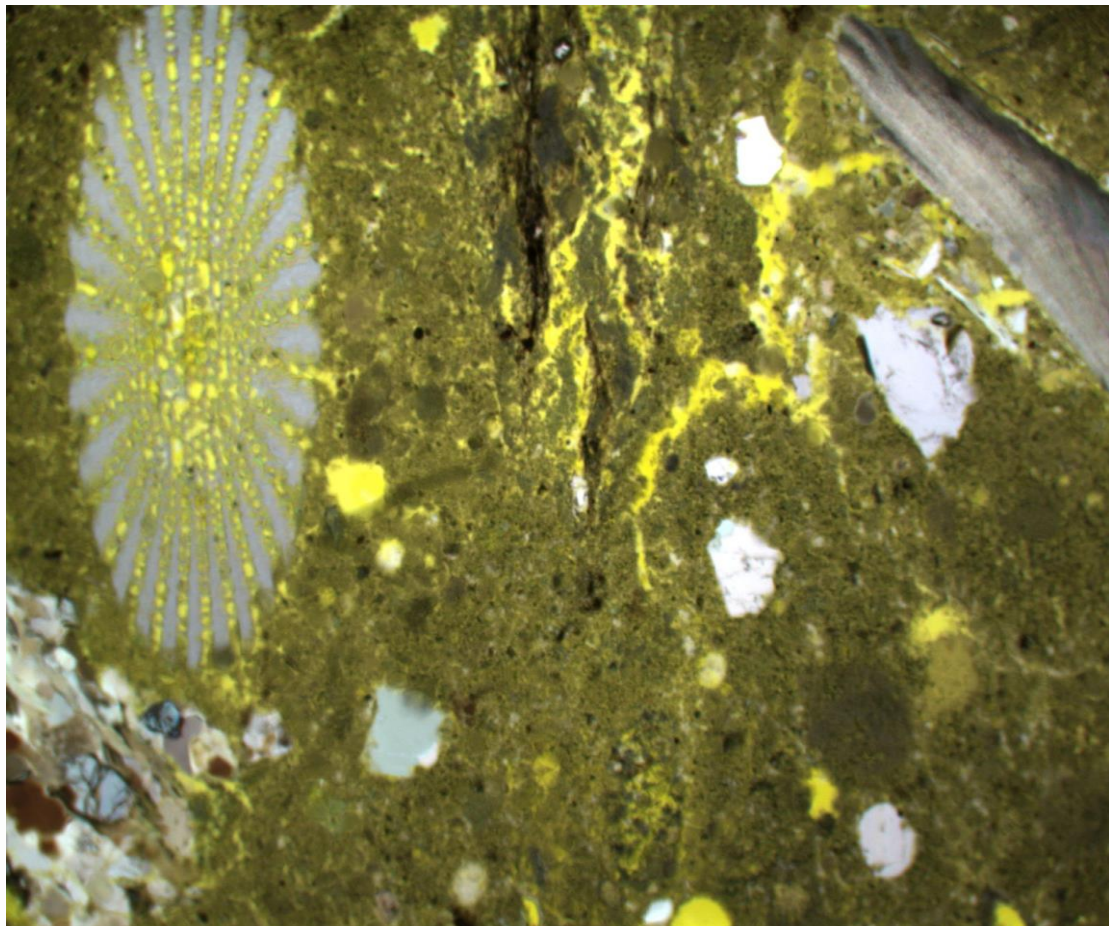


Rapport – NIKU, Bygninger og omgivelser

## Middelalderske kalkmørtler

Analyser av egenskapene til et utvalg av mørtelprøver tatt fra middelalderske anlegg

Forfattere:            Annika Haugen  
                              Ellen Hole  
                              Leidulf Mydland



NIKUs upubliserte rapporter nr 12/2005

## Forord

Gjennom hele vår forhistorie og helt frem til nyere tid har tre vært det viktigste bygningsmaterialet. Bruken av stein og bruken av mørtel som bindemiddel kom til landet tidlig i middelalderen. Magnus den Gode (konge 1035-47) lot oppføre en steinhall i Nidaros og dette er den første steinbygning vi kjenner til som ble oppført her i landet. Det var fortrinnsvis kirker og bygg knyttet til kongens virksomhet som ble bygget med de nye materialene og de nye bygningsmetodene. Et svært lite antall bygg som ikke var knyttet til kirkemakt og krone var bygget av stein.

