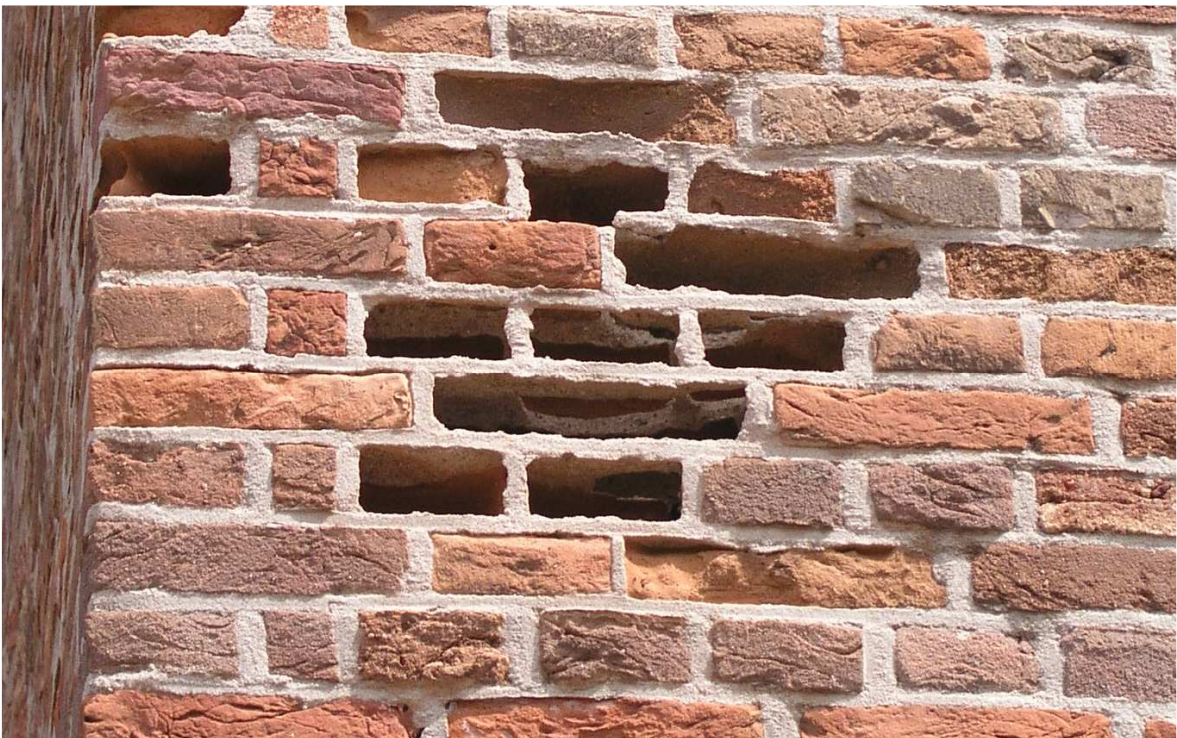


Totaalonderzoeksproject

Aanpak Vochtproblematiek M a s s i e f Metselwerk

Deelonderzoek

Kwaliteitseisen Restauratiebaksteen



dr ir C. Groot / J. Gunneweg

Delft, december 2005

Deelonderzoek Kwaliteitseisen restauratiebaksteen

Inhoudsopgave Rapportage

0. Samenvatting

1. Inleiding

Probleemstelling
Opdracht
Context

2. Literatuuronderzoek

2.1 Theoretische en experimentele aspecten van vochttransport in metselwerk

- Voorafgaand onderzoek
- Materiaaleigenschappen en waterdichtheid
 - Porositeit en vochttransport door bakstenen
 - Vochtopname: snelheid en opslagcapaciteit
 - Droging
- Overwegingen op macroniveau
 - Snelheid van vochttopname (Hallergetal) en het weer
 - Snelheid van vochttopname (Hallergetal) en vochtgehalte van het metselwerk
 - Regensimulatieproeven
 - Drie praktijkgevallen
- Overwegingen op microniveau
- Conclusies vanuit theoretisch en experimenteel onderzoek

2.2 Historisch Onderzoek

- Inleiding
- Eisen baksteen algemeen
- Toepassing en aanduiding baksteenkwaliteiten in het verleden
- Invloed van materiaalkeuze en vervaardigingstechniek op de hygrische eigenschappen
- Hygrische eigenschappen in historisch perspectief (tabel)
- Invloed bakproces op hygrische eigenschappen
- Invloed oventype op hygrische eigenschappen
- Relatie datering metselwerk / muurdikte en hygrische eisen

3. Praktijk en Laboratoriumonderzoek

3.1 Monstername

3.2 Laboratoriumonderzoekingen TCKI: hygrische eigenschappen 8 steentypen uit historische objecten en 2 nieuwe steentypen

3.3 Laboratoriumonderzoekingen TUD: hygrische eigenschappen “nieuwe bakstenen” van het marktonderzoek

4. Marktonderzoek

5. Conclusies

6. Verantwoording keuzen tav eisen voor de hygrische eigenschappen met het oog op een te ontwikkelen richtlijn

7. Geraadpleegde literatuur en andere bronnen

Bijlagen (ter inzage)

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 | Marktverkenning restauratiebaksteen |
| 2 | Laboratoriumonderzoek TUD |
| 3 | Laboratoriumonderzoek TCKI |
| 4 | PFM- onderzoek Rockview |
| 5 | Uittreksel NEN 2489 |

Samenvatting

In dit rapport wordt verslag gedaan van onderzoek naar

- het definiëren van kwaliteitseisen van stenen toe te passen in het opgaande werk bij restauratie- en nieuwbouw, van zwaar regenbelast massief metselwerk, waaronder molens *het ontwikkelen en beschrijven van eenvoudige (op de bouwplaats) uit te voeren proeven ter bepaling van de geschiktheid van een toegepaste steen voor zwaar regenbelast massief metselwerk*
- marktverkenning en vaststellen modaliteiten levering van adequate stenen

Kwaliteitseisen stenen en eenvoudige proeven

Daartoe zijn de literatuur (van klassieke bouwkunde handboeken tot de meest recente publicaties) van theoretisch en experimenteel onderzoek op het gebied van waterdichtheids- problemen in metselwerk bestudeerd; ook werd bestudeerd de NEN 2489, die, gebaseerd op spouwmuurbouw helemaal geen eisen stelt aan de hygrische eigenschappen voor stenen bij opgaand werk. Voorts is het vochtopnamegedrag van massief metselwerk in de praktijk nader geanalyseerd aan de hand van baksteenmonsters uit historische gebouwen en de bestudering van schadegevallen. Als methoden van onderzoek aan historische baksteenmonsters werden toegepast: fysische vochtabsorptiemethoden, kwikporosimetrie, fluorescentie-microscopie en chemische analyse van het keramische materiaal

De belangrijkste conclusie is dat de stenen een matige opzuignelheid van vocht bij een bijpassende vochtopnamecapaciteit moeten bezitten. Bij vroegere voorschriften werd alleen aandacht besteed aan vochtopnamecapaciteit.

In deze studie wordt aangetoond dat de opzuignelheid een belangrijker criterium is dan de opnamecapaciteit.

Opzuignelheid en vochtopnamecapaciteit worden in de bouwpraktijk uitgedrukt in resp. het Hallergetal en de vrijwillige wateropname. Deze karakteristieken kunnen op eenvoudige wijze op de bouwplaats worden bepaald. De beschrijving van de proeven is in het verslag opgenomen.

Op grond van de onderzoeken wordt een richtlijn voorgesteld voor stenen (gevelklinker en hardgrauw) toe te passen in zwaar vochtbelast opgaand vollewand metselwerk. Ten aanzien van Hallergetal en vrijwillige wateropname worden de volgende eisen gedefinieerd:

R 3 (Gevelklinker)

Hallergetal (Initiële Wateropzuiging)

Gemiddeld (10 stenen):	17.5 [g / dm² / min.]
Bovengrens (individueel):	20 [g / dm ² / min.]
Ondergrens (individueel):	15 [g / dm ² / min.]

Vrijwillige Wateropneming (vrije waterabsorptie)

Bovengrens:	25 % [V/V]
-------------	------------

R 4 (Hardgrauw)*Hallergetal (Initiële Wateropzuiging)*

Gemiddeld (10 stenen):	25 [g / dm² / min.]
Bovengrens (individueel):	30 [g / dm ² / min.]
Ondergrens (individueel):	20 [g / dm ² / min.]

Vrijwillige wateropneming (vrije waterabsorptie)

Bovengrens:	35 % [V/V]
--------------------	-------------------

Uit het onderzoek naar de regendichtheid van historische objecten is naar voren gekomen dat de dichtheid vaak in belangrijke mate te danken is aan de in de loop der tijd ontstane 'verweringslaag' aan de regenzijde van de muur. Deze verweringslaag vermindert de opzuigsnelheid van de stenen soms tot meer dan 50%. In hygrisch opzicht is de verwijdering van deze laag (o.a.) door reiniging sterk af te raden.

Bij onderzoek naar de gewenste eigenschappen van bakstenen gericht op waterdichtheid van metselwerk dient altijd bedacht te worden dat de stenen een deel van het metselwerk zijn.

Naast materiaaleigenschappen (van metselstenen, metselspecie en compatibiliteit tussen steen en voegmateriaal) spelen vervolgens vakmanschap, constructie en ontwerp, de invloed van beschermende maatregelen, en de effecten van scheuren een belangrijke rol bij waterdichtheid van metselwerk.

Met andere woorden niet alleen de eigenschappen van de metselstenen bepalen het al dan niet waterdicht zijn van metselwerk.

Marktonderzoek

Het doel van het marktonderzoek was de mogelijkheden te onderzoeken van de baksteenindustrie om stenen met de gewenste hygrische eigenschappen – de gevelklinker en hardgrauw kwaliteit- zowel bij grotere als bij kleinere aantallen, tegen een aanvaardbare prijs te leveren.

Tevens om na te gaan welke steenfabrieken door oventype, vakmanschap en flexibiliteit in staat zouden zijn om deze stenen als 'speciaalproducties' op aanvraag te produceren.

Conclusies:

- Het aantal steenfabrieken dat courant stenen produceert die aan de voorlopige Richtlijneisen voor 'Hardgrauw' en 'Gevelklinker' voldoen is zeer beperkt.
- Deze fabrieken hebben meestal een kleine productiecapaciteit
- Indien men een flexibele instelling heeft en bereid is tot aankopen van andere klei (bv Westerwald voor Geel) en in staat is bij het stoken een hoger temperatuurtraject te bereiken, en bereid is proef partijen te stoken, kan de situatie worden verbeterd.
- Grote partijen, m.n. IJssel formaat, Geel, vormen een marktprobleem; een steenfabriek met een tunneloven kan hier een oplossing bieden doch meestal is in een dergelijke geavanceerde fabriek de vormgeving dmv strengpers of vormbak. Hiermee is geen 'handvorm structuur' te maken.

Bundeling van vraag via een centrale instantie gevolgd door gemeenschappelijke inkoop, kan daar mogelijk een oplossing voor vormen.

Deelonderzoek:

Restauratiebaksteen zwaar regenbelast opgaand metselwerk

- Kwaliteitseisen
- Marktverkenning
- Modaliteiten levering

1. Inleiding

Probleemstelling

Geschikte nieuwe restauratiestenen met name in IJsselmaat, voor opgaand werk (klassieke kwaliteitsnamenreeks "hardgrauw", of "gevelklinker") zijn op de Nederlandse baksteenmarkt momenteel niet courant voorhanden. De moderne Baksteennorm NEN 2489 geeft geen aansluiting op de eisen te stellen bij het klassieke vollwandmetselwerk.

De in fase 1 genomen steekproef is niet breed genoeg om een aanbeveling ten aanzien van vereiste eigenschappen voor opgaand werk op te kunnen baseren. Hiertoe moeten meer monsters (een 10-tal) van goede molens en ander vollwand metselwerk worden genomen.

Er is onvoldoende inzicht in welke steenfabrieken nieuwe restauratiebakstenen zullen kunnen leveren, die in de toe te passen formaten en kleur (vnl. IJssel-) aan de te stellen kwaliteitseisen voldoen.

Opdracht

Definiëren kwaliteitseisen van stenen toe te passen in het opgaande werk bij restauratie- en nieuwbouw, van zwaar vochtbelast vollwand metselwerk, waaronder molens; marktverkenning en vaststellen modaliteiten levering.

Voorts, ontwikkelen en beschrijven van een eenvoudig (op de bouwplaats) uit te voeren proef ter bepaling van de geschiktheid van een toegepaste steen voor zwaar regenbelast vollwand metselwerk.

Context

Bij onderzoek naar de gewenste eigenschappen van bakstenen gericht op waterdichtheid van metselwerk dient altijd bedacht te worden dat de stenen een deel van het metselwerk zijn. Met andere woorden niet alleen de eigenschappen van de metselstenen bepalen het al dan niet waterdicht zijn van metselwerk, maar ook de mortel.

2. Literatuuronderzoek kwaliteitseisen restauratiebaksteen

2.0 Doel van de literatuurstudie en manier van werken

Het doel van de literatuurstudie is het definiëren van kwaliteitseisen van (restauratie) baksteen toegepast in opgaand zwaar regenbelast vollewand metselwerk.

Dit zal op twee wijzen worden gedaan:

- vanuit een (theoretische en experimentele) analyse van vochttransport in poreuze materialen; hierbij worden ingebracht de inzichten voortgekomen uit laboratorium- en praktijkonderzoek naar vochtproblemen in metselwerk gedurende de laatste eeuw
- vanuit de historische bestudering van molenbestekken van molens gebouwd in West-Nederland

De reden voor deze tweevoudige benadering is de volgende: verondersteld mag worden dat deze twee invalshoeken complementaire informatie zullen opleveren; hierdoor kan het aantal uit te voeren proeven ter ondersteuning van keuze van materiaaleigenschappen van de steen voor zwaar vochtbelast metselwerk beperkt in omvang blijven.

2.1 Theoretische en experimentele aspecten vochttransport in metselwerk

Voorafgaand onderzoek

Gedurende de laatste 75 jaar zijn er vele praktijk- en laboratoriumonderzoeken gedaan naar waterdichtheid van metselwerk. De onderzoeksresultaten zijn geëvalueerd in literatuurstudies van Grimm (1982) en Ramamurthy & Anand (2001).

In de literatuurstudies wordt geconcludeerd, dat
materiaaleigenschappen (van metselstenen, metselspecie en compatibiliteit tussen steen en voegmateriaal), vakmanschap, constructie en ontwerp, de invloed van beschermende maatregelen, en de effecten van scheuren
de belangrijkste elementen zijn tav waterdichtheid van metselwerk.

Deze conclusie bevestigt de complexiteit van de problematiek. Bij de keuze van een geschikte steen kan men zich niet beperken tot alleen de steen; hoewel uit het bovenstaande blijkt dat een aantal aspecten (zoals vakmanschap, constructie en ontwerp de invloed van beschermende maatregelen, de effecten van scheuren) los staan van de materiaalkundige eigenschappen van de steen, komt ook duidelijk naar voren dat de interactie tussen steen en mortel (compatibiliteit) invloed heeft op de waterdichtheid van het metselwerk.

Materiaaleigenschappen en waterdichtheid

Porositeit en vochttransport door bakstenen

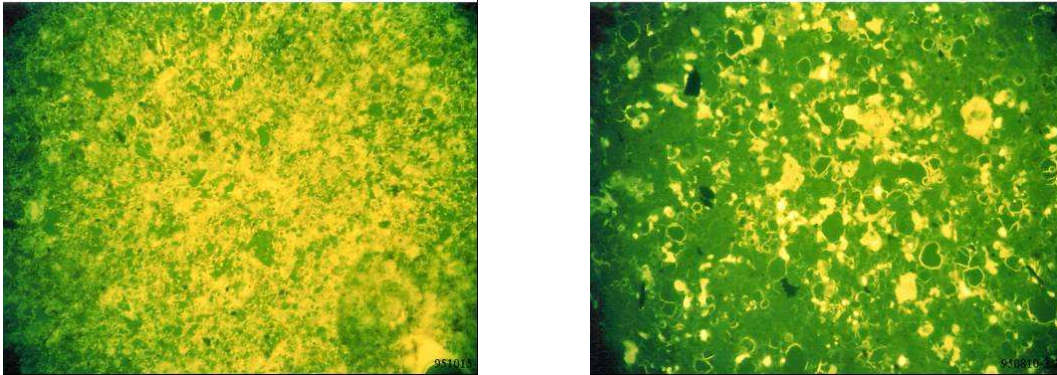
Steenachtige bouwmaterialen vallen onder de zgn “poreuze media”. De porositeit komt voor bouwmaterialen zoals natuursteen, beton, baksteen en mortels op verschillende wijzen tot stand, maar wezenlijk voor deze materialen is dat ze via capillaire werking vocht op kunnen nemen, en via droging (verdamping) weer vocht kunnen afstaan. Vochtopname- en drogingsgedrag van het metselwerk onder uiteenlopende omgevingscondities bepalen het al dan niet optreden van vochtdoorslag.

De porositeit van bakstenen wordt in belangrijke mate beïnvloed door het bakproces (naast andere aspecten als type klei, vervaardigingstechniek, drogen etc.). Hierbij speelt de sintering een doorslaggevende rol.

Grofweg komt het er op neer dat bij lagere temperatuur gebakken stenen (bv “rood”, “zachtere stenen”) een poriënsysteem hebben dat bestaat uit een “netwerk” van met elkaar in verbinding staande fijne poriën. In de bij hogere temperatuur gebakken stenen (“klinker”, “hardere stenen”) zijn de poriën als het ware dichtgesmolten en komen zij voor belangrijk gedeelte geïsoleerd voor (Van Rhijn, 1995).

Van de kleinere poriën smelten tevens een aantal aaneen tot grotere poriën er wordt lucht uitgedreven, het totale poriënvolume wordt ook kleiner waardoor de steen krimpt.

Daar waar sprake is van een netwerk van poriën is vochttransport door een steen goed mogelijk. Bij geïsoleerde poriën is vochttransport zeer moeilijk.



Figuur 2.1 Twee fuorescentie-microfoto's van bakstenen: wit geeft porositeit aan en groen is vaste stof. Links: het sterk verbonden capillair netwerk en een grote opslagcapaciteit van sterk zuigende baksteen (rood); Rechts: geïsoleerde poriën en een geringe opslagcapaciteit van een zwak-zuigende baksteen (klinker) (Rockview, Amsterdam)

Met fluorescentie microscopie is een goed idee te krijgen van de verschillen in porositeit van sterk zuigende en zwak zuigende stenen. Een interpretatie van verschillen in opzuiggedrag van stenen met een gemiddeld opzuiggedrag is niet éénduidig met fluorescentiemicroscopie te verkrijgen.

