Vattenmättnadsgrader i Samband med Frysning av Porösa och Spröda Material*. Lund: LTH.
- Greenspan, L. (1977) “Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions.” *Journal of Research of the National Bureau of Standards - A Physics and Chemistry* 81A(1): 89–96.
- Lindqvist, J.E. et al. (1999) *Gammal Kalkputs: Analys och Utvärdering*. 1. uppl. Stockholm: Riksantikvarieämbetet (RAÄ).
- Rothstein, von, E. (1856) *Handledning i allmänna byggnadslärans praktiska del med hufvudsakligt afseende på husbyggnadskonsten samt kostnadsförslagers uppgörande*. Häftet 1, Byggnads-materialier. Stockholm.
- Sjöbladh, C.G. & Engeström, J. (1750) *Beskrifning, huru Kalk skal tilredas ifrån thes första Bränning och til then warder färdig til sitt Bruk*. Original ur Calle Brobäck's Gotlandicasamling, Maj 2007.
- Svenska Institutet för Standarder (SIS) (2000) *Bruk - Del 10: Hårdnat Murbruk - Bestämning Av Densitet (Svensk Standard SS-EN 1015-10)*. <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/cement-gips-kalk-bruk/ssen101510/>.

Svenska Institutet för Standarder (SIS) (2003) *Murbruk – Proving – Del 18: Bestämning Av Kapillärsugningskoefficient För Hårdnat Murbruk (Svensk Standard SS-EN 1015-18)*. <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/cement-gips-kalk-bruk/ssen101518/>.

Svenska Institutet för Standarder (SIS) (2019) *Proving Bruk – Del 11: Hårdnat Murbruk – Bestämning Av Böjdraghållfasthet Och Tryckhållfasthet (Svensk Standard SS-EN 1015-11:2019)*. <https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/cement-gips-kalk-bruk/ss-en-1015-112019/>.

“Wikipedia.” (2024). https://sv.wikipedia.org/wiki/Alfshögs_kyrka.