Bruken av kalk og kalkmørtler til både muring, spekking, puss og overflatebehandling forutsetter inngående kjennskap til både fremstilling, produksjon av kalk og kalkmørtler, hvordan bruke dette materialet på riktig måte og sist men ikke minst etterbehandling og daglig vedlikehold.

Kunnskapen om bruk av kalkmørtel var levende helt frem til Portlandsementen gradvis overtok for de gamle kalkmørtlene. Utover på 1900-tallet ble Portlandsementen erstattet av moderne sementtyper og bruken av kalkmørtler gikk nesten helt i glemmeboken.

Sommeren 2005 ble NIKU av Riksantikvaren bedt om å foreta analyser av en rekke prøver med middelalderske kalkmørtler for å avklare hva de inneholder og hvilke egenskaper de har. I tillegg til at denne analysen vil være en dokumentasjon av de middelalderske kalkmørtlene, ligger det også et ønske om å lære noe av historien, dvs. kunnskap om de middelalderske kalkmørtlene vil kanskje gi oss kunnskap om hvordan bruke kalkmørtler på bygninger og ruiner også i dag.

I samarbeid med Riksantikvaren ble det, fra en stor samling av mørtelprøver av varierende kvalitet, valgt ut 26 kalkmørtelprøver. Dette var alle prøver av rimelig god kvalitet og prøver som man var relativt sikre på at var middelalderske.

Arbeidet med denne rapporten er utført av Annika Haugen, Ellen Hole og Leidulf Mydland. De to førstnevnte har utført alle analysene, med unntak av trykktestene, som ble utført av Norges Byggeforskningsinstitutt i Trondheim.

Oslo, 19. desember 2005.

Leidulf Mydland  
 Gruppeleder – NIKU, bygninger og omgivelser.

## Bakgrunn

Gjennom flere år er det tatt ut prøver av mørtel fra en rekke ulike ruiner og anlegg i hele landet. Disse mørtlene, som i all hovedsak antas å være kalkmørtler, er tidligere ikke analysert med henblikk på å finne ut mørtlenes sammensetning og egenskaper.

De middelalderske kalkmørtlene representerer en viktig kilde til forståelsen for middelalderens bygningsteknologi. Innsikt i bruk av mørtler (ikke tørrmuring), spekking, fuging og puss av overflater antas å være en av de viktigste kunnskapene som man måtte ha når større eller mindre bygninger skulle oppføres. Sammen med bruk av stein som bygningsmateriale, var bruken av mørtler også ny i Norge ved inngangen til middelalderen.

Et av hovedmålene med dette prosjektet har vært å gjennomføre analyser av middelalderske kalkmørtler som viser hvordan mørtlene var sammensatt; hva slags bindemiddel er blitt brukt, eventuelle hydrauliske komponenter, blandingsforhold, porøsitet, hvilke tilslag er benyttet samt eventuelle andre tilsetninger.

Et annet hovedmål har vært å påvise enkelte av de viktigste egenskapene mørtlene har hatt; for eksempel fukteegenskaper, trykkstyrke og froststyrke. Særlig froststyrken må betraktes som en av de aller viktigste egenskapene hos mørtel i nordisk klima.

Det har også vært interessant å se på de middelalderske kalkmørtlene ut fra en nåtidig problemstilling. Gjennom mange år har man brukt kalkmørtel til istandsetting og delvis gjenoppbygging av middelalderske ruiner og stående anlegg i Norge, hvilket har bydd på en del problemer knyttet til de moderne kalkmørtelreparasjonene.

I samarbeid med Riksantikvaren ble det gjennomført en utvelgelse av 26 antatt middelalderske mørtelprøver. Dette utvalget ble gjort på bakgrunn av at prøvene skulle ha god nok kvalitet for videre analyser, og samtidig være representative.

Det er blitt gjennomført både kjemiske og fysiske analyser samt tynnslipsanalyser.

De kjemiske analysene har omfattet kvalitativ påvisning av klorid-, nitrat-, sulfat- samt proteininnhold. De fysiske analysene har omfattet kapillærsugingstester, uttørkingstester, frostsyklostester samt trykktester.

## Gjennomføring av analyser og tester

### Saltanalyser

For hver prøve ble en mørtelbit knust, og fikk stå i deionisert vann i et døgn. En kvalitativ saltanalyse ble deretter utført ved å senke test-strips for henholdsvis klorid, nitrat og sulfat (fungerer på samme måte som pH-papir), ned i løsningen og avlese resultatet.

### Proteinanalyse

Ved termisk spaltning av proteiner dannes det flyktige pyrrolderivater som kan påvises ved en fargereaksjon med p-dimetylamino-benzaldehyd.

Finknuste partikler av mørtelprøven ble ført inn i et kapillærrør som var lukket i den ene enden. I rørets åpne ende ble det satt en "propp" med cellstoff, som var fuktet med en mett oppløsning av p-dimetylamino-benzaldehyd i konsentrert eddiksyre. Deretter ble den lukkede enden av kapillærrøret varmet opp over en bunsenbrenner, slik at prøvematerialet ble forkullet. For de prøvene der protein var tilstede, ble tuppen på cellstoff-proppen farget rød.

### Frostsyklus tester

Prøvene er blitt tørket til referansevekt i 50°C. Mørtelprøvene fikk suge vann kapillært fra overflaten i 20 timer fra et fuktig underlag, deretter ble de veid, pakket inn diffusjonstett, og fryst i sykler. Antall frostsyklus ble målt i forhold til prosentuell vektminskning. Ved dårlig frostbestandighet vises tydelig nedbryting etter 5 sykler, mens en middels - god frostbestandighet vises i at prøven tåler minst 10-20 frostsykluser. Til sammenligning kan nevnes at en fullstendig frostbestandig nyprodusert mørtel i dag skal tåle minst 40 frostsykluser.

### Kapillærsugingstester

Så store og "flate" prøvebiter som mulig ble plukket ut. Prøvene ble tørket ved 50°C til de hadde oppnådd en stabil tørrvekt. Når prøvene hadde blitt kalde ble de plassert med overflaten i kontakt med et fuktig underlag som hadde fri tilgang til vann. Deretter ble prøvene veid i bestemte tidsintervaller. Resultatene er presentert i grafer i et diagram, se vedlegg 4. Kapillaritetstallene, som leses av disse grafene, er et mål for hvor raskt et tørt materiale kan trekke opp vann.

### Uttørkingstester

Prøvene ble først tørket i 50°C. Deretter fikk de trekke opp vann kapillært fra et fuktig underlag i 4 døgn. Så ble de dekket med en tynn plastfolie på alle sider bortsett fra "uttørkingssiden". Prøvene ble plassert i sand slik at luft bare kunne komme til fra en side. Arealet til uttørkingssiden ble målt og hastigheten på uttørkingen per arealenhet ble målt ved veiing en gang per døgn i fire døgn.

### Trykkstyrketester

Trykkstyrketester er blitt gjennomført av Norges Byggeforskningsinstitutt i Trondheim. NS 3104 fungerer ikke direkte på eldre mørtel, dog er prøvelegemer blitt laget ved at en 25 x 25 x 25 mm prøvebit er blitt jevnet til med sementmørtel, slik at den er blitt kubisk. Trykkprøving er utført i henhold til NS-EN 1015-11. Mørtelklasse vil si den klassen mørtelen tilfredsstiller i henhold til NS-EN 998-2.

### Tynnslipsanalyser

Tynnslipspreparater er blitt laget av Geologisk museum, Universitetet i Oslo.

Utrekning av innholdet i en mørtel har blitt gjort ved kvantitative analyser i form av punkttelling av bestanddeler i tynnslip under mikroskop. Det vil si at bestanddelenes innbyrdes mengdeforhold i volum er blitt bestemt ved hjelp av punkttelling. Volumprosent for hvert enkelt delmateriale er blitt regnet ut på grunnlag av punkttellingen.

Prinsippet er at man teller alle bestanddelene i slippet. Kravet i NT Build 370 er minst 500 punkter jevnt fordelt over et område på 24x36 mm. I samtlige prøver har mellom 700 og 1000 punkter blitt telt. Når hele slippet er telt, omgjøres tallene til volumprosent.

