



LUND UNIVERSITY

Bindemedel till mur- och putsbruk

En introduktion

Lindmark, Sture; Strandberg, Paulien

2022

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Lindmark, S., & Strandberg, P. (2022). *Bindemedel till mur- och putsbruk: En introduktion*. (TVBM; Nr. 3188). Lund University.

Total number of authors:

2

General rights

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

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

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

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

Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

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



LUND UNIVERSITY

Bindemedel till mur- och putsbruk

En introduktion

Lindmark, Sture; Strandberg, Paulien

2022

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Lindmark, S., & Strandberg, P. (2022). *Bindemedel till mur- och putsbruk: En introduktion*. (TVBM; Nr. 3188). Lund University.

Total number of authors:

2

General rights

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

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

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

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

Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

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

Bindemedel till mur- och putsbruk

- en introduktion

Sture Lindmark & Paulien Strandberg-de Bruijn | Avdelning
Byggnadsmaterial | LTH | Lunds Universitet
TVBM-3188



LUND
UNIVERSITY

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

Lunds Universitet
Avd Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Innehållsförteckning

1	<u>Förord</u>	2
2	<u>Inledning</u>	3
3	<u>Lera</u>	3
4	<u>Gips</u>	4
5	<u>Kalkbaserade bindemedel (luftkalk)</u>	5
5.1	<u>Bränning</u>	5
5.2	<u>Släckning</u>	6
5.3	<u>Hårdnandeprocessen</u>	6
5.4	<u>Luftkalkbrukets egenskaper</u>	7
6	<u>Hydrauliska kalkbindemedel</u>	9
6.1	<u>Puzzolankalk, Romacement</u>	9
6.2	<u>Bränd hydraulisk kalk</u>	9
6.3	<u>Naturlig hydraulisk kalk</u>	10
7	<u>Portlandcement</u>	11
7.1	<u>Tillverkningsprocessen</u>	11
7.2	<u>Portlandcementets hårdnande och strukturutveckling</u>	12
7.3	<u>Kalkcementbruk</u>	14
7.4	<u>Murcement</u>	14
8	<u>Skillnader mellan kalk- och cementbaserade bruk</u>	15
9	<u>Referenser</u>	16

1 Förord

Denna rapport skrevs ursprungligen 2013. Initiativtagare och beställare var Tomas Gustavsson, Tomas Gustavsson Konstruktioner AB, Lund. I denna version har vi rättat till vissa fel samt gjort smärre kompletteringar.

Vi tackar Tomas för att vi fått detta uppdrag, och vi tackar även Ulrika Nelfelt, Finja Betong AB, Daniel Nymberg, Kalkkonsulten D Nymberg AB samt Kristin Balksten, Uppsala universitet, som alla har läst tidiga utkast av rapporten och givit värdefulla kommentarer.

Lund, 1 juni 2022

Sture Lindmark & Paulien Strandberg-de Bruijn

2 Inledning

Syftet med denna rapport är att ge en kortfattad, översiktlig beskrivning av olika typer av bindemedel som används till mur- och putsbruk. I första hand avses själva bindemedelskemin, men även bindemedlens betydelse för brukens egenskaper berörs kortfattat. Avsikten har varit att göra framställningen enkel genom att bara beskriva de väsentligaste delarna av bindemedelskemin. Sekundära fenomen och detaljer har utelämnats. För en utförligare framställning hänvisas därför till referens- och litteraturlistorna.

Rapporten är en sammanställning av uppgifter från välkända litteraturkällor. Detta har i många fall medfört att enskilda referenser inte anges för enstaka faktauppgifter. De viktigaste källorna bakom texten är dels Czernin (1969), dels Dührkop *et al* (1966).

Bindemedlets typ har förvisso stor betydelse för vilka egenskaper ett bruk får, både i det färska och i det fullt hårdnade stadiet. Det kan dock inte nog understrykas att de slutliga egenskaperna för ett mur- eller putsbruk, i form av hållfasthet, vidhäftning och beständighet, i hög grad bestäms av hur underlaget förmår suga bort vatten från det färska bruket och av hur vatten avdunstar från bruket i det tidiga skedet. Dessutom spelar själva arbetstekniken en stor roll. Allt detta faller dock utanför ämnesområdet för denna rapport.

3 Lera

Lera har använts som byggnadsmaterial i många tusen år. Lera som råmaterial har alltid varit lättillgänglig och byggande med lera har historiskt sett varit ett prisvärt alternativ till andra byggnadsmaterial såsom tegel och trä. Lera har dock liten användning i modernt byggande, även om intresse för lera som byggnadsmaterial har återuppstått de senaste åren. Lera har låg energiförbrukning vid framställning (Minke, 2006; Nanz et al., 2018) samt obegränsad återvinningsmöjlighet. Lera passar därför väl in i ett cirkulärt byggande.

Lera består av extremt små mineralpartiklar som bildats genom nedbrytning av berggrund. Denna nedbrytning (erosion) kan ske på olika vis på olika platser, och detta påverkar både partikelform och partikelstorlek i leran. Lerans mineralogiska sammansättning avgörs av den berggrund den har skapats ur. Detta innebär att lerans ursprung får stor betydelse för dess egenskaper som byggnadsmaterial.

Lera förekommer vanligtvis naturligt blandad med något grövre partiklar. Det vi kallar lerjord är därför i regel en blandning av lera, silt, sand och grövre partiklar. Själva lerpartiklarna är per definition mindre än 0,002 mm (2 μ m), vilket innebär att lerpartiklarna är mindre än kornen i både kalk och oreagerat cement. Lerpartiklar är platta och relativt avlånga och får därigenom en mycket stor kontaktyta mot varandra. Lerbruket hårdnar genom att vatten avdunstar, varefter lerpartiklarna binds ihop med svaga elektriska krafter; van der Waals-bindningar. Som ett mycket grovt riktvärde kan man räkna med att den slutliga, torkade lerbaserade byggprodukten kan få en tryckhållfasthet på omkring 0,1-1 MPa (Minke, 2006). Uppgifter om ytterligare något högre hållfasthet förekommer hos vissa leverantörer. Värdet är starkt beroende av hur väl leran har torkat.