Vochtopname: snelheid en opslagcapaciteit

Voor de problemen van waterdichtheid van metselwerk zijn de snelheid van vochttopname en vochttopnamecapaciteit van belang. De snelheid van vochttopname van bakstenen wordt vaak uitgedrukt in het zgn. Hallergetal. Dit getal wordt bepaald door een steen gedurende 1 minuut vanuit één zijde water te laten opzuigen (die zijde bevindt zich hierbij ~3 mm onder het wateroppervlak). Het Hallergetal wordt uitgedrukt in $\text{gr/dm}^2/\text{min}$. Sinds kort wordt toegepast de zgn Initiele Wateropzuiging (IW); de proef waarmee de IW wordt bepaald is dezelfde als waarmee het Hallergetal wordt bepaald; de IW wordt echter uitgedrukt in $\text{kg/m}^2/\text{min}$ (een Hallergetal van 10 komt overeen met een IRA van 1). De term IW geeft duidelijker dan het Hallergetal aan dat het om een beginneffect van wateropzuiging gaat. Wateropzuiging over een langere periode wordt door deze proef niet gekarakteriseerd.

Als classificatie van het initiële waterabsorptiegedrag van bakstenen, naar Hallergetal, kan worden gehanteerd:

- zwakzuigend: Hallergetal < 10
- matig zuigend: $10 < \text{Hallergetal} < 25$
- sterk zuigend: Hallergetal > 25

In de lage landen (Nederland en België) worden in de bouw veel bakstenen met een hoog Hallergetal gebruikt Hallergetal 30-50 (Hallergetallen van 60-80 komen in uitzonderlijke gevallen ook voor).

Naast de initiële vochtabsorptie (Hallergetal, IRA), die verband houdt met de snelheid van vochttopname (bijv. regen), is de totale vochttopnamecapaciteit van metselwerk van belang voor waterdichtheid van metselwerk. Immers een snelle vochttopname met een geringe vochttopname capaciteit betekent dat een muur snel verzadigd zal zijn.

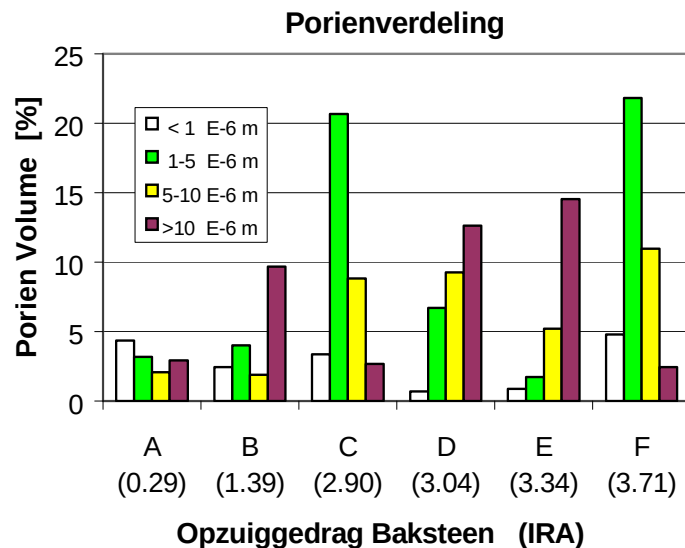
De vochtopnamecapaciteit (het gaat hierbij om vrijwillige capillaire vochtopname) wordt bepaald door een proefstuk gedurende 48 uur water te laten opzuigen (niet direct onder dompelen om te voorkomen dat lucht achterblijft in het proefstuk).

De waarden van de vrijwillige wateropname kunnen uiteenlopen van 2.5 vol % voor zeer zwak zuigende klinkers tot ~35 vol% voor sterk zuigende bakstenen.

Droging

De snelheid van droging van een baksteen wordt in absolute zin vooral bepaald door het poriënvolume (de aanwezige hoeveelheid poriën). Ook speelt, zo mag worden verondersteld, de verhouding tussen fijne en grove poriën een rol.

Figuur 1 geeft een beeld van de poriënverdeling van 6 verschillende steentypen. De poriënverdeling is bepaald met behulp van kwikporosimetrie. A is een zeer dichte klinker, die zeer zwak zuigt. B is een matig zuigende steen, D t/m F zijn sterk zuigende stenen. Vergelijken we de stenen C en D dan valt op dat een nagenoeg gelijke IRA (Hallergetal) bereikt kan worden met een zeer verschillende poriënverdeling: C heeft zeer veel fijnere poriën en betrekkelijk weinig grove poriën, terwijl D weinig fijne poriën en meer grove poriën vertoont.



Figuur 2.2 Poriënverdeling voor verschillende bakstenen; opzuiggedrag van steen A t/m F steeds sterker zuigend: IRA: 0.29 (Hallergetal 2.9) (A) tot IRA: 3.71 (Haller 37.1) (F); per steen 4 groepen poriën; van links naar rechts: 1^e staaf van het diagram: poriëndiameter <1μm;4^e staaf > 10μm.

Bij droging zal de vochtafname, in absoluut gewicht, sneller gaan bij de sterk zuigende dan voor de zwak zuigende stenen. Niet duidelijk is hoe dat in relatieve zin, vochtafname als functie van het totale vrije vochtgehalte per steentype, is.

Vergelijken we de verschillende steentypen met het oog op droging dan zullen in de groep sterk zuigende stenen (C t/m F) de steentypen D en E sneller drogen dan C en F, omdat bij deze stenen relatief veel grove poriën voorkomen. Ook is te zien dat steen B om de dezelfde een relatief gunstig drooggedrag zal vertonen.

Overwegingen op macroniveau

Vanuit de observatie van de manier waarop water tijdens een regenbui zich over een oppervlak van een gemetselde wand verspreidt, maakt Thomas (1996) onderscheid tussen “regenjas” en “overjas” gedrag van een muur.

Bij “regenjas” gedrag loopt het water langs de muur door de geringe absorptie van de stenen; indringing van water in het metselwerk gebeurt hoofdzakelijk in de voegen en dan in het bijzonder op het hechtvlak (interface) van steen en mortelvoeg. Dit houdt in dat de voegen zwaar vochtbelast zijn en dat de kwaliteit van de steen-voeg interface uitstekend moet zijn. Dit is niet zo gemakkelijk te realiseren omdat dit soort klinker-achtige stenen meestal met cement species worden verwerkt, die veel krimp vertonen: dit levert dan krimpscheuren in het hechtvlak op. Bij het historisch metselwerk hebben we vooral met kalkmortels te maken. Dit type mortels is bijzonder geschikt voor molens omdat ze vanwege hun lage E-modulus zeer geschikt zijn om dynamische belasting op te nemen (daarnaast vertonen ze gunstige healingeigenschappen). Kalkvoegen zijn minder geschikt bij “regenjas”gedrag omdat ze sneller worden aangetast onder zware vochtbelasting.

Bij “overjas”gedrag werken, als gevolg van de sterke absorptie, de stenen als een spons. In dit geval draagt de hele muur bij aan de absorptie van regenwater. De kwaliteit van de interface steen-voeg is minder belangrijk dan in het eerste geval.

Over het algemeen betekent sterke absorptie tevens snelle droging; toch moet er rekening mee gehouden worden dat droging via verdamping langzamer gaat dan vochtopname via capillaire werking, zodat er opslagcapaciteit in de muur benodigd is. In feite bepaalt de *vochtopnamecapaciteit* van de muur (die vaak een functie van de dikte is) wanneer waterdoorslag optreedt.

De bovenstaande overwegingen zijn een idealisering van de werkelijkheid, daar de aanwezigheid van inwendige holten worden verwaarloosd. Deze holten kunnen de veroorzaakt zijn door slecht vakmanschap (niet “vol en zat”gemetseld) of ongelijkmatige thermische vervormingen. De invloed van holtes op waterdichtheid is aanzienlijk omdat zij in de muur geïsoleerde waterreservoirs vormen, waarin het water niet door capillaire actie aan het materiaal kan worden gebonden. Lekkage kan gemakkelijk ontstaan indien de reservoirs via scheuren met de buitenwereld in contact komen.

Snelheid van vochtopname (Hallergetal) en het weer

Voor het weer in Nederland, heb de duur en intensiteit van neerslag en de afwisseling en duur van droge perioden zijn bij het KNMI gegevens voorhanden. Ca 6% van de tijd is er regen en gedurende de overige 94% is het droog; in verhouding regen : droogintervallen gemiddeld 1 op 16.

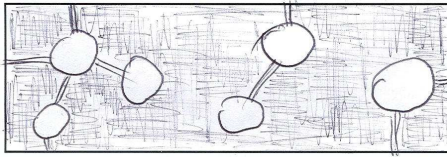
Vocht dat bij regen capillair de muur in wordt gezogen, moet er in die gemiddeld 16x zo lange drooginterval door verdamping weer uit zijn. Anders raakt de vochtbalans verstoord.

Met behulp van het hallergetal kan iets gezegd worden over de mate van indringing van regen en de gevolgen van de indringing op het drooggedrag.

Het Hallergetal is te beschouwen als een maat voor de snelheid waarmee het regenwater in de muur trekt (indringsnelheid).

De drogingssnelheid wordt steeds langzamer indien het regenwater dieper in de muur is doorgedrongen.

Vergelijking van zwak zuigende (baksteen A) en sterk zuigende (baksteen B) stenen: een denkmodel



Baksteen A)



Baksteen B)

Figuur 2.3 Geschematiseerde voorstelling van de porositeit van zwak en sterk zuigende bakstenen

Steen A)

baksteen, op hoge temperatuur gebakken. (Hardgrauw, klinker)
Grote poriën die bijna geïsoleerd liggen. Huid bijna gesloten; zwak zuigend, Hallergetal laag .
% wateropneming: X%.

Zal bij een bui bijna alle regen weren. Door de weinige in de huid aanwezige poriën zal nauwelijks water in de steen dringen en zodra buitenste laag verzadigd is gaat de steen zich gedragen als een gesloten huid en stroomt het meerdere regenwater langs het oppervlak af naar beneden.
Het regenwater blijft buiten en wordt niet doorgegeven naar de binnenzijde van de steen en de achterliggende mortelvoeg en andere stenen dieper in de muur.

Bouwwerk is 'dicht'. *(bij aanname juiste mortelkeuze en vakbekwame uitvoering)*

(toch zal deze steen bij de proef ter bepaling van de vrijwillige waterabsorptie na 48 uur onderdompeling wel 'vol' raken! Deze situatie wordt in de praktijk echter nooit bereikt.)

Steen B)

baksteen op lage temperatuur gebakken, netwerk van fijne open poriën, ('rood') sterk zuigend: hoog Hallergetal. % wateropneming, gelijk als bij steen A: X%.

Bij de minste bui wordt het water direct diep naar binnen gezogen. Raakt tijdens drooginterval niet genoeg water kwijt door verdamping om een nieuwe regenbelasting op te kunnen vangen.
Waardoor bij de volgende bui extra water in de muur, t.o.v. de beginsituatie met tot gevolg een hoger vochtgehalte dan bij de vorige bui, enzovoorts. De vochtbalans wordt negatief. Het water bereikt van lieverlee de mortelvoeg, en de daar achter liggende steen (afhankelijk van de barrière-werking van de voeg).

Bouwwerk slaat door ! *(bij aanname zelfde situatie qua mortelkeuze en uitvoering als bij steen A)*

Snelheid van vochtopname (Hallergetal) en vochtgehalte van het metselwerk

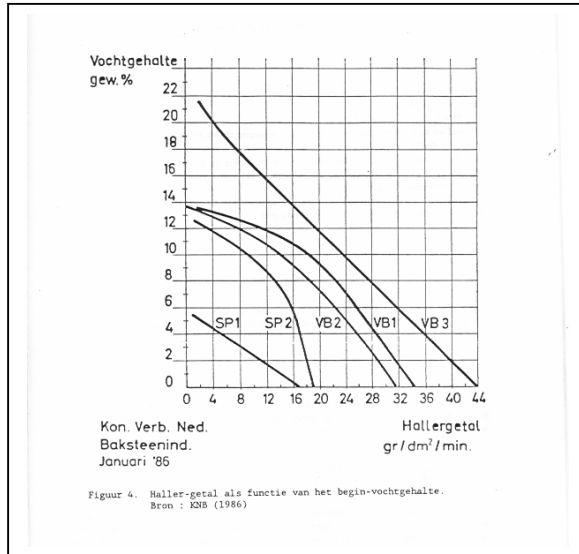
Uit experimenteel onderzoek is gebleken dat het Hallergetal een functie is van het aanvangsvochtgehalte van de steen.

Een grafiek van KNB – Baksteen, weergegeven in de studie van Groenendijk Vochttransport door baksteen (TUD 1988) laat dit op heldere wijze zien. Het gaat om 5 stenen met een oplopend Hallergetal van 17 (SP1) tot Hallergetal 44 (VB3), van 'klinker' tot 'rood'.

SP1, 'klinker' heeft bij 6% vochtgehalte, Hallergetal 0, dwz neemt dan in 1 minuut, 0 gram water/dm² op: is verzadigd, er gaat a.h.w. een afsluitklep dicht en de regenflux stroomt eraf.

VB 3, 'rood', heeft dit verzadigingsmoment pas bij 22% vochtgehalte. Bij continue regenflux gaat de afsluitklep veel later dicht dus komt er veel meer water in de steen.

We kunnen zo het Hallergetal dus ook beschouwen als een maat voor indringsnelheid.



Figuur 2.4 Hallergetal als functie van het vochtgehalte van 2 typen strengpers- en 3 typen vormbakstenen

Regensimulatieproeven

De veronderstelling dat zwakzuigende stenen minder snel vochtdoorslag vertonen dan sterk-zuigende stenen wordt bevestigd door resultaten van regensimulatieproeven uitgevoerd aan de TU-Eindhoven (Leppers 1996).

Bij de verlijmdde proefmuren, waarbij de aansluiting hechtvlak – lijm mortel krimpvrij en door het spuitpistool geheel gesloten en eenvormig was, toonden de proeven pas in een veel later stadium doorslag en wel op basis van de verschillen in hallergetal.

*Na 60 minuten,
Haller 41 , gele steen : doorslag op 14 strekken;
Haller 21 , rode steen : geen doorslag*

De gekozen belasting was 18 l/m²/h, gedurende 5 uur
Dit is de regenintensiteit van een zware bui. Deze duren echter zelden langer dan 1 uur.
De proefbelasting mag dan ook worden gezien als hoog!

Dat de metseltechniek heel belangrijk is bij voorkomen van doorslag tonen de regensimulatieproeven uit het werk van Leppers ook aan. Met traditioneel metselwerk is met een halfsteens muur bijna geen dicht werk te maken zo toonden de proeven op de beide proefmuren. Ze toonden na 25 minuten doorslag op de stootvoegen (waarbij rood iets meer; mogelijk in verband met de 'hand' van de metselaar?).
De mortelkeuze is zeer bepalend voor het verdere vochttransport in de muur.

Drie praktijkgevallen

De hygrische eigenschappen van 3 recente toepassingsvoorbeelden van vollwandmetselwerk (van molens) worden hieronder in relatie gebracht met de vochtdoorlatendheid van het metselwerk. Het gaat hierbij om de molens: de Distilleerketel, de Nieuwe Palmboom en de Schelvenaar.

Distilleerketel

Monsterstenen van de Distilleerketel werden bewaard gebleven door aannemer; hierdoor konden het Hallergetal en de vrijwillige wateropname worden bepaald.

Tijdens de bouw waren er geen relevante eisen voorgeschreven door directie bij keuze steen. Inzichten ontbraken gewoon.

Na beëindiging van het metselwerk bleek dat de Distilleerketel 'lek' en er ontstond een bouwgeschil.

Nieuwe Palmboom

Door de door de opdrachtgever geconsulteerde externe baksteendeskundigen werd alleen gekeken naar de procentuele vrije waterabsorptie als parameter. Het Hallergetal als maat voor de snelheid van vochtname (dichtheid van de buitenzijde van de steen) kwam in het geheel niet aan de orde. Achteraf betekende dit dat de opdrachtgever zich met de deskundigen gedurende het hele proces zat blind te staren op de verkeerde karakterisering, en - onder het goedkeurend oog van de adviseurs, bij het proces betrokken om de fouten van Distilleerketel te vermijden- stenen, bij een water opne- ming van 27,6% v/v stenen werden toegepast met een Hallergetal van 43 ("spons"!) , met een " lekke" molenromp als resultaat!

Schelvenaar

Stenen van zelfde steenfabriek als bij Nieuwe Palmboom maar, als gevolg van de aldaar getrokken lessen, op een hogere temperatuur gebakken.

Monsterstenen tijdens 1e fase ontvangen van HHS Alblasserwaard en Vijfherenlanden die een restpartij als inboetstenen voor de Kinderdijk molens had gekocht.

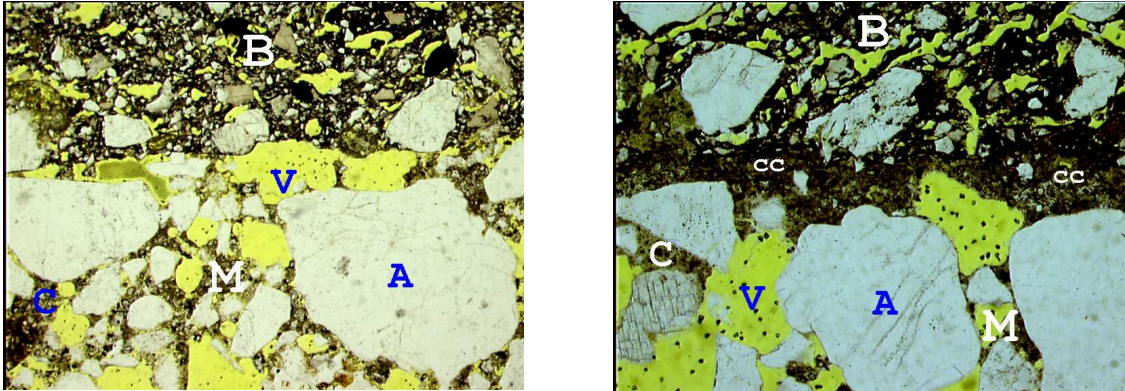
Molen De Schelvenaar, als restaurant/ partycentre in gebruik, is 'dicht' zo werd door onderzoekers ter plekke vastgesteld.

Tabel 2.1 Hygrische vergelijking 3 nieuwe molens

Drie praktijkgevallen van nieuwe molens				
		Hallergetal [gr/dm ² /min]	Vrije Waterabs. % [v/v]	Vochtsituatie
1977?	"De Distilleerketel"	45	29	Lek
1988	"De Nieuwe Palmboom"	43	28	Plaats. Lek
1993	"De Schelvenaar"	28	28	Dicht

Overwegingen op microniveau

Zoals hierboven vermeld is de kwaliteit van het hechtvlak steen-voeg van groot belang voor de waterdichtheid van metselwerk (Grimm, 1982). Met kwaliteit wordt bedoeld een goede mechanische hechting tussen steen en voeg en daarbij een dichte materiaalstructuur in de hechtzone. Om dit te bereiken moeten er fijne deeltjes, zoals cement, kalk of gemalen kalkmeel aanwezig zijn in het hechtvlak.