I samtlige prøver har en kvantitativ vurdering av mengden og typen bindemiddel og tilslag blitt gjennomført. I tillegg har store (>0,3 mm) og små (<0,3 mm) luftporer, rene og forurensede kalkklumper og eventuelle klinker blitt registrert.

Forurensede kalkklumper identifiserer hydrauliske komponenter. 5-12% forurensede kalkklumper representerer en svakt hydraulisk mørtel, 15-20% en middels sterkt hydraulisk mørtel og 20-30% en sterkt hydraulisk mørtel. Hydrauliske komponenter kan gi høy froststyrke.

Froststyrke vurderes først og fremst ut fra mengden små (<0,3 mm) og store (>0,3 mm) luftporer. Hvis andelen små porer er mer enn 5-6% og samtidig andelen store porer er under ca. 10% så vurderes

mørtelen å ha en god froststyrke. I tillegg er porestrukturen viktig. En skadet porestruktur med et kollapset poresystem gir dårlig frostbestandighet.

I tillegg har det blitt gjennomført en kvalitativ vurdering av revner, sprekkdannelser, materialbortfall, utfellinger, porestruktur samt mineralogien i tilslaget.

Alle tynnslipsanalyseresultatene er blitt systematisert og arkivert i et databaseverktøy som er under utvikling, og har arbeidstittel ”integrrert dokumentasjon, databehandling, analyse og presentasjon”.

## Resultater

En betydelig andel av prøvene viste seg å ha dårlig froststyrke (10 av 26 prøver), se vedlegg 1 og 2.

Uttørkingsevnen til kalkmørtler ligger gjennomsnittlig fra 2- 7 kg/m<sup>2</sup>. Samtlige tester viste at prøvene hadde forholdsvis god uttørkingsevne, se vedlegg 3..

Normalt kapillaritetstall for en moderne ren kalkmørtel er 5-15 kg/m<sup>2</sup>√h, mens en moderne sementmørtel har kapillaritetstall på 1-3 kg/m<sup>2</sup>√h. De analyserte mørtlene viser kapillaritetstall innenfor intervallet 4,9-20,2 kg/m<sup>2</sup>√h, altså noe i overkant av hva man kan forvente, se vedlegg 4.

Blandingsforholdene viste at flertallet av mørtlene var meget fete, med en høy andel bindemiddel, se tabell nedenfor samt vedlegg 1.

Bare to prøver viste innhold av hydrauliske komponenter.

Proteiner fantes i et flertall prøver mens saltinnhold i stor grad er begrenset til nitrater.

Trykkfastheten ble prøvd på tre mørtelprøver. Murmørtelmaterialer deles inn i klassene M1 – M20, i henhold til blant annet sine trykkfasthetsegenskaper, der klasse 1 er den svakeste og 20 den sterkeste. To av disse prøvene viste seg å ha trykkstyrke tilsvarende mørtelklasse 1 mens den tredje hadde styrke tilsvarende mørtelklasse 2,5, altså meget lav trykkstyrke, se vedlegg 5.

| PRØVE NR/<br>BESKRIV-<br>ELSE  | FROST-<br>STYRKE                                | UT-<br>TØRKING | KAP.<br>TALL.<br>kg/m <sup>2</sup> ·h | BINDE-<br>MIDDEL<br>type, mengde | TILSLAG<br>type, mengde     | BLAND.<br>FORH.<br>(BM:T) | HYDR.<br>KOMP. | TRYKK<br>FAST-<br>HET<br>MPa | SPREKK-<br>DANN. | SALT | PROTEIN |
|--|---|----------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|------------------------------|------------------|------|---------|
| 1/<br>Utstein 5,<br>233009000,<br>murmørtel  | Middel  |                |                                       | Kalk<br>34%                      | Bergarter<br>58%            | 1:2                       | nei            |                              | nei              | NO3  | nei     |
| 2/<br>Utstein 7,<br>233009000,<br>murmørtel  | Dårlig  |                |                                       | Kalk<br>28%                      | Bergarter<br>48%            | 3:5                       | nei            |                              | nei              |      | ja      |
| 3/<br>Utstein 8,<br>233009000,<br>murmørtel  | Middel  |                | 14,4                                  | Kalk<br>26%                      | Bergarter<br>59%            | 1:2                       | nei            |                              | ja               | NO3  | ja      |
| 4/<br>Utstein 1,<br>2004,<br>1561430,<br>murmørtel   | Dårlig  |                | 17,2                                  | Kalk<br>30%                      | Bergarter<br>21%            | 3:2                       | nei            |                              | ja               |      | ja      |
| 5/<br>Utstein 7,<br>2004,<br>1561430,<br>murmørtel   | Middel  |                | 18,8                                  | Kalk<br>48%                      | Bergarter<br>31%            | 2:1                       | nei            |                              | ja, små          | NO3  | nei     |
| 6/<br>Utstein 8,<br>2004,<br>1561430,<br>murmørtel   | Middel  |                | 20,2                                  | Kalk<br>64%                      | Skjell,<br>kvarts<br>19%    | 3:1                       | noe            |                              | nei              | NO3  | nei     |
| 7/<br>Katarina-<br>hospitalet,<br>2004,<br>1561340, M9,<br>Kalkprøve 1,<br>murmørtel   | Middel<br>- God                                 |                | 11,5                                  | Kalk<br>43%                      | Bergarter<br>39%            | 1:1                       | nei            |                              | nei              |      | ja      |
| 8/<br>Nonneseter<br>1, 1561333,<br>2004,<br>murmørtel  | God   | Middels        |                                       | Kalk<br>30%                      | Skjell,<br>bergarter<br>49% | 3:5                       | nei            |                              | ja, små          | NO3  | nei     |
| 9/<br>Rokoberget,<br>St.Mikaels<br>kirkeruin,<br>sv. hjørne,<br>kjærne, Løten<br>kommune,<br>kalkprøve 1,<br>Tor Sæther,<br>2005,<br>murmørtel | Dårlig<br>(syklus)<br>-<br>Middel<br>(tynnslip) | Høy            | 11,1                                  | Kalk<br>39%                      | Bergarter<br>41%            | 1:1                       | nei            | 0,5<br>MPa                   | nei              |      | ja      |
| 10/<br>St. Nikolas<br>ruin, A,<br>murmørtel  | Middel  |                |                                       | Kalk<br>45%                      | Bergarter<br>skjell,<br>32% | 5:3                       | nei            | 2,8<br>MPa                   | ja, små          |      | ja      |

| PRØVE NR/<br>BESKRIVELSE   | FROST-<br>STYRKE | UT-<br>TØR KING | KAP.<br>TALL.<br>kg/m <sup>2</sup> ·h | BINDE-<br>MIDDEL<br>type, mengde | TILSLAG<br>type, mengde    | BLAND.<br>FORH.<br>(BM:T) | HYDR.<br>KOMP. | TRYKK<br>FAST-<br>HET<br>MPa | SPREKK-<br>DANN. | SALT               | PROTEIN |
|--|------------------|-----------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|------------------------------|------------------|--------------------|---------|
| 11 og 12/<br>"Biblioteket"<br>Tønsberg,<br>1991,<br>murmørtel                          | Middel           | Høy             | 8,1                                   | Kalk<br>65%                      | Bergarter<br>20%           | 3:2                       | ja             | 1,6<br>MPa                   | nei              |                    | nei     |
| 13/<br>Tingelstad<br>kirke,<br>kalkprøve 1,<br>1961,<br>pussmørtel                     | Middel<br>-God   | Middel          | 9,2                                   | Tynnsliip ødelagt.               |                            |                           |                |                              |                  | NO3                | ja      |
| 14/<br>Tenor<br>kirkeruin,<br>kalkprøve 1,<br>2005,<br>murmørtel                       | Dårlig           |                 |                                       | Kalk<br>22%                      | Bergarter<br>53%           | 2:5                       | nei            |                              | nei              |                    |         |
| 15/<br>Steinvikholm<br>kalkprøve 1,<br>20.02.03,<br>murmørtel                          | Middel           |                 |                                       | Kalk<br>35%                      | Bergarter<br>33%           | 1:1                       | nei            |                              | ja               |                    |         |
| 16/<br>Steinvikholm<br>kalkprøve 2,<br>20.02.03,<br>murmørtel                          | God              |                 |                                       | Kalk<br>42%                      | Bergarter<br>31%           | 5:3                       | nei            |                              | ja               |                    |         |
| 17/<br>Mjøskastellet<br>kalkprøve 1,<br>2003,<br>murmørtel                             | Middel -<br>God  |                 | 5,9                                   | Kalk<br>36%                      | Bergarter<br>36%           | 1:1                       | nei            |                              | ja, små          |                    | ja      |
| 18/<br>Halsnøy,<br>kalkprøve 1,<br>murmørtel   | Middel           |                 | 6,4                                   | Kalk<br>77%                      | Bergarter<br>11%           | 8:1                       | nei            |                              | nei              | Cl,<br>NO3         | nei     |
| 19/<br>Sørbø kirke,<br>kalkprøve 1,<br>pussmørtel                                      | Dårlig           | Middel          | 4,9                                   | Kalk<br>81%                      | Skjell,<br>Bergarter<br>6% | 16:1                      | nei            |                              | nei              | Cl,<br>NO3,<br>SO4 | nei     |
| 20/<br>Katedral-<br>skolen,<br>Stavanger,<br>rom 6, kjeller<br>17.01.01.<br>pussmørtel | Dårlig           |                 |                                       | Kalk<br>44%                      | Bergarter<br>39%           | 1:1                       | nei            |                              | noe              | NO3                | nei     |
| 21/<br>Sverresborg ,<br>Trøndelag  | Dårlig           |                 |                                       | Kalk<br>5%                       | Bergarter<br>8%            | Ikke<br>fastsatt          | nei            |                              | nei              |                    |         |
| 22/<br>Tautra<br>klosterruin,<br>Trøndelag   | Dårlig           |                 |                                       | Kalk<br>47%                      | Bergarter<br>33%           | 5:3                       | nei            |                              | ja               | NO3,<br>SO4        | nei     |
| 23/<br>Valdisholm,<br>Eidsberg   | Dårlig           |                 |                                       | Kalk<br>20%                      | Bergarter<br>46%           | 2:5                       | ja             |                              | noe              |                    |         |

| PRØVE NR/<br>BESKRIV-<br>ELSE   | FROST-<br>STYRKE  | UT-<br>TØRKING | KAP.<br>TALL.<br>kg/m <sup>2</sup> ·√h | BINDE-<br>MIDDEL<br>type, mengde | TILSLAG<br>type, mengde | BLAND.<br>FORH.<br>(BM:T) | HYDR.<br>KOMP. | TRYKK<br>FAST-<br>HET<br>MPa | SPREKK-<br>DANN. | SALT | PROTEIN |
|---|-------------------|----------------|--|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------|------------------------------|------------------|------|---------|
| 24/<br>Rein<br>klosterruin,<br>Trøndelag  | Dårlig-<br>middel |                |  | Kalk<br>50%                      | Bergarter<br>30%        | 5:3                       | nei            |                              | ja               |      | ja      |
| 25/<br>Katarina-<br>hospitalet,<br>Kalkprøve 1,<br>1561703 Mur<br>M3. 15/9-<br>2005,<br>murmørtel | Middel            |                |  | Kalk<br>49%                      | Bergarter<br>36%        | 5:3                       | nei            |                              | ja               |      | ja      |
| 26/<br>Katarina-<br>hospitalet,<br>Kalkprøve 2,<br>1561703 Mur<br>M7. 15/9-<br>2005,<br>murmørtel | Middel            |                |  | Kalk<br>52%                      | Bergarter<br>33%        | 5:3                       | nei            |                              | ja               | NO3  | nei     |



## Diskusjon

Middelaldermørtel forventes å være fet, med typisk blandingsforhold 1:3. Mange av de undersøkte mørtelprøvene har vist seg å være enda fetere enn dette. 10 av 26 prøver er fetere enn 1:1. Den aller feteste har forholdet 16:1, kalk/tilslag. Den magreste har forholdet 1:3, kalk/tilslag. Dette forholdet gjelder for to prøver vi mistenker er reparasjonsmørtler, se vedlegg 1.

Tynnslipsanalyser kan gi informasjon om froststyrke, fordi man får et godt inntrykk av porene og deres struktur og størrelse, og man kan påvise eventuelle hydrauliske komponenter. Et stort antall små porer (< 0,3 mm) styrker frostbestandigheten, mens et stort antall store porer (>0,3 mm) vil kunne gi omvendt effekt. Videre kan hydrauliske komponenter, selv i liten mengde, ha positiv innvirkning på froststyrken. En av prøvene (nr 12) inneholder hydrauliske komponenter, og har god frostbestandighet til tross for ikke-optimalt poresystem.

Med ett unntak er det god sammenheng mellom observasjonene i tynnslipsanalysen og resultatene fra frostsyklustestene.

Evnen til å suge vann og til å tørke ut burde kunne kobles til froststyrke. Likeledes burde saltskader kunne gi en endret struktur, som igjen kan påvirke froststyrke. Tilsetning av proteiner kan trolig også påvirke en mørtels porestruktur.

Det er ikke blitt konstatert noen sammenheng mellom froststyrke og følgende parametre:

- evnen til å suge vann kapillært
- evnen til å tørke ut
- saltinnhold
- proteininnhold

Mørtlene har forholdsvis høye kapillaritetstall, det vil si at de suger mye vann. De 5 prøvene det ble gjort uttørkingstester på viser middels eller god evne til å tørke ut. Dette stemmer overens med hva man kan forvente av en middelaldermørtel, siden de gjerne er porøse.

Prøvene med kraftig protein-utslag har også høy porøsitet (både store og små porer), hvilket *kan* ha en sammenheng. Dog vites ikke om disse proteinene stammer fra tilsetninger ved blanding av mørtelen, eller om de skyldes sekundære kilder, for eksempel biologisk aktivitet.

I en del av prøvene er bindemiddelet i stor grad omdannet til gips. Dette skjer ved sulfat-eksponering, for eksempel sur nedbør. De mørtelprøvene som har mye kjemisk omdanning til gips har likevel god frostbestandighet. Muligens kan dette ha en sammenheng med at omdanningen har resultert i høyere porøsitet.

Tilslag med svært liten partikkelstørrelse vil gi positive effekter i en mørtel på grunn av at pakkingen blir tettere. De analyserte mørtlene har i liten grad så finkornet tilslag at dette kan ha hatt innvirkning på mørtelens bestandighet.

Det er blitt observert at det ofte er god sammenkitting mellom tilslag og kalk. Dette er gjerne et tegn på god bearbeiding.

Kalkklumper fungerer som tilslag, og kan dermed være en delforklaring på at historiske, fete mørtler har fungert godt. En stor del av prøvematerialet viser slike kalkklumper.

I flere av mørtlene er skjell brukt i tilslaget. Slike kalkholdige tilslag har gunstig effekt på karbonatiseringen, fordi de danner en kjerne for kalsitts krystallvekst. Videre gir de bedre sammenkitting mellom tilslag og bindemiddel fordi de har lik kjemi.

## Konklusjoner

De analyserte mørtlene varierer mye både innholdsmessig og egenskapsmessig. Forskjellene peker i retning av en nokså vilkårlig tilberedning av mørtelen. Dog gjelder sedvanlige likhetstrekk for middelaldermørtel også her: kalkklumper, kull, dårlig gradert tilslag.

Svært mange av mørtlene har også vist seg å være meget fete, flertallet enda fetere enn forventet.

En betydelig andel av prøvene viste seg å ha dårlig froststyrke. Froststyrken har blant annet sammenheng med porestruktur og porestørrelse. En dominans av små porer i porestrukturen og et uskadet poresystem gir god froststyrke. Faktorer som bearbeiding, tilsetninger av proteiner og så videre kan ha innvirkning på porestrukturen, og er dermed interessante parametere med hensyn på froststyrke.

## Vedlegg

Tynnslipsanalyse, vedlegg 1

Frostsyklusprøving, vedlegg 2

Uttørking, vedlegg 3

Kapillærsuging, vedlegg 4

Trykkstyrke, undersøkelse av middelaldermørtler, vedlegg 5