Lera som bindemedel har några begränsningar som gör att användningen har varit och fortsatt är mycket begränsad:

- Lerjord är inte ett standardiserat, väldefinierat material. Dess egenskaper varierar med dess ursprung. För att kunna anpassa lerjorden till det tänkta användningsområdet måste man känna dess sammansättning.
- Vatten tillsätts för att göra leran bearbetbar. Detta medför att lerbundna produkter krymper kraftigt när de torkar. För lertegel och lerbruk kan man räkna med mellan 3 och 12% krympning från formning till torkat material. Krympningen kan minskas genom minimering av mängden ingående lera (dvs ökad andel sand och andra grövre partiklar), lämpligt val av ballastgradering och användning av krympreducerande tillsatsmedel.
- Produkter av icke bränd lera tål inte att utsättas för fritt vatten och frostpåkänningar under längre tid. En obränd lersten som utsätts för fritt vatten kan lösas upp totalt inom loppet av något dygn, medan s.k. rammed earth (stampade jordväggar) har något bättre beständighet mot regnpåverkan. Obrända lerstenar måste därför skyddas mot fritt vatten, som t.ex. slagregn.

Även om obränd lera är känsligt för väta så har lera använts i stor omfattning även i Sverige. Detta gäller t.ex. korsvirkeshus där facken ibland fylldes med olika typer av lerprodukter. För att dessa väggar skulle kunna fungera väl försågs de med ett yttre skydd mot väta, t.ex. en kalkputs. Historiskt sett har olika organiska tillsatsmaterial använts, t.ex. kogödsel (Hantverkslaboratoriet, 2015; Millogo et al., 2016), för att förbättra lerans beständighet mot fukt. Även på senare år har byggnader uppförts med väggar av (obrända) lerprodukter.

4 Gips

Bruk med gips som bindemedel bör undvikas användas utomhus eftersom sådant bruk lätt löses upp när det utsätts för vatten. Gipsbruk används däremot med fördel i vissa inomhusapplikationer, särskilt för utsmyckningar. I Sverige är brytbar gipssten sällsynt (Erenmalm & Leijon, 2013), vilket till viss del förklarar dess ringa användning här. Historiskt sett har gips använts som puts i bl.a. Tyskland, där det kallas det för ”stuckgips” (Karni & Karni, 1995).

Gips förekommer i naturen som gipssten, med den kemiska sammansättningen $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Gipsstenen består alltså av kalciumsulfat med två vattenmolekyler, s.k. kristallvatten, till varje molekyl kalciumsulfat. Genom att bränna gipsstenen vid cirka 150°C kan delar av kristallvattnet drivas bort. Därigenom skapas $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, ett så kallat halvhydrat. När detta ånyo blandas med vatten binder det återigen ihop till gipssten. Halvhydratet kan alltså användas som bindemedel i ett gipsbruk. Ett problem är att reaktionen sker mycket snabbt; den börjar inom några minuter och är färdig på mindre än en timme. Bruket kan därför inte användas för praktiskt putsningsarbete utan att man tillsätter någon form av retarderingsmedel. Denna form av gips, halvhydratet, kompletterat med retarderingsmedel, säljs som modellgips eller stuckgips.

Genom att bränna gipsstenen hårdare (ca 200°C) erhålls kalciumsulfat utan något kristallvatten alls, $\text{Ca}(\text{SO}_4)$, kallad anhydrit. Även denna kan användas som bindemedel i bruk, men i denna form har produkten en långsammare hårdnande process.

Gipsen kan blandas med enbart vatten och kallas då gipspasta. Pastorna används framförallt som ytputser. Gipsen kan även blandas med ballast till ett normalt bruk, och det går även att kombinera gipsen med kalk, varvid man får ett GK-bruk eller GK-pasta om ballasten slopas.

När gipsbruket hårdnar krymper det inte, utan det sker istället en viss svällning. Gipsbruk drabbas därför mycket sällan av krympsprickor. Tack vare sin relativt grova porstruktur uppvisar gipsbruken också endast mycket små fuktbetingade rörelser. Gipsbruk är dock känsliga för hög fuktighet; de sväller och förlorar mycket av sin hållfasthet. De kan därför inte användas utomhus eller i fuktiga lokaler. Genom behandling med linolja kan man dock uppnå en viss resistens mot fukt.

Gips kan inte blandas med Portlandcement eller hydraulisk kalk eftersom gipsens sulfat reagerar med aluminium i cementet och bildar ettringit. Detta orsakar kraftig svällning och leder till att blandbruket bryts sönder inifrån. Även på underlag av betong kan man få denna typ av problem. Dessutom är det svårt att uppnå god vidhäftning mot betong.

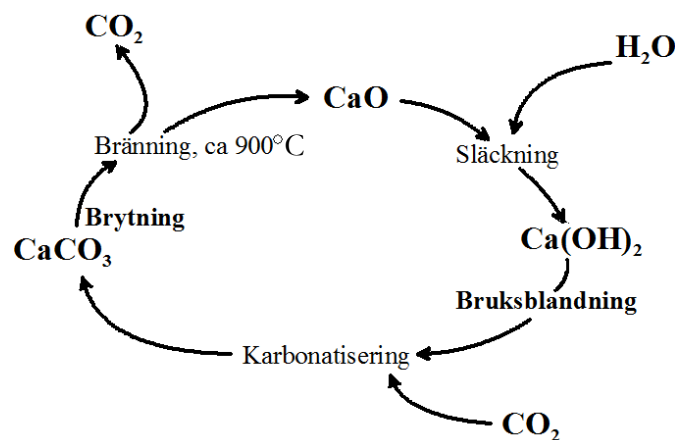
Gipsbruk har inte samma höga pH-värde som cementbruk och förmår därför inte skydda eventuell armering mot korrosion. Armering måste därför förses med ett separat korrosionsskydd. Gips har god brandbeständighet och gipsbruk används således som brandskydd, precis som gipsskivor.

5 Kalkbaserade bindemedel (luftkalk)

Kalk har använts som bindemedel i byggnadsmaterial i flera tusen år. Som bindemedel i bruk kan kalk delas upp i grupperna luftkalk respektive hydraulisk kalk. Luftkalk hårdnar genom reaktion med luftens koldioxid, se Figur 1. Hydraulisk kalk hårdnar dels genom reaktion med luftens koldioxid, dels genom reaktion med vatten.

5.1 Bränning

Första steget i framställningen av bindemedlet kalk består i att kalksten (kalciumkarbonat; CaCO_3) bryts ur berggrunden och bränns vid ca 900°C ($700\text{--}1100^\circ\text{C}$). Vid bränningen drivs koldioxid (CO_2) ut ur kalkstenen. Den återstående resten är en fast men mycket porös ”sten” av kalciumoxid; CaO . Genom att tillsätta vatten till kalciumoxiden får man kalciumhydroxid; $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Det är denna kalciumhydroxid som sedan används som bindemedel i bruk. Det slutliga hårdnandet sker genom att kalciumhydroxiden reagerar med koldioxid från omgivande luft och omvandlas till kalciumkarbonat, så kallad karbonatisering. Därmed har alltså kalciumkarbonatet återbildats. Bruket har nu hårdnat fullt ut.



Figur 1: Kalkens kretslopp: Från kalciumkarbonat i berggrunden (kalksten), via olika mellanformer, och tillbaka till kalksten i det hårdnade bruket.

De kemiska reaktionerna kan sammanfattas som

1. Bränning: $\text{CaCO}_3 + \text{värme} \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
2. Släckning: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2$
3. Lösning av koldioxid i vatten: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$
4. Karbonatisering: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

Enligt reaktionerna ovan hårdnar bindemedlet kalk genom reaktion enbart med luftens koldioxid. Sådant kalkbindemedel kallas därför luftkalk. Det finns även kalkbindemedel där en del av hårdnandeprocessen sker genom reaktion med vatten, så kallade hydrauliska bindemedel. Dessa beskrivs längre ned i texten.

5.2 Släckning

Den brända kalken, CaO, omvandlas till kalciumhydroxid, Ca(OH)₂ genom att vatten tillsätts; kalken släcks. Denna släckning kan ske på två principiellt olika sätt: Vid s.k. torrsläckning tillsätts en precist avvägd mängd vatten vilket ger kalciumhydroxid i form av ett fint, vitt pulver. Alternativt kan man våtsläcka kalken, vilket innebär att man släcker den brända kalken med ett kraftigt överskott av vatten. Kalciumhydroxiden bildas då istället som en välling, eller kalkdeg¹. Genom att ständigt hålla den våtsläckta kalken våt kommer den inte att karbonatisera, och den kan därför lagras under mycket lång tid. Under lagringstiden löses klumpar av kalk upp av vattnet och pastan blir med tiden alltmer homogen, smidigare och jämnare i konsistensen, med mindre tendens till grynighet. Våtsläckt kalk får därmed nästan tixotropa egenskaper, medan torrsläckt kalk ger en bindemedelspasta som är kortare i konsistensen, dvs inte lika plastiskt formbar.

Utöver dessa två renodlade huvudprinciper för släckning förekommer även varianterna jordsläckning (i markgravar) och stukasläckning. Grundprincipen är densamma, men jordsläckt respektive stukasläckt kalk kan ge bruk med något annorlunda egenskaper, se Balksten (2005) samt Eriksson (2015).

Den bildade kalciumhydroxiden består av mycket fina partiklar: enligt Czernin (1969) är partiklarna av storleksordningen 2 µm. Detta innebär att partiklarna i kalken är mindre än i Portlandcement och det är detta som gör att kalkbruket får god arbetbarhet, smidighet och liten vattenseparation. Partiklarna har dock en väsentlig storleksspridning, vilken varierar med bland annat kalkstenens ursprung, bränningsteknik och släckningsteknik. Detta innebär att kalkens egenskaper kan variera betydligt mellan olika fabrikat.

5.3 Hårdnandeprocessen

Luftkalkbruket hårdnar i två skilda processer: Först sker en torkning genom att vattnet dels sugas in i underlaget, dels avdunstar. Därvid packas kalkkornen samman av kapillära krafter och binder ihop fysiskt med varandra, ungefär som lera. Detta får kalkbruket att styvna till. Den tidiga hållfasthet som skapas av denna inledande torkning gör det möjligt att mura med kalkbruk. Vid bortsugning av vatten till murstenarna skapas den kontakt mellan sten och bruk som lägger

¹ Släckningen skapar ett stort värmeöverskott, vilket kan få släckvattnet att koka, varpå det kalkhaltiga vattnet kan stänka omkring. Eftersom kalkens höga pH-värde gör den mycket frätande, speciellt i kombination med den höga temperaturen, måste man därför utföra släckningsarbetet med tillbörlig försiktighet.

grunden för den slutliga hållfastheten. Det är därför viktigt att murstenen inte rubbas ur sitt läge efter att bortsugning av vatten har börjat; ”lagd sten ligger!”.

Den första torkningen medför en kraftig krympning av bruket. Detta sker inom något till några få dygn, beroende på de klimatiska förutsättningarna. Eftersom bruket då ännu inte har uppnått någon betydande hållfasthet, spricker det inte utan dras i stället samman; dess volym minskar. Grov ballast kan då medföra att det uppstår viss sprickbildning inne i bruket. Genom att komprimera bruket eller arbeta ihop eventuella sprickor efter att denna krympning är avslutad, men innan någon egentlig hållfasthet har uppnåtts, kan man eliminera en stor del av dessa sprickor.

Efter den inledande torkningen börjar det egentliga hårdnandet som består i att den släckta kalken reagerar med luftens koldioxid och återbildar kalciumkarbonat (kalksten). Processen kallas karbonatisering. För att karbonatiseringen skall kunna ske krävs att koldioxiden är löst i vatten (då kallad kolsyra). Detta betyder att karbonatiseringen inte kan ske om bruket är alltför torrt. En relativ fuktighet i intervallet 50-80% är nödvändig och karbonatiseringen sker som bäst vid ca 65-75%RF. Detta ställer krav på att bruket skyddas mot såväl väta som uttorkning tiden närmast efter att putsning utförts, och att det hålls lagom fuktigt genom t.ex. mycket försiktig vätning med vattendimma. Vid goda förhållanden kan man räkna med att en normal puts karbonatiserar tvärs igenom inom några månader. Observera att kalkbruket inte får hållas så vått att koldioxid inte kan komma in till kalciumhydroxiden! Av detta skäl bör man även undvika att putsa med luftkalkbruk alltför sent på säsongen, dvs inte alltför sent på hösten, eftersom detta ökar risken för dåligt hårdnande vilket kan leda till beständighetsproblem.

Karbonatiseringen går snabbare ju porösare bruket är, eftersom detta underlättar för koldioxiden att komma in i bruket, till den oreagerade kalken. Porositeten uppstår under det första skedet då blandningsvattnet avgår, dvs då bruket torkar. Eftersom torkningen beror dels av förhållandet mellan underlagets sugförmåga och brukets förmåga att hålla kvar vatten, dels av det omgivande klimatet, kommer dessa faktorer att påverka brukets slutliga kvalitet, t.ex. i form av brukets tryckhållfasthet. Feta bruk, med stor andel bindemedelspasta, blir mindre porösa än magra bruk. Feta bruk i mycket grova konstruktioner kan därför vara oreagerade ännu efter flera hundra år.

5.4 Luftkalkbrukets egenskaper

Det hårdnade luftkalkbrukets fysikaliska struktur och slutliga egenskaper är inte möjliga att förutsäga på samma säkra vis som för cementbruk. Detta beror dels på att kalken skiljer sig från produkt till produkt i högre grad än vad cement gör, dels på att den slutliga strukturen påverkas av det färska brukets fukttekniska samverkan med underlaget, av ballastgraderingen och av det omgivande klimatet, eftersom dessa faktorer avgör i vilken mån kalkpastan packas samman i bruket vid den första torkningen. Dessutom kan strukturen påverkas av hur hantverket utförs; hur tjocka skikt man lägger på, om man komprimerar ihop bruket efter den första torkningen, mm. Även kalkens ursprung har stor betydelse, där en kalk från ett visst geografiskt läge kan skilja sig avsevärt från en kalk från ett annat geografiskt läge.

Jämfört med hårdnad cementpasta är det hårdnade (karbonatiserade) kalkbruket relativt grovporöst. Karbonatkristallerna och porerna kan ses under mikroskop. Detta medför också att de fuktbetingade rörelserna i kalkbruket är relativt små (mindre än i cementbruk), vilket är typiskt för grovporösa, oorganiska byggnadsmaterial eftersom det kapillära undertrycket blir mindre i grova porer än i fina porer.

Luftkalkbruket har väsentligt lägre hållfasthet än cementbruk; ca 0,5-3 MPa. Även dess elasticitetsmodul är lägre än för cementbruk. Kalkbruket är alltså mindre styvt, och det bygger därför inte upp lika stora spänningar som cementbruk vid eventuella tendenser till rörelser. Töjbarheten före brott är dock ungefär densamma. Kalkbruk är således inte mer elastiskt² än cementbruk, men tack vare olikheterna i mekaniska egenskaper kommer sprickbildningen i kalkbruk och kalkputs att bli fördelad på många, fina sprickor medan den i cementbruk blir fördelad på några få, grova sprickor.

Kalciumkarbonatet som bildas genom karbonatiseringen är inte helt vattenfast, se Figur 2. Det innebär att kalkbruk som ständigt eller alltför ofta utsätts för vatten kan komma att lösas upp.



Figur 2: Exempel på hur kalkbruk löses upp då det ständigt utsätts för rinnande vatten: Bakom skottgluggarna i murens övre del finns en gångbrygga. Denna avvattnas via öppningar i murverket. Vattnet som rinner ut löser kalkbruket. (Colmars, Frankrike)

5.4.1 Dödbränd kalk

Om bränningen sker vid alltför hög temperatur kommer en del av kalken att börja sintra, dvs partiellt smälta. Detta medför att den färdiga produkten kommer att innehålla en del korn av kalciumoxid med mycket tät yta. Dessa korn tar inte upp släckningsvattnet, och förblir därmed osläckta i torrsläckt kalk. Dessa korn kallas därför dödbrända. Släckningen kan istället komma att ske efter att man har applicerat ett bruk av den torrsläckta kalken. Eftersom släckningen medför en volymökning finns stor risk att de dödbrända kornen då spränger sönder det hårdnade bruket. Vid all framställning av luftkalk måste man därför begränsa bränningstemperaturen, och sedan även försöka sikta bort de dödbrända korn som eventuellt ändå uppstår. Bruk som beretts av länge lagrad, våtsläckt kalk löper mindre risk för kalksprängningar, eftersom de dödbrända kornen har möjlighet att hinna släckas under lagringstiden.

² Elasticitet avser ett materials förmåga att återgå till ursprunglig form efter en töjning. Begreppet misstolkas ofta som ett mått på hur mycket materialet kan töjas innan det brister. Den förmågan kallas istället just töjbarhet, eller seghet.

5.4.2 Kalkutfällningar

Kalkutfällningar på den färdiga ytan kan uppstå om det finns kvar icke karbonatiserad kalk som kan transporteras ut till ytan i samband med en fukttransport i bruket. När kalken når ytan reagerar den snabbt med luftens koldioxid och avsätts som kalkkristaller (kalciumkarbonat) på ytan. Problemet uppstår alltså om putsen utsätts för rinnande vatten innan karbonatiseringen (hårdnandet) har kommit långt nog. Kalkutfällningarna missfärgar ytan och sitter hårt fast (kalksten!). Utfällningarna kan tas bort genom försiktig tvättning med syra.

På grund av kalkens begränsningar vad gäller säsongberoende och hållfasthetstillväxt har kalken i Sverige kommit att trängas undan av Portlandcement efter andra världskriget. Även Portlandcement har dock visat sig ha vissa begränsningar som bindemedel i puts och i murverk och därför har intresset för kalk som bindemedel återigen ökat, särskilt i samband med renovering av äldre byggnader med kalkbaserade bruk, se t.ex. Hidemark & Holmström (1984).

6 Hydrauliska kalkbindemedel

Som beskrivits ovan så hårdnar luftkalkbruk under inverkan av den koldioxid som finns i luften. Det finns även bindemedel som främst hårdnar genom reaktion med vatten. Dessa kallas hydrauliska bindemedel, och de två vanligaste är hydraulisk kalk och Portlandcement. Dessa bindemedel bygger på att kalken först, tillsammans med kiselsyra (SiO_2), bildar kalciumsilikat, som sedan, tillsammans med vatten, bildar *kalciumsilikathydrat*. Detta är en extremt finfördelad, icke-kristallisk reaktionsprodukt, s.k. gel, vanligtvis kallad CSH-gel. Denna gel ger de hydrauliska produkterna en betydligt högre hållfasthet och beständighet mot vattenpåverkan än vad luftkalk kan ge.

Kalciumsilikathydratet kan fås att bildas på två helt olika sätt:

- Genom att blanda kalciumhydroxid ("släckt kalk") med en lämplig, reaktiv kiselsyra och vatten kan kalciumsilikathydrat bildas vid normal temperatur. Detta kallas "den kalla vägen".
- Genom att bränna en lämplig blandning av kalk och kiselsyrahaltigt material vid hög temperatur skapas först vattenfri *kalciumsilikat* som sedan, efter avsvälning och finmalning, kan reagera med vatten och bilda kalciumsilikathydrat.

6.1 Puzzolankalk, Romancement

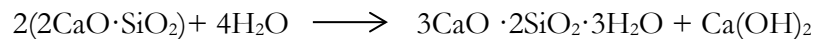
Det första sättet att skapa kalciumsilikat, dvs "den kalla vägen", är den som utnyttjades av romarna för framställning av s.k. romancement, eller *puzzolansk kalk*. Härvid blandade man in kiselsyrahaltigt material i vanligt kalkbruk. Detta kiselsyrahaltiga material kunde vara finmalt tegelkross, som ju består av bränd lera med dess innehåll av bland annat kiseldioxid. Man använde även en speciellt lämplig vulkanaska från byn Puzzuoli, och denna typ av tillsatser har därför fått namnet puzzolaner. Den puzzolanska kalken ger en slutprodukt med högre hållfasthet och bättre vattenbeständighet än luftkalkbruk. För att framställning på den kalla vägen skall fungera krävs att det kiselsyrahaltiga materialet är mycket finfördelat och tillräckligt reaktivt.

6.2 Bränd hydraulisk kalk

I den andra varianten, dvs bränning vid hög temperatur, bildas kalciumsilikatet ur en smälta av delkomponenterna. Denna procedur används för framställning av hydraulisk kalk och Portlandcement, och innebär bland annat att man inte är beroende av att ha tillgång till reaktiv kiselsyra.

Grundprincipen här är alltså att först skapa vattenfri kalciumsilikat som sedan, i ett bindemedel, blandas med vatten och då bildar kalciumsilikathydrat. Den enklaste formen av kalciumsilikat, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (även betecknad CS^3), framställs genom att bränna en blandning av ungefär lika delar kalciumoxid och kiselsyra (CaO respektive SiO_2). Denna förening är dock obenägen att reagera med vatten. Den är i själva verket så stabil att den förekommer som ett naturligt mineral, kallat wollastonit.

Med en något mer kalkrik blandning av kalk och kiselsyra bildas vid bränningen dikalciumsilikat med formeln $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2^3$, även kallad *belit*. Denna är tydligt mer benägen att reagera med vatten enligt följande:



Det är reaktionsprodukten trikalciumdisilikathydrat, eller $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, som bildar den extremt finfördelade och mycket hållfasta gelen. Reaktionen är dock långsam (veckor och månader).

Framställning av belit (C_2S) ur en smälta av de rena reaktanterna kalciumoxid och kiseldioxid kräver mycket hög temperatur; omkring 2000°C . Om reaktanterna föreligger i mycket finfördelad och mycket välblandad form kan dock belit bildas även vid lägre temperatur. Detta sker då i fast fas, dvs ingen smälta behövs. Vissa jordar, s.k. märglar, innehåller en sådan lämplig blandning av kalksten och lera. Genom att bränna denna märgel vid cirka 1200°C skapas både den kalk som reagerar med koldioxid, och det dikalciumsilikat (belit) som beskrivits ovan. På så sätt får man alltså en produkt som har förmåga *både* till hydrauliskt hårdnande *och* till hårdnande genom karbonatisering. Denna produkt kallas *hydraulisk kalk*, eller bränd hydraulisk kalk. Slutprodukten får bättre hållfasthet och även bättre tålighet mot vatten än vad luftkalkbruk har. Eftersom det vid bränningen bildas nästan enbart belit och ingen eller nästan ingen alit (se nedan), blir den hydrauliska hårdnandeprocessen långsam.

Beroende på märgelns proportioner av kalciumkarbonat respektive lermineraller, fås en mer eller mindre hög andel s.k. *fri kalk* (CaO) i den brända produkten. Denna fria kalk är alltså kalk som blivit över istället för att användas till att bilda kalciumsilikat, och den behöver därför släckas för att sedan kunna karbonatisera, och även för att den inte ska släckas senare, då bruket blandas med vatten (vilket skulle leda till söndersprängning inifrån). Denna släckning måste göras med en noggrant avpassad mängd vatten, så att de hydrauliska komponenterna inte reagerar redan vid släckningen. Den kalciumhydroxid som bildas vid släckningen är ett lika fint pulver som i de rena kalkbruken, vilket bidrar till att ge det hydrauliska kalkbruket smidiga egenskaper. Mycket kalkfattiga leror ger upphov till produkter som inte behöver släckas. Dessa blir dock grovkorniga och måste finmalas för att reaktionen med vatten skall ske rimligt snabbt för att passa i modernt byggande.

6.3 Naturlig hydraulisk kalk

Hydraulisk kalk kan vara en s.k. naturlig hydraulisk kalk (Natural Hydraulic Lime, NHL, på engelska), vilket syftar på att den hydrauliska kalken är gjord av en kombination av kalk och leror såsom den har hittats naturligt, i kalkbrottet. En hydraulisk kalk (Hydraulic Lime, HL) som inte är ”naturlig” består istället av kalk där man har blandat in en viss del lera (och i vissa fall en liten

³ Beteckningen $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ används för att tydligt visa att sammansättningen består av kalciumoxid respektive kiseldioxid (kiselsyra). Ett alternativt sätt att beteckna sammansättningen kunde vara Ca_3SiO_5 , men den beteckningen skulle göra ursprunget och sammanhangen oklarare. Cementkemister använder ett beteckningssystem så att kalciumsilikatet betecknas CS, dikalciumsilikat C_2S (belit) och trikalciumsilikat C_3S (alit).

andel Portlandcement!). Dessa bindemedelsbeteckningar anges ofta tillsammans med en siffra som ger en indikation om vilken hållfasthet som kan uppnås, t.ex. är NHL5 en naturlig hydraulisk kalk som kan ge en tryckhållfasthet över 5 MPa efter 28 dygn (SS-EN 459).

Eftersom råvarorna som används till naturlig hydraulisk kalk varierar från plats till plats, och eftersom sammansättningen även påverkar utbytet i bränningsprocessen, får naturlig hydraulisk kalk olika egenskaper beroende på sitt ursprung. Produkten är således inte lika väldefinierad som Portlandcement. Mängden hydrauliskt hårdnande komponenter blir avgörande för hållfasthetstillväxten och för sluthållfastheten, och mängden kalk blir avgörande för brukets arbetbarhet.

7 Portlandcement

Portlandcement är det som vi i dagligt tal kallar ”vanligt” cement och är det dominerande bindemedlet i betong. I Sverige började Portlandcementet användas som bindemedel i mur- och putsbruk under första halvan av 1900-talet och blev dominerande efter andra världskriget. Portlandcementet utvecklades under tidigt 1800-tal och fick sitt namn av att den härdade produkten utseendemässigt liknar naturlig sten som finns på ön Portland utanför Dorset i England. Som alternativ till Portlandcement finns aluminatcement, vitcement och flera andra specialcement.

Traditionell tillverkning av Portlandcement medför stora utsläpp av koldioxid och ger därmed stor klimatpåverkan. I syfte att minska cementtillverkningens klimatpåverkan tillverkas idag bindemedel som utöver Portlandcement även kan innehålla reaktiva restmaterial som mald masugnsslagg eller flygaska från kolförbränning.

7.1 Tillverkningsprocessen

Portlandcement framställs på liknande sätt som bränd hydraulisk kalk, dvs genom bränning av en lämplig blandning av kalciumkarbonat och kiselsyrhaltigt material. Vid framställning av Portlandcement används dock en mer kalkrik blandning av kalk och kiselsyra, vilket ger slutprodukten trikalciumsilikat; $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, även kallad *alit*. Alit är mer benägen att reagera med vatten än belit (jfr bränd hydraulisk kalk ovan), och reaktionen sker inom några dagar till veckor. Slutprodukten är dock densamma (trikalciumdilikathydrat). Ett normalt Portlandcementet innehåller både alit och belit. Det är bland annat genom att variera andelarna av dessa olika typer av kalciumsilikater som man kan skapa cement med olika reaktionshastigheter.

Framställning av trikalciumsilikat (alit) ur kalk och kiselsyra kräver mycket hög temperatur (cirka 2000°C). Genom att tillsätta ett flussmedel kan dock reaktionen fås att ske även vid måttligare temperatur (ca 1450°C). Vid cementproduktion utgörs detta flussmedel av den järnoxid och aluminiumoxid som ingår i råvarorna. För att få bästa möjliga sammansättning tillsätter man de olika lermineralerna även i andra former än bara den lokala leran. Det kan vara till exempel bauxit (som innehåller aluminiumoxid), skiffer, mm.

I brännprocessen förekommer alltså en smälta, och därmed kommer slutprodukten ut i form av sintrade, hårda stycken. Dessa mals sedan till mycket fint pulver. Man tillsätter sedan 4-5% viktsprocent gips (Ca_2SO_4) för att förhindra att cementet härdar alltför snabbt vid kontakt med vatten. Därmed är Portlandcementet färdigt.

Eftersom brännprocessen vid tillverkning av Portlandcement sker vid en så hög temperatur att kalciumoxid kan sintra och bilda dödbrända korn (se 5.4.1), måste mängden kalk i råvarorna

kontrolleras och regleras mycket noggrant så att verkligen all kalk förbrukas till framställningen av de olika kalciumsilikaterna. Skulle någon fri kalk bli kvar i cementet uppstår, precis som för kalkbruken, risken för svällning och söndersprängning i den färdiga konstruktionen.

Utöver alit och belit innehåller Portlandcement även reaktiva oxider av järn och aluminium. Även dessa bidrar till hållfastheten. Se vidare Czernin (1969) respektive Ljungkrantz et al. (1994)

7.2 Portlandcementets hårdnande och strukturutveckling

När Portlandcementet blandas med vatten startar de kemiska reaktionerna omedelbart. Efter någon halvtimme inträffar en ”paus” på några timmar, och sedan startar den egentliga hårdnandeprocessen. Det är fram till slutet av denna paus som man har möjlighet att bearbeta materialet. Den verkliga hållfasthetstillväxten startar alltså efter några timmar och är huvudsakligen klar på en månad för s.k. standardcement.

Belitens reaktion med vatten har visats ovan. Alitens reaktion sker enligt följande



Portlandcement hårdnar alltså genom en reaktion med vatten, inte genom torkning och inte genom reaktion med luftens koldioxid. För att ytterligare poängtera detta brukar man kalla hårdnandeprocessen för hydrataion. Om fukten torkar bort i ett tidigt skede upphör cementreaktionen och hållfasthetsutvecklingen uteblir. Sådan tidig torkning kan ske dels genom avdunstning till omgivande luft (särskilt vid torr och blåsig väderlek), dels genom bortsugning av blandningsvatten till underlaget. Skulle sådan torkning ske blir slutresultatet ett bruk med dålig sammanhållning och dålig vidhäftning. Nypåslagen cementhaltig puts måste därför skyddas mot torkning. Ofta måste man med aktiva insatser hålla putsen våt, t.ex. genom besprutning med fin vattendimma. Observera att här är det fråga om att hålla bruket kapillärt mättat, till skillnad från kalkbruk där det gäller att bibehålla en relativ fuktighet om cirka 60-80%.

När cementet blandas med vatten sprids cementkornen ut som en dispersion. Beroende på hur blandningsförhållandet mellan cement och vatten är, blir avståndet mellan cementkornen mer eller mindre stort. Blandningsförhållandet anges som kvoten av vattenmängden och cementmängden och kallas för vattencementtal, vct:

$$vct = \frac{W}{C}$$

där W betecknar mängden vatten [kg] och C mängden cement [kg]. Ju lägre vct är, desto tätare ligger cementkornen, desto mindre blir den slutliga porositeten och desto högre blir hållfastheten.

Vid den kemiska reaktionen med vatten börjar reaktionsprodukter växa ut från cementkornen. Om cementkornen ligger tätt nog (lågt vct) kommer dessa utväxter att nå varandra, och kornen börjar då låsas ihop; en hållfasthet skapas. Ju lägre vct är, desto tidigare kommer hållfasthet att börja skapas. Det utrymme som blir kvar mellan kornen när reaktionen är avslutad kommer att vara tomt, och utgör pastans så kallade kapillärporositet.

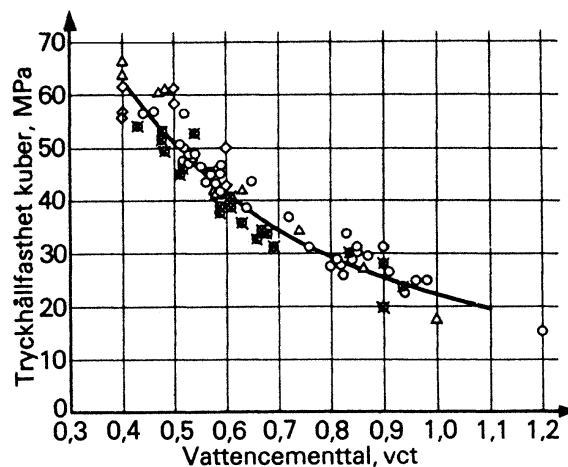
För att ange hur långt cementreaktionen har gått används benämningen hydrataionsgrad, betecknad α . Vid starten, när inget cement har reagerat, är hydrataionsgraden $\alpha=0$. Vid fullt avslutad reaktion är $\alpha=100\%$.

Med hjälp av vct och hydratationsgraden kan nu cementpastans totala porositet beräknas som

$$P_{pasta} = \frac{vct - 0,19\alpha}{0,32 + vct}$$

Husbyggnadsbetong kan ha vct $\approx 0,35-0,60$. Vid vct 0,50 blir pastans porositet i sådan betong därmed ungefär 40%. I cementbruk för putsning kan vct vara större än 1, och därmed blir även cementpastans porositet betydligt mycket högre.

Pastans hållfasthet, och även brukets eller betongens hållfasthet, minskar med ökande porositet. I figur 3 visas hur tryckhållfastheten för betong beror av vattencementtalet vid nästan fullständig hydrataion ($\alpha \approx 1$). Tryckhållfastheten påverkas även av ballasttyp och ballastgradering, men inverkan av dessa är mycket liten jämfört med inverkan av vattencementtalet.



Figur 3: Tryckhållfastheten för betong som funktion av vattencementtalet (Ljungkrantz et al., 1994).

7.2.1 Samspel med underlaget i tidigt skede

För betong avgörs vattencementtalet och därmed betongens egenskaper av proportionerna i betongblandningen. För mur- och putsbruk avgörs vattencementtalet i hög grad av hur underlaget förmår suga bort vatten ur det helt färska bruket. Följden är att ett och samma bruk kan ge en slutprodukt med olika egenskaper beroende på vilket underlag det har använts på (här har t.ex. underlagets porositet och porstorleksfördelning avgörande betydelse), och på hur fuktigt underlaget var då bruket applicerades, eftersom vatteninnehållet påverkar underlagets förmåga att suga bort vatten ur bruket.

7.2.2 Krympning och sprickning i cementbundna material

När cementets di- och trikalciumsilikater reagerar bildas den extremt finfördelade gel som beskrevs ovan. Även en stor del av kapillärporositeten (hålrummen mellan gelpartiklarna) utgörs av mycket fina porer. När vatten går in i eller ut ur dessa fina porer kommer det att uppstå mycket stora dragkrafter i den hårdnade cementpastan, och det uppstår därför krymp- respektive svällningsrörelser. Detta är typiskt för mycket finporösa, oorganiska material. Dessa rörelser är därför större för de finporösa cementbundna produkterna än för de grovporösa kalkbundna. De krympkrafter som uppkommer vid torkning efter att härdningen verkligen kommit igång i ett cementbaserat material, är så stora att materialets draghållfasthet lätt överskrids, varvid materialet spricker. Dessa sprickor bildas alltså i det redan hårdnade materialet, varför det inte är möjligt att

åtgärda sprickorna genom efterkomprimering, så som man kan göra för kalkbruk i ett tidigt skede.

7.3 Kalkcementbruk

Kalkcementbruk (KC-bruk) har ett bindemedel som är en blandning av luftkalk och Portlandcement. Kalken ger bruket en bra arbetbarhet medan cementet säkerställer en bra hållfasthet. Ju större andel cement bruket innehåller desto högre hållfasthet får det (förutsatt att det har tillräcklig tillgång till fukt). Allteftersom cementet härdar, blir bruket tätare med avseende på fukt- och gastransport. Tillträdet för koldioxid blir därmed allt svårare, och kalken kan bli kvar i icke karbonatiserat tillstånd under mycket lång tid. Kalken får alltså i sådana bruk betydelse huvudsakligen för brukets arbetbarhet, och endast ytterst litet för dess mekaniska egenskaper. Kalkens positiva effekter på arbetbarheten börjar märkas redan vid mycket liten andel kalk i blandningen (ca 10%).

På grund av den täta struktur som cementet bildar blir kalkcementbruk tätare mot fukttransport än rena kalkbruk. Jämfört med rent kalkbruk kan kalkcementbruk därför försvåra uttorkning av underliggande material, vilket kan medföra en ökad risk för skador på bakomliggande konstruktioner av trä och annat organiskt material om fukt kommer in till dessa material, t.ex. genom uppsugning underifrån eller via sprickor i putsen. Variationen i fuktegenskaper varierar starkt med brukets sammansättning och vid val av de ingående komponenterna bör hänsyn tas till underlagets sammansättning och egenskaper.

7.4 Murcement

Murcement består av Portlandcement som malts ihop med kalksten eller dolomit. Kalkstenen (eller dolomiten) har inte bränts och är här alltså inte reaktiv. Däremot ger den pastan och därmed bruket en bättre arbetbarhet och minskad vattenseparation. Man får alltså något av en kombination av kalkbrukets egenskaper och cementbrukets egenskaper. Bindemedelskemin blir identisk med den för Portlandcementet.

8 Skillnader mellan kalk- och cementbaserade bruk

Följande är en kort sammanfattning av de olika bindemedlens kemi och egenskaper:

Cementbaserade bruk:

- ger sträva bruk med relativt stor vattenseparation
- är hydrauliska och kräver fukt för att härda
- måste hållas fuktiga (våta) fram till att härdningen gått tillräckligt långt
- krymper måttligt i tidigt skede, men kan drabbas av krympsprickor senare
- ger hög hållfasthet och hög elasticitetsmodul (hög styvhet)
- ger en så gott som fullständigt vattenfast slutprodukt
- är mindre beroende av hur hantverket utförs

Kalkbaserade bruk:

- ger smidiga bruk med god arbetbarhet och liten vattenseparation.
- kräver luft (koldioxid) för att härda
- kräver viss fukt för att härda; härdar snabbast vid ca 65-75% relativ fuktighet
- krymper kraftigt vid den första torkningen (före det egentliga hårdnandet) men sprickor kan arbetas ihop medan bruket är plastiskt
- ger låg hållfasthet och låg elasticitetsmodul
- löses upp (urlakas) om det ständigt eller alltför ofta utsätts för rinnande vatten.
- är mer beroende av hur hantverket utförs

9 Referenser

- Balksten, K. (2005). *Kalkputs : porstrukturens betydelse för beständighet*. Chalmers tekniska högsk.
- Czernin, W. (1969). *Cementkemi för byggare*. Svenska cementföreningen.
- Erenmalm, T., & Leijon, U. (2013). *Materialguiden, kapitel Gips*.
- Eriksson, J. (2015). *Bruk av kalk och sand : ur ett hantverkligt perspektiv*. University of Gothenburg, Acta universitatis Gothoburgensis.
- Hantverkslaboratoriet. (2015). *Lerputs - Utbildningsmaterial om lera och lerputs*. Göteborgs Universitet.
- Hidemark, O., & Holmström, I. (1984). *Kalkputs 2 Historia och teknik : redovisning av kunskaper och forskningsbehov*. Riksantikvarieämbetet.
- Karni, J., & Karni, E. (1995). Gypsum in construction: origin and properties. *Materials and Structures*, 28, 92–100. <https://rdcu.be/cOdF7>
- Ljungkrantz, C., Möller, G., & Petersons, N. (1994). *Betonghandbok Material* (2. utg.). Svensk byggtjänst.
- Millogo, Y., Aubert, J.-E., Sere, A. D., Fabbri, A., & Morel, J.-C. (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. *MATERIALS AND STRUCTURES*, 49(11), 4583–4594. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>
- Minke, G. (2006). *Building with Earth - Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser — Publishers for Architecture.
- Nanz, L., Rauch, M., Honermann, T., & Auer, T. (2018). Impacts on the Embodied Energy of Rammed Earth Façades During Production and Construction Stages. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(1), 75–88. <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2786>