Figuur 2.5 Vergelijking van hechtvlakken. Links: een zwak zuigende steen in contact met een legmortel en rechts. Rechts: een sterk zuigende steen in contact met een legmortel. Het hechtvlak links bevat veel holtes, doordat er nauwelijks vachttransport van de specie naar de zwakzuigende steen heeft plaatsgevonden (maw uitharding van de mortel bij een hoog vochtgehalte). Het hechtvlak rechts bevat veel fijne cementdeeltjes, die daar terecht gekomen zijn tijdens het transport van vocht vanuit de specie naar de sterk zuigende steen; dit gebeurde direct na vermetelsing

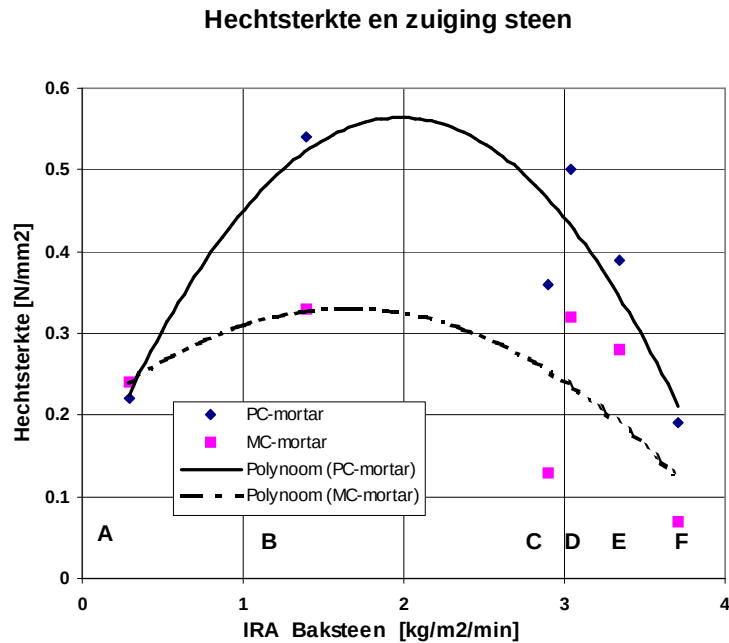
verklaring letters: B: steen, V: holte, A: zanddeeltje, C: uitgeharde cement, cc: cementdeeltjes in hechtvlak

Deze toestand wordt bereikt indien direct na het vermettelen vocht van de specie naar de steen wordt gezogen waarbij fijne deeltjes naar het hechtvlak worden gesleept. Uit de bovenstaande figuur blijkt dat het hechtvlak tussen een zwakzuigende steen en een mortel poreus is; en het hechtvlak tussen een sterk zuigende steen een mortel dicht is door opvulling met fijne deeltjes (wel moet hierbij het zand een dusdanige korrelverdeling hebben dat een dichte “bolstapeling” ontstaat).

Opgemerkt kan worden dat bij zeer sterk zuigende stenen de *mechanische hechting* tussen steen en *cementmortel* slechter wordt doordat er onvoldoende water aanwezig blijft om tot een goede uitharding van de cement te komen (Groot en Larbi, 1999).

Onderzoekingen hebben uitgewezen dat er een optimum is voor de hechtsterkte tussen cementvoegmortels en metselstenen als functie van het opzuiggedrag van de steen. (zie figuur 2.5)

In figuur 2.6 zijn de resultaten weergegeven van een serie proeven waarin de relatie tussen de hechtsterkte steen / voeg en het initiële zuiggedrag van baksteen wordt weergegeven. Er werden 6 steentypen met verschillend opzuiggedrag en twee verschillende voegmortels gebruikt, een portlandcement (PC) mortel en een metselcement (MC) mortel: voor meer details wordt verwezen naar Groot en Larbi (1999).



Figuur 2.6 Voor portland cement en metselcement mortels geldt dat de hoogste hechtsterkte wordt bereikt bij stenen met een Hallergetal van 15-25 gr/dm²/min (IRA: 1.5-2.5 kg/m²/min)

Duidelijk is te zien dat (zowel voor de PC als de MC mortels) er een maximale hechtsterkte optreedt bij matig zuigende stenen. Ook blijkt er een duidelijk verschil in hechtsterktewaarden voor portland cement mortels en de metselcement mortels (de metselcement mortels bevatten als bindmiddel 55 gew % portland cement en 45 gew % kalksteenmeel)

In historisch metselwerk hebben we vaak te maken met kalkmortels. Bovenstaande ideeën hebben betrekking op cement en bastaardmortels (Er is veel minder onderzoek gedaan aan kalkmortels dan aan cementmortels).

Extrapolerend vanuit het bovenstaande kan tav kalkmortels het volgende worden aangenomen:

- bij slecht zuigende stenen zoals klinkers zal het hechtvlak poreus en daarmee waterdoorlatend zijn
- vanaf gevellinker/hardgrauw naar sterker zuigende stenen zal het hechtvlak meestal voldoende fijn materiaal bevatten, zodat een dicht hechtvlak ontstaat (wel moet hierbij het zand een dusdanige korrelverdeling hebben dat een dichte "bolstapeling" ontstaat)

Opmerking

Voor vochttransport dwars door het metselwerk hebben we te maken met stenen en voegen: materialen met een verschillende porositeit (waarbij de voeg vaak nog een speciale porositeit in het hechtvlak vertoont). De verschillen in porositeit kunnen grote invloed op het vochttransport uitoefenen (hier zal nader op worden ingegaan in het onderzoek "metselmortels opgaand werk")

Conclusies vanuit theoretisch en experimenteel onderzoek

Opzuiggedrag én vrijwillige wateropneming

Uit macro-overwegingen (“regenjas” of “overjas”) kan de conclusie worden getrokken dat het absorptiegedrag zich bij voorkeur tussen “regenjas” en “overjas” zal bewegen; daarmee wordt de vrijwillige vochtopnamecapaciteit van het metselwerk een belangrijke parameter.

Uit micro-overwegingen (kwaliteit van het hechtvlak tussen steen en voeg) blijkt dat het opzuiggedrag en in het bijzonder de snelheid van vochtopneming van belang is. Deze parameter, uitgedrukt in het zgn. Hallergetal, lijkt optimaal te zijn bij een matig zuigende steen.

Een optimale combinatie van beide eigenschappen is dan:

Een matige zuiging (een gemiddeld Hallergetal) met een daarbij zo hoog mogelijke vrijwillige wateropneming.

Deze conclusies worden bevestigd door regensimulatieproeven ter bestudering van vochtdoorslaggedrag uitgevoerd aan de TU-Eindhoven. Analyse van de hygrische eigenschappen van 3 nieuwe gemetselde molens duidt in dezelfde richting.

2.2 Historisch onderzoek

Inleiding

De karakteristieken en de kwaliteitseisen van baksteen zijn tegenwoordig op een zeer zijn verfijnde wijze vastgelegd in verschillende normbladen, waarvan “De Baksteennorm NEN 2489” de kern vormt; deze karakteristieken zijn via gestandaardiseerde laboratoriumproeven te controleren. Geconstateerd moet worden, zoals in deel I van dit onderzoeksproject werd aangetoond, dat de normen zo zeer geënt zijn op de moderne bouw (spouwmuurconstructies) en het gebruik van cementgebonden mortels, dat zij nauwelijks toepasbaar zijn in de restauratiesector, waar het gaat om klassiek vollwand metselwerk - d.i. bouw met massieve muren- opgetrokken in kalkmortels. (Groot & Gunneweg, 2002; pp 32-41).

Het inzicht in de eisen die moeten worden gesteld aan baksteen toegepast in het opgaande werk van zwaar vochtbelaste bouwwerken in klassiek massief muurwerk, is in zekere zin “verwaterd” waardoor ook de baksteenmarkt er diensgevolge niet meer op is ingesteld; hierdoor is het vrijwel ondoenlijk om uit de standaardproducties op de baksteenmarkt de geschikte stenen te vinden voor restauratiewerk. (Groot & Gunneweg, 2002, p. 38 en p 41)

Een belangrijke invalshoek bij de bouwhistorische literatuurstudie is het opdiepen en chronologisch ordenen van kennis over het metselambacht, over de ontwikkelingen in de bouw – en productie technologie alsmede over de ontwikkeling van de wetenschap (ook proeven en meettechnieken) en de wisselwerking van die disciplines op elkaar.

En van daaruit het leggen van dwarsverbanden met de resultaten van het praktijkonderzoek.

Op die manier kan men het historisch perspectief, de ontwikkelingslijnen in de tijd zichtbaar maken en door combineren en deductie kan men achterhalen waar een ontwikkeling eventueel ontspoorde en ‘normvervaging’ tot foute materiaaltoepassingen of werkwijzen leidden in de restauratiepraktijk. Vervolgens kan men dan aanzetten geven tot mogelijke verbeteringen.

Een vorm van Kennisrecycling dus.

Eisen baksteen algemeen

De eisen te stellen aan baksteen gebruikt als metselsteen zijn tegenwoordig nauwkeurig gedefinieerd, zie "De Baksteennorm NEN 2489"

Het gaat dan met name om

- a. formaat
- b. kleur
- c. structuur
- d. drukvastheid

-
- e. dichtheid resp porositeit: uitgedrukt in % vrijwillige wateropneming v/v
 - f. absorptie- of opzuiggedrag uitgedrukt in het Hallergetal: in g / dm²/min.
 - g. vorstbestandheid

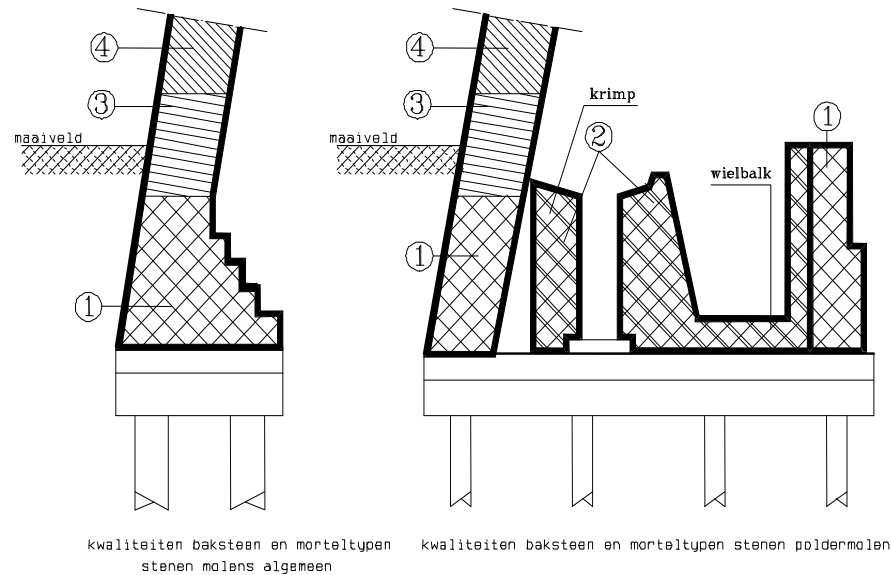
Mechanische eigenschappen nemen in de Baksteennorm NEN 2489 een prominente plaats in. Opvallend is dat tav van opgaand metselwerk *geen* zgn "hygrische" eigenschappen (eigenschappen die te maken hebben met vochttransport in een poreus materiaal) worden gesteld in NEN 2489. Dit is te begrijpen (voor het moderne metselwerk) wanneer men beseft dat buitenspouwbladen lek *mogen* zijn; immers, doorlekkend vocht wordt door verdamping in de spouw weer afgevoerd.

In het kader van de vochtproblematiek van vollwand metselwerk zijn echter vooral de zgn "hygrische" eisen van belang (waarbij vorstbestand, gezien het belang van de porositeit tav deze eigenschap als hygrisch wordt benaderd); een duidelijke (her)definiëring van de hygrische vereisten kan een belangrijke bijdrage leveren aan een succesvolle steenkeuze voor vochtbelast vollwand metselwerk.

Toepassing en aanduiding baksteenkwaliteiten in het verleden

In de klassieke bouw werden de verschillende baksteenkwaliteiten op de steenbakkerij en de bouwplaats ambachtelijk op basis van gevoel en ervaring uitgesorteerd, zonder dat daar geschreven definities voor bestonden.

De verschillende kwaliteiten werden onderscheiden door streekgebonden kwaliteitsnamen, zoals Dordreghtsen plaveijsteen of goede IJssel-onder (zie ook Groot & Gunneweg, 2002, dl I, bijlage II. pp 5-6) die voldoende houvast boden, zodat – al dan niet vastgelegd in een handgeschreven bouwbestek - de juiste steen op de juiste plek in het bouwproject terecht kwam.



Figuur 2.7 Typen metselwerk (voor betekenis cijfers zie tabel 1)

Zwaar regenbelast massief opgaand metselwerk

Uit vergelijkende bestudering van de historische bestekken en de klassieke handboeken (Scholten, 1908, p 61, bestekken in dl 2, bijlage II, van Groot en Gunneweg, 2002) blijkt dat voor zwaar vochtbelast massief opgaand metselwerk, *de gevelklinker of de hardgrauw kwaliteit* als de aangewezen kwaliteitsklasse werd beschouwd.

Niet zwaar regenbelast massief opgaand metselwerk

In niet zwaar regenbelast werk (woonhuizen in straten in de stad; van solitaire gebouwen, evt de noord- en oostgevels), bij molens, de veldmuren van een achtkante grondzeiler (onder overstek en beperkt van hoogte!) volstaat de *boerengrauw*.

Een overzicht van toepassingsgebieden historische baksteenkwaliteiten en bijbehorende morteltypen zijn in tabel 1 weergegeven.

Tabel 2.2- Toepassingsgebieden historische baksteenkwaliteiten en bijbehorende morteltypen

Toepassingsgebied	Huidige benaming baksteenkwaliteit *)	Morteltype
1. Fundering <i>Boven-steen; boerengraauwe moppen; Boerengrauw</i>	Boerengrauw	Kalk(-mortel)
2. Waterdicht werk onder grondwaterniveau (kelder; wielbak; krimp) <i>digte klinkert; plavey; uytgeforteerde digte klinkert fteen; vlakke klinkert; Vechtse regenbak klinkermoppen</i>	Kelderklinker	Sterke tras
3. Trasraam **) <i>Plavey; regte klinkert mop Steenen; Dordreghtsen plavey stenen; IJssel onder steen</i>	Trasraamklinker	Bastertrtras
4. Opgaand werk: ronde stenen molens <i>(een geval:) Eerste soort mondsteen; (meestal) IJssel ondersteen; hardgrauw</i>	Gevelklinker Hardgrauw	Slappe bastertrtras of kalk(-mortel)
5. Opgaand werk: achtkanten <i>Beste graauwe moppen; boerengrauwen moppen; boerengrauw</i>	Boerengrauw	Bastertrtras
6. Binnenmuren molenaarswoning <i>Boven-steen; boerengraauwe moppen; Boerengrauw; Keurrode moppen</i>	Boerengrauw Rood	Kalk(-mortel) Kalk(-mortel)

* Aan de hand van deze ordening - die uiteraard zijn basis vindt in de klassieke bouwkunde in zijn algemeenheid - is een poging gedaan om de historische streekgebonden kwaliteitsaanduidingen te koppelen aan de later in zwang gekomen landelijk algemeen gehanteerde kwaliteitsnamen-reeks voor metselbaksteen, 'kelderklinker / trasraamklinker / gevelklinker / hardgrauw / boerengrauw / rood'. De 'plaveij' (straatklinker), de kleinste, hardste kwaliteit, komt daar niet in voor daar dit in wezen geen 'metselbaksteen' is.

** men ziet dat in sommige oude bestekken geen overwegend onderscheid werd gemaakt voor stenen voor het trasraam ten opzichte van die voor het waterdichte werk maar dat daar vaak dezelfde klinkersteen voor werd voorgeschreven; wel werd voor 't trasraam steeds een 1 klasse minder sterke mortel (bastertrtras ten opzichte van sterke tras) voorgeschreven.

De invloed van materiaalkeuze en vervaardigingstechniek op de hygrische eigenschappen

Er zijn verschillende aspecten van het vervaardigingsproces, die een rol kunnen spelen bij het ontstaan van een specifieke porositeit die bepalend is voor de hygrische eigenschappen van een baksteen.

Te noemen zijn:

- type klei (mineralen)
- het vormen (verdichting)
- het droogproces (snelheid van drogen)
- het bakproces (mate van sintering)
- het oventype

Het is zeer moeilijk om de invloed van de verschillende aspecten op de hygrische eigenschappen te kwantificeren, omdat daarvoor te weinig gegevens beschikbaar zijn.

Hygrische eigenschappen in historisch perspectief

In de hierna volgende tabel 2 wordt een overzicht gegeven van Hallergetal-waarden en vrijwillige vochttopnemingswaarden welke in de literatuur en Normen zijn gevonden; tevens komen in de tabel enige waarden voor die verkregen zijn uit eigen onderzoek aan historisch metselwerk van molens.

Invloed kleisoort en toeslagstoffen op hygrische eigenschappen

• Geelbakkende klei

Chemische analyses TCKI

Zie hoofdstuk "Praktijk en Laboratoriumonderzoek" pag. 34

monsterstenen nrs 4 t.e.m. 7 (historische IJsselstenen) en
nrs 9 en 10 (eigentijdse gele stenen IJsselmaat) :

- tussen 9 - 11 % CaO tegenover 3 - 4 % FeO₃;

kalk / ijzer verhouding van 2,6 tot 3,7 : 1

Algemeen:

Geelbakkende klei is van nature kalkhoudend en bevat weinig ijzeroxide.

Afgezien van klei die bij Brunssum (L) voorkomt en aluminiumoxyde bevat en maar weinig wordt toegepast voor gele baksteen.(1965 ; BG III) .

Zo bv de klei waar de oorspronkelijke IJsselstenen van werden gebakken en ook de Friese klei.

Door hard stoken trekt deze kleur naar grijs en bij een lage temperatuur wordt de kleur bleekroze (Sch 49). In het juiste temperatuurtraject worden calciumsilicaten gevormd, die de gele kleur geven (Van Wijck TCKI; 2005).

Dergelijke kalkhoudende klei is 'thermisch weinig stabiel' dwz. sinterpunt en smeltpunt liggen dicht bij elkaar. (Van Wijck TCKI; 2005) .

Wat inhoudt dat deze klei in de stookcurve minder lang in sintertemperatuur kan worden gehouden (zie par. 'Invloed Bakproces' (pag 27), stap 5 stookcurve) zonder dat extreme vervorming optreedt , dan een roodbakkende ijzerhoudende klei.

Klassieke productie IJsselstenen

Opgemerkt moet worden dat de vroegere wijze van kleiwinning van IJsselsteen niet meer voor komt. De klassieke IJsselstenen werden geproduceerd in steenbakkerijen aan de Hollandsche IJssel en de Noord, uit slib dat aldaar uit de rivier werd opgebaagd.

Dit slib vereiste weinig bewerking. Het werd opgehoopt in zgn. " zellingen", inhammen in de rivier die met een lage dam omsloten en van een invaartopening waren voorzien waarin het slib bij laag water telkens bloot kwam en bij hoog weer onder liep. Na 1 of 2 jaar had het dan de nodige vastheid verkregen om per schuit naar de fabriek vervoerd om dan zonder enige verdere bereiding aan de kleimolen en daarna aan de steenvormers te worden overgegeven. (O.B. 122)

Deze wijze van winning betekende dat de klei vrij was van humusachtige resten – want nimmer als landbouwgrond in gebruik geweest- waardoor bij het bakproces geen holten konden ontstaan, en verder beter verdicht zou zijn. Dit zou wellicht een verklaring kunnen zijn voor het feit dat de originele IJsselstenen toch redelijk dicht waren van structuur.*

De ijsselstenen werden met de hand gevormd in zand, duinzand en gebakken in een veldoven of een de gewone open oven.

De krimp van het formaat van uit deze kleisoort gebakken stenen bij hogere temperaturen was aanzienlijk en ' grenst aan het ongeloofelijke' (Vd Kloes O.B. 210)

Men ziet dat af aan bv . oude gebikte ijsselstenen; de hardere / dichtere kwaliteiten zijn veel kleiner dan de op lagere temperatuur gebakken zachtere soorten.

**Nb:*

De in het lopende onderzoekstraject gedane opzuigproeven met de ' schone' zijden ('zool') van de historische monsters IJsselstenen laten desondanks hoge waarden voor het Hallergetal zien, wat erop zou kunnen duiden dat de sintertemperatuur niet, of niet lang genoeg is bereikt. (zie ook hierna bij 'discussie kalkcyclus')

toevoegen kalkmeel – verschraling met zand

Al sinds het eind van de 19^e eeuw is men gewoon de klei met allerlei toeslagstoffen te vermengen om zo elke gewenste kleur of uiterlijke schakering te verkrijgen.

Kleur en schakering van de baksteen zijn in de m o d e r n e bouw net als bij voegwerk, belangrijker dan hygrische eigenschappen.

Zo wordt tegenwoordig vrij algemeen aan ijzerrijke r o o d bakkende klei , kalkmeel (gemalen kalksteen, Calcite CaCO_3) toegevoegd om een g e l bakkend eindresultaat te verkrijgen.

Dit kan bij onvoldoende fijne maling en te lage baktemperatuur negatieve effecten hebben op de poriënstructuur en dus de waterabsorptie: hygroscopische werking *)

Bij voldoende fijne maling en hogere baktemperatuur, vallen deze effecten weg doordat een andere chemische structuur ontstaat van het keramisch maaksel (calciumsilicaten); verbindingen die, naarmate de temperatuur hoger en qua tijd-temperatuur relatie langer aangehouden stabiel worden. (Van Wijck TCKI; 2005).

Vaak wordt ter verschraling zand toegevoegd of chamotte (gebroken misbaksels). Dit heeft ook tot doel minder scheurvorming tijdens het droogproces te krijgen.

Ook dit kan – bij een te lage temperatuur, negatieve invloed hebben op de hygrische eigenschappen. Zoals uit de beschrijving van het bakproces valt op te maken, vindt een goede hechting pas plaats bij s i n t e r e n (stap 4b, 900 - 1050 °C) in het voorbeeld.

temperatuur

Veel nieuwe gele stenen (waaronder IJsselmaat) worden b e n e d e n deze temperatuurwaarden gebakken (ivm. thermische instabiliteit).

Wat betekent dat de kwaliteit 'klinker' hier beduidend moeilijker te halen is dan bij roodbakkende klei. 'Hardgrauw' (vroegere aanduiding ' ondersteen ') is zeker haalbaar, en wel bij een temperatuur **tussen 1070 – 1090 °C**. (Van Wijck TCKI; 2005)

***) discussie: kalkcyclus:**

Wanneer men het scheikundige proces van het kalkbranden – de kalkcyclus hier op projecteert, zou kunnen verklaren dat stenen uit roodbakkende, ijzerrijke klei waar de kalk als toeslag in de vorm van kalkmeel aan is toegevoegd, om een geelbakkend eindresultaat te krijgen, bv sommige nieuwe IJsselstenen, en bij het bakken het sinterttraject niet hebben bereikt, sterker zuigend zijn dan die uit diezelfde roodbakkende klei zonder kalktoevoeging zijn vervaardigd.

Rond de 900 °C vindt ontleding plaats van het toegevoegde CaCO_3 in Calciumoxyde (CaO) ,('ongebluste kalk') en kooldioxyde (CO_2).

In onder die temperatuurwaarde gebleven stenen zal in het eindresultaat de toegevoegde hygroscopische CaCO_3 onveranderd aanwezig zijn: een bijdrage aan hygroscopische absorptie.

Wanneer de tijd-temperatuur situatie wel lang genoeg in sintergebied > 900 °C. Is geweest valt het gevormde CaO verder uiteen en de calciumionen, gaan een verbinding aan met de siliciumionen waarbij - meer of minder stabiele, afhankelijk van de temperatuur- totaal niet hygroscopische calciumsilicaten worden gevormd.

relatie gloeiverlies - hallergetal

Een maat voor aanwezigheid in het gebakken eindproduct, voor de niet aan silicium gebonden, oorspronkelijke hygroscopische calciumcarbonaat is het zgn 'gloeiverlies'. Dit betreft het ontwijkende CO_2 .

Wanneer men bij zuivere kalk, CaCO_3 de koolzuur uitstoot, heeft men een theoretisch gloeiverlies van 44% .

Dit kan men linken aan het gloeiverlies dat bij de chemische analyses van TCKI bij verschillende gele monsterstenen is gevonden.

Een gloeiverlies van bijv 3% , wanneer dit uitsluitend CO_2 zou betreffen, zou erop duiden dat de steen nog $3/40 * 100/44 = 15,5\%$ van het ongebrande hygroscopische calciumcarbonaat bevat.

Zo bezien zou er een relatie tussen gloeiverlies en hallergetal moeten bestaan.

Wanneer men in de chemische analyses van TCKI de laagste en de hoogste waarden van het gloeiverlies neemt en plaatst naast die van het Halergetal dan blijkt die link duidelijk:

Monster nr	kleur	% CaO	gloeiverlies	Hallergetal
1.3	rood	5,3	1,1	21
2.3	geel	11,3	2,5	43
3.3	rood	4,5	0,8	28
4.3	geel	10,1	2,2	28
5.2	geel	11,0	3,4	61
6.2	geel	8,9	2,3	55
7.3	geel	10,3	3,3	63
8.1	geel	9,9	1,9	33
9 .a	geel	7,8	0,4	30
9.3	geel	9,2	0,5	40
10.3	geel	8,0	0,2	21

Bij 5.2 en 7.3, met ca 11% CaO , geeft 3,4 resp 3, 3 % gloeiverlies, een hallergetal van 61 resp 63.

Bij 10.3, met 8,0% CaO geeft 0,2% gloeiverlies een hallergetal van 21 op. Gloeiverlies is omgekeerd evenredig met de baktemperatuur.

Dus geeft het gloeiverlies bij kalkrijke kleien ook een indicatie voor de bereikte baktemperatuur.

***Ook hier:
alleen stenen voldoende lang in het sintertraject
gebakken leveren een bruikbaar product op!***

- Roodbakkende klei**

Chemische analyses TCKI

monsterstenen nrs 1 en 3 (historische, WF) (eigentijdse, geen monsters van geanalyseerd)

- minder dan 6 % CaO tegenover 4 – 6 % FeO₃ (sterk roodbakkend soms wel 8%);

kalk / ijzer verhouding van 1 – 1,5 : 1 (soms wel 0,78 : 1)

- algemeen:

Roodbakkende klei , bv Waal- Utrechtse en Rijn stenen, bevat relatief veel ijzeroxide – sterk roodbakkende klei wel tot 8%- en weinig kalk.

Is 'thermisch stabiel' (Van Wijk TCKI; 2005) , dwz smeltpunt ligt wat verder van het sinterpunt : plm 1070 ; (1909; SCH, 1973; PVA; Van Wijk TCKI; 2005))

Straatklinkers komen wel op 1100 °C. (Van Wijk TCKI; 2005).

Hierdoor kan verklaard worden dat roodbakkende klei een dichtere steen oplevert dan geelbakkende en ook makkelijker op en 'klinkerkwaliteit'gebakken kan worden.

In de oudste analyses van VDKL komt dit verschil in porositeit tussen rode steen en gele steen ook naar voren. Hardgrauw Waalsteen: roodbakkende klei, gevonden wateropneming 17%(m/m) tegen vergelijkbare kwaliteit IJsselsteen – geelbakkend, 20,5% (m/m).

Ook in het onderzoek aan de monsterstenen komt een significant verschil tussen 'geel' en 'rood' naar voren (zie ook tabel 3.2, monster 1 en 3 'rood overige 'geel').

verschralling met zand

Gelden dezelfde aspecten als eerder vermeld bij geelbakkende klei waarnaar wordt verwezen.

Temperatuur

Temperatuurwaarden waarop gewerkt dient te worden zijn:

- 'Hardgrauw', bij 1060 °C, en afhankelijk van tijd / temperatuur relatie,
- 'Gevelklinker'bij 1080 °C. idem.

(Van Wijk TCKI; 2005).

- Oranje bakkende klei**

- algemeen

Geen historische oranje gekleurde monsterstenen onderzocht in laboratorium.

Historische handboeken geven daar geen duidelijk beeld van.

Dit vraagt een type klei met **vrijwel geen kalk en weinig 2 – 3½ % ijzer.**

Dit kan zijn een klei is afkomstig uit het Westerwald (Duitsland), die thermisch zeer stabiel is en op hoge temperatuur kan worden gebakken. (Van Wijk TCKI; 2005).

Soms wordt echter een lichtrood - oranje gekleurde steen verkregen door een kalkrijke, geelbakkende klei op een lage (plm 800 °C) temperatuur te bakken, oftewel bij een periodieke oven, op deze kleur uit te sorteren.

Dit geeft echter de klassieke kwaliteit 'rood' als eindresultaat, zacht en poreus. Alleen geschikt voor binnenmuren.

(daarvan is vwb een 'restauratiesteen', een praktijkgeval bekend met een weliswaar zeer merkwaardig doch ook ernstig schadebeeld als gevolg.(zie foto 2.1 met bijschrift)).

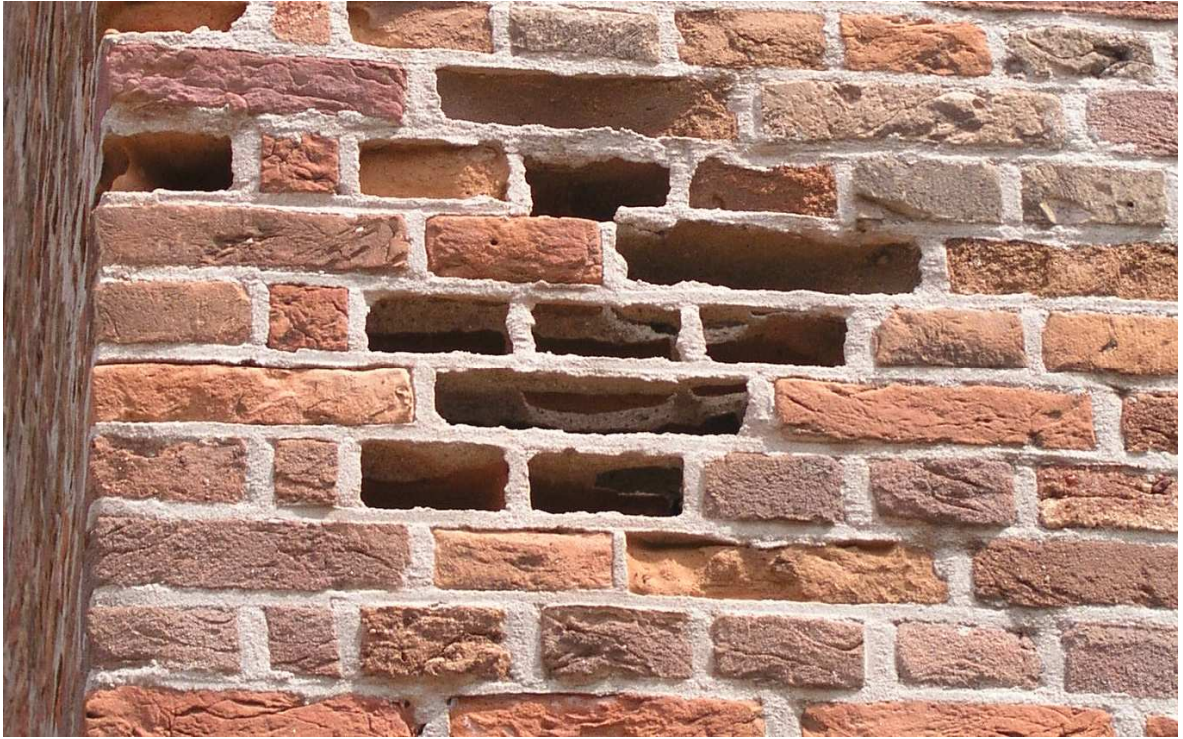


Foto 2.1 Zachte poreuze stenen gevoelig voor zoutaantasting

SAMENVATTING:

Aspecten grondstof – toeslagstoffen en baktemperatuur

De in deze richtlijn genoemde waarden voor de hygrische eigenschappen van **R3 Gevelklinker** en **R4 Hardgrauw**, kunnen bij proefproducties, op experimentele wijze worden verkregen.

Enige indicatie kan worden verkregen uit het onderstaande.

Gele stenen (o.m. IJssel):

- **Kleigrondstof**
Kalkrijke natuurlijke geelbakkende klei of ijzerrijke, met kalksteenmeel geelbakkend gemaakte klei;
- **9 - 11 % CaO tegenover 3 - 4 % FeO₃**;
- **kalk / ijzer verhouding van 2,6 tot 3,7 : 1**
- **Temperatuur**
- kwaliteit R4 Hardgrauw, **tussen 1070 – 1090 °C**.
- kwaliteit R3 Gevelklinker, **minder makkelijk haalbaar**.
- **Toevoegingen:**
- kalksteenmeel, alleen indien fijn gemalen en temperatuurbereik wordt gehaald
- Verschraling: toevoegen zand of chamotte alleen indien temperatuurbereik wordt gehaald
- **Gloeiverlies: < 0,5%**

Rode stenen (Waal- of Utrechtse of Rijn steen):

- **Kleigrondstof**
Natuurlijke roodbakkende klei dus zonder toevoegingen ;
< 6 % CaO tegenover 4 – 6 % FeO₃
(sterk roodbakkend soms wel 8%);
- **kalk / ijzer verhouding van 1 – 1,5 : 1**
(soms wel 0,78 : 1)
- **Temperatuur**
- kwaliteit R4 'Hardgrauw', bij **1060 °C**,
en afhankelijk van tijd temp. relatie,
-kwaliteit R3 'gevelklinker', bij **1080 °C**.
- **Toevoegingen:**
- Verschraling: toevoegen zand of chamotte alleen indien temperatuurbereik wordt gehaald

Oranje stenen (Waal- of Utrechtse of Rijn steen):

- **Kleigrondstof**
- **Temperatuur**
Natuurlijke ijzer-arme oranje bakkende klei (bv Westerwald klei Duitsland), zonder toevoegingen.
- **geen kalk, tegenover 2 a 3,5% FeO₃**
- **Temperatuur**
- kwaliteit R4 'Hardgrauw', bij **1070 °C**,
en afhankelijk van tijd temp. relatie,
-kwaliteit R3 'gevelklinker', bij **1100 °C**.
- **Toevoegingen:**
- Verschraling: toevoegen zand of chamotte alleen indien temperatuurbereik wordt gehaald.

Invloed bakproces op hygrische eigenschappen

Bakproces algemeen

Het principe van het bakproces bij keramisch materiaal is dat een deel van de kleimassa smelt en daarna bij de afkoeling door stolling de overige niet gesmolten delen aan elkaar kit. Een belangrijke scheiding ligt op 900 °C. Beneden die temperatuur vindt de vochtuitdrijving plaats en daarboven smelten bepaalde stoffen. Het proces dat aan het smelten vooraf gaat is het sinterproces. Tijdens dit sinteren lopen de poriën langzaam vol met gesmolten materiaal waardoor de poreusheid van de steen afneemt, het volume verkleint en door de vorming van glasachtige bestanddelen verkrijgt de steen sterkte. De klei en kwartsdeeltjes trekken samen en worden omgeven door het smeltende materiaal. De bakrimp kan totaal wel 20% bedragen.

Het bakken moet gelijkmatig geschieden opdat ook de kern gelijktijdig tot een gedeeltelijke smelting overgaat. Al naar gelang de temperatuur en de tijdsduur van de verhitting verkrijgt men stenen van verschillende hardheid en poreusheid. Voor straatstenen is de tijdsduur het langst. Wordt de temperatuur te hoog, krijgt het materiaal een te hoog gehalte aan vloeibare delen waardoor het zijn stabiliteit verliest en vervormt, mede onder de druk van de in de oven opgestapelde stenen. Daarbij kunnen zich door ontleding van bepaalde kleibestanddelen gassen vormen, zodat de steen een slakachtige structuur krijgt. (Niet te verwarren met de aangebakken slakken die soms ontstaan bij een met kolen gestookte oven, waar de brandstof tussen de stenen geworpen wordt. (1973; PVA p 40))

Het bakken gebeurt bij een temperatuur van 1000-1200 °C, afhankelijk van het soort klei (2003; KNB.WWW; 1987 GBJ p. 26 e.v.)).

Stookcurve

Hieronder een voorbeeld van het bakproces bij een steen gevormd uit een klei waarvan het sinterpunt op 1050 °C ligt. (1973; PVA p 40; 1987 GBJ p. 26 e.v.)

Op grond van aanvullende informatie verstrekt door TCKI (Van Wijk, Juni 2005) kan worden vastgesteld dat deze stookcurve betrekking heeft op een roodbakende ijzerhoudende klei.

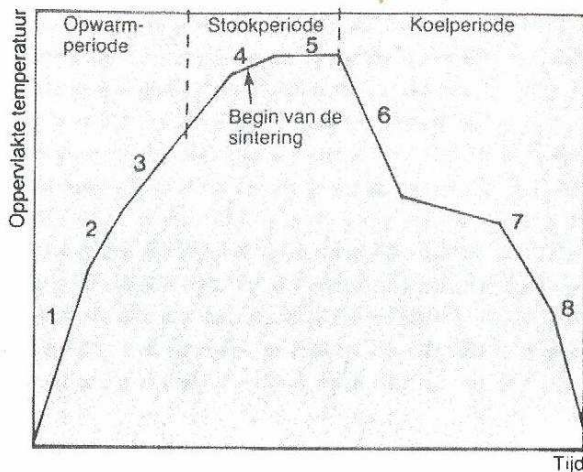


Fig. 2.8 Stookcurve (bron 1987; GBJ p. 27.)

De vormelingen, groenlingen of groene stenen, na eerst in droogkamers of –tunnels te zijn gedroogd, bevatten nog ca 7% vocht. Hiervan is ca de helft chemisch aan de klei gebonden.

Het is van belang dat de stenen in het voorafgaande droogproces goed en voldoende gelijkmatig zijn gedroogd.

De tijd-temperatuur relatie is van groot belang. Het gehele stookproces duurt gemiddeld 2 a 3 dagen en verloopt als volgt:

- 1- **50 – 150 °C** Het smoken (smauchen). In deze opwarmfase ontwijkt door voorzichtig stoken de hygroscopische restvochtigheid (het vrije water) en krimpt de steen.
- 2- **150–400 °C** In dit 2^e deel van de opwarmfase worden aanwezige organische stoffen (humusresten) naar het brandpunt gevoerd en droogt de steen steeds verder.
Het is van belang dat de steen voldoende en gelijkmatig is gedroogd voordat de bakfase begint daar men anders water insluit en zich binnen de kern stoom vormt en de steen zich op blaast of op zijn minst scheurvorming krijgt of krom trekt.
- 3- **400 – 800 °C** De organische stoffen verbranden waardoor grove poriën ontstaan en CO₂ vrijkomt; deze stookperiode mag niet te snel verlopen daar anders de buitenkant van de steen al zou zijn dichtgesinterd voordat alle gassen waren ontweken hetgeen tot opblazen van de steen leidt waarbij holten ontstaan. Er vinden chemische reacties plaats waarbij een aantal kleimineralen zuurstof opnemen (oxyderen). Het chemisch gebonden kristalwater wijkt uit bij ca 485 °C en het plastisch vermogen van de klei gaat verloren. De waterhoudende kiezelzure aluinaarde gaat over in watervrij aluminium silicaat. Er is in deze fase weinig krimp.
- 4- **800 – 900 °C Het bakken of garen;** de maximale poreusheid wordt bereikt in de vorm van een netwerk van fijne poriën. (Van Rhijn, 121295; zie ook PFM foto in figuur 2.1 'links')
Hier ontstaat bij roodbakende klei een vrij poreuze steen die voor binnenmuren wordt gebruikt ('rood').

900 – 1050 °C Het sinteren. *Hierbij ontstaat voor het eerst een goede hechting van de zandkorrels (vormzand) met de min of meer gesmolten kleideeltjes (vorming 'bakhuid') en er vindt bij voortdurend een verandering van de poriestructuur plaats.*
Bij kalkrijke (geelbakende) klei treedt de kalkcyclus in werking en wordt het calciumcarbonaat CaCO₃ nu ontleed in CaO en CO₂.

Bij plm 1000 °C ontstaat een geleidelijk grauwere steen, de kwaliteit 'boerengrauw', en bij plm 1050 °C de kwaliteit 'hardgrauw', beide geschikt voor opgaand werk in verschillende condities.
- 5- **1050 –1080 °C Het 'rijpen'.** Door de stenen langere tijd op deze temperatuur te houden zullen ze door en door gesinterd raken. en daardoor de vereiste vastheid en dichtheid krijgen. *Bij de verdere temperatuurstijging smelten de kleinere poriën aaneen tot grotere poriën er wordt lucht uitgedreven, het totale poriënvolume wordt ook kleiner waardoor de steen krimpt. Ook raken de poriën als het ware dichtgesmolten en komen zij los van elkaar te liggen* (Van Rhijn, 121295; zie ook PFM foto in figuur 2.1 'rechts').

Hier ontstaat de 'gevelklinker' kwaliteit

1080 – 1125 °C Bij deze temperatuur ontstaan de hardste kwaliteiten, 'trasraamklinker', 'kelderklinker' en 'straatklinker'.

Boven 1125 °C Oversintering. Er ontstaan gassen, er komen glasachtige blazen op de steen en de steen kan zelfs vormloos versmelten. Klei voor straatstenen moet zijn sinter- en smeltpunt ver uit elkaar hebben willen ze na de voor deze steen benodigde lange sinterperiode niet oversinterd raken of krom trekken.

De brandstoftoevoer wordt gestopt waarna in drie stappen, de koelperiode plaats vindt.

- 6- **snelle koeling** de plasticiteit verdwijnt.
- 7- **de fase waarin kwarts wordt omgezet**; is kritisch; de koelsnelheid is kleiner. Scheurvorming kan ontstaan bij te snelle afkoeling. Vooral bij gemagerde vette kleisoorten die gesinterd zijn. Ook al treedt er geen scheurvorming op dan nog kunnen inwendige spanningen ontstaan die zich later als breuk openbaren.
- 8- **afkoeling tot uitrij temperatuur**

Nb:

Oxyderend stoken

*Door bij ijzerhoudende klei extra zuurstof toe te voegen wordt het **helder roodkleurende** Fe_2O_3 verkregen.*

Reducerend stoken:

*Door zuurstof reducerende gassen toe te voegen of tijdelijk de toevoer van buitenlucht naar de oven af te sluiten, die met koolwaterstof en kooldioxide ijzeroxide veranderen in ijzeroxyd Fe_3O_4 , gaat de kleur naar **blauwgrijs / donkerpaars, zelfs naar zwart**.*

Invloed oventype op hygrische eigenschappen

Het type oven is van grote invloed op de temperatuurverdeling binnen het baksel en de te behalen maximumtemperatuur van het baksel. Dus welke hygrische kwaliteiten of hoofdgroepen steen er na sorteren uit komen. Ook is het van invloed op de nuancering en bij vereiste hogere hygrische kwaliteit (i.c. hardgrauw of gevelklinker), de maximum aantallen per stooksel.

Tijdens de bedrijfsbezoeken in het kader van het marktonderzoek (bijlage 1) werden de volgende oventypen aangetroffen:

oventypen:

- V: veldoven
- E: enkele vlamoven
- K: kamerringoven
- T: Tunnelringoven Hoffman (evt gemodificeerd)
- A: volautomatische tunneloven

brandstof:

- G: gas
- K: kolen
- K-Gv: kolen, voorverwarmen met gas
- G-Kn: gas, met wat kolen in 't pakket voor nuancering
- O: olie

Turf, van oudsher de brandstof in de steenbakkerij (Sch; Janss) wordt niet meer toegepast.

Voor een beschrijving van de verschillende oventypen wordt verwezen naar de handboeken van Scholten (p. 37 e.v.; architectonische tekeningen in een aparte portefeuille), Ploos van Amstel (v.a. pag 40 met principetekeningen), Janssen (voor de historische oventypen) en diverse publicaties van KNB.

Van twee oventypen, tw. de moderne 'volautomatische tunneloven' vs de Meiler' / 'Veldoven' zijn hieronder, als kadertekst de karakteristieken beschreven,

De mogelijkheden van de diverse oventypen voor verschillende producties zijn aangegeven in de desbetreffende bijlage. Aangezien het steeds gaat om speciaalproducties zou het misplaatst zijn om hier mbt de oventypen gedetailleerde conclusies te willen trekken.

Volstaan wordt met enkele algemene opmerkingen:

Op de 'tunneloven' na, die een continu proces heeft, dat een over het gehele baksel gelijkmatige doorbakkenheid dus hygrische kwaliteit oplevert, zijn de andere oventypen zgn. periodieke ovens waar een spreiding van de temperatuur in het baksel bestaat en er dus maar een gedeelte 'hardgrauw / klinker –achtigen' uit de oven komen, naast boerengrauw en rood. Met uitsorteren op klank (klinken) kan men die verschillende kwaliteiten scheiden.

Er zou veel voor te zeggen zijn om voor een grotere partij te gaan naar een moderne steenfabriek met een tunneloven. Echter een dergelijke steenfabriek kan vaak niet de gewenste 'handvormstructuur' leveren omdat men vaak werkt met strengpers of vormbak als vormmethode.

Men komt toch vaak uit bij meer traditionele steenbakkerijen. Zoals reeds gememoreerd kunnen die niet de gehele oveninzet op een en hetzelfde temperatuurs / kwaliteits- niveau afbakken.

Wat bij gewenste grotere partijen leidt tot een langere doorlooptijd van de levering ofwel dat men hierop moet anticiperen door tijdig tevoren al te bestellen om de stenen tijdig op de bouwplaats te hebben.

Volautomatische tunneloven – veldoven / meiler

Er wordt met opmerkingen over twee oventypen volstaan, die uitersten zijn in de technologische ontwikkeling en wat hun mogelijkheden tot productie van restauratiestenen ieder hun eigen karakteristieken en beperkingen hebben.

- Volautomatische tunneloven

Allereerst de volautomatische *tunneloven*; de tegenwoordig meest gebruikte oven. Een gas gestookt continu proces waarbij de temperatuur voor alle groenlingen op de ovenwagen goed is te reguleren (max. 1000-1200 °C) en derhalve geen grote spreiding in mate van doorbakkenheid optreedt en met een voor de gehele partij gelijke stookcurve (tijd - temperatuur relatie), dus kwaliteit.

Echter, in de steenfabrieken waar deze zeer moderne, computergestuurde ovens draaien, geschiedt het vormen van de stenen vaak met de strengpers en/of de vormbak machine. En niet kleiner dan waalformaat.

Voor stenen met een handvorm karakter kan men hier niet terecht.

- veldoven vs meiler

Een speciale plaats wordt ingenomen door stenen type ' veldbrand' , die in het zuiden van het land, met name Limburg en Noord-Brabant bij molen- en boerderijbouw veel zijn toegepast en in de restauratiepraktijk toch een verhaal apart zijn. Een steensoort die zijn naam zou ontleen aan het oventype ' veldoven' waarin hij zou zijn gebakken.

In de literatuur bestaat een zekere spraakverwarring bestaat omtrent de ' veldoven' en de ' meileroven' of ' meiler' .



Foto 2.2 Pakket 'veldbrandstenen' uit veldoven



Foto 2.3 Controlepaneel tunneloven

Alle geschreven bronnen, alsmede de gesprekken met baksteenfabrikanten tijdens het marktonderzoek, ook met informanten (o.a. gesprek hr. Pannekoek, 171203) met elkaar in verband gebracht ontstaat het volgende beeld.

- **Meiler**

De 'de meiler oven', kortweg 'meiler', is het oudste oventype. Hierbij werden geheel geen bouwkundige voorzieningen getroffen en hij werd vaak gesitueerd in het veld, in de buurt van de bouwplaats. Hier kwam 'de veldbrand' uit: gebrand op het veld.

Hij werd ten onrechte vaak 'veldoven' genoemd.

We spreken bij 'de meiler' over de oudste vorm van steenbakkerij toen dit een nevenbedrijf was van het boerenbedrijf. De *meiler* (zie Scholten p. 37) werd geheel van gestapelde vormelingen opgebouwd. Hij kwam vooral op de Limburgse löss gronden voor. Maar ook de oudste in het noorden van het land gebakken stenen –nu kloostermoppen genaamd- werden op deze manier gebakken. Het was meer een plek en een stookwijze, dan een inrichting of bouwwerk.

Scholten beschrijft het stookproces hiervan zeer gedetailleerd.

De steenkwaliteit was wisselend want sterk weersafhankelijk (regen!) Vaak kwamen daar te weinig stenen uit met een zodanige doorbakkenheid dat zij geschikt waren als voorwerkers dus werden in de buitenzijde van de muur, zo spaarzaam mogelijk en zo gelijkmatig mogelijk verdeeld, noodgedwongen ook mindere kwaliteiten verwerkt.

Het kwam voor dat in de binnenzijde van de muur dan stenen werden verwerkt die maar nauwelijks "gaar" waren. De muurdikten van de daaruit opgetrokken bouwwerken waren daar echter op aangepast want vrij groot. Zo bijvoorbeeld bij de stenen beltmolens in het zuiden van het land.

- **Veldoven**

In de ambachtelijke periode, waarbij de steenbakkerij een zelfstandig beroep, op een vaste locatie wordt komt – ook in het zuiden van het land- de *veldoven* in gebruik.

De '*veldoven*' (bij Scholten de 'gewone oven') was wel een inrichting, een bouwwerk op een vaste plek. Hij had/ heeft twee muren waartussen het stookproces geschiedt en was soms beschermd met een pannendak. Het stookproces was nog steeds vrij primitief maar toch beduidend minder van wind en regen afhankelijk dan bij de meiler wat een beter resultaat gaf.

Hij kwam veel vaker voor, ook aan de grote rivieren waar er zowel IJssel als Waal- en Vecht stenen uit kwamen.

Maar in het zuiden, waar de klei en het formaat gelijk bleven aan wat met de 'meiler' werd geproduceerd heetten de uitkomende stenen: 'veldbrand'.

Het type veldoven, in verbeterde vorm, was nog tot in de 30-er jaren van de 20^e eeuw in ons land in gebruik. Bijvoorbeeld 7 veldovens van de steenfabriek "Altena" aan de rivier de IJssel. Deze werden opgeheven door een tekort aan klei en de invloed van de crisisjaren op de bouwproductie. (gesprek hr. Pannekoek, 171203)

In het zuiden, is nog één steenfabriek die (ook) een veldoven stookt (SF –D) en daaruit de zo karakteristieke veldbrandstenen levert. Hierbinnen is een grote spreiding van hygrische kwaliteiten, die door 'klinken' kunnen worden uitgesorteerd.

Conclusie:

Het is van belang in de te ontwerpen richtlijn speciale aandacht aan de hygrische eisen voor 'veldbrand' en 'kloostermoppen' te besteden.

Relatie datering metselwerk / muurdikte en hygrische eisen

Hoe ouder het metselwerk, hoe dikker de muren, hoe minder dicht de stenen mogen (i.c. hoe sterker zuigend) zijn om geen last van vochtdoorslag te hebben (bv 'kloostermoppen').

Door de eerder geschetste ontwikkelingen van de baksteenfabricage mbt verbeterde oventypen en dito van de temperatuurbeheersing i.c. door de toepassing van de gesloten oven, na de meiler en de veldoven, en het overgaan op steenkool ipv turf als brandstof kon een (groter deel van een) ovenlading stenen eerder en langer op sintertemperatuur gebakken worden dan voordien. Door de toepassing van kleinere formaten, die sneller droogden kon zonder gevaar voor droogscheuren, vettere klei worden toegepast. Met hardere / dichtere, dus minder zuigende kwaliteiten als eindresultaat. (IJsselstenen, Rijnstenen).

Hetgeen erin resulteerde dat gebouwd kon worden met dunnere muren. (zie ook Groot & Gunneweg; 2002, par. 2.1.3 , pag.18)

Men ziet dit duidelijk weerspiegeld in de muurdikten van middeleeuwse kerken en kastelen tegenover de gevels van woonhuispanden en pakhuizen en de bakstenen windmolens, in de eind 17^e – eind 18^e eeuw. En een nog verdere sprong aan het eind van de 19^e eeuw: de vlamoven, de ringoven: meer 'klinkerharde' stenen, mn. Waalstenen, met de bouw van tamelijk dunwandige fabrieken en andere utiliteitsgebouwen als uitkomst.

Een theoretische verklaring kan wordt gevonden in het volgende.

Vochtdoorslag vindt plaats als in de muur het 'kritisch vochtgehalte' (zie Groot & Gunneweg, 2002, par.1.1.1 , pag. 1) wordt overschreden. In een dikkere muur wordt de hoeveelheid in een regenperiode opgezogen water, over een grotere massa verdeeld dan bij een dunne(re). Met als resultaat, een lager vochtgehalte dus groter kans dat het kritisch vochtgehalte niet wordt overschreden, bij gelijke eigenschappen van de toegepaste stenen.

Bij in kloostermoppen opgetrokken gebouwen (iets vergelijkbaars gaat op voor agrarische bouwwerken in het zuiden van het land, in zgn 'veldbrandstenen', maar veel langer toepassing gevonden) is, omdat er veel meer stenen van de ovenlading -ook de zachtere- werden toegepast als voorwerkers, bovendien de spreiding van kwaliteiten in het gevelvlak zeer groot en daardoor visueel ook de schakering in kleur.

Dit is een belangrijk kenmerk voor die bouwperiode.

Opgemerkt wordt dat de zachtste kwaliteit eerder aanleiding geeft tot vorstschade/ zoutschade dan dat er nu vochtdoorslag door wordt veroorzaakt.

Conclusie:

Uit bovenstaande wordt duidelijk dat het toepassen van een richtlijn voor de hygrische eigenschappen bij de 'kloostermoppen' en ook bij de 'veldbrandstenen' , i.c. de waarden voor de hardgraauw en de gevelklinker, zijn doel voorbij kan schieten en hooguit de 'minimumkwaliteit' en de 'bandbreedte' , gerelateerd aan de bestaande situatie en het al dan niet optreden van vochtdoorslag, in ogenschouw genomen moet worden.

3. Praktijk en Laboratoriumonderzoek

3.1 Monstername

Door de Rijksdienst voor de Monumentenzorg werden een 10-tal eigenaars van door de onderzoekers geselecteerde zwaar vochtbelaste maar *n i e t l e k k e* monumenten (8 stenen windmolens, een 19^e eeuwse fabrieksgebouw, een idem utiliteitsgebouw) gevraagd aan het onderzoeksproject mee te willen werken door toestemming te verlenen dat er een drietal bakstenen als 'monster' uit de muur zouden worden genomen en vervangen door passende andere.

In wezen een verzoek om *'gezond weefsel' af te staan ten behoeve van het vinden van een medicijn ter genezing van 'zieke' monumenten*. Hierop werd in vrijwel alle gevallen positief gereageerd.

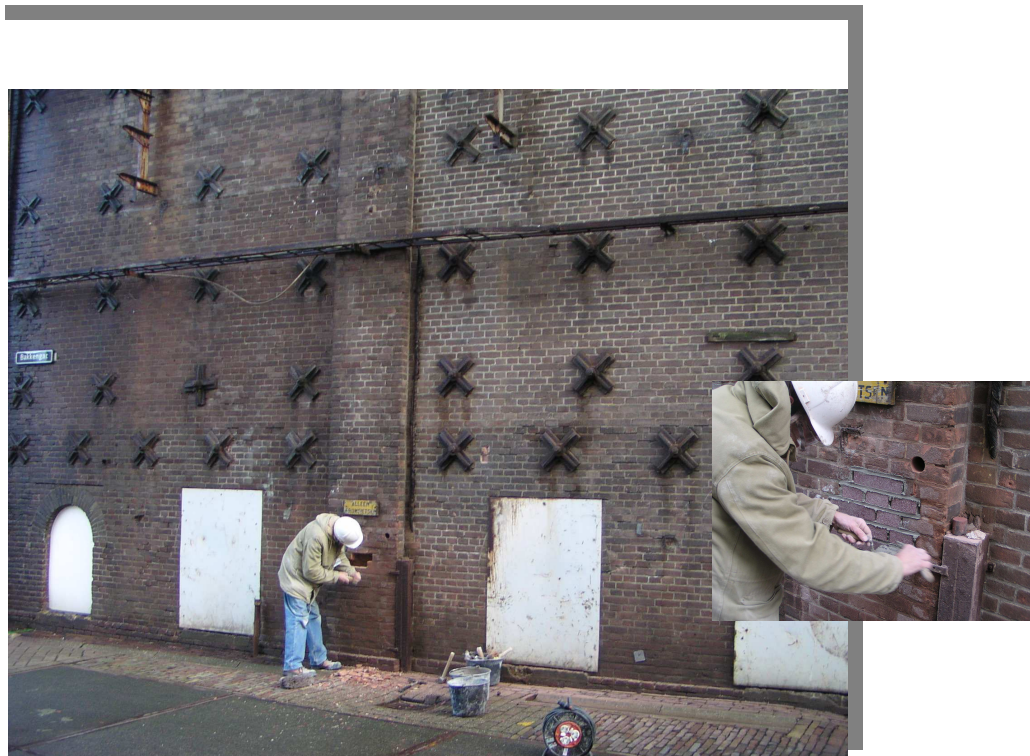


Foto 3.1 Uithakken monsterstenen en inboeten vervangende; nrs 1 Delft, DSM (voorheen Koninklijke Gist en Spiritusfabriek)

Een van de onderzoekers ging met een ervaren restauratiemetselaar op pad om de monsterneming uit te voeren. Bij de molens werden de monsters genomen aan de niet regenbelaste oost-zijde en vervangen door passende inboet ijselstenen. Bij de beide andere objecten door passende WF renovatiesteen.

De bezoeken aan de objecten en het visueel bestuderen van de monsters en de aanhangende mortelresten leverde al enkele interessante inzichten op. Ook de in eigen laboratorium uitgevoerde analyses mbt hallergetal en procentuele vrije waterabsorptie. Met name omtrent de invloed van de verweringslaag en bakhuid (hoofdstuk 3.3) op de hygrische eigenschappen.

Nadat de monsters in het eigen laboratorium waren onderzocht werden zij afgeleverd bij het Technisch Centrum voor de Keramische Industrie (TCKI) te Velp waar een aantal specifieke analyses zijn uitgevoerd. Te noemen zijn poriënverdeling en chemische samenstelling van de oorspronkelijke klei (hoofdstuk 3.4).

Onderstaand de bemonsterde objecten in numerieke volgorde

1	DSM, Delft	(c.1910)
2	de Roos, Delft	(1727)
3	TU-Delft Mijnbouwplein, Delft	(c. 1910)
4	Aeolus, Vlaardingen	(1793)
5	Molen 7, Kinderdijk	(1738)
6	De Hoop, Zierikzee	(1850-76)
7	De Hoop, Rozenburg	(1887)
8	Windlust, Achthuizen	(1852)
9	DNPB, Schiedam (nieuwe steen)	(1986)
10	Randwijk, Heteren (nieuwe steen; van marktonderzoek)	(2004)

3.2 Uitvoering van de proeven

Naast de hierboven genoemde monsters werden er ook stenen beproefd die thans op de markt worden gebracht voor restauratiedoeleinden (zie hoofdstuk3.4).

Om te voorkomen dat er veel schade zou worden aangericht, was het aantal stenen van de 10 bemonsterde *oude* projecten gering: ~ 3 monsters per project.

Dit was anders voor de *nieuwe* stenen over het algemeen 5 per type steen.

Voor beide series stenen werden het Hallergetal en de vrijwillige wateropname bepaald. Bij de oude serie werd veel aandacht besteed aan de verschillen in opzuiggedrag tussen de (door tijd en omstandigheden) vervuilde zichtzijde en de schone zoolzijde (deze zijde vertegenwoordigt in feite de beginsituatie tav het opzuiggedrag van de steen tijdens de bouw van het object)



Foto 3.2 Zichtzijde (zwarte buitenkant) en zoolzijde (legzijde van de steen) van een monstersteen anno 1789.

Aan de oude stenen werden tevens bij de TCKI proeven gedaan om een indruk te krijgen betreffende (i) verschillen in porositeit en (ii) verschillen in chemische samenstelling.

3.3 Analyse resultaten Laboratoriumonderzoekingen TCKI: hygrische eigenschappen van 8 historische en 2 moderne baksteentypen

Inleiding

In kort bestek worden in het onderstaande de resultaten van het onderzoek door TCKI uitgevoerd, weergegeven (voor details betreffende de methoden van onderzoek, en een meer uitgewerkte analyse van de resultaten wordt verwezen naar bijlage 5).

De monsters die aan de TCKI werden aangeboden zijn genomen uit 8 historische gebouwen (monsters 1 t/m 8) die *geen* vochtdoorslagproblemen vertoonden + 2 monsters van nieuwe stenen. De 8 historische gebouwen bestaan uit 2 gebouwen uit het begin van de 20^e eeuw: een fabrieksgebouw (monster 1) en het faculteitsgebouw van het voormalige mijnbouwkunde van de TU Delft (monster 3). De overige 6 historische monsters zijn van historische molens waarvan bekend is dat deze, evenals de gebouwen van monsters 1 en 3, thans geen vochtdoorslagproblemen vertonen (de monsters 2,4,5,6,7, en 8). Monster 9 is de steen die gebruikt is voor de in 1989 goeddeels herbouwde De Nieuwe Palmboom (DNP), die lek is. Monster 10 is een moderne hardgrauw.

Het onderzoek is met name gericht op de karakterisering van bakstenen met het oog op vochtopname (het hygrische gedrag). Fundamenteel gezien gaat het hierbij vooral om de porositeit en poriënverdeling in bakstenen, omdat poriën capillair opzuiggedrag vertonen. Bij het opnemen van vocht door een muur gaat het vooral om

- de snelheid waarmee dit gebeurt (uitgedrukt in het Hallergetal)
- de opnamecapaciteit (buffer) van de steen (uitgedrukt in de vrijwillige wateropname)

Initieel wateropzuiggedrag (Hallergetal)

In tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van de Hallergetallen van de onderzochte monsters. De hallergetallen zijn bepaald aan het legvlak (de zool) en aan de aan het weer blootgestelde buitenzijde (de zichtzijde).

Tabel 3.1 Overzicht hallergetallen legvlak (zool) en buitenzijde (zicht) van de 10 monsters (GEM is gemiddelde van een aantal monsters, STDV is de standaardafwijking over de resultaten)

		ZOOL *)				ZICHT #)		
		GEM		STDV		GEM		STD
		g/dm ² /min	%			g/dm ² /min	%	
1	DSM, Delft	21.7	10.4	48.0		13.3	2.9	21.7
2	de Roos, Delft	43.3	7.6	17.6		21.7	12.6	58.1
3	TU-Delft, Delft	28.3	5.8	20.4		21.7	2.9	13.3
4	Aeolus, Vlaardingen	28.3	2.9	10.2		13.3	2.9	21.7
5	Molen 7, Kinderdijk	61.3	14.3	23.4		23.8	12.5	52.6
6	de Hoop, Zierikzee	55.0	7.1	12.9		25.0	0.0	0.0
7	de Hoop, Rozenburg	63.3	7.6	12.1		33.3	7.6	22.9
8	Windlust, Achthuizen	33.3	10.4	31.2		16.7	7.6	45.8
9	DNP, Schiedam ^)	40.0	0.0	0.0		36.7	2.9	7.9
10	Randwijk, Heteren ^)	21.7	2.9	13.3		18.3	5.8	31.5

*) ZOOL: binnenzijde / legzijde

#) ZICHT: verweerde buitenzijde / strekzijde

^) nieuwe stenen

De zool is schoongemaakt van mortelresten en geeft bij de bepaling van het Hallergetal een indruk van het opzuiggedrag (snelheid) van de steen op het moment van verwerking destijds. De zichtzijde is de buitenzijde van de steen, die in de loop van de tijd een ander opzuiggedrag heeft gekregen onder invloed van vervuiling, mogelijke toepassing van vochtremmende middelen etc.

De proeven zijn uitgevoerd met 3 monsters per object. In tabel 3.1 zijn gemiddelde waarden en standaardafwijkingen (in absolute waarde en in percentage) aangegeven. De standaardafwijkingen van de DSM/Delft (monster1), molen 7/Kinderdijk (monster 5) en de Windlust/Achthuizen (monster 8) zijn groot: dit duidt op een grote variatie in de kwaliteit van de toegepaste stenen. De waarden voor proefstukken 9 en 10 zijn nagenoeg gelijk, hetgeen niet verwonderlijk is, daar het hier nieuwe stenen betreft, die in een gecontroleerd proces gestookt zijn.

Uit de resultaten in tabel 3.1 is op te maken dat de initiële vochtopnamen (Hallergetal) aan de zoolzijde voor vijf van de 7 molens hoog tot zeer hoog zijn. Dit is een onverwacht resultaat, omdat verondersteld werd dat de waterdichtheid van deze molens in belangrijke mate bepaald zou zijn door een matig opzuiggedrag (een "gemiddeld" Hallergetal: 15-30 gr/dm²/min) van de toegepaste stenen.



Foto 3.3 De verweerde zichtzijde (links) en de zool of legzijde (rechts) van stenen aangetroffen in de Molen de Hoop, Roozenburg (monster 7)

Wat uit de resultaten echter ook blijkt is dat de Hallergetalwaarden aan de zichtzijde van het metselwerk bijzonder veel lager zijn dan die aan de zoolzijde: hallergetalwaarden aan de zichtzijde ~0.5 tot 0.3 zo hoog als die aan de zoolzijde. Dit is van belang omdat de toetreding van regen in de molenromp vanuit de zichtzijde plaats vindt. In feite betekent dit dat, wat betreft de stenen, de vochtopname met een gematigde opzuigkracht plaatsvindt (met als bijkomend voordeel dat de waterberging van de stenen hoog is).

Intussen is niet duidelijk hoe de vochtoverlastsituatie bij de molens is geweest gedurende de eerste tientallen jaren na oplevering. Waren ze toen lek (of had men er minder last van omdat er goed gelucht werd en men niet te kieskeurig was) en zijn ze in de loop van de jaren waterdicht geworden? Of is de invloed van de voeg-steenovergang (barrière) op de waterdichtheid toch groter dan verondersteld?

Verschillen tussen zool en zichtzijde zullen voornamelijk veroorzaakt zijn door vervuiling van de buitenzijde (en/of de toepassing van waterwerende middelen, zoals teer, oliën etc.).

De wateropzuigingsproeven over langere perioden (niet alléén over 1 minuut, maar ook over 5 minuten en 15 minuten) laten zien (zie bijlage 5) dat de vochtopname vanuit de zool sneller stopt dan vanuit de zichtstrek: met ander worden de vervuiling heeft tevens een duidelijk *vertragend* effect op de vochtopname.

Vrijwillige wateropneming

Naast het Hallergetal zijn voor alle proefstukken ook de vrijwillige wateropneming bepaald. De vrijwillige wateropneming wordt bepaald door een proefstuk voor een periode van 48 uur in water te leggen en de opname van water in het proefstuk te bepalen. In feite geeft de vrijwillige wateropname een indruk van de vochtopnamecapaciteit (de berging) van een proefstuk.

In tabel 3.2 is een overzicht gegeven van vrijwillige wateropname in volumeprocenten; bovendien is de volumieke massa van de monsters weergegeven.

De volumieke massa kan berekend worden door het gewicht en het volume van het monster te bepalen. De gewichtsbepaling is eenvoudig: via weging van het droge monster. Het volume van het (onregelmatig gevormde) monster kan worden vastgesteld door de opwaartse kracht te bepalen die het verzadigde monster in water gewogen ondervindt.

Tabel 3.2 Overzicht Hallergetal (zoolzijde), vrijwillige wateropname en volumieke massa

		HALLER			Vrijw. Wateropn			Volumieke Massa	
		GEM	STDV		GEM	STDV		GEM	STDV
		g/dm2/min			vol % (v/v)			kg/m3	
1	DSM, Delft	21.7	10.4		23.1	2.1		1729	52
2	de Roos, Delft	43.3	7.6		34.8	4.4		1490	93
3	TU-Delft, Delft	28.3	5.8		25.9	0.5		1703	12
4	Aeolus, Vlaardingen	28.3	2.9		26.7	1.5		1650	13
5	Molen 7, Kinderdijk	61.3	14.3		34.1	5.1		1486	106
6	de Hoop, Zierikzee	55.0	7.1		35.5	0.2		1465	2
7	de Hoop, Rozenburg	63.3	7.6		33.3	2.9		1461	23
8	Windlust, Achthuizen	33.3	10.4		29.7	4.7		1580	121
9	DNP, Schiedam ^)	40.0	0.0		26.7	0.1		1619	8
10	Randwijk, Heteren ^)	21.7	2.9		17.2	2.9		1823	39

Uit tabel 3.2 is op te maken dat er in globale zin een verband bestaat tussen volumieke massa, vrijwillige wateropname en hallergetal.

Zo blijkt dat de monsters de Roos (Delft), Molen 7 (Kinderdijk), Molen de Hoop (Zierikzee) en Molen de Hoop (Rozenburg) een bijzonder lage volumieke massa hebben, hetgeen wijst op een hoog poriënvolume; tevens blijkt dat deze monsters een hoge vrijwillige wateropneming vertonen en hoge Hallergetallen hebben.

Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat de verschillen in de Hallergetallen toch aanzienlijk kunnen zijn: tussen 43.3 (de Roos, Delft) en 63.3 (de Hoop, Rozenburg). Aangezien de poriënvolumes van deze 4 monsters nagenoeg gelijk zijn, dienen de verschillen in Hallergetallen vooral toegeschreven te worden aan verschillen in de poriëverdeling (verschillen in aanwezigheid van grove en fijne poriën) van de 4 monsters (eenzelfde poriënvolume kan bereikt worden met zeer

uitlopende poriënverdelingen). Zo zullen relatief veel fijne poriën tot een langzamer vochtopname leiden en dus een lager Hallergetal.

Uit de chemische analyse zoals uitgevoerd door de TCKI blijkt dat de sterk zuigende monsters (hierboven genoemd) gestookt zijn van een klei met een hoog kalkgehalte in de receptuur .

Poriën en vochttransport

Voor vochttransport in kleiprodukten moeten de poriën in verbinding met elkaar staan (vernetting / verbondenheid van de poriën). Uit de vergelijking van het poriënvolume (dat afgeleid kan worden uit de vrijwillige wateropname) en het theoretische poriënvolume (dat uit de volumieke massa volgt) is iets te zeggen over verbonden en geïsoleerde poriën.

Immers, de vrijwillige wateropname geeft een indruk van de hoeveelheid water die als gevolg van de onderlinge verbondenheid van poriën door het monster is geabsorbeerd. Dit houdt echter niet in dat alle poriën zijn gevuld met water: het monster kan ook geïsoleerde poriën bevatten. Het totale (theoretische) poriënvolume, verminderd met het vrijwillige watervolume, levert het volume aan geïsoleerde poriën op.

Vergelijking van de volumieke massa (tabel 3.2) met een poriënvrije massa (waarvan de dichtheid voor klei-achtige materialen 2650 kg/m³ is) levert vervolgens het theoretische poriënvolume voor ieder monster op; dit gaat als volgt:

$$PV_{\text{theor.}} = [1 - (\rho_{\text{volumieke massa}} / \rho_{\text{zonder porien}})] \times 100$$

waarbij,

$PV_{\text{theor.}}$: theoretisch poriënvolume

$\rho_{\text{volumieke massa}}$: volumieke massa

$\rho_{\text{zonder porien}}$: soortelijke massa (zonder poriën)

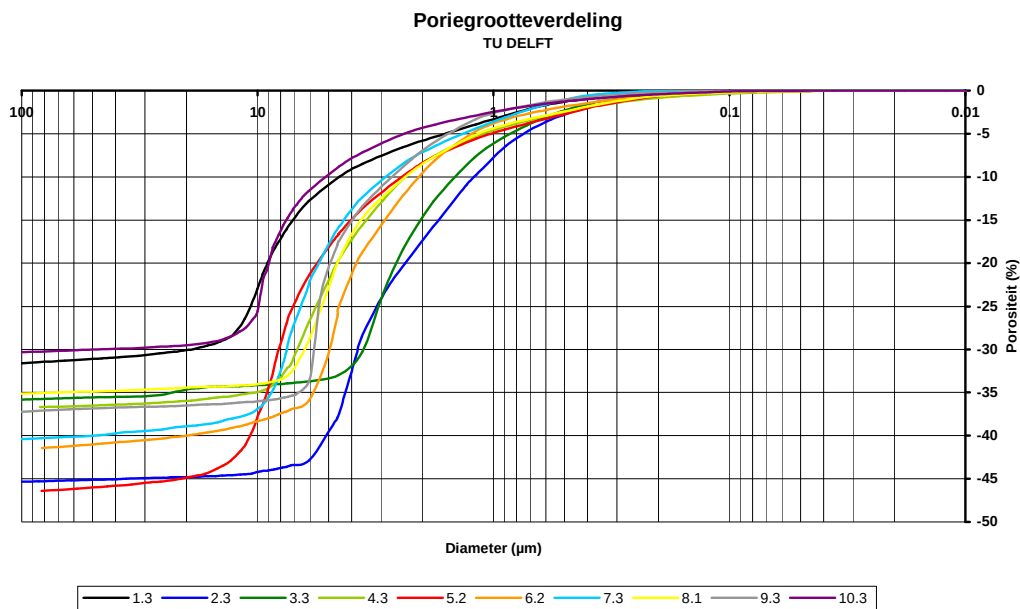
Tabel 3.3 Verbonden poriën / geïsoleerde poriën

		Vrijw. Wateropn. (experimenteel) vol % (v/v)	Porien Volume (theoretisch) vol % (v/v)	Verbonden Porien % v/h porien vol.
1	DSM, Delft	23.1	34.8	66.3
2	de Roos, Delft	34.8	43.8	79.4
3	TU-Delft, Delft	25.9	35.7	72.4
4	Aeolus, Vlaardingen	26.7	37.7	70.7
5	Molen 7, Kinderdijk	34.1	43.9	77.5
6	de Hoop, Zierikzee	35.5	44.7	79.2
7	de Hoop, Rozenburg	33.3	44.9	74.1
8	Windlust, Achthuizen	29.7	40.4	73.5
9	DNP, Schiedam	26.7	38.9	68.5
10	Randwijk, Heteren	17.2	31.2	55.1

Uit tabel 3.3 blijkt dat de monsters van de Roos (2), Molen 7 (5) en de Hoop (6), de hoogste percentages verbonden poriën bezitten. Lage vrijwillige wateropneming blijkt samen te hangen met een hoger percentage geïsoleerde poriën (DSM, (1) en Randwijk (10)). Dit is te begrijpen als men zich realiseert dat bij hoger doorsintering meer en meer geïsoleerde poriën ontstaan. Vochttransport zal het gemakkelijkst plaatsvinden door de monsters 2, 5 en 6 omdat deze zowel een hoge mate van verbondenheid van de poriën als een hoog totaal poriënvolume bezitten. Dit in tegenstelling tot de monster 1 en 10.

Poriegrootteverdeling en drooggedrag

Kwikporosimetrie geeft een idee over de poriegrootteverdeling en het totale poriënvolume van poreuze materialen. In figuur 3.1 zijn de resultaten verzameld van de kwikporosimetrie aan de 10 monsters.



Figuur 3.1. Poriegrootteverdeling van de verschillende monsters (de getallen verwijzen naar de monsters; bijv. 4.3: aeolus, monster 3, zie verder par. 3.1 monstername)

Met behulp van figuur 3.1 kunnen uitspraken gedaan worden over verschillen in totaalporositeit van de monsters en de verschillen in poriënverdeling; het laatste kan leiden tot conclusies over verschillen in drooggedrag.

Langs de horizontale as zijn de poriediameters aangegeven: van links naar rechts, van 100 µm naar 0.01 µm.

Uit deze curves is de totale porositeit van een product af te lezen uit het snijpunt van de lijnen met de verticale as aan de linker zijde van de grafiek (schaalverdeling weergegeven aan de rechterzijde). Bij geen enkel product worden poriën aangetroffen met een diameter kleiner dan 0.1 µm. Poriën met een diameter tussen 0.1 en 1 µm komen ook slechts in beperkte mate voor. Bij de Molen de Roos (2) en het TU-gebouw (3) is het poriënaandeel in tussen 0.1 en 1 µm iets meer dan 5 % van het totale steenvolume. Bij nagenoeg alle producten liggen de meeste poriën in het diameterbereik tussen 1 en 10 µm.

Alleen de monsters van het DSM gebouw (1) en Molen 7, Kinderdijk (5) hebben meer dan 5 % volumeaandeel poriën groter dan 10 μm . Deze monsters zullen een goed drooggedrag vertonen: hoe groter de poriediameter hoe geringer de weerstand tegen verdamping.

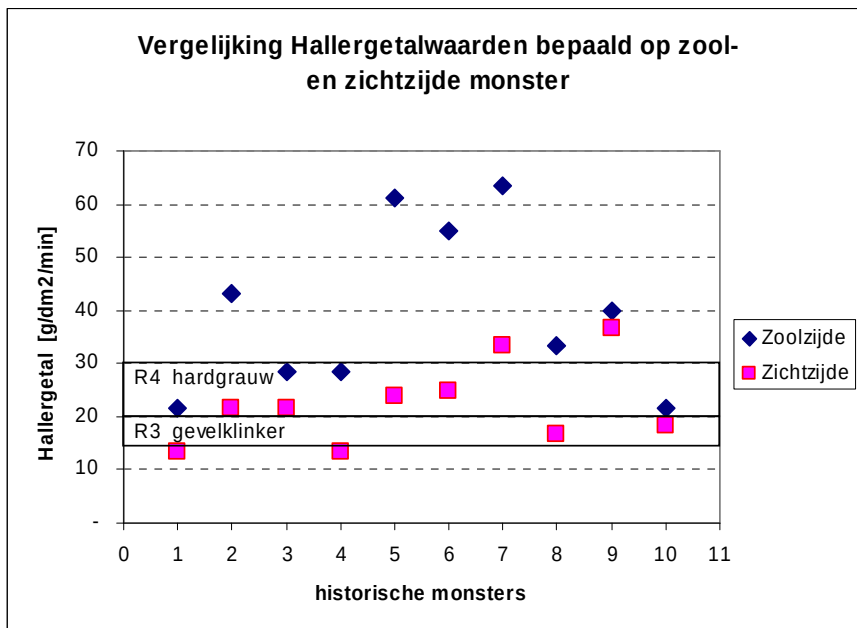
De monsters DSM (1) en Randwijk Heteren (10) bezitten de geringste porositeit.

De monsters Molen de Roos (2), TU-Delft (3), Molen de Hoop, Zierikzee (6) en De nieuwe Palmboom (9) bevatten nagenoeg alleen fijne poriën; kleiner dan 6 μm . Van deze producten mag verwacht worden dat zij het sterkste vochtvasthoudend vermogen hebben en dus het slechts zullen drogen.

Relatie Hallergetal – verweringslaag bij historische steenmonsters

De analyseresultaten Hallergetal historische monsterstenen molens ijsselformaat (2,4,5,6,7,8,) tonen een opmerkelijk, zelfs extreem verschil tussen de waarden 'zool' en 'zicht'. Zicht is met ruim twee eeuwen verweringslaag (+ bakhuid) en 'zool', de gebikte legzijde.

In onderstaande figuur 3.2 is dit grafisch weergegeven. De zones geven aanbevolen gebieden voor hardgrauw (R4) : Haller 20-30 $\text{gr/dm}^2/\text{min}$ en gevelklinker (R3) 15-20 $\text{gr/dm}^2/\text{min}$.



Figuur 3.2 Overzicht hallergetalwaarden voor zool- en zichtzijde van de monsterstenen. De monsters 2,4,5,6,7,8 betreffen historische molens.

De waarden 'zool', vergeleken met de overige gevonden waarden (o.a.1. DSM (1), TUD (3)) dienen *niet* als referentie worden gebruikt om nu de hygrische eisen mbt Hallergetal mee te formuleren.

De gedachte is veeleer gerechtvaardigd dat sommige van deze objecten kort na de bouw bij hevige regen doorsloegen en dat de basisconditie als 'vochtig' was te kenschetsen. Dit is te onderbouwen wanneer wij alle inmiddels historisch bouwkundige kennis projecteren op de aangetroffen situatie.

In de eerste plaats zorgde de bedrijfssituatie, met zijn optimale vorm van natuurlijke ventilatie ervoor dat de overlast binnen de perken bleef. Daarnaast zal men vaak zijn toevlucht hebben genomen tot uitwendige beschermingen.

Uit 'Onderzoeksrapport Vochtproblematiek Stenen Molens – 1e Fase', DI I (par. 2.3. 1 en 2.3.2. pags 44 e.v.) is bekend dat 'teren' en 'pleisteren', zelfs behandelen met lijnolie, om oude vochtproblemen te bestrijden, veelvuldig werd toegepast (en ook door gevelreinigingstechnieken is 'weggerestaureerd'). Het zal ook, veel vaker dan bekend is, en bij sommige molens mogelijk al vanaf kort na de bouw zijn toegepast.

Soms is hiervoor bewijs beschikbaar: Bijv. Pendrechtse Molen waar uit rekeningen blijkt dat er omstreeks 1845 een behandeling met lijnolie werd toegepast. Van de molen Y, Anthonie molen is bekend dat hij van oudsher met 'Stockholmer teer ' (houtteer) werd behandeld.

Zo zullen er veel meer geweest zijn. Niet bekend is sinds hoe lang molen G, De Windhond al zijn geteerde gedaante heeft. Van probleemgeval De Valk, Leiden is bekend uit bestudering van oude foto's dat deze molen ook over grote delen geteerd was. Het monstersteentje van de molen Aeolus te Vlaardingen laat bij nauwkeurig bekijken zien dat er koolteerresten op de zichtzijde zitten.

Men mag veronderstellen dat dit in veel meer gevallen voorkwam omdat, zo hebben wij nu met proeven kunnen vaststellen de ijsselstenen uit midden 18^e eeuw in veel gevallen te poreus, te sterk zuigend waren.

Samenvatting en conclusies

Voor dit onderzoekshoofdstuk:

De dichte molens waarvan monsterstenen werden genomen danken hun dichtheid in belangrijke mate aan de 'verweringslaag'.

Nieuwe stenen die vwb Hallergetal aan die waarden voldoen, zullen gunstig presteren.

Algemeen:

Andermaal is aangetoond dat gevelreinigingstechnieken voor onoplosbare vochtproblematiek kunnen zorgen (een onderzoeksresultaat dat zal worden meegenomen in deelonderzoek 7 Invloed verweringslaag – gevelreiniging)

Ook wordt temeer onderstreept dat voor sommige objecten, gezien steenkeuze e/o kwaliteit vakmanschap bij de bouw geen oplossing mogelijk is zonder ingrepen, die het uiterlijk aspect veranderen.

3.4 Analyse resultaten Laboratoriumonderzoeken TUD: hygrische eigenschappen “nieuwe bakstenen” van het marktonderzoek

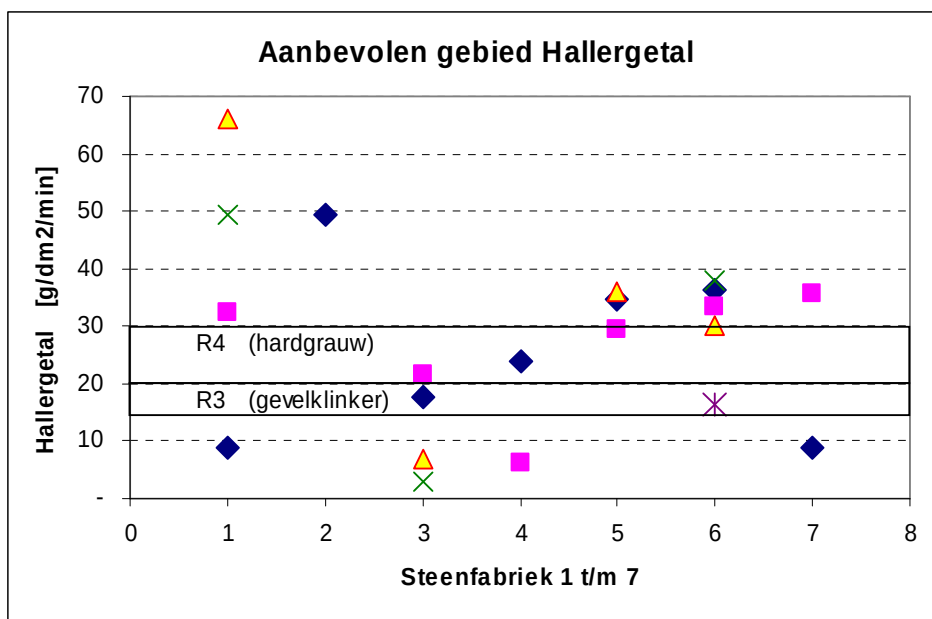
Via bezoeken aan steenfabrikanten, die zich op steenproductie voor restauratiedoeleinden richten, is getracht een inzicht te krijgen in de eigenschappen van de op de markt gebrachte stenen. Van 7 fabrikanten werden in totaal 20 steentypen beproefd (over het algemeen 5 monsters per type steen). Hallergetal en vrijwillige wateropname werden bepaald. De spreiding in de resultaten is over het algemeen een functie van het productieproces, en is over het geheel genomen aanzienlijk lager dan bij de monsters van de historische objecten (vergelijk met TCKI resultaten in vorige hoofdstuk).

De resultaten zijn verzameld in Tabel 3.4 en tevens grafisch gepresenteerd in figuur 3.3. Uit tabel en figuur kan worden opgemaakt dat 3 steentypen (roodbakkend) als hardgrauw (R4) kunnen worden gekarakteriseerd en 2 steentypen (één rood- en één geelbakkend)

Tabel 3.4 Overzicht opzuiggedrag (Hallergetal) en vrijwillige wateropneming van op de markt zijnde restauratiestenen

Fabriek	aantal	kleur	Hallergetal [g/dm ² /min]		Vrijw. Wateropn [vol %]	
			GEM	STDEV	GEM	STDEV
1	5	Rood	8,8	1,4	6,7	0,9
	5	Roze	32,5	13,7	14,1	7,7
	10	Geel	66,2	6,6	47,0	1,7
2	5	Geel	49,5	4,3	36,5	0,6
3	5	Geel	17,3	2,5	17,6	2,2
	5	Rood	21,7	2,6	21,7	1
	5	Geel	7,0	2,9	6,0	2,6
	5	Rood	3,0	0,2	2,4	0,2
4	6	Rood	24,0	7,0	13,1	1,9
	14	Wit	6,1	1,4	4,0	1,1
5	7	Geel	34,8	4,2	32,7	1,7
	4	Rood	29,4	2,5	27,3	0,4
	4	Rood	36,1	7,8	23,0	4,2
6	5	Geel	36,3	0,8	38,5	0,6
	5	Geel	33,5	1,4	39,6	0,9
	5	Rood	30,1	1,3	18,4	1,3
	5	Rood	38,0	2,1	23,4	1,1
	3	Rood	16,4	0,8	12,7	0,1
7	5	Wit	8,8	1,0	7,7	0,1
	5	Rood	35,8	2,1	14,7	0,2

Gevelklinker (Hallergetal 15-20 [g/dm²/min])
 Hardgrauw (Hallergetal 20-30 [g/dm²/min])



Figuur 3.3 Grafisch overzicht van geschiktheid van fabrieksstenen voor toepassing in zwaar vochtbelast opgaand massief metselwerk (vergelijk tabel 3.4)

3.5 Laboratoriumonderzoek Rockview

Doelstelling

Er zijn een aantal fluorescentie-microfoto's gemaakt met het doel te onderzoeken of visuele informatie te koppelen zou zijn aan hygrische eigenschappen, bepaald aan dezelfde monsters als waarvan de microfoto's zijn gemaakt.

Methodiek

Uit iedere aangeleverde baksteen is een van de monstercode voorzien deelmonster gezaagd met afmetingen van circa 48 x 25 x 20 mm. Na droging in een stoof bij 105°C zijn de deelmonsters onder vacuüm geïmpregneerd met een araldiethars, waaraan een fluorescerende kleurstof is toegevoegd. Na te zijn uitgehard is van ieder deelmonster een "dunne doorsnede" vervaardigd, parallel aan het grondvlak van circa 48 x 25 mm.

Een dunne doorsnede is een microscooppreparaat met een dikte van circa 20 µm. Bij deze geringe dikte zijn de meeste componenten doorzichtig, waardoor zij in wit gepolariseerd licht kunnen worden gedetermineerd. Een dergelijk onderzoek is het "petrografische onderzoek", een klassieke onderzoeksmethode uit de geologie.

Omdat de preparaten met een fluorescerende hars zijn geïmpregneerd, kunnen de dunne doorsneden tevens in doorvallend violet licht met golflengte van 480 nm worden bestudeerd. Op plaatsen waar de hars kon indringen, gaat deze dan groen fluoresceren, waardoor de open structuren zichtbaar zijn.

Er zijn in principe twee vormen van open structuren: (1) de diffuse open structuren, waarvan de poriën zo klein zijn dat zij niet meer afzonderlijk zijn waar te nemen, ofwel de microporositeit, verantwoordelijk voor het capillaire gedrag van materialen en (2) de grote open structuren, die wel afzonderlijk met het blote oog zijn te onderscheiden, waaronder de macroporiën (= macroporositeit), scheuren, holtes, barsten en dergelijke.

Van ieder monster is een microfoto gemaakt, die telkens voorzien is van een korte beschrijving.

Opgemerkt dient te worden dat het fotografische materiaal uiterste gevoelig is voor de geel-groene fluorescentie-kleuren, die zelfs bij een sterke onderbelichting leiden tot hevige geel-groen-intensiteiten van de foto's. Hierdoor geven de foto's een fellere weergave van het fluorescentie-beeld dan in werkelijkheid het geval is. De begeleidende teksten zijn dan ook gebaseerd op hetgeen door de microscoop is te zien.

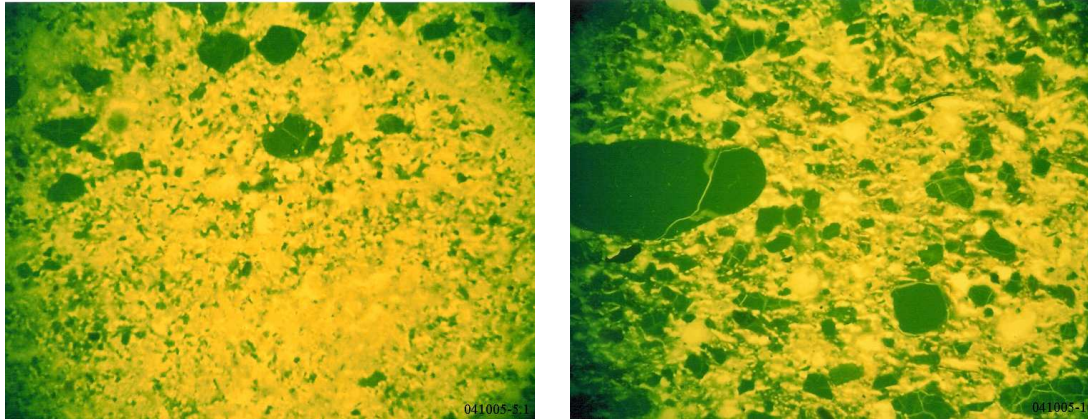
De microscoop die voor dit onderzoek is gebruikt, is de Jenapol van Carl Zeiss, een polarisatie-fluorescentie-microscoop die geschikt is voor bestudering van dunne doorsneden in doorvallend wit en violet licht. De gebruikte vergrotingsfactor van het objectief is 10 x.

De uiteindelijke vergrotingsfactor van de microfoto's bedraagt 41,7 x. Dit komt overeen met een schaal van 1 : 0,024. Hierdoor zijn fenomenen op de foto's op te meten en om te rekenen in hun werkelijke grootte: 1 cm op de foto's is in werkelijkheid 0,024 cm, ofwel 0,24 mm.

Resultaten

Er zijn preparaten gemaakt en gefotografeerd van de historische monsters DSM (1), TU-Delft (3), de Aeolus (4), Molen 7 van Kinderdijk (5), De nieuwe Palmboom (9) en Hetern (10). De serie bevat een aantal matig zuigende stenen (1), (3), (4) en (10) en een aantal sterk zuigende stenen (7) en (9).

Hieronder zijn twee fluorescentie-microfoto's opgenomen van een sterk-zuigende steen en een matig zuigende steen. Het geel is een indicatie voor porositeit; het groene duidt op vaste stof: zand en bindmiddel. Duidelijk zijn de verschillen in *totale porositeit* zichtbaar.



Molen 7, Kinderdijk (sterk zuigend, IJssel)

Heteren, (matig zuigend, hardgrauw)

Figuur 3.4 Fluorescentie-microfoto's van twee monsters. Links: historische gele ijsselsteen (molen7, Kinderdijk); Rechts: moderne steen hardgrauw kwaliteit (Heteren)

Het onderscheid dat vanuit de foto gemaakt moet worden tussen microporositeit (capillairen) en macroporositeit (scheuren, holten en barsten) is niet eenvoudig. Een belangrijker bezwaar echter is dat de microporositeit als diffuse open (gele) structuren in beeld komt, waarin geen onderscheid gemaakt kan worden tussen capillair afmetingen. Informatie over de verschillen in porositeit, dus verschillen in poriediameters biedt de mogelijkheid tot interpretatie van hygrische eigenschappen: zie bijv fig 3.1 poriegrootteverdeling bepaald met behulp van kwikporosimetrie

De conclusie is dat deze methode vooralsnog beperkte mogelijkheden biedt tav van de interpretatie van het hygrische gedrag van bakstenen: wel sterke verschillen zichtbaar, echter de methode biedt geen duidelijke aanknopingspunten tav bijv Hallergetal en drooggedrag.

4. Marktonderzoek

Doel van dit onderdeel was de mogelijkheden te onderzoeken van de baksteenindustrie om stenen met de gewenste hygrische eigenschappen -de gevelklinker en hardgrauw kwaliteit- zowel bij grotere als bij kleinere aantallen, tegen een aanvaardbare prijs te leveren.

Tevens om na te gaan welke steenfabrieken door oventype, vakmanschap en flexibiliteit

In staat zouden zijn om deze stenen als 'speciaalproducties' op aanvraag te produceren.

Uitgaande van een eerste globale verkenning werden voor de hardgrauw kwaliteit voorlopige gewenste waarden bepaald voor het opzuiggedrag, Hallergetal [$\text{gr/dm}^2 / \text{min}$] en de vrije waterabsorptie [in vol%].

Gewapend met deze uitgangspunten en de kennis uit het literatuuronderzoek, werden een aantal steenfabrieken die (mede) voor de restauratiesector leveren bezocht en met de restrictie dat de vergaarde informatie in neutrale, anonieme vorm zou worden bewerkt, een kijkje in de keuken mogen nemen. Van relevante baksteensoorten werden monsters in ontvangst genomen om de hygrische eigenschappen van te bepalen.

In korte tijd kon zo een groot scala aan werkwijzen, oventypen -van de enkele vlamoven, via de kamerringoven, de Hofmann -ringoven naar de tunneloven, en tussendoor, echt uit het stenen tijdperk, de veldoven - en dito eindproducten, van vrij ambachtelijk tot hi-tech industrieel, worden aanschouwd.

Totaal werden 7 bedrijven bezocht waarvan monsterstenen werden meegenomen. De informatie over het productieproces en gebruikte grondstoffen etc. is gerangschikt in tabelvorm en gegeven in bijlage 1.

Van de monsterstenen werden in eigen laboratorium Hallergetal en waterabsorptie vastgesteld.

De resultaten zijn gerangschikt in de hierna weergegeven in hoofdstuk 3.2 .

Hieruit bleek dat er in het bemonsterde courant aanwezige kwaliteitsassortiment *bij slechts 3 steenfabrieken*, stenen werden aangetroffen die aan de gewenste voorlopige criteria voor de 'hardgrauw kwaliteit' voldeden. Bij 'geel' slechts in het assortiment van één steenfabriek.

Het blijkt dat stenen met een 'ouderwetse' uitstraling, i.c. handvorm, genuanceerd, soms met decoratieve sintering (steenkool als brandstof) , zeer gevraagd zijn.

Maar dan voor 'nostalgische' nieuwbouwprojecten, uiteraard in spouwmuur concept.

Reden waarom geen belangstelling voor de hygrische eigenschappen.

Uiteraard werd in de gesprekken met de steenfabrikanten steeds van gedachten gewisseld over de mogelijkheden om stenen te produceren die niet alleen een ouderwetse uitstraling hebben maar ook aan de *hygrische eisen* zouden voldoen.

Steeds weer kwamen we uit op het type (herkomst) klei of kleimengsel, het al dan niet verschralen met zand, de vormmethode (strengpers en vormbak, dichter dan handvorm of machinale handvorm) en toch vooral ook de vereiste hogere baktemperatuur (het bereiken van het 'sinterpunt' in de stookcurve).

Waarbij het veel uit maakt of men over een kleine dan wel een grote partij spreekt daar de gewenste kwaliteit maar 15% van een oven-inzet (periodieke oven) is.

De resultaten van de hygrische eigenschappen van de stenen zijn verzameld in tabel 3.4 Haller / Vrijwillige wateropname van het vorige hoofdstuk.

Bij sommige steenfabrieken bleken de mogelijkheden zeker aanwezig om op die vraag een passend antwoord te geven. Een ervan had stenen met een vrije waterabsorptie van 18% (v/v) en een Hallergetal van 17 ($\text{gr/dm}^2/\text{min}$) zo op voorraad, hetgeen perspectief biedt!

Wat we, net als de mensen op de steenfabriek, deden was de stenen tegen elkaar kloppen, klinken. En dan hadden we soms stenen in handen die 'goed klonken' . Helder , hard, maar bij onze laboratoriumproeven bleken ze dan soms toch ' zeer poreus' !

Scholten (Handboek De Praktische Metselaar, 1909) zegt daarover:

Stenen uit zanderige klei gevormd zijn bros, vallen gemakkelijk stuk en springen bij het behakken dikwijls in; zij zijn minder dan de zgn 'taaie' steen uit vette klei gebakken. Deze kan veel beter met mes en hakhamer bewerkt worden.

Dat stenen uit deze zgn korte klei gebakken weliswaar hard kunnen klinken, maar toch zeer poreus kunnen zijn vonden wij bevestigd in een helder klinkende gele steen die toch 47% (v/v) water op bleek te nemen (dat is dus bijna de helft van het volume !) en daarbij met een Hallergetal van 66 , extreem zuigend was.

Dus niet in de verste verte een 'hardgrauw' van de klassieke kwaliteit.

Uiteraard lag dit steentje wel wat licht in de hand en als je 'm spleet zie je de brosse structuur er ook wel aan af!



Figuur 4.1 Kolendoseerapparaten boven tunneloven

Hierbij kunnen we dus vaststellen dat het op 'klank' sorteren, alleen op gaat binnen één ovenlading, op de steenfabriek, maar niet om bij stenen van verschillende herkomst de beste (dichtste) er uit te halen.

Wij vernamen dat zich een trend voordoet dat men voor de duurdere nieuwbouwprojecten (zie hierboven) van lieverlee toch ook gaat vragen naar hardere, dichtere stenen, i.c. de kwaliteit die vroeger zo gewoon was, en die dan maar iets duurder zijn.

Minder last van alg en mos begroeiing dus fraaier om te zien en te beleven duurzamer dus minder gauw toe aan allerlei bouwchemische reinigings- en impregneringsbehandelingen.

CONCLUSIES

- Het aantal steenfabrieken dat courant stenen produceert die aan de Voorlopige eisen 'R 4 Hardgrauw' voldoen, is beperkt. Naar de uitkomsten van de proeven op de meegenomen monsters, in Rood 3 en in Geel slechts 1 steenfabriek.
- Deze fabrieken hebben meestal een kleine productiecapaciteit

- Indien men een flexibele instelling heeft en bereid is tot aankopen andere klei (bv Westerwald voor Geel) en in staat is bij het stoken een hoger temperatuurtraject te bereiken, en bereid is proef partijen te stoken, kan de situatie worden verbeterd.
- Grote partijen, m.n. IJsselmaat, Geel, vormen een marktprobleem; een steenfabriek met een tunneloven kan hier een oplossing bieden doch meestal is in een dergelijke geavanceerde fabriek de vormgeving dmv strengpers of vormbak. Hiermee is geen 'handvorm structuur' te maken.
- **Bundeling van vraag via een centrale instantie gevolgd door gemeenschappelijke inkoop, kan daar mogelijk een oplossing voor vormen, waarbij best nog een concurrentie prikkel kan worden ingebracht.**

5. Conclusies

Kwaliteiseisen stenen

De belangrijkste conclusie is dat de stenen een matige Initiële Wateropzuiging (Hallergetal) en een bijpassende Vrijwillige Wateropneming (vochtopnamecapaciteit) moeten bezitten om waterdichtheid voor zwaar regenbelast metselwerk te realiseren. Bij vroegere voorschriften werd alleen aandacht besteed aan de Vrijwillige Wateropneming.

In deze studie wordt aangetoond dat de Initiële Wateropzuiging een belangrijker criterium is dan de Vrijwillige Wateropneming.

Initiële Wateropzuiging (Hallergetal) en de Vrijwillige Wateropneming kunnen op eenvoudige wijze op de bouwplaats worden bepaald. De beschrijving van de proeven is in 'Bouwstenen voor de richtlijn' opgenomen.

Op grond van de onderzoeken wordt aanbevolen hardgrauw (R4) of gevelklinker (R3) als stenen toe te passen in zwaar vochtbelast opgaand vollewand metselwerk.

De hygrische eigenschappen voor deze typen stenen zijn:

- R4: Hallergetal ~25 (gemiddelde uit 10 stenen met als ondergrens Hallergetal 20 en bovengrens Hallergetal 30). Vrijwillige wateropneming bovengrens 35% (v/v)
- R3: Hallergetal ~17.5 (gemiddelde uit 10 stenen met als ondergrens Hallergetal 15 en bovengrens Hallergetal 20). Vrijwillige wateropneming bovengrens 25% (v/v)

Uit het onderzoek naar de regendichtheid van historische objecten is naar voren gekomen dat de dichtheid vaak in belangrijke mate te danken is aan de in de loop der tijd ontstane 'verweringslaag' aan de buitenzijde van de muur. Deze verweringslaag vermindert de Initiële Wateropzuiging van de stenen soms tot meer dan 50%. In hygrisch opzicht is de verwijdering van deze laag (o.a.) door reiniging sterk af te raden.

Bij onderzoek naar de gewenste eigenschappen van bakstenen gericht op waterdichtheid van metselwerk dient altijd bedacht te worden dat de stenen een deel van het metselwerk zijn. Naast materiaaleigenschappen (van metselstenen, metselspecie en compatibiliteit tussen steen en voegmateriaal) spelen vervolgens vakmanschap, constructie en ontwerp, de invloed van beschermende maatregelen, en de effecten van scheuren een belangrijke rol bij waterdichtheid van metselwerk.

Met andere woorden niet alleen de eigenschappen van de metselstenen bepalen het al dan niet waterdicht zijn van metselwerk.

Marktonderzoek

Het doel van het marktonderzoek was de mogelijkheden te onderzoeken van de baksteenindustrie om stenen met de gewenste hygrische eigenschappen – de gevelklinker en hardgrauw kwaliteit – zowel bij grotere als bij kleinere aantallen, tegen een aanvaardbare prijs te leveren.

Tevens om na te gaan welke steenfabrieken door oventype, vakmanschap en flexibiliteit in staat zouden zijn om deze stenen als 'speciaalproducties' op aanvraag te produceren.

Conclusies:

- Het aantal steenfabrieken dat courant stenen produceert die aan de eisen voor 'Hardgrauw' en 'Gevelklinker' voldoen is zeer beperkt.
- Deze fabrieken hebben meestal een kleine productiecapaciteit
- Indien men een flexibele instelling heeft en bereid is tot aankopen van andere klei (bv Westerwald voor Geel) en in staat is bij het stoken een hoger temperatuurtraject te bereiken, en bereid is proefpartijen te stoken, kan de situatie worden verbeterd.
- Grote partijen, m.n. IJsselmaat, geel, vormen een marktprobleem; een steenfabriek met een tunneloven kan hier een oplossing bieden doch meestal is in een dergelijke geavanceerde fabriek de vormgeving dmv strengpers of vormbak. Hiermee is geen 'handvorm structuur' te maken.

6. Verantwoording keuzen tav eisen voor de hygrische eigenschappen met het oog op een te ontwikkelen richtlijn

Belangrijk voor waterdichtheid van een steen is de aard van de porositeit. Zoals uit fluorescentie-microscopisch onderzoek blijkt hebben sterk-zuigende stenen (bijv. rood) zwakzuigende stenen (bijv. klinker) een sterk verschillende porositeit. Het "rood" vertoont een doorlopend netwerk van capillaire poriën, de klinker heeft veel geïsoleerde poriën en er is nauwelijks een doorlopend netwerk tussen de capillairen. Als gevolg hiervan transporteert de klinker regenwater *langzaam* de muur in: intensievere en langdurige regenperioden zijn nodig om een klinker verzadigd te krijgen.

Tot op heden is de waterdichtheid van vollwand metselwerk voornamelijk gekoppeld geweest aan de vrijwillige wateropname (zie de tabel: Waarden en eisen Vrijwillige Wateropname en Hallergetal door de jaren heen). In deze karakterisering komt onvoldoende tot uiting het belang van de snelheid van wateropname door het metselwerk. Immers, hoe minder water zich in het materiaal bevindt, hoe minder er via verdamping weer uit moet drogen.

Voor stenen wordt sinds de jaren 50 het Hallergetal (of the Initiele Wateropzuiging, IW) gebruikt om de initiële snelheid van vochtname te karakteriseren.

Het belang van een gecombineerde toepassing van eisen aan de hand van waarden voor Hallergetal en vrijwillige wateropname kan worden toegelicht aan tabel 5.1 (historische monsters, TCKI onderzoek).

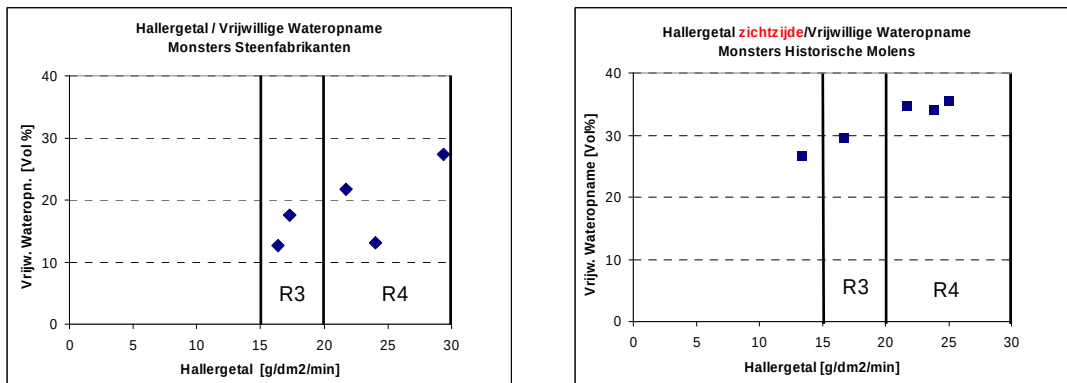
Tabel 5.1 Vergelijking Hallergetal en vrijwillige wateropname

		HALLER			Vrijw. Wateropn	
		GEM	STDV		GEM	STDV
		g/dm2/min			vol % (v/v)	
1	DSM, Delft	21,7	10,4		23,1	2,1
2	de Roos, Delft	43,3	7,6		34,8	4,4
3	TU-Delft, Delft	28,3	5,8		25,9	0,5
4	Aeolus, Vlaardingen	28,3	2,9		26,7	1,5
5	Molen 7, Kinderdijk	61,3	14,3		34,1	5,1
6	de Hoop, Zierikzee	55,0	7,1		35,5	0,2
7	de Hoop, Rozenburg	63,3	7,6		33,3	2,9
8	Windlust, Achthuizen	33,3	10,4		29,7	4,7
9	DNP, Schiedam ^)	40,0	0,0		26,7	0,1
10	Randwijk, Heteren ^)	21,7	2,9		17,2	2,9

Vergelijken we hallergetal en vrijwillige wateropname van de monsters TUDelft (3), Aeolus (4) en de Nieuwe Palmboom (9), dan hebben deze vergelijkbare vrijwillige wateropnamen, echter de nieuwe Palmboom heeft een veel hogere opzuigsnelheid (Hallergetal), met als gevolg dat een steen van De Nieuwe Palmboom sneller vol zal zijn met water. Dit feit komt door een karakterisering van de steen alleen met de vrijwillige wateropname niet naar voren.
(een vergelijkbare redenering kan worden gegeven voor de Roos (2), Molen 7 (5) en de Hoop, Zierikzee (6).

Hallergetal en vrijwillige wateropneming

Bij vergelijking van Hallergetalwaarden en vrijwillige wateropneming van moderne stenen met historische monsters (Hallergetalwaarden vervuilde zichtzijde!) blijkt dat bij vergelijkbare Hallergetalwaarden de vrijwillige wateropname van de historische monsters (dus de vochtopnamecapaciteit) duidelijk hoger ligt dan bij de moderne stenen.
Met ander woorden het probleem van een initiële sterk zuigende stenen kan verkeren in een voordeel: door de vervuiling neemt de snelheid van vochtopname af (afname Hallergetal) bij een gelijkblijvende hoge bergingscapaciteit.



Figuur 5.1. Vergelijking van Hallergetalwaarden en vrijwillige wateropnamen van Monsters Steenfabrieken en Monsters Historische Molens

7. Geraadpleegde literatuur en andere bronnen

- Anderegg F.O., Construction of water-tight brick masonry, American Ceramic Society 13, pp.315-324, 1930.
- Baksteengids dl III , Metselsteenproducten en hun toepassing; 1966
- Baksteennorm. N 520 uit 1934,
- Baksteennorm, NEN 2489, 1972
- Grimm C.T., Water permeance of Masonry Walls: A Review of the Literature, in Masonry: Materials, Properties and Performance, ASTM STP 778, J.G. Borchelt ed., American Society for testing and Materials, pp. 178-199, 1982.
- Groenendijk J., Vochttransport door baksteen – een numeriek model TUD 1988
- Groot C., Effects of water on mortar-brick bond; thesis 1993
- Groot C., The characteristics of brick and mortar considering mortar/brick bond. In: M. Wu, Y. Qian, (eds.); Proceedings of the 11th intern. brick/block masonry conference, ECS (Engineering Construction Standardization, Shanghai (China), p. 51-58, 1997.
- Groot C. and Larbi J., The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. Heron, volume 44, 2, p. 63-77, 1999.
- Groot Caspar en Gunneweg Jos, Onderzoeksrapport Vochtproblematiek Stenen Molens – 1e Fase; in 2 delen, Delft / Zeist oktober 2002.
- van der Kloes J.A., Onze Bouwmaterialen, 1893
- van der Kloes J.A., "Handleiding voor de metselaar" 5^e dr 1913.
- Ploos van Amstel mmv W.Temming, Bouwstoffen, Leiden 1973
- Ramamurthy K. and K.B. Anand, Classification of Water Permeation Studies on Masonry, Masonry International, Vol. 14, No 3, pp.74-79, 2001.
- van Rhijn J.C., Themadag Stenen Molens en vochtproblematiek, Zeist 12 dec 1995
- RDMZ, Kalkboek, Zeist september 2003
- Scholten G.A., De Praktische Metselaar Handboek 1909
- Thomas K., Masonry Walls, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, Chapter : Rain penetration, dampness and remedial measures, pp. 144-159, 1996.
- website Kon. Verbond va Nederlandse Baksteenfabrikanten, www.knb-baksteen.nl ;De Steeg 2003
- Van Wijck H , TCKI juni 2005 , discussies

Toelichting

- Van der Kloes (o.a. Onze Bouwstoffen, 1893 en Handleiding voor de Metselaar, 1913).
Bijzondere vermelding verdient de genoemde auteur Prof. J.A. van der Kloes, de eerste hoogleraar bouwmaterialkunde in Delft.

Heeft het vakgebied vormgegeven en baanbrekend werk gedaan op het gebied van theorie en praktijktoepassingen van materiaalkundige aspecten van mortel en steen.

Hij praktiseerde een permanente terugkoppeling van ervaringen uit de bouwpraktijk aan verdergaande natuurkundige en chemische analysemethoden en omgekeerd. En heeft een belangrijke impuls gegeven aan het vernieuwen van mortelrecepturen, met name het verlagen van het bindmiddelgehalte, met name kalk wegens betere productiemethoden. Met name ter voorkoming van muuruitslag tgv calciumcarbonaat en drogingskrimp.

Dit komt in het volgende onderzoekshoofdstuk nader ter sprake.
Vele jaren is hij in de vakliteratuur als toonaangevend auteur geciteerd.

- Onderzoeksrapport Vochtproblematiek Stenen Molens – 1e Fase; in 2 delen, 2002.
In dl 2, bijlage II ligt een samenvatting van 18^e en 19^e eeuwse bouwbestekken.
Eerst handgeschreven en later, toen zich in de 19^e eeuw de ingenieurs van de Waterstaