

Alf M. Waldum og Grete Kjeldsen

# Hydraulisk kalkmørtel

Historie, egenskaper og anvendelse



BYGGFORSK

Norges byggforskningsinstitutt

Alf M. Waldum og Grete Kjeldsen

# **Hydraulisk kalkmørtel**

Historie, egenskaper og anvendelse

Prosjektrapport 399 – 2006

Prosjektrapport 399  
Alf M. Waldum og Grete Kjeldsen  
**Hydraulisk kalkmørtel**  
Historie, egenskaper og anvendelse

Emneord: mørtel, kjemi, materialstruktur, styrke

ISSN 0801-6461  
ISBN 82-536-0905-1

100 eks. trykt av  
S.E. Thoresen as  
Innmat: 100 g Kymultra  
Omslag: 200 g Cyclus

© Copyright Norges byggforskningsinstitutt 2006  
Materialet i denne publikasjonen er omfattet av ånds-  
verkslovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med Nor-  
ges byggforskningsinstitutt er enhver eksemplarframstil-  
ling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det  
er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor,  
interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk.  
Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstat-  
ningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter  
eller fengsel.

Adr.: Forskningsveien 3 B  
Postboks 123 Blindern  
0314 OSLO  
Tlf.: 22 96 55 55  
Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08  
[www.byggforsk.no](http://www.byggforsk.no)

# Forord

Hydraulisk kalk er et bindemiddel for mørtel som får sin fasthet dels i kontakt med vann (som sement), dels ved tilgang på luft (som hydratkalk). Ut fra skriftelige kilder kan det se ut som om materialet har vært lite brukt i Norge opp igjennom historien. Nyere forskning kan imidlertid tyde på at det ikke er tilfelle og det er sannsynlig at hydraulisk kalk har vært brukt i Norge på samme måte som i Sverige og Danmark, om enn i mer beskjeden målestokk. Vi mangler kunnskap om lokale kalksteinsbrudd, kalksteinens sammensetning og betydningen av dette for mørtelens egenskaper.

Bakgrunnen for denne rapporten er et oppdrag Norges byggforskningsinstitutt har utført på oppdrag for Riksantikvaren. Det arbeidet som ligger til grunn for denne prosjektrapporten er et litteraturstudium, kontakt med miljøer i Norden og andre europeiske land, erfaringer fra laboratorieundersøkelser og praktiske anvendelser i Norge.

Forsvarsbygg ved Britt-Alise Hjelmeland, Riksantikvaren og NIKU har bidratt med viktige faglige innspill og vurderinger.

# Innhold

<b>Forord</b> .....	<b>3</b>
<b>Innhold</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Innledning</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Hva er hydraulisk kalk?</b> .....	<b>6</b>
<b>3. Herdning av hydraulisk kalkmørtel</b> .....	<b>8</b>
<b>4. Hydrauliske mørtlers historie (fragmenter fra en litteraturstudie)</b> .....	<b>9</b>
4.1 Momenter fra gammel europeisk litteratur .....	9
4.2 Hydraulisk mørtel i Skandinavia før 1900 .....	9
4.2.1 Norge .....	9
4.2.2 Sverige .....	10
4.3 Hydraulisk mørtel i Skandinavia i nyere tid .....	11
4.3.1 Norge .....	11
4.3.2 Sverige .....	11
4.3.3 Danmark.....	11
<b>5. Dagens forskning og anvendelse</b> .....	<b>13</b>
5.1 Dagens forskning .....	13
5.1.1 Generelt.....	13
5.1.2 Norge .....	13
5.1.3 Danmark.....	13
5.1.4 Sverige .....	14
5.1.5 Storbritannia.....	14
5.2 Anvendelse av hydraulisk kalk i dag .....	15
<b>6. Oppsummering</b> .....	<b>17</b>
<b>Litteratur</b> .....	<b>18</b>

# 1. Innledning

Hydratkalk fikk sin renessanse på 1980-tallet i forbindelse med rehabilitering av antikvariske bygninger og monumenter spesielt, men også ved oppussing av eldre murbygninger generelt. For antikvarisk bebyggelse var selvsagt det historiske aspektet ved å bruke kalk svært viktig. Dessuten hadde erfaringer fra reparasjonsarbeider med mørtler basert på sement og mursement utført i 1960- og 1970-årene ofte gitt meget uheldige resultater. Disse mørtlenes høye styrke, manglende elastisitet og ikke minst fukttekniske egenskaper var sentrale skadefaktorer.

Ved å benytte kalkmørtler ville man unngå utbedringer som i mange tilfeller førte til en direkte akselerert skadeutvikling på den opprinnelige konstruksjonen. Samtidig er det kjent og akseptert at mørtler basert på hydratkalk vil ha begrenset motstandsevne mot frysing/tining. For å bedre denne egenskapen og samtidig beholde kalkmørtelens mange positive egenskaper i størst mulig grad, ble hydraulisk kalk introdusert på det norske markedet på slutten av 1980-tallet. Hovedformålene med å bruke denne kalktypen, som var svært lite kjent i norsk murbransje på den tiden, var å oppnå en raskere fasthetsutvikling og bedre bestandighetsegenskapene.

Rapporten gjør rede for sentrale trekk i historien for hydraulisk kalk og materialets posisjon i dagens marked.

## 2. Hva er hydraulisk kalk?

Når man til daglig snakker om kalk er det ensbetydende med hydratkalk. All kalk som produseres i Norge i dag tilhører denne kalktypen.

Hydratkalk for bygningsformål framstilles ved brenning av kalkstein og deretter lesking/vanntilsetning. Kalksteinen består i all hovedsak av kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ) i lufta vil reagere med lesket kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) i en prosess som betegnes karbonatisering og som gjør at kalken føres tilbake til kalkstein. Det er altså karbonatisering som er årsak til at vanlige kalkmørtler oppnår sin styrke. De kjemiske prosessene ved brenning og herding er skjematisk vist i fig. 2.

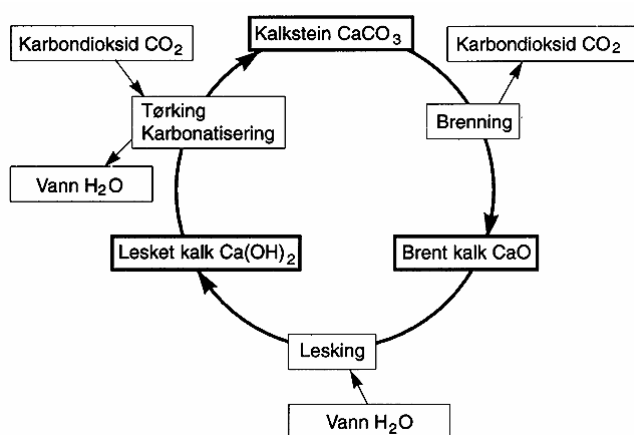


Fig. 2  
Kjemiske prosesser ved brenning, lesking og herding av kalk

En hydraulisk kalk er, i motsetning til en hydratkalk, en kalk som har en viss evne (stor eller liten) til å herde under vann, altså uten tilgang på luft. Denne egenskapen skyldes at det i kalksteinen som brennes også fins leire (kalktypen kalles ofte mergel). Den brente kalken vil da inneholde en rekke sure stoffer som lar seg løse i saltsyre. Viktigste av disse stoffene er silisiumoksid,  $\text{SiO}_2$ , men også aluminiumoksid,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , og jernoksid,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , er sentrale forbindelser. Stoffene reagerer kjemisk med brent kalk, kalsiumoksid,  $\text{CaO}$ , og magnesiumoksid,  $\text{MgO}$ , og danner henholdsvis silikater, aluminater og ferritter.

Framstillingen av hydraulisk kalk er, som man vil se av tabell 2, ikke knyttet opp mot bestemte grenser for råmaterialets sammensetning. Man vil altså ha hydrauliske kalktyper med høyst ulike egenskaper. Alt etter råstoffets kalkinnhold inneholder det ferdige produktet større eller mindre mengder brent kalk og dermed større eller mindre mengder hydraulisk materiale. Mengden hydraulisk aktive bestanddeler bestemmer mørtelens herdningshastighet og slutfasthet.

De fleste brente hydrauliske kalker inneholder en betydelig mengde finfordelt, brent kalk (brenntemperatur 900–1200 °C). Ved å tilsette "riktig" mengde vann, vil slik kalk leskes til et fint pulver, men leskeprosessen foregår likevel betydelig mindre voldsomt enn for en brent hydratkalk. Hvis mengden fri kalk ikke er tilstrekkelig for å oppnå nødvendig finhet på pulveret, vil det være nødvendig å foreta en nedmaling. Spesielt kalkfattige råmaterialer som etter brenningen praktisk talt ikke inneholder fri kalk, vil det naturligvis ikke være mulig å leske.

Et alternativ til å framstille hydraulisk kalk ved brenning av leirholdig kalkstein, er å tilsette en hydraulisk komponent til en lesket hydratkalk. Slike tilsetninger inneholder kiselsyre (silisiumoksid, SiO<sub>2</sub>) i "reaksjonsvennlig" form som for eksempel teglmel, trass, brent alunskifermel, flyvaske, o.a. En hydraulisk kalk framstilt på denne måten betegnes også pussolankalk. Se også kap. 4.

Den hydrauliske evnen hos en kalk angis i dag gjerne ved en såkalt Cementation Index (CI). Denne bestemmes etter følgende likning:

$$CI = (2,8 \cdot \% \text{SiO}_2 + 1,1 \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \cdot \% \text{Fe}_2\text{O}) / (1 \cdot \% \text{CaO} + 1,4 \cdot \% \text{MgO})$$

Tabell 2

Den hydrauliske evnen til en kalk vurdert på grunnlag av Cementation Index (CI)

Vurdering	CI
Svakt hydraulisk kalk	0,3–0,5
Moderat hydraulisk kalk	0,5–0,7
Sterkt hydraulisk kalk	> 0,7

Det kan her være verdt å huske at vanlig portlandsement lages av de samme råmaterialer som hydraulisk kalk, kalkstein og leire, men brennes ved en temperatur over sintreringsgrensen (ca. 1250 °C).



### **3. Herdning av hydraulisk kalkmørtel**

En hydraulisk kalkmørtel herdner både som en hydratkalkmørtel og en sementmørtel, det vil si ved karbonatisering og geldannelse (hydratisering).

Geldannelsen skyldes at det dannes en masse av kolloidale partikler (kolloid = limlignende substans), et mineralsk lim. De nevnte partiklene er svært små og samlet har den kolloidale massen en meget stor overflate. Den store overflaten tiltrekker seg vannmolekyler og massen absorberer dem. Dermed blir bevegelsen til den enkelte partikkel begrenset. Dette igjen fører til en sammenlenking eller nettdannelse i den kolloidale substansen og dermed en skjelettoppbygging i massen [1].

Geldannelsen skjer relativt raskt (fra noen timer til noen døgn) slik at det i en masse av langsomt karbonatiserende kalk vil være et skjelett av gelbindinger. Jo større andel hydraulisk reaktive komponenter i forhold til kalkmengden, jo sterkere blir skjelettet og dermed mørtelen.

## 4. Hydrauliske mørtlers historie (fragmenter fra en litteraturstudie)

### 4.1 Momenter fra gammel europeisk litteratur

De eldste spor av hydrauliske mørtler går tilbake til ca. år 5000 f.Kr. [2] og stammer fra den Persiske bukt. Omkring år 1000 f.Kr. skal fønikerne ha begynt å bruke mørtler med hydrauliske bindemidler, blant annet er det funnet sisterner i Jerusalem pusset med vanntett puss basert på kalk og teglmel. Noen hundreår senere vet vi at man brukte vulkansk aske som tilsetning til kalk for å framstille en hydraulisk fuge-mørtel.

Den første, kjente beskrivelse av kalk, kalkbrenning og mørtel for muring, fins hos den romerske forfatteren Marcus Cato som levde ca. 200 år f.Kr. [3]

En arkitekt og arkitekturteoretiker med meget stor innflytelse på utviklingen når det gjelder mørtel og murverk er Vitruvius. I sitt store bokverk "The ten books on architecture" fra ca. år 20 f.Kr. [4] skriver han blant annet om betydningen av å bruke riktig type mørtelsand og anbefaler også blandingsforhold for kalkmørtler avhengig av sandtype. Vitruvius er også den første som skriver om hydrauliske tilsetningsstoffer som knust tegl og pussolaner. Han anbefaler for eksempel at man bør tilsette så mye som en tredjedel knust tegl til mørtelen når elve- eller havsand blir brukt (dvs. sand med lite finstoff). Vitruvius beskriver pussolaner som et slags pulver eller jord fra områdene rundt "Baiae" og "Vesuvius" og også ved Aetna og Mysia (gresk område som ble kalt "Burnt district"). Det er helt tydelig at pussolaner ble brukt når konstruksjonen ble utsatt for store påkjenninger. For konstruksjoner under vann anbefaler Vitruvius for eksempel en mørtel som består av to deler pussolansk jord og en del kalk.

Under romerrikets storhetstid, de første århundrene e.Kr., ble store bygninger, bymurer og viadukter ført opp i murverk av naturstein og tegl. En stor del av disse konstruksjonene ble murt med mørtler som inneholdt hydrauliske bestanddeler som pussolaner, trass (en spesiell type pussolan som blant annet finnes langs Rhinen) og teglmel. Analyser som bekrefter dette er utført i flere land, blant annet i Tyskland og Italia. [5]

Flere av Vitruvius sine anbefalinger ble fulgt i svært lang tid. Den italienske arkitekten Andrea Palladio bruker for eksempel rådene om sandkvalitet og blandingsforhold i sine bøker fra 1570 [6]. Han nevner imidlertid ingen ting om teglmel eller pussolaner, men beskriver en "flisig kalkstein fra de Paduanske fjell" (Nord-Italia) som gir en utmerket mørtel til byggverk "under bar himmel og i vann siden det herdner raskt og har en god bestandighet". Det påpekes blant annet at mørtelen ikke kan lagres, men må brukes direkte. Dette viser at mørtelen hadde sterke hydrauliske egenskaper.

### 4.2 Hydraulisk mørtel i Skandinavia før 1900

#### 4.2.1 Norge

Theodor Brochs "Lærebog i Bygningskunsten" fra 1848 [7] er den første norske boken vi kjenner til som behandler hydraulisk mørtel. Broch behandler både brenningen, den kjemiske sammensetningen, herdeprosessen, noen egenskaper og bruksområder. En "hydraulisk Murkalk" får man enten ved å tilsette hydratkalk "et uglødet Lersilikat" eller ved å bruke naturlig hydraulisk kalk. De kiseljordholdige tilsetningene som Broch med et fellesnavn betegner "Cement" kan være pussolan, trass, andre vulkanske produkter, brent leire, finmalt teglstein, finmalt glass, steinkullaske, torvaske og utlutet treske. Broch sier at blandingsforholdet mellom kalk og sand bør prøves fram på stedet, men han oppgir samtidig at man kan blande 1 K' (kubikkfot) hydraulisk kalk med 2 K' sand. Kalkmørtelen blandes med vann og brukes umiddel-

bart eller senest dagen etter. Broch sier at den naturlige hydrauliske kalken herder raskere enn en hydrat-kalk med tilsetninger. Det er viktig at flatene som skal pusses er fuktige og at pussene må holdes våt for å herdne. Hydraulisk kalkmørtel anbefales brukt under vann og til pussing av murer utsatt for fukt.

Broch nevner også at kalksteinsbruddene på "Ladegaardsöen" og spesielt på "Langöen" ved Oslo (i dag henholdsvis Bygdøy og Langøyene) gir en god naturlig hydraulisk kalk. Kalken fra bruddene på Langøya ved Holmestrand og på Malmøya ved Oslo er mer eller mindre hydraulisk.

#### 4.2.2 Sverige

I Sverige var det allerede på midten av 1700-tallet organisert forskning på hydrauliske mørtler. Viktige incitamentet bak dette forskningsarbeidet var å utnytte de svenske kalkforekomstene og å øke nivået på kunnskapene om kalkbrenning. Også på denne tiden ble Vitruvius sine anbefalinger om sandkvaliteter og mørtelsammensetning fulgt. C. J. Cronstedt beskriver anvendelse av pussolaner ved bygging av fundamenter for en kirke i Roma. Han uttrykker ønske om at et tilsvarende pussolan kan "oppfinnes" i Sverige for all form for bygging i vann [8]. I årene etter behandles problematikken rundt bestandighet til mørtler i flere artikler. Tilsetninger som tjære og aske eller olje omtales. Trass fra Holland og fra Kölnområdet nevnes som spesielt godt egnet til bestandige mørtler.

Ved analyser utført på 1770-tallet kom man fram til at trass inneholdt leirpartikler og kalkjord [9]. Med bakgrunn blant annet i nevnte analyser, blir det arbeidet med å finne svenske råmaterialer med lignende egenskaper. Alunskifermel trekkes her fram som et interessant materiale. Aske av dyrebein er en annen tilsetning som gir positive egenskaper uten at hydrauliske egenskaper er spesielt nevnt.

I "Jernkontorets annaler" fra 1824 gis en sammenstilling av de forsøk og konklusjoner G. A. Pasch gjennomførte over en femårs periode under byggingen av Göta kanal (1810–1832). Han vier stor oppmerksomhet til hvilke kalksorter som herdner under vann. I tillegg til kalk fra nærområdene, inngår også kalk fra Öland, Gotland og Danmark i hans undersøkelser. Mens svært mange kalktyper ga gode resultater med hensyn til fasthetsoppbygging under vann, anses samtlige Gotlandskalker som helt ubrukbare for dette formålet [10].

Utover på 1800-tallet blir kunnskaper om kalkmørtler spredt via håndbøker og lærebøker. Carl Stål er den første i Sverige som benytter begrepet hydraulisk kalk. I en av sine lærebøker [11] refererer han til franskmannen Vicats opplysninger om at man kan forvandle vanlig, fet kalk til hydraulisk ved å bearbeide våtlesket kalk til en deig ved innblanding av kiselholdig leire. Deretter tørkes og brennes massen før den til slutt blandes med hydrat-kalk.

I en lærebok fra 1856 [12] angis det at en hydraulisk kalk bør brennes i kortere tid og ved lavere temperatur enn en ren kalk for å unngå dødbrenning. Følgende kjennetegn gis for en hydraulisk kalk:

- jordaktig, slett brudd
- tett tekstur
- grå til mørkeblå farge
- leiraktig og i blant bituminøs lukt ved å puste på den.

I [12] gis det anvisninger på hvordan man kan avgjøre om en kalk har hydrauliske egenskaper, hvordan hydraulisk kalk bør leskes o.a. I boken vurderer man videre de ulike hydrauliske komponenters egnethet for forskjellige formål.

## 4.3 Hydraulisk mørtel i Skandinavia i nyere tid

### 4.3.1 Norge

Nyere norsk litteratur om hydraulisk kalk fins, ut fra våre undersøkelser, i meget beskjednen grad. I A. Bugges "Husbygningslære" [13] fra 1918 er hydraulisk kalk nevnt som et av flere bindemiddeltypene, men med kommentaren "Hos oss brændes ikke saadan kalk og faaes vistnok heller ikke i handelen." Han sier videre at hydraulisk kalkmørtel ikke benyttes i Norge. Bugge anbefaler derimot kalkmørtel iblandet sement og han sier at denne blandingen er mye brukt.

I det store lærebokverket "Husbygging" fra 1949 [14], er hydraulisk kalk ikke nevnt. All oppmerksomhet rundt bindemidler for mur- og pussmørtel er med andre ord viet hydratkalk og portlandsement. Det samme gjelder for et kompendium i Husbygging fra NTH fra 1933 (Grendahl) [15]. I NBI anvisning nr. 3 fra 1954 "Puss i norsk klima" [16] er hydraulisk kalk som bindemiddel omtalt på én side. Også i NBI håndbok nr. 20 "Mørtel - Mur - Puss" [17], som er et fellesnordisk prosjekt fra 1966, har hydraulisk kalk en meget beskjednen plass. Om mørtler på basis av hydraulisk kalk sier man at de herdner omtrent på samme måte som sementfattige KC-mørtler og kan derfor grovt sett likestilles med disse. Den største forskjellen oppgis å være at bindingen av de hydrauliske bestanddeler normalt starter senere i den hydrauliske kalken.

### 4.3.2 Sverige

I den svenske "Hantverkets bok, Mureri" fra 1953 [18], er det en interessant betraktning rundt puss- og murmørtel. Her blir Paschs forskning om mørtel omtalt i rosende ordelag (se pkt. 4.2). Forfatteren (S. Nycander) mener at den høye kvaliteten på murmørtelen i mange bygninger fra midten på 1800-tallet kan skyldes Paschs arbeider og da i første rekke ved anvendelsen av natursement, det vil si pussolaner, trass, alunskifer o.a. Videre hevdes at kunnskapene om puss- og muringsteknikk forfalt kraftig på slutten av 1800-tallet og de første årtier av 1900-tallet, men fikk et stort oppsving når den moderne portlandssementen ble tatt i bruk. For å unngå skader anbefaler Nycander at man bør unngå rene kalkmørtler ved pussing utendørs og isteden benytte KC-mørtler i alle påslag.

Fra den svenske boken "Kalkputs 2" fra 1984 [19] skal et par utsagn nevnes. For det første; "Herdningen av en mørtel basert på hydraulisk kalk er sikrere enn for en mørtel basert på hydratkalk og man får alltid en viss minstefasthet. Dog kreves det likevel også at mørtelen karbonatiserer for at ikke en del av bindemiddelet skal være vannløselig". Videre; "Hydratkalk herdner fra overflaten og innover, en prosess som går langsommere jo dypere den går. Derfor er det en risiko for at en grunning av luftherdende kalk blir svakere enn de øvrige sjiktene. For å unngå dette kan man enten la grunningen sluttherdne før neste påslag appliseres eller benytte en hydraulisk kalkmørtel med tilpasset styrke".

### 4.3.3 Danmark

I "Dansk Hydraulisk Kalk og Hydratkalk" [20] fra 1945 beskriver prof. E. Suenson den posisjon dansk hydraulisk kalk har hatt opp gjennom årene. Han refererer også resultater fra laboratorieforsøk. I [20] nevnes at hydraulisk kalk omtales i dansk litteratur første gang i 1551. Den var brent i Skåne. Rundt 1740 begynte man å utnytte "cementstein" (leirholdig kalkstein) fra Bornholm. Denne industrien pågikk til tidlig på 1900-tallet.

I 1940-årene ble hydraulisk kalk brent både på Sjælland og i Jylland. Med bakgrunn i laboratorieundersøkelser av de tre danske kalktypene som var på markedet den gang, konkluderer Suenson med at "Dansk hydraulisk Kalk er kun svagt hydraulisk og brukes derfor i overvejende Grad til Husbygningsmurværk, af hvilket der kræves en hurtigere Hærdning eller større Styrke, end man kan opnaa med almindelig Luftkalk; til Vandbygningmørtel er den derimod uegnet."

Suenson påpeker videre at hydraulisk kalkmørtel foretrekkes i husbygging framfor en sementholdig kalkmørtel, fordi sement i høyere grad gir hvite saltutslag. Dessuten kan sementholdig mørtel misfarge lys naturstein som for eksempel marmor. Flere steder i [20] understreker Suenson hvor viktig det er for egenskapene til herdnet hydraulisk kalkmørtel at steinene det mures med eller pusses mot er sugende. Mellom tette flater uten sug vil mørtelen ikke kunne avgi overskuddsvann og ikke få tilført CO<sub>2</sub>.

Undersøkelser av mørtlenes frostmotstandsevne inngikk ikke i utprøvingen i [20]. Suenson understreker imidlertid at dersom hydrauliske mørtler brukes til muring, fuging eller pussing av loddrette vegger, er det ingen grunn til å tvile på frostmotstandsevnen. Suenson fraråder å bruke hydrauliske kalkmørtler til vannrett avdekning av murer, uten at den mørtelen man vurderer å bruke undersøkes nærmere.

## 5. Dagens forskning og anvendelse

### 5.1 Dagens forskning

#### 5.1.1 Generelt

Den forskning som utføres rundt hydraulisk kalk i dag har som formål å utvikle analyse- og målmeter for å kunne karakterisere gamle mørtler og å kunne utvikle reparasjonsmørtler med "lik" sammensetning og tilsvarende egenskaper som de opprinnelige mørtlene. Her gjenstår mye forskning, blant annet når det gjelder å dokumentere betydningen av forskjellene mellom en hydraulisk kalkmørtel og en moderne KC-mørtel.

#### 5.1.2 Norge

Vi har ikke kjennskap til forskningsprosjekter i Norge som går spesielt på hydrauliske kalkmørtler. Norge ved Forsvarsbygg tok initiativ til og deltok i det europeiske forskningssamarbeidet LIMWORKS sammen med Skottland, Østerrike, Sverige og Tyskland (mai 1999 – april 2002). Prosjektet ble støttet av EUs kulturprogram Rafael og man hadde som mål bl.a. å restaurere tre historiske kalkovner i Skottland, Østerrike og Norge. Den ene av to kalkovner på Karljohansvern Orlogsstasjon i Horten er restaurert og delvis rekonstruert i prosjektet. Ovnene ble bygd i 1852 og 1854. Som et ledd i restaureringsarbeidet har man bygget en feltovn, hentet ut kalkstein fra Langøya i Oslofjorden og brent denne kalken. Marinen hadde tidligere et eget kalkbrudd på Langøya. Kalkmørtlene ble her produsert i sin helhet på byggeplassen. Ulike blandemetoder og mørtelsammensetninger ble forsøkt. Et viktig resultat av prosjektet var at man fikk sikker kunnskap om at man må ha hatt tilgang på og kunnskaper om naturlig hydraulisk kalk i Norge.

En viktig del av prosjektet var å undersøke den lokale kalkens sammensetning og kvalitet, murmørtlene og kunnskapene bak. Det ble derfor utført ulike analyser av råmateriale og mørtler. Britt-Alise Hjelmeland i Forsvarsbygg opplyser at resultatene fra disse analysene viser at brenning av lokal kalkstein gir hydrauliske mørtler med andre egenskaper enn dagens kalkmørtler. Bl.a. fikk kalken en lys gul/oker farge. I rapporten fra prosjektet [21] og i en artikkel i Fortidsminneforeningens årbok fra 2002 [22] er det ytterligere redegjort for kunnskap om hydraulisk kalkbruk i Norge. Hjelmeland påviser her at hydrauliske kalkmørtler har vært brukt målrettet svært lenge også i Norge. Bl.a. dokumenterer hun at Forsvaret har brukt hydrauliske kalkmørtler helt siden 1600-tallet.

#### 5.1.3 Danmark

I Danmark er det tidligere gjennomført flere laboratorieundersøkelser av hydrauliske kalkmørtler, men det er først og fremst styrkeegenskapene man har sett på. Man har målt E-modul og bruddfasthet på utstøpte mørtelprismer. Dette opplyser Jens Østergaard ved Dansk Teknologisk Institut, Murværk. Han hadde ikke kjennskap til andre forskningsprosjekter i Danmark unntatt det som er gjennomført ved Nationalmuseets Bevaringsafdeling [23].

Nationalmuseets Bevaringsafdeling har sett på tre "moderne" typer hydraulisk kalk (Jura, Lafarge og Otterbein) og undersøkt hvor egnet de er til restaureringsformål [23]. Kalkens kornfordeling og kjemiske sammensetning, mørtelens styrkeegenskaper, kapillærsug, struktur og arbeidbarhet ble undersøkt. Noen resultater er gjengitt i tabell 5.1.3 a og b. Resultatene viser at hydraulisk kalk ikke kan karakteriseres ved den kjemiske sammensetningen alene. Mengde og type hydrauliske mineraler er avgjørende for herdeforløpet. Videre er fuktforholdene under herdningen viktig for styrkeutviklingen. Herdning i "fuktig luft" ser ut til å være gunstig da både hydratiseringen og karbonatiseringen kan finne sted samtidig. Partikkelstørrelsen har betydning for mørtelens porestruktur. Ved tilsetning av kulekalk (våtlesket kalk) fant man at styrken ble lavere, mens mørtlenes heftegenskaper og arbeidbarhet ble bedre.

Tabell 5.1.3 a

Kjemisk sammensetning av tre "moderne" typer hydraulisk kalk sammenliknet med sement. Fra [23]

	Mørteltype			
	Lafarge	Otterbein	Jura	Sement
<b>Kjemisk innhold</b>				
SiO <sub>3</sub>	11	10	27	24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,65	3,5	7,9	3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	2	3	2,3
CaO	66	62	43	65
MgO	0,45	2,6	2,8	0,7
Hydraulisk indeks	0,18	0,24	0,83	0,45
<b>Mineralsk innhold</b>				
CaCO <sub>3</sub>	16	12	13	
Ca (OH) <sub>2</sub>	76	71	46	
Syreoppløselig silikat	1,5	12	21	
Uoppløselig silikat	7	5	21	
<b>Hydrauliske mineraler</b>				
Dikalsiumsilikat, C <sub>2</sub> S	ja	ja	ja	ja
Trikalsiumsilikat, C <sub>3</sub> S	ja	nei	nei	ja

Tabell 5.1.3 b

Egenskaper målt på fire forskjellige hydrauliske mørtler

Kalken som er tilsatt Jura og sement er våtlesket kalk (kulekalk). Fra [23]

Egenskap	Enhet	Mørteltype											
		Lafarge/sand			Otterbein/sand			Jura/kalk/sand			Sement/kalk/sand		
Blanding	vekt	1:3			1:3			1:1:6			1:2:9		
Lagringstid	døgn	14	31	365	14	31	365	14	31	365	14	31	365
Bøystyrke	MPa	1,9	2,7	4,4	0,6	0,9	1,5	0,3	0,6	0,7		0,8	1,2
Trykkstyrke	MPa	6,8	9,2	20	1,4	2,3	10	1,6	1,5	2,5		2,5	4,8
Karb. dybde	mm	0	2	3	1	3	10	3	7	20		4	12
E-modul	GPa			23			15			5,3			7
Kapillaritet	kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	6,6		2,4	13		6,6	11		12	10		9,6

### 5.1.4 Sverige

Det er flere miljøer i Sverige som er opptatt av kalkbaserte mørtler til restaureringsformål, men så vidt vi kjenner til, pågår det ikke forskningsprosjekter på hydraulisk kalk hos noen av disse.

Sölve Johansson (Byggkonsult Sölve Johansson AB) skriver på en doktoravhandling om produksjon og bruk av hydrauliske kalkmørtler i Norden, med vekt på Sverige, fra middelalderen og fram til i dag. Avhandlingen vil omfatte både litteraturstudier og analyser. En kartlegging av forekomster av kalkstein som kan brukes som hydraulisk kalk, er gjennomført. En lisensiatavhandling ble lagt fram i 2004 [24], mens doktoravhandlingen er planlagt ferdig om 1–2 år.

### 5.1.5 Storbritannia

I januar 1998 igangsatte English Heritage i samarbeid med BRE et forskningsprosjekt for å se på hva som karakteriserte mørtler basert på hydraulisk kalk, blandinger av hydraulisk kalk og våtlesket hydratkalk og hydratkalk modifisert med hydrauliske tilslag. Totalt ser man på 58 ulike mørtelblandinger. [25] gir bare noen foreløpige resultater fra den delen av prosjektet hvor man så på egenskapene til ulike hydrauliske mørtler. Åtte mørtler basert på hydrauliske kalktyper tilgjengelige i Storbritannia ble testet. Man så på følgende egenskaper: Fukttinnhold, konsistens, fashetsutvikling, porøsitet, vanddamppermeabilitet, E-modul/bruddfasthet, bestandighet mht. saltutfelling og fryse-/tinebestandighet.

De foreløpige resultatene indikerer at vanddamppermeansen til rene hydrauliske mørtler er lavere enn for mørtler basert på hydraulisk kalk og hydratkalk. Vanddamppermeansen ser også ut til å bli lavere jo mer hydrauliske de rene mørtlene er. Videre har man sett at med tilsetning av hydratkalk endrer den hydrauliske mørtelens egenskaper:

- Trykkfastheten målt etter 60 døgn reduseres
- Bestandigheten mht. saltutslag reduseres

En oppsummering av hele prosjektet vil først bli publisert i 2006 i en publikasjon fra English Heritage om mørtelforskning i England.

På Heriot-Watt Universitetet i Skottland har man gjennomført et forskningsprosjekt hvor man så på om det også i praksis er en sammenheng mellom en mørtels hydrauliske egenskaper og permeabilitet, og om dette kan benyttes som et mål for mørtelens evne til å "puste" [26]. Flere ulike kalktyper, både hydraulisk kalk og hydratkalk, ble undersøkt i prosjektet. For å få et mål på mørtlenes hydrauliske egenskaper målte man varmeutviklingen i herdingens tidlige fase. I tillegg målte man vanddamppermeansen. Mørtlenes mikrostruktur ble undersøkt ved hjelp av et ESEM (Environmental scanning electron microscope). Forskningsprosjektet var en del av et doktorgradsarbeid som ble avsluttet i 2003. Avhandlingen [27] er ikke publisert.

## 5.2 Anvendelse av hydraulisk kalk i dag

I de siste 8–10 årene er mørtler hvor hydraulisk kalk utgjør hele eller deler av bindemiddelinholdet i mørtelen brukt ved flere rehabiliteringsarbeider her i landet. Erfaringene med hensyn til bestandighet er generelt gode når det gjelder puss, men mindre tilfredsstillende for omfuging/spekking. Ved omfuging/spekking av murverk av naturstein og tegl har man bl.a. sett noen skader på grunn av uheldig valg av type hydraulisk kalk.

Mørteltypene  $KK_H$  1:1:5 og  $KK_H$  1:1:6 (hydratkalk, hydraulisk kalk og sand i volum) er vanlige blandinger i utvendig puss, se eksempel i fig. 5.2 a. Ved omfuging/spekking av murte vegger i værutsatte strøk er det imidlertid nødvendig å benytte en mørtel med større frostmotstandsevne og en blanding med hydraulisk kalk som eneste bindemiddel, for eksempel  $K_H$  1:3 kan anbefales, se fig. 5.2 b.



Fig. 5.2 a

Værutsatte fasader pusset med mørtel  $KK_H$  1:1:5

Bildet er tatt fire år etter pussing og skadene er begrenset til lokale avskallinger ved åpninger i tårnet og i overgang vegg/terreng.





Fig. 5.2 b  
Festningsmur under omfuging/rehabilitering  
Mørtel  $K_H$  1:3 benyttes.

I Danmark benyttes hydrauliske kalkmørtler spesielt på værutsatte fasader, sokler, horisontale trekninger o.l. De vanligste blandingene er  $KK_H$  1:1:6 og 1:2:9 og  $K_H$  1:3. Man har der erfaring med det kan være vanskelig å kalke på en hydraulisk kalkpuss. Sandkalk (våtlesket hydratkalk (kulekalk) og fin sand blandet i forholdet 4:1) kan ikke brukes til dette formålet. Man bruker i hovedsak den samme hydrauliske kalken i Danmark som i Norge.

Bruken av hydraulisk kalk i det norske markedet var i årene rundt tusenårsskiftet preget av tilfeldigheter og mangelfulle kunnskaper i bransjen. Manglende kunnskaper gir seg bl.a. utslag i at man snakker om hydraulisk kalk som om det er et bindemiddel med bestemte egenskaper, mens man i realiteten har et stort spekter av sammensetninger og egenskaper, jf. pkt. 2 og 5.1.3.

I dag er betegnelsene på de ulike kalktypene i ferd med å bli innarbeidet i den del av murerbransjen som arbeider med restaureringsoppgaver. Samtidig skjer det stadige endringer i markedet. Kjente, "utprøvde" typer hydraulisk kalk forsvinner og nye dukker opp. Man bruker i større grad naturlig hydraulisk kalk framfor framstilt.

De tekniske mørtelegenskaper som etter vår mening er spesielt viktige for et godt sluttresultat er sluttfasthet, frostmotstandsevne og E-modul. Det er ofte slik at en mørtel med høy styrke (trykkfasthet  $> 6 \text{ N/mm}^2$ ) har en høy frostmotstandsevne. Samtidig øker gjerne E-modulen med økende fasthet. Dette igjen betyr at evnen til å ta opp bevegelser uten oppsprekking avtar. Denne evnen er som kjent en sentral årsak til at det teknisk er riktig å velge kalkmørtler med mange rehabiliteringsprosjekter.

## 6. Oppsummering

I norsk faglitteratur er hydraulisk kalk ikke viet stor oppmerksomhet bortsett fra hos Broch [7]. Dette kan bl.a. skyldes forhold som at murverk har spilt en beskjeden rolle i norsk byggeri slik at mørtelforskning aldri har blitt høyt prioritert. Hydrauliske tilsetninger som teglmel o.a. er imidlertid velkjent også hos oss.

I Norden for øvrig, og kanskje spesielt i Sverige, er situasjonen når det gjelder litteratur om hydraulisk kalk en helt annen. Eksempler på bruk av hydrauliske mørtler går tilbake til 1000-tallet [2]. Gjennom hele middelalderen er hydrauliske mørtler i bruk i varierende omfang avhengig av hvor i landet man er, lokal tilgang på brent kalk, muligheter for import osv.

På 1700- og 1800-tallet førte bygging av de svenske kanaler til et stort behov for mørtel som kunne holde i kontakt med vann. En betydelig aktivitet ble derfor satt i gang for å produsere alternative materialer til pussolaner og trass som måtte importeres. Perioden fra 1700 til ca. 1930, hvor portlandsement reformerte hele mørtelproduksjonen, kan derfor karakteriseres som den hydrauliske kalkens storhetstid i Sverige. Det er ingen avgjørende grunn til at dette ikke skal gjelde også for Norge selv om bruken av hydraulisk kalk har vært betydelig mer beskjeden hos oss.

Hydrauliske kalkmørtler benyttes først og fremst til restaureringsformål i dag. Markedet for hydraulisk kalk er derfor forholdsvis lite og dette preger også forskningsinnsatsen på området. Felles for de pågående prosjektene er at de er igangsatt eller støttet av kulturminnemyndigheter og/eller – etater og organisasjoner som for eksempel Forsvarsbygg, The Scottish Lime Centre og English Heritage. Prosjektene har som et overordnet mål å få fram glemt kunnskap og forståelse for hydrauliske kalkmørtler og deres egenskaper. Med økt forståelse og kunnskap bør man kunne beskrive mørtelsammensetninger som er compatible med de bygningene som skal rehabiliteres, samtidig som mørtlene har gode fryse-/tineegenskaper.

Hydratkalk alene kan ikke løse alle bindemiddeloppgaver i mørtel i norsk klima. På flere bruksområder er en mørtel med hydrauliske tilsetninger å foretrekke. Erfaringer fra flere større restaureringsarbeider de siste årene har vist at hydraulisk kalk av flere årsaker er å foretrekke framfor sement som hydraulisk komponent i mørtelens bindemiddel.

# Litteratur

- [1] Czernin, W. Cementkemi för byggare. Svenska Cementföreningen. Malmø, 1969
- [2] Malinowski, R. og Frifelt, K. Prehistoric hydraulic mortar. Byggforskningsrådet, D12:1993. Stockholm, 1993
- [3] Cato, M. P. On Agriculture. The Loeb Classical Library. Oversatt av W. O. Hooper og H. B. Ash. London, 1936
- [4] Vitruvius (Pollio, Marcus Vitruvius). The Ten Books on Architecture. Ca. 35 f.Kr. Oversatt av Morris H. Morgan. Harvard, 1914. Dover Publications Inc. New York, 1960
- [5] Lamprecht, H. O. Opus Caimentitum. Bautechnik der Rohmer. Düsseldorf, 1985
- [6] Palladio, Andrea. The Four Books of Architecture. Dover Publications. New York, 1965
- [7] Broch, T. Lærebog i bygningskunsten. Christiania, 1848
- [8] Cronstedt, C. J. Tal om stenhus bygnad. Stockholm, 1755
- [9] Andersson, B. Quist. Försök anstälde på Trass. Kunglige Svenska vetenskapsakademiens handlingar, vol. 31. Stockholm, 1770
- [10] Pasch, G. E. Underrettelser om de vid Göthakanal anstälde försök att bereda cement och murbruk för muringar i vatten. Jernkontorets Annaler 8, s. 191–296. 1824
- [11] Stål, C. Utkast til lärobok i byggnadskonsten. 1834
- [12] Rothstein, E. E. Handledning i almäna byggnadslärens praktiska del. Stockholm, 1856
- [13] Bugge, A. Husbygningens lære. Aschehoug. Kristiania, 1918
- [14] Holmgren, J., Landmark, O. og Vesterlid, A. (red). Husbygging. Aschehoug. Oslo, 1945-50
- [15] Grendahl, H. Husbygning: Forelesninger ved Norges tekniske høiskole. Tapir. Trondheim, 1933
- [16] Svendsen, S. D. Puss i norsk klima. Norges byggforskningsinstitutt, Anvisning nr. 3. Oslo, 1954
- [17] Dührkop, Saretok og Sneck, Svendsen. Mørtel – Mur – Puss. Norges byggforskningsinstitutt, Håndbok 20. Oslo, 1966
- [18] Granholm, H. (red). Hantverkets bok. Mureri. Stockholm, 1953
- [19] Hidemark, O., og Holmström, I. Kalkputs 2. Historia och teknikk – redovisning av kunskaper och forskningsbehov. Riksantikvarieämbetet och statens historiska museer, RAÄ 1984:4. Stockholm, 1984
- [20] Suenson, E. Dansk Hydraulisk Kalk og Hydratkalk. Ingeniørvidenskabelige skrifter 1945:4. Akademiet for de Tekniske Videnskaper & Dansk Ingeniørforening. København, 1945
- [21] Hjelmeland, B-A. Restaurering av kalkovn på Karljohansvern Orlogstasjon i Horten. Forsvarsbygg, Kulturminneforvaltningen. Oslo, 2002
- [22] Hjelmeland, B-A. Nasjonale klenodier i mur – Gjør vi rett? Fortidsminneforeningen. Årbok 2002. Oslo, 2002
- [23] Larsen, P. K., Thorvardarson, A. og Ernfridsson, E. Hydrauliske kalkmørtler. Nationalmuseets Bevaringsafdeling. Nordisk forum for bygningskalk, Akershus festning, Oslo, 13.–14. 10. 2000
- [24] Johansson, S. Hydraulisk kalkbruk. Kunskaps- og forskningsläge. Tilgangen på kalksten med hydrauliska komponenter, naturlig cement og hydraliska tillsatsmaterial för byggande i Sverige från medeltid till nutid. Lisensiatavhandling. Göteborgs universitet, mars 2004
- [25] Teutonico, J. M., Ashall, G., Garrod, E. og Yates, T. A comparative study of hydraulic lime-based mortars. RILEM Proceedings PRO 12, Paisley, 1999
- [26] Banfill, P. F. G. og Forster, A. M. A relationship between hydraulicity and permeability of hydraulic lime. RILEM Proceedings PRO 12, Paisley, 1999
- [27] Forster, A. M. Hot-lime Mortars. PhD-Thesis, Heriot-Watt University, Skottland, 2003

