

## Historische mortels van de oude tijden tot de helft van de 19de eeuw

Lubelli, Barbara; Nijland, TG; van Hees, Rob

**Publication date**

2016

**Document Version**

Final published version

**Published in**

Mortels technisch en bouwhistorisch bekeken

**Citation (APA)**

Lubelli, B., Nijland, TG., & van Hees, R. (2016). Historische mortels van de oude tijden tot de helft van de 19de eeuw. In T. G. Nijland (Ed.), *Mortels technisch en bouwhistorisch bekeken: Syllabus TNO-NvMZ studiedag* (pp. 3-21). TNO.

**Important note**

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

**Takedown policy**

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

A microscopic image of a mortar cross-section. The image shows a matrix of brownish-yellow mortar with numerous light-colored aggregate particles of various sizes and shapes. Some particles are circular, while others are angular. A scale bar in the top right corner indicates a length of 0.5 mm.

0.5 mm

**Mortels technisch en  
bouwhistorisch bekeken**

***TNO-NVMz studiedag  
20 januari 2016, Delft***



## Inhoud

Programma	2
Lubelli, B., Nijland, T.G. & Hees, R.P.E. van <b>Historische mortels van de Oudheid tot in de 19<sup>e</sup> eeuw</b>	3
Quist, W.J. <b>De zaak Van der Kloes: Vroeg-twintigste-eeuws mortelonderzoek in Delft</b>	22
Nijland, T.G. <b>Microscopisch onderzoek van mortels</b>	35
Naldini, S. <b>De historische en esthetische waarde van muur- en plafondafwerkingen</b>	51
Nijland, T.G. & Kipp, F. <b>Mortels van de Romeinen en een Roomse bisschop</b>	76
Hees, R.P.J. van <b>Steenreparatiemortels, eigenschappen, eisen en praktijkproblemen</b>	88
Overzicht TNO-NVMz studiedagen	97
Nederlandse Vereniging van Monumentenzorgers	98
Gebouwd erfgoed bij TNO	99

## Programma

- 9.30 - 10.00** Ontvangst
- 10.00 - 10.15** Opening - *Martin van Bleek, NVMz, Timo Nijland, TNO*  
*Barbara Lubelli, TNO, dagvoorzitter*
- 10.15 - 10.45** Historische mortels van de Oudheid tot in de 19<sup>e</sup> eeuw –  
*Barbara Lubelli, TNO*
- 10.45 - 11.15** De zaak Van der Kloes: Laat-negentiende-eeuws  
mortelonderzoek in Delft – *Wido Quist, TU Delft*
- 11.15 - 11.45** Koffie / thee
- 11.45 - 12.15** De Ruwe Pleisters van de Van Nellefabriek – *Mariël*  
*Polman – Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed*
- 12.15 - 12.30** Discussie
- 12.30 - 13.30** Lunch
- 13.30 - 14.00** Microscopisch onderzoek van mortels – *Timo Nijland,*  
*TNO*
- 14.00 - 14.30** De historische en esthetische waarde van muur- en  
plafondafwerkingen – *Silvia Naldini, TU Delft*
- 14.30 - 15.00** Mortels van de Romeinen en een Roomse bisschop –  
*Timo Nijland, TNO*
- 15.00 - 15.30** Thee / koffie
- 15.30 - 16.00** Steenreparatiemortels, eigenschappen, eisen en  
praktijkproblemen – *Rob van Hees, TNO*
- 16.00 - 16.15** Discussie
- 16.15 - 16.30** Transfer naar TNO MEC-laboratorium
- 16.30 - 18.00** Borrel

## Historische mortels van de Oudheid tot in de 19<sup>e</sup> eeuw

Barbara Lubelli<sup>1,2</sup>, Timo G. Nijland<sup>1</sup> & Rob P.J. van Hees<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> TNO, <sup>2</sup> Faculteit Bouwkunde, TU Delft

Vanaf de Romeinse tijd tot in de 19<sup>e</sup> eeuw is historisch metselwerk in monumenten en ander gebouwd erfgoed vaak vervaardigd met kalk- of kalk-puzzolaanmortels. Sommige kalken zijn van nature in meer of mindere mate hydraulisch. In de 19<sup>e</sup> eeuw begint wetenschappelijk onderzoek naar hydraulisch bindmiddelen en doen natuurlijke hydraulisch kalk, Portland cement en voorlopers daarvan hun intrede. Deze bijdrage geeft een beknopt overzicht van historische mortels, met bijzondere aandacht aan hun gebruik in Nederland.

### Inleiding

Mortel is een mengsel van één of meerder anorganische bindmiddelen, toeslag, water en soms een kleine hoeveelheid additieven. Een bindmiddel is een materiaal dat, door zijn hechtende en bindende eigenschappen, een samenhangend geheel van (minerale) deeltjes kan maken. Er bestaan verschillende soorten bindmiddelen. Een eerste classificatie kan worden gemaakt tussen luchthardende bindmiddelen, die in de lucht kunnen verharden, en hydraulische bindmiddelen, die water nodig hebben om te verharden en dus geschikt zijn voor constructies in water (Fig. 1). De eerste categorie omvat luchtkalk en gips; de categorie hydraulische bindmiddelen omvat (natuurlijke) hydraulische kalk, kalk-puzzolaan, kalk-cement-puzzolaan en de verschillende soorten cement. Figuur 2 geeft een kort overzicht van het gebruik van bindmiddelen in de tijd.

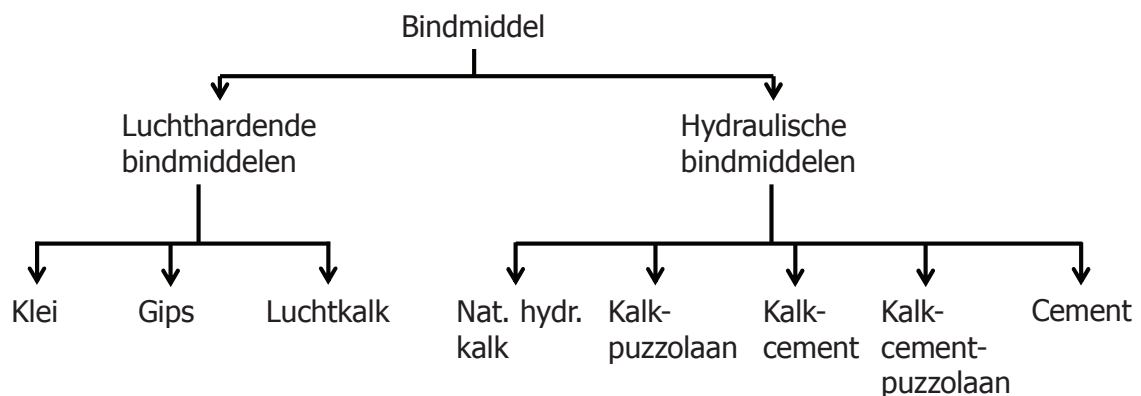


Fig. 1. Classificatie van bindmiddelen.

## TNO – NVMz studiedag

### Mortels technisch en bouwhistorisch bekeken

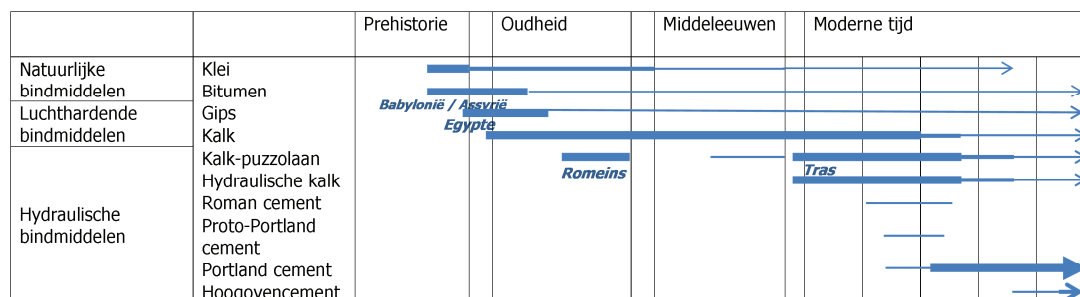


Fig. 2. Historisch overzicht van het gebruik van verschillende bindmiddelen in de tijd (Aangepast naar: Van Balen et al. 2003).

Naast het bindmiddel is de toeslag de belangrijkste component van een mortel, die de eigenschappen daarvan sterk kan beïnvloeden. Toeslag wordt gevormd door losse, korrelvormige materialen. Dit kunnen natuurlijk voorkomende (zee- of rivier-) zanden zijn, of gebroken en gemalen natuursteen of kunstmatige producten. De deeltjesgrootte varieert tussen 63 micrometer en 8 millimeter, maar is in de regel niet meer dan 2 millimeter. De toeslag kan kalk- of kiezelhoudend zijn. De rol van de toeslag is zowel om de mortel minder vet te maken en dus minder gevoelig voor scheurvorming tijdens het verharderen als om aan de mortel de nodige sterkte, hardheid en porositeit geven. De verhouding tussen bindmiddel en aggregaat in historische mortels wordt in het laatste deel van deze bijdrage besproken.

### Mortels in de Oudheid

#### *Bitumen, klei en gips*

Voor de uitvinding van kalkmortels waren bitumen, klei en gips de gebruikelijke bindmiddelen.

*Bitumen* is een kleverige, zwarte en zeer visceuze vloeibare of half-harde vorm van petroleum. Het is aanwezig in natuurlijke afzettingen en wordt tegenwoordig kunstmatig gemaakt. De hechting komt door de kleverige eigenschappen van het materiaal zelf. Natuurlijk bitumen werd al gebruikt in Mesopotamië om bakstenen te verbinden, vaak gemengd met leem, zand, slib of klei en/of stro; dit type mortel werd soms gebruikt bij gewone gebouwen, maar vaker bij prestigieuze constructies zoals de Ishtar poort in Babylon en zogenaamde ziggurats (tempeltorens) zoals in Ur, Aqarquf, Tchoga Zanbil (Connan 1999). Bitumen werd ook gebruikt als waterafstotende laag in waterreservoirs, waterleidingen, boten en allerlei soorten tanken. Later gebruikten de Romeinen bitumen ook als additief in mortels om de eigenschappen daarvan te verbeteren (Checova 2009).

Met *klei* wordt in dit verband een mengsel van kleimineralen en zand of slib bedoeld. Klei is gevoelig voor water en de sterkte van dergelijke mortels is matig. Zoals boven al gemeld, werd klei gemengd met zand en/of bitumen en/of slib al in het 4<sup>e</sup> millennium voor Christus gebruikt in Mesopotamië. Ook in het oude

Egypte werd klei gebruik als mortel, vaak in combinatie met baksteen (Ghorab et al. 1986), soms ook voor natuursteenconstructies als de Meidun pyramide uit 2600 v.Chr. (Regourd et al. 1988).

*Gips* is in veel Egyptische pyramides, bijvoorbeeld die van Cheops (2560-2540 v.Chr.) en Unas (2250 v.Chr.) als bindmiddel gebruikt (Regourd et al. 1988). De gips die gebruikt werd door de Egyptenaren was vaak onzuiver en bevatte ook kalk. De aanwezigheid van calciumcarbonaat in natuurlijke gipsvoorkomens, en daarmee ook in mortels, heeft sommige onderzoekers in het verleden wel doen concluderen dat de Egyptenaren al het gebruik van kalkmortels beheersten. Meer recente studies hebben duidelijk gemaakt dat in Egyptische constructies geen sprake is van kalkmortels tot de Romeinse tijd (Ghorab et al. 1986).

De voorkeur voor gips boven kalk komt doordat voor productie van gips lagere en dus makkelijker te bereiken, temperaturen nodig zijn dan voor kalk. Natuurlijk gips,  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , wordt verpoederd en verbrand in een ketel (het zogenaamde *calcineren*) tot het meeste chemisch gebonden water verdampt is. Wanneer nieuw water wordt toegevoegd aan dit poeder, neemt dit weer een deel water op en wordt hemihydraat (basaniet) gevormd,  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ . Er ontstaat een plastische massa, ook wel bekend als Parijs pleister, die makkelijk te verwerken is in verschillend vormen. Door verdere hydratatie verhardt deze massa opnieuw naar gips,  $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , de oorspronkelijke component van het natuurlijke gipsgesteente. Nadelen van gips zijn de beperkte sterkte en de matige oplosbaarheid in water. Niettemin zijn er resten van gipsmortels in zeer goede staat van conservering gevonden in Egyptische pyramiden die uit 2500-2600 voor Christus dateren.

#### *Kalk en kalk-puzzolaan*

Kalk is een term die vaak wordt gebruikt voor meerdere chemische verbindingen, een feit dat soms voor onduidelijkheid zorgt. Het proces van het maken van kalk bestaat uit verbranden van kalksteen of schelpen, beiden (hoofdzakelijk) bestaand uit calciumcarbonaat,  $\text{CaCO}_3$ , in kalkovens (Fig. 3). Het vrije kalk,  $\text{CaO}$ , die door het branden ontstaat, is ongebluste kalk, ook wel levende, bijtende of etskalk genoemd. Deze wordt geblust met water, waardoor portlandiet of kalkhydraat,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ontstaat. Blussen kan op twee manieren, droog of nat: bij droogblussen of lessen worden kluiten kalk besproeid met water, waarbij de kluiten steeds omgekeerd worden; er ontstaat een wit, vettig poeder. Bij nat blussen worden de kluiten kalk onder water gezet, waarbij eerst een kalkmelk ontstaat en uiteindelijk een taai deeg. De gebluste kalk verhardt in een mortel weer door reactie met  $\text{CO}_2$  uit de lucht, waarbij opnieuw calciumcarbonaat,  $\text{CaCO}_3$ , ontstaat (Fig. 4). De kalk wordt daarom luchtkalk genoemd. In het verleden werd steenkalk meestal nat geblust, terwijl schelpkalk, dat enige hydrauliteit heeft, altijd droog werd geblust.





Fig. 3. De 19<sup>e</sup> eeuwse kalkoven Wolfspad in Hahn bij Aken (restauratie 1987).

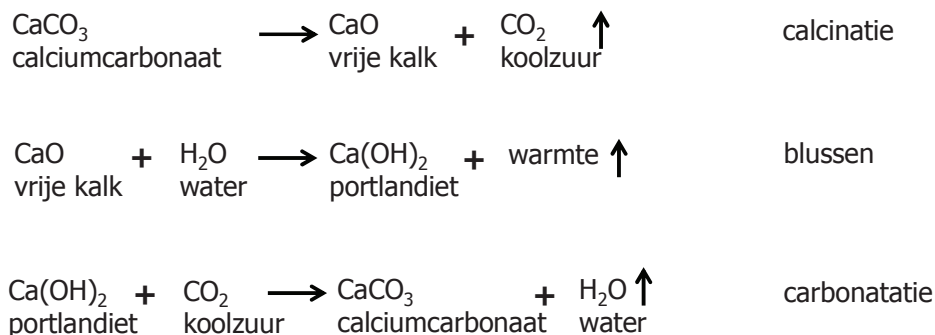


Fig. 4. De cycli van kalk.

Ondanks dat kalksteen al vroeg gebruikt was als bouw materiaal (bijvoorbeeld in de Egyptische pyramiden), werd de techniek om kalkmortels te produceren pas in de 6<sup>e</sup> eeuw voor Christus uitgevonden. Toen begon in Çatalhöyük in Klein-Azië (Delatte 2001) en in Griekland het gebruik van kalk in pleisters. De kalkmortel die destijds door de Grieken werd gebruikt, was vervaardigd op basis van kalk, water en fijn zand. Dit laatste was soms van vulkanische oorsprong (afkomstig van de eilanden Santorini en Nisiros), waardoor de mortel hydraulische eigenschappen kreeg. Eén van de oudste voorbeelden van kalk-puzzolaan mortel is de pleisterlaag van een waterreservoir van het ondergrondse aquaduct van Megara uit 550 v.Chr., in de 19<sup>e</sup> eeuw teruggevonden bij archeologische opgravingen (Fahlbusch 2008). Er zijn meerdere voorbeelden van puzzolane kalkmortels, ook uit latere periodes, in Griekse baden en cisternen gevonden: het gebruik van puzzolaan en het natuurlijk oplossen en rekristalliseren van calciumcarbonaat in de poriën en scheuren heeft aan deze mortels zeer goede duurzaamheid verleend (Stefanidou et al. 2014).

Ondanks het gebruik van kalk als bindmiddel in pleisters, werd metselmortel in die tijd nog altijd op basis van klei of gips vervaardigd. Het eerste bekende gebruik van metselmortel op kalkbasis dateert uit de 2<sup>e</sup> eeuw voor Christus. Hoewel de Grieken dus het bestaan van kalk- en kalk-puzzolaan mortels kenden,

zijn het de Romeinen die het gebruik van deze mortels naar hun hoogste niveau hebben gebracht. Een belangrijk verschil tussen de Griekse en de Romeinse architectuur is juist het gebruik van mortels: Terwijl in de Griekse constructies de samenhang wordt verkregen door de vorm van de natuursteenelementen en het gebruik van metalen doken, wordt deze in de Romeinse architectuur bereikt door de mortel.

Na de Grieken (500-300 v.Chr.) ontdekten ook de Romeinen rond 300 v.Chr. de mogelijkheden van puzzolaan (Elsen et al. 2013), dat ze *pulvis puteolanus* noemden, naar de naam van het stadje Puteoli, nu Pozzuoli, aan de voet van de Vesuvius, waarvan het materiaal vandaan kwam. Vitruvius (70/80 v.Chr. - 15 na Chr.) schrijft in hoofdstuk VI van zijn boek *De Architectura libri decem*: '*... Er is ook een soort poeder dat door natuurlijke processen verbazende resultaten geeft. Het is te vinden in de plaatsen rond de Vesuvius ... Dit materiaal geeft, wanneer met kalk en steenbrokken wordt gemengd, niet alleen sterkte aan alle soorten gebouwen, maar het wordt zelfs, wanneer het voor dammen in zee wordt gebruikt, hard onder water.*'

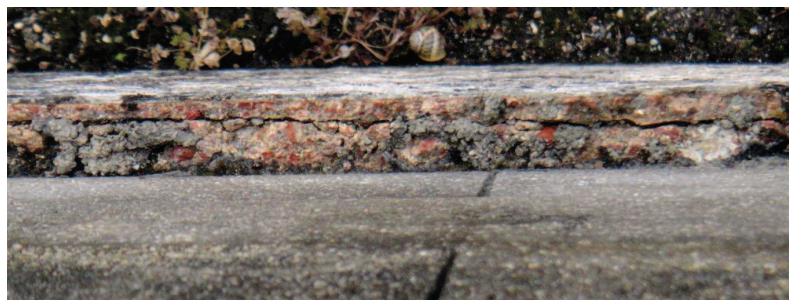
Deze pozzolanische mortel werd ook gebruikt in de zogenaamde *opus caementitium*, Romeins beton (Lamprecht 1986). Dit is een mengsel van een hydraulische bindmiddel bestaande uit kalk en puzzolaan met brokken natuursteen en/of baksteen. Romeins beton werd vaak gebruikt tussen als opvulling tussen paramenten van natuursteen of baksteen (Fig. 5) en had vaak, ook aangezien de dikte van deze binnenlaag, een constructieve functie. In enkele gevallen was dit Romeins beton zelfs gewapend: De thermen van Caracalla in Rome zijn één van de weinige voorbeelden waar een koperen elementen werden gebruikt om het beton te versterken (Gori 1999). Romeins betonmortels werden ook gebruikt voor vloeren en (waterkerende) afwerkingen, vaak in meerlaagssystemen (Fig. 6, 7).



Fig. 5. Gebruik van *opus caementitium* in het paleis van Septimius Severus uit de 2<sup>e</sup>-3<sup>e</sup> eeuw na Chr (Foto S. Naldini).



*Fig. 6. Romeins beton in het Thermenmuseum te Heerlen.*



*Fig. 7. Detail van tweelaags Romeins betonmortel als bekleding van een waterbasin (Conimbriga, Portugal, 1<sup>e</sup> eeuw na Chr.).*

De eerste voorbeelden van Romeins beton dateren uit de tweede eeuw voor Christus, maar deze waren nog van slechte kwaliteit. Daarna, in de keizerlijke periode, werd de techniek voortdurend verbeterd en aangepast voor toepassing in verschillende soorten constructies. Een saillant voorbeeld is de koepel van het Pantheon in Rome uit 118-125 na Chr. Hierin wordt de dikte van het opus caementitius dunner en het type aggregaat lichter met de hoogte; in de hogere delen werd puimsteen gebruikt (Idorn 1997, Delatte 2001); door deze aanpassingen was het mogelijk ruimte met een doorsnede van 43,3 m te overkoepelen.

Naast puzzolaan is kalk de tweede belangrijke component van Romeinse mortels. Het productieproces van kalk was de Romanen al goed bekend en gestandaardiseerd in de 2<sup>e</sup> v.Chr. In zijn boek *De Agri Cultura* uit ongeveer 160 v.Chr. beschrijft Marcus Porcius Cato met veel details het proces van calcineren van kalksteen in kalkovens. Later, in de 1<sup>e</sup> eeuw v.Chr., beveelt Vitruvius in hoofdstuk V van zijn boek *De Architectura* het gebruik van witte kalksteen aan om kalk te branden. Hij geeft de voorkeur aan harde steen voor het maken van kalk voor metselmortel en zachte en poreuze steen voor kalk voor pleisters (Vitruvius Pollio ca. 29-23 v.Chr.). De aanbeveling van Vitruvius om witte (en dus pure) kalksteen te gebruiken voor het maken van kalk werd in de latere eeuwen nooit betwijfeld; dit heeft waarschijnlijk de ontdekking van de mogelijkheden van natuurlijke hydraulische kalk vertraagd.

Leon Battista Alberti (1404-1472) herhaalt in zijn boek *De re aedificatoria* de voorschriften van Vitruvius. Hij schrijft over het blussen van kalk dat, anders dan voor gips, moet kalk niet gemalen worden; de grote stukken ongebluste kalk moeten, al een lange tijd voor de constructie, nat gemaakt worden met veel water. Het water moet niet in een keer gegeven worden, maar met kleine hoeveelheden (Alberti 1450). De lange periode die gebruikt werd voor het blussen van de kalk is door onderzoekers beschouwd als één van de oorzaken van de erg goede kwaliteit en duurzaamheid van oude mortels (b.v. Cazalla et al. 2000, Pavia & Caro 2008). In de keizerlijk periode verspreidden de Romeinen hun kennis over bouwen over hun hele imperium: zo gebeurde het dat een metselaar in Noord-Afrika dezelfde bouwtechnieken gebruikte als iemand in Groot-Brittannië. De Romeinen brachten de morteltechniek tot zo een hoog niveau dat de kennis op dit gebied ongeveer hetzelfde bleef tot de 18<sup>e</sup> eeuw. In de belangrijkste boeken over bouwtechnieken, bijvoorbeeld *De re aedificatoria* van Leon Battista Alberti (1404-1472), *Trattato di architettura civile e militare* van Francesco di Giorgio Martini (1439-1502), *I quattro libri dell'architettura* van Andrea Palladio (1508-1580) en *L'idea dell'Architettura universale* van Vincenzo Scamozzi (1548-1616) werden de instructies van Vitruvius herhaald, soms met enkele toevoegingen of nadere specificatie.

### **Hydraulische mortels**

Ondanks het gebruik van puzzolaan in mortel om hydraulische te bereiken, was het bewust gebruik van klei bevattende natuursteen om natuurlijke hydraulische kalk te maken nog aan de Romeinen onbekend. Waarom puzzolaan voor verharding onder water zorgde, was de Romeinen onduidelijk. Dat zal in de Middeleeuwen niet veel anders geweest zijn, al werden puzzolanen zoals pannengruis (cocciopesto) opnieuw gebruikt, en was tras met name in Nederland een zeer belangrijke puzzolaan. Hoewel niet als zodanig omschreven zijn in de praktijk ook al natuurlijke hydraulische kalken in gebruik, zoals Doornikse kalk in Nederland. Zowel tras als Doornikse kalk komen hieronder apart aan bod.

#### *Begrijpen van hydraulische bindmiddelen*

In de tweede helft van de 18<sup>e</sup> eeuw begint de wetenschappelijk aanpak die met de tijd leidt tot het begrijpen van hydraulische eigenschappen van mortels. John Smeaton (1724-1792), een Engels ingenieur en wetenschapper, is een belangrijke aanzetgever van deze ontwikkeling. Hij bestudeerde het effect van kleigehalte in kalksteen en van verschillende puzzolaan toevoegingen (puzzolaan uit Pozzuoli, tras, baksteengruis enz.) op de hydraulische van de mortel. Toen hij de opdracht kreeg om de Eddystone vuurtoren in Devon, Engeland, te bouwen, was de sterkte van de te gebruiken mortel één van de belangrijkste problemen die hij moest oplossen. Hij wist dat *twee delen van gebluste kalk, in het droge poeder gemengd met de een deel van Nederlandse Terras (tras), en beide zeer goed samen gemengd om de consistentie van een pasta te krijgen, met behulp van zo weinig mogelijk water'* een goede oplossing was om een sterke mortel te maken, geschikt voor constructies in water. Maar hij wilde de trasmortels beter

begrijpen en de relatie tussen tras en verharding onderwater verklaren. Hij wilde ook een relatie kunnen leggen tussen de kwaliteit van de oorspronkelijke kalksteen en de verkregen sterkte van de mortel. Na het uitvoeren van simpele chemische analyses op verschillende meer of minder zuivere kalkstenen, concludeert hij dat de aanwezigheid van klei in kalksteen de oorzaak is van de hydraulische reactie. Hij kan echter nog geen verklaring geven. Smeaton schrijft : *'Het blijft een curieuze vraag... waarom de aanwezigheid van klei in de samenstelling van een kalksteen het maakt mogelijk dat deze (de kalk die daaruit verkregen is) in het water hard wordt'* (Skempton 1981). Smeaton begreep nog niet waarom het toevoegen van klei aan kalk bij het maken van een mortel niet leidde tot dezelfde resultaten. Het was voor hem nog niet duidelijk dat klei samen met kalksteen gecalcineerd moest worden om reactief te worden.

Het werk van Smeaton werd het startpunt van het onderzoek van Louis Vicat (1786-1861), die in 1818 de bijdragen van de verschillende chemische elementen aan de hydraulische van een bindmiddel onderzocht en definieerde in de zogenaamde *hydrauliciteitsindex* (HI):

$$\text{Hydrauliciteitsindex} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO}}$$

Tabel 1 geeft een classificatie van mortels op basis van de hydrauliciteitsindex, zoals die begin 20<sup>e</sup> eeuw in Nederland gehanteerd werd.

Tabel 1. Indeling van verschillende soorten kalk op basis van hydrauliciteit volgens Van der Kloes (1924).

Hydr. index	Type kalk
0 - 0,1	Vette en magere kalk
0,1 - 0,16	Zwak hydraulische kalk
0,16 - 0,31	Middelmatig hydraulische kalk
0,31 - 0,42	Hydraulische kalk
0,42 - 0,50	Krchtig hydraulische kalk
0,50 - 0,65	Limietkalk

Deze formule voor de hydrauliciteitsindex bleef in gebruik tot 1966, wanneer Boynton deze nauwkeuriger maakte in de *cementatie-index* (CI), die nog nu gebruikt is om de hydrauliciteit van een bindmiddel te bepalen (Tabel 2).

$$\text{Cementatie-index} = \frac{2,8 \text{ SiO}_2 + 1,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + 1,4 \text{ MgO}}$$

Het gaat in deze formule om de gehalten in gewichtsprocenten (m/m%).

**TNO – NVMz studiedag**  
**Mortels technisch en bouwhistorisch bekeken**

Tabel 2. Indeling van verschillende bindmiddelen op basis van de cementatie index volgens Boynton (1966).

Cem. index	Type bindmiddel
0 - 0,3	Niet hydraulisch
0,3 - 0,5	Zwak hydraulisch
0,5 - 0,7	Matig hydraulisch
0,7 - 1,1	Sterk hydraulisch

*Natuurlijk hydraulische kalk (NHL)*

Smeaton ontdekte dat hydraulische bindmiddelen niet alleen kunnen ontstaan door toevoeging van reactieve materialen, zoals puzzolaan, gemalen baksteen en tras, maar ook door het branden van kalksteen die een variabele hoeveelheid klei bevat. Door deze kalksteen te branden bij temperaturen hoger dan gebruikelijk voor luchtkalk (maximaal 1250 °C) ontstaan hydraulische componenten (reactief silica en alumina) die na het aanmaken van de mortel, met water en met kalk reageren om calciumsilicaathydraat (CSH) en calciumaluminaathydraat verbindingen te vormen. Deze kalk wordt *natuurlijke hydraulische kalk* (NHL) genoemd.

*Parker cement (of Roman cement)*

In de tweede helft van de 18<sup>e</sup> eeuw, ontwikkelt het onderzoek naar hydraulische bindmiddelen zich verder. In 1796 werd *Parker cement*, ook wel *Roman cement* genoemd (en niet te verwarren met Romeins beton) gepatenteerd door James Parker in Engeland. Dit is een sterk hydraulisch bindmiddel. Parker cement werd geproduceerd door verbranden van mergel (een kleihoudende kalksteen of kalkrijke klei) bij temperaturen van 800-1000 °C, net onder de temperatuur van sinteren. Roman cement kan dus worden gezien als een soort natuurlijk hydraulisch bindmiddel. Historische bindmiddelen op basis van Roman cement hebben vaak een grote variatie aan samenstelling, door de verschillende oorspronkelijk gebruikte mergel (Gosselin et al. 2009), hetgeen resulteert in meer of minder reactieve klinkers (Bayer et al. 2012).

De voornaamste eigenschappen van Roman cement zijn de hoge vloeibaarheid de snelle zetting. Dit maakt deze mortels uitermate geschikt maken voor gegoten ornamenten (Fig. 8, 9). Mede dankzij deze eigenschappen groeide de productie en het gebruik van Roman cement in de eerste deel van de 19<sup>e</sup> eeuw in verschillende Europese landen, zoals Engeland, Frankrijk, Duitsland, Oostenrijk en Polen (Gosselin et al. 2009).

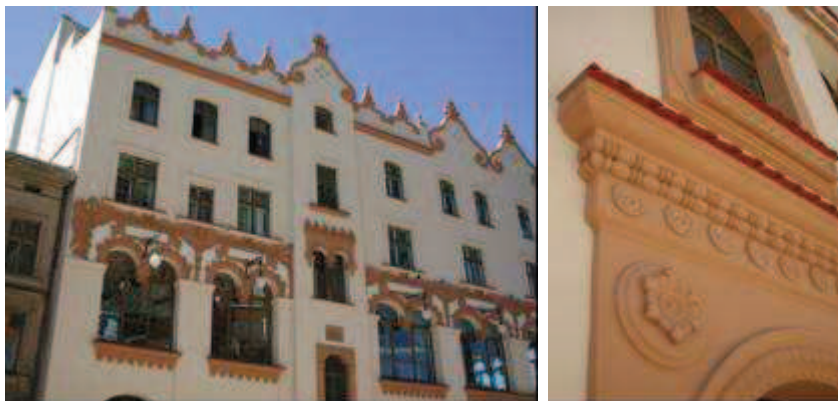


Fig. 8. Gebouw in Krakow met ornamenten in Roman cement.



Fig. 9. Ornamenten uit Roman cement in Wenen (links Liebiggasse 5, rechts Rennegasse 20).

## Bindmiddelen in historische mortels in Nederland

### *Steen- en schelpkalk*

Ook in Nederland waren tot in de 19e eeuw de verschillende kalksoorten de enige bindmiddelen, met als voornaamste onderscheid steen- en schelpkalk, hoewel met name de steenkalk nogal wat soorten kent. Het moge duidelijk zijn, *steenkalk* (in allerlei spellingsvarianten, zoals bijvoorbeeld *styencalx* in de stadsrekeningen van Deventer) wordt verkregen door het branden van kalksteen, *schelpkalk* door het branden van schelpen, waartussen vaak ook enige klei, waardoor het bindmiddel enigszins hydraulisch is. Hoewel opslag door de grote reactiviteit zeer zorgvuldig moest geschieden, werd ongebluste kalk soms naast reguliere, gebluste kalk gebruikt. Dit lijkt echter geen probleem te zijn geweest. Zo is in de bouwrekening van het stadhuis van Gouda over 1450 sprake van levering van '*ongelescht calex*' (Pot 1950), terwijl in de stadsrekeningen van van Deventer de betalingen voor het blussen een aparte post vormen, los van de levering, bijvoorbeeld in 1394 ('*voer alle dessen vors. calc die an den hoep ghestort is te lesschene ...*': (De Meyer 1968)) en 1406 ('*... voer dessen vors. Calc te gadere maken 99 tunnen te lesschen ...*' (De Meyer 1971)).

Aangezien steenkalk in Nederland vaak uit de omgeving van Luik kwam, werd, zeker in de 19<sup>e</sup> en begin 20<sup>e</sup> eeuw, vaak van *Luikse* of *Maaskalk* gesproken.

Goeree heeft het begin 18<sup>e</sup> eeuw over Dortse, Engelse, Doornikse (zie hieronder) en Friese kalk; dat laatste is ongetwijfeld een schelpkalk (Goeree 1705), terwijl in de Utrechtse Domrekeningen van 1468 sprake is van Leidse kalk ('*Leyds calcx*' en '*Leytsch kalck*') (Tenhaeff 1946), waarmee ook een schelpkalk bedoeld werd. Niet iedereen had een positief beeld van deze soort kalk. Zo schrijft Simon Stevin (1548-1620) in zijn onvoltooid gebleven *De Huysbou*: '*Doornixe calck is de beste omdat het aan de steen harde vereenicht; daerna Maescalck, dewelcke gemaect wordt van blaeuwe ende witte arduyn. Maer Leydts calck, gemaect zynde van gebrande zeeschelpen, maeckt vochtige muyren om de souticheytswille.*' (Van den Heuvel 2005).

Een voorbeeld van natuurlijk hydraulische kalk gebruikt in Nederland is Doornikse kalk. Deze is een steenkalk gebrand uit Doornikse kalksteen. Doordat deze kalksteen redelijk wat klei bevat, is zij hydraulisch (b.v. Elsen et al. 2004). Sirag (1933) onderscheidt drie soorten Doornikse kalk, met circa 5, 30 en 40 % hydraulische bestanddelen. Het bindmiddel werd als Doornikse poederkalk verhandeld. Aangezien het onder invloed van water verhardt, wordt dit type kalk ook als waterkalk aangeduid. Het was overigens veruit de belangrijkste, maar niet de enige waterkalk die in Nederland werd gebruikt. In Twenthe gebruikte men ook waterkalk uit het Duitse Rheine (Van der Kloes 1924). Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat al vroeg meer van de in Oost-Nederland gebruikte kalk gebrand werd uit kalksteen afkomstig uit Duitsland. Zo heeft recent onderzoek van de palts van Zutphen laten zien dat een niet volledig gebrand brok kalksteen uit één van de kalkbrandkuilen (daterend van na 882 en voor beting 12<sup>e</sup> eeuw) laten zien dat daarin een gidsfossiel aanwezig is, kenmerkend voor de Devonische kalkstenen uit de Eifel in Duitsland (Groothedde 2013).

### *Tras en cocchiopesto*

Om sterk hydraulisch mortel te maken, die nodig was voor constructies in water en dus belangrijke defensie kunstwerken, was in Nederland tras gebruikt. Tras is gemalen tufsteen, in het bijzonder de tuf uit het Brohltal. Hoewel de grondstof uit Duitsland afkomstig was, en de tras aangeduid werd als Rheinische Trass, Brohler tras, en Andernacher tras, werd tras vooral ervaren als een Nederlandse vinding. In Frankrijk sprak men van '*terrasse de Hollande*' (De Béliador 1737-1770, Chatoney & Bivot 1856), in Engeland van '*Dutch trass*'. Het feit dat de benodigde tufsteen als blokken ingevoerd werd, en hier te lande in molens vermalen, was daar ongetwijfeld een belangrijke factor in. Tras was een dusdanig vermaarde delfstof, dat reizigers in de 19<sup>e</sup> eeuw spraken van de '*trass valley of Brohl*' (Hibbert 1832).

Het hoogtepunt van het gebruik van tras-kalkmortels in Nederland wordt bereikt vanaf de 17<sup>e</sup> eeuw. Echter, eerder al vanaf de 10<sup>e</sup> eeuw werden tras-kalkmortels, of althans kalkmortels met tufsteengruis gebruikt. In de hoogtijdagen van de tras is de vraag dusdanig groot, dat niet alleen vers groevemateriaal, maar ook afbraakmateriaal gebruikt werd voor de trasproductie. Zo ondernam men vanuit Nederland tochten naar de Romeinse ruïnes van Xanten om tufsteen te bekomen



(Röder 1959). Ook werden herstellingen en restauraties deels op deze wijze gefinancierd.

Schelpkalk-trasmeel werd in 1910 geïntroduceerd, en bestond uit een mengsel van schelpkalk en tras in de verhouding 1 : 1¼, waarbij enig ongebluste schelpkalk werd bijgemalen om de verharding te versnellen (Van der Kloes 1924).



*Fig. 10. Restant van de originele 11<sup>e</sup> eeuwse pleister van de Pieterskerk in Utrecht, een kalkmortel met pannengruis.*



*Fig. 11. Restant kalkmortel met pannengruis aan de 12<sup>e</sup> eeuwse stadmuur van Leuven.*

Een andere materiaal die aan kalk kan worden toegevoegd om hydrauliteit te bereiken is gemalen baksteen, de cocchiopesto van de Romeinen, die dit ook in Nederland gebruikten (Fig. 6). In Nederland komt gemalen baksteenpoeder al voor in Middeleeuwse mortels, zoals de 11<sup>e</sup> eeuwse buitenpleister van de Pieterskerk in Utrecht (Temminck Groll 1988; fig. 10). Hoewel onduidelijk is of het bij de toevoeging alleen om een pigmenterende, of ook bewuste keuze vanwege de bindende werking (als puzzolaan) ging, blijkt uit microscopisch onderzoek dat dat laatste wel degelijk het geval was (Nijland 2015, deze syllabus). Andere voorbeelden van Middeleeuwse cocchiopesto in onze streken zijn de twee mortelvloeren aangetroffen in St. Servaas in Maastricht die behoren tot

de derde bouwfase die waarschijnlijk dateert van voor het midden van de 8<sup>e</sup> eeuw (Panhuysen 1991) en de 12<sup>e</sup> eeuwse stadsmuur van Leuven (Fig. 11).

Later, tussen het eind van de 17<sup>e</sup> en het begin van 18<sup>e</sup> eeuw, zal gemalen gebakken klei weer terugkomen in een nieuwe type hydraulische bindmiddelen, het z.g. *Amsterdams en Cazius cement*.



Fig. 12. Metselwerk met Amsterdams of Cazius cement uit 1814 aan de Papsluis in Werkendam (voor de restauratie).

#### *Amsterdams en Cazius cement*

In dezelfde periode wanneer in andere Europese landen het Parker cement zijn gouden jaren had, probeerde men in Nederland een sterk hydraulisch mortel te maken door gebakken klei te gebruiken. Zo kwamen eind 18<sup>e</sup> eeuw bindmiddelen op de markt die eveneens een roze mortel opleverden (Fig. 12), het zogenaamde Amsterdams cement en Cazius cement (Van der Kloes 1924, Van Balen et al. 2003). Ze werden ook wel kunst-cement genoemd, en ontstonden mede vanwege de problemen met het verkrijgen van goede tufsteen om tot tras te vermalen (Van der Kloes 1924). Het gaat om gegloeid slib uit respectievelijk het IJ, in 1783 door A. Booij in Amsterdam geëtrooieerd, en uit de Vaartsche Rijn, in 1792 door de weduwe Cazius & zonen gepatenteerd. Booij ging in 1790 samen met G. Asschenberg, maar noch Booij & Asschenberg, noch de wed. Cazius ging het voorspoedig. Samen kregen ze een octrooi van 1810 tot 1840, en in deze periode produceerde zeker Cazius kennelijk aanzienlijk, aangezien soms 13 trasmolens te gelijk bezig waren voor hem te malen (Van der Kloes 1924). Begin 19<sup>e</sup> eeuw werd het op grote schaal verplicht gebruikt voor onder meer militaire, waterbouwkundige en gemeentewerken. Na 1840 raakte het in onbruik. De problemen met de kwaliteit zullen hier niet vreemd aan zijn geweest. Hierover waren regelmatig conflicten. De wens van het gemeentebestuur van Utrecht om zich, na slechte ervaring bij sluiswerken, aan het verplichte gebruik bij gemeentewerken te onttrekken, in het bijzonder de renovatie van het stadhuiscomplex door stadsarchitect J. van Embden, leidde tot een langdurig conflict met het Rijk en ontslagname van de Utrechtse burgemeester Van Doelen in 1824 (Van der Kloes 1924, Struick 1974). Tijdens de grondstoffenschaarste in de Eerste Wereldoorlog deed Van der Kloes nog een vergeefse poging dit type

bindmiddel te doen herleven, naar analogie van het in toenmalig Nederlands-Indië wel gebruikte roodcement (Van der Kloes 1924).

### Mortelsamenstellingen

In *De architectura* geeft Vitruvius aanwijzingen voor het maken van mortels: Een verhouding tussen bindmiddel en zand van 1:3 (in het geval van zand uit gebroken natuursteen) en 1:2 (in het geval van rivier- of zeezand) worden als optimaal beschreven; in het laatste geval, suggereert hij om ook een deel van pannengruis (cocciopesto) toe te voegen om de kwaliteit van de mortel te verbeteren. In tabel 3 zijn de mortel composities die gesuggereerde door Vitruvius samengevat.

Leon Battista Alberti herhaalt de suggesties van Vitruvius in *De re aedificatoria* (Alberti 1850): *'Tenslotte, indien het type en kwaliteit van de steen een vloeiender en soepel mortel vereist, moet het zand gezeefd worden; maar wanneer een dikkere mortel nodig is, het is goed om halve maat scherpe en fijne grind te mengen met een deel zand. Het is bekend dat de toevoeging van een derde deel gemalen tegels een veel sterkere mortel zal geven.'*

Scamozzi (1548-1616) geeft in *L'idea della architettura universale* (Scamozzi 1615) verschillende recepten voor mortels, afhankelijk van het gebruik. Zo is bijvoorbeeld een vloeibare mortel geschikt voor het vullen van het metselwerk van funderingswerk.

Tabel 3. Mortel samenstelling volgens Vitruvius.

Bindmiddel	Aggregaat	Commentaar
1 deel kalk	3 delen zand uit gebroken natuursteen	
1 deel kalk	2 delen rivierzand	
1 deel kalk	2 delen rivierzand	
1 deel kalk	2 delen rivierzand, 1 deel pannengruis	Bij voorkeur in het geval van rivierzand
1 deel kalk	2 delen puzzolaan ( <i>pulvis puteolanus</i> )	Hydraulische mortel voor constructies in zoutwater

Milizia (1725-1798) besteedt in het boek *Principi di Architettura civile* (Milizia 1781) een heel hoofdstuk aan het maken van mortels. Hij schrijft dat sommige stenen een poederende oppervlak hebben en dus naar een mortel met meer kalk vragen. Verder geeft hij duidelijk aan dat de verhouding tussen kalk en zand niet altijd hetzelfde hoeft te zijn, maar kan variëren afhankelijk van de kwaliteit van de beschikbare materialen en het type metselwerk. Volgens Milizia is een verhouding van 1 op 1 normaal, maar als de kalk van goede kwaliteit is, kan de verhouding ook 3:2 of zelfs 1:3 of 1:4 worden. Daarnaast moet ook de hoeveelheid water aangepast worden, afhankelijk van de kwaliteit van de stenen: Hogere watergehalten zijn nodig in het geval van stenen met hoge absorptie, terwijl voor minder absorberende stenen een dikkere mortel beter is.

Ook in de praktijk wijkt de samenstelling van oude mortels vaak af van de aanbevelingen gegeven door Vitruvius. Dit kan door verschillende redenen komen, bijvoorbeeld om constructieve redenen (denk aan de koepel van het Pantheon in Rome), vanwege de functie van de mortel of door de lokale beschikbaarheid van materialen. In het algemeen geldt dat oude mortels een hogere bindmiddelgehalte hebben dan moderne mortels. Dit komt mogelijk ook door het feit dat het bindmiddel nu fijner gemalen (en dus meer reactief) is dan in het verleden.

### **Mortelsamenstellingen in Nederlandse historische mortels**

Informatie over de samenstelling van in het verleden in Nederland gebruikte mortels kan verkregen worden uit oude documenten, en door microscopisch onderzoek van het materiaal zelf (bv. Nijland 2015).

In oude bestekken is sprake van sterke tras mortels, veelal zonder zand, en basterd tras, met zand. In tabel 4 wordt een overzicht gegeven van gangbare mengverhoudingen in Nederland in de eerste helft van de 20<sup>e</sup> eeuw. De verhoudingen lagen echter zeker niet altijd vast. In de overgangperiode met hydraulische kalk, proto-portland cement en Portland cement, werd nadrukkelijk ook geëxperimenteerd met mengsels van verschillende bindmiddelen, en was de variatie in samenstelling en eigenschappen binnen een verondersteld hetzelfde bindmiddel veel groter dan heden ten dage. Men vatte een bepaald begrip soms ruim op. Zo betekende tras niet altijd dat er tras gebruikt moest worden. Interessant is wat dit betreft het rond 1800 daterende bestek van het in 1806 in gebruik genomen dok in Hellevoetsluis. Daarin is sprake van *'sterke tras'* en *'sterke basterd tras'*, waaronder vervolgens het volgende verstaan werd: *'De hier voren genoemde sterke tras, moet bestaan uit twee deelen geotroijeerde kunst-cement, en drie deelen luiksche steenkalk. De basterd tras uit een en één half deel dito kunst-cement, een half deel zuiver zand, en drie deelen kalk.'* (Bestek van dok Hellevoetsluis, artikel 12 en 14) Het begrip tras was kennelijk haar eigen samenstelling ontstegen, en fungeerde als aanduiding voor een mortel met een (kunstmatige) puzzolane toevoeging. Een overzicht van enkele mortelsamenstellingen in enkele oude Nederlandse bestekken wordt gegeven in tabel 5.

### **Conclusie**

Deze bijdrage geeft een beknopt algemeen overzicht van historische mortels vanaf de Oudheid tot halverwege van de 19<sup>e</sup> eeuw, met daarnaast aandacht aan hun gebruik in Nederland. Het overzicht laat zien hoe de behoefte voor bepaalde prestaties (bijvoorbeeld van hydraulische mortels voor constructies in water) samen de beschikbaarheid van (min of meer) lokale materialen (bijvoorbeeld puzzolaan in Italië, tras in Nederland) het ontwikkelen van nieuwe mortels sterk heeft beïnvloed. Daarnaast wordt het duidelijk dat mortel samenstelling in de praktijk vaak meer gevarieerd is dan door aanbevelingen die in boeken wordt

## TNO – NVMz studiedag

### Mortels technisch en bouwhistorisch bekeken

aangegeven. Men experimenteert met nieuwe materialen en samenstellingen, en met het creatief gebruik van lokaal beschikbare materialen.

### Referenties

- Alberti, L.B., 1450. *De re Aedificatoria*. Italiaanse vertaling door Cosimo Bartoli (1565).
- Balen, K. van, Bommel, B. van, Hees, R. van, Hunen, M. van Rhijn, J. van & Rooden, M. van, 2003. Kalkboek, het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden. Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zeist.
- Bayer, K., Gosselin, C., Hilbert, G. & Weber, J., 2012. Microstructure of historic and modern roman cements to understand their specific properties. ICOMOS - Rocare Conference, Parijs.
- Bélibidor, B.F. de, 1737-1770. *L'architecture hydraulique, ou l'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*. C.A. Jombert, Parijs, 5 delen.
- Boynton, R.S., 1966. *Chemistry and technology of lime and limestone*. Interscience, New York.
- Cazalla, O., Rodriguez Navarro, C., Sebastián, E. & Cultrone G., 2000. Aging of lime putty: Effects on traditional lime mortar carbonation. *Journal of the American Ceramic Society* 83:1070-1076.
- Chatoney & Bivot, 1856. *Considerations générales sur les matériaux employés dans les constructions a la mer*. Deuxième partie. *Annales des Mines, Mémoires* 10.
- Connan, J., 1999. Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: Molecular archaeology reveals secrets of past civilizations. *Philosophical Transactions of the Royal Society London* B354:33-50.
- Delatte, N., 2001. Lessons from Roman cement and concrete. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice* 127:109-115.
- Elsen, J., Brutsaert, A., Deckers, M. & Brulet, R., 2004. Microscopical study of ancient mortars from Tournai (Belgium). *Materials Characterization* 53:289-294.
- Elsen, J., Cizer, O. & Snellings, R., 2013, Lessons from a lost technology: The secrets of Roman Concrete. *American Mineralogist* 98:1917-1918.
- Fahlbusch, H., 2008. Municipal water supply in antiquity. Beschikbaar op: <http://www.romanaqueducts.info/webteksten/waterinantiquity.htm> (laatst gemodificeerd juni 2008, bezocht 9 februari 2015).
- Ghorab, H.Y., Ragai, J. & Antar A., 1986. Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars. Part 1: X-ray diffraction studies. *Cement and Concrete Research* 16: 813-822.
- Goeree, W., 1705. *D'algemene bouwkunde volgens d'antyk en hedendaagse manier door een beknopte inleiding afgeschetst en van veel onvoegsame bewindzelen en verbasteringen onswagteld en verbeterd*. A. van Damme, Amsterdam (gecteerd in Janse 1965).
- Gori, R., 1999. Theoretical performances of RC elements built at turn of the century. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities* 13(2):27-32.
- Gosselin, C., Verges-Belmin, V., Royer, A. & Martinet, G., 2009. Natural cement and monumental restoration. *Materials and Structures* 42:749-763.
- Groothedde, M., 2013. Een vorstelijke palts te Zutphen ? Macht en prestige op en rond het plein 's-Gravenhof van de Karolingische tijd tot aan de stadsrechtverlening. *Zutphense Archeologische Publicaties* 77.
- Heuvel, C. van den, 2005. 'De Huysbou', a reconstruction of an unfinished treatise on architecture, town planning and civil engineering by Simon Stevin. *KNAW, Amsterdam, History of Science and Scholarship in the Netherlands* 7.
- Hibbert, S., 1832. *History of the extinct volcanos of the basin of Neuwied, on the lower Rhine*. W. & D. Laing, Edinburgh.
- Idorn, G., 1997. *Concrete progress: From antiquity to third millennium*. Thomas Telford, London.
- Janse, H., 1965. *Bouwers en bouwen in het verleden. De bouwwereld tussen 1000 en 1650*. Europese Bibliotheek, Zaltbommel.
- Kloes, J.A. van der, 1924. *Onze bouwmaterialen. Deel III. Mortels en beton*. L.J. Veen, Amsterdam.

- Lamprecht, H.O., 1986. *Opus caementitium. Bautechnik der Römer*. 5<sup>e</sup> druk, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf.
- Marcus Porcius Cato, ca. 160 v.Chr. *De Agri Cultura*. Beschikbaar op: [http://la.wikisource.org/wiki/De\\_agri\\_cultura](http://la.wikisource.org/wiki/De_agri_cultura) (bezocht 25 februari 2015).
- Marcus Vitruvius Pollio, 29-23 v.Chr. *De Architectura*. Italiaanse vertaling door C. Amati (1829).
- Meyer, G.M. de, red., 1968. *Teksten en documenten VII. De stadsrekeningen van Deventer*. Deel I 1394-1400. Wolters-Noordhoff, Groningen.
- Meyer, G.M. de, red., 1971. *Teksten en documenten IX. De stadsrekeningen van Deventer*. Deel II 1401-1410. Wolters-Noordhoff, Groningen.
- Milizia, F., 1781. *Principii di Architettura civile*. Herzienne en gecorregeerd editie door G. Battista Cipriani Sanese (1825), Bassano.
- Nijland, T.G., 2015. *Microscopisch onderzoek van mortels*. In deze syllabus.
- Panhuysen, T.A.S.M., 1991. *De Sint-Servaaskerk te Maastricht in de vroege middeleeuwen*. Bulletin van de Koninklijke Nederlandse Oudheidkundige Bond 90:15-24.
- Pavia, S. & Caro, S., 2008. *An investigation of Roman mortar technology through the petrographic analysis of archaeological material*. *Construction and Building Materials* 22:1807-1811.
- Pot, G.J.J., 1950. *De bouwrekening van het Goudse stadhuis van 1450*. Bulletin KNOB, 6e serie, 3, 129-145.
- Regourd, M., Kerisel, J., Deletie, P. & Haguenaer, B., 1988. *Microstructure of mortars from three Egyptian pyramids*, *Cement and Concrete Research* 18:81-90.
- Röder, J., 1959. *Zur Steingbruchgeschichte des Pellenz- und Brohltaltuffs*. *Bonner Jahrbuch* 159:47-88.
- Scamozzi, V., 1615. *Dell'idea della architettura universale*. Editie van 1714.
- Scharroo, P.W., 1946. *Scheikunde der bouwmaterialen*. L.J. Veen, Amsterdam.
- Skempton A.W., red., 1981. *John Smeaton, FRS*. Thomas Telford, Londen.
- Sirag Jzn., M., 1933. *Bouwmaterialen*. Voorheen Van Mantgem en De Does, Amsterdam.
- Stefanidou, M., Patcha, V., Konopissi, S., Karkadelidou, F. & Papayanni I., 2014. *Analysis and characterization of hydraulic mortars from ancient cisterns and baths in Greece*. *Materials and Structures* 47:571-580.
- Struick, J.E.A.L., 1974. *De Stadhuisbrug tussen winkel en raadhuis*. Broese en Kemink, Utrecht.
- Temminck Groll, C.L., 1988. *De romaanse kerken van Utrecht*. Stabu / Broese Kemink, Utrecht.
- Tenhaeff, N.B., 1946. *Bronnen tot de bouwgeschiedenis van den Dom te Utrecht*. Tweede deel, eerste stuk (rekeningen 1395-1480). Martinus Nijhoff, Den Haag.
- Tubag, 1934. *Der rheinische Trass. Seine eigenschaften und Anwendung im Bauwesen*. Tubag, Kruft (productbrochure).
- Veen, A.L.W.E. van der, 1920-1923. *Resultaten van het onderzoek van oude natuursteen*. Rijkscommissie voor de Monumentenzorg, Den Haag.

Tabel 4. Overzicht aanbevolen mengverhoudingen (in volumedelen) in de eerste helft van de 20<sup>e</sup> eeuw volgens 1 - Van der Kloes (1924), 2 - Sirag (1933) en 3 - Scharroo (1946).

Toepassing	Bindmiddel						Zand	Opmerking	Ref.
	Luike steenkalk	Schelpkalk	Doomikse poederkalk	Tras	Schelpkalk-trameel	Portland cement			
Bestand tegen waterdruk						1	1¼-2		1,2
						1	2		3
				0,4		1	3		3
				1		1	2		1
		1		1¼					2
		1		1½				drooggebluste steenkalk	2
		1		1½			2		1
		1	1	1¼			1½		1,2,3
		1		1½			2	drooggebluste steenkalk / vette kalk	2,3
		1		3			4	stijf kalkdeeg	1,2,3
Vochtdicht						1	2¼	slap kalkdeeg	1
			1	1			2		2
					1		1-1½		1
						1	2½-3		1,2,3
				1		1	4		1
				¼		1	3		2
				0,4		1	3		3
		1		1¼			2-2½		1,2,3
		1		1½			2½-3	drooggebluste steenkalk	1,2,3
		1		3			4-6	stijf kalkdeeg	1,2
Sterk, buiten							5-6	kalkdeeg	3
							3¾-4½	slap kalkdeeg	1
			1	1			2½-3		2
					1		1¼-2		1
						1	3		2,3
				¼-½		1	3-4		3
				½-1		1	4-5		2
	½				1	3-3½		3	
Fundamenten, muren							2½-3		2
							3-3½	drooggebluste steenkalk	2
							6-7	stijf kalkdeeg	2
			1	1			3-3½		2
						1	3		1
				1		1	4-5		1
		1				1	5		2,3
		2				1	6-7		2,3
		1		1¼			3-4		1,2,3
		1		1½			4-5	Vette kalk	1,2,3
Voegmortel							8-9		2,3
							10-12		2,3
					1		2½-3		1,3
				3			8-10	Stijf kalkdeeg	3
Voegmortel							6-8	Slap kalkdeeg	3
		1					3-4		2
	½				1	3		2	

Tabel 5. Mortelsamenstellingen (in volumedelen) uit enkele historische Nederlandse bestekken.

Mortel	Kalk (niet geduid)	Luike steenkalk	Schelpkalk	Doornikse poederkalk	Trass	Schelpkalk-trasmeel	Portland cement	Kunst-cement	Zand	Bestek
Kalkmortel				3					2	c. 1890, St. Vituskerk, Hilversum <sup>1</sup>
			1						1	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, binnen <sup>2</sup>
				5					4	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, buiten
	2								1	1662, stadhuis, Axel <sup>3</sup>
Sterke tras				2	1					1892, DWL Oude Plantage, Rotterdam <sup>4</sup>
				1	1					c. 1890, St. Vituskerk, Hilversum
			1		1					c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, binnen
				2	1					c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, buiten
		3						2		c. 1800, dok, Hellevoetsluis <sup>5</sup>
Sterke basterd tras				4	2				1	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
			4		3				1	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, binnen
				4	3				1	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, buiten
Basterd tras			2		1				1	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, binnen
				4	3				3	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, buiten
Slappe basterd tras				5	1				3	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
				3	2				1	c. 1890, St. Vituskerk, Hilversum
			3		1				1	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, binnen
				9	4				8	c. 1850, Fort aan de Klop, Utrecht, buiten
		3						1½	½	c. 1800, dok, Hellevoetsluis
Sterk cement			1				2		3	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
Cement			1				1		3	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
Slappe cement			1				1		5	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
Voegspecie			1				1		1	1892, DWL, Oude Plantage, Rotterdam
Overig			4		5				10	1921, Pieterskerk, Leiden <sup>6</sup>
	1						2		10	1920, Kruisherenkerk, Maastricht <sup>7</sup>
	5				2				5	1920, Kruisherenkerk, Maastricht
					1		1		4	1908, brug over Oude Maas, Spijkenisse <sup>8</sup>
						¼	1		3	1916, Woudagemaal, Lemmer <sup>9</sup>
							1		3	1916, Woudagemaal, Lemmer

Bronnen: 1 - Bestek van de RK Kerk St. Vitus te Hilversum door P.J.H. Cuypers, artikel 39. 2 - Bestek van Fort aan de Klop, Utrecht, c. 1850. 3 - Janse 1965. 4 - Bestek en voorwaarden. Aanbesteding. Het maken van 5 filters op het terrein der Drinkwaterleiding achter de Oude Plantage. Bestek 135, Gemeente Rotterdam, 10 juni 1892, artikelen 44, 45 en 59. 5 - Bestek van dok Hellevoetsluis, artikel 12 en 14. 6 - Van der Veen 1920-1921. 7 - Opzichter Sturm in Van der Veen 1920-1921. 8 - Tubag 1934. 9 – Bestek wegens het bouwen van een Stoomgemaal voor de bemaling van Frieslands boezem bij Lemmer en bijbehorende werken, 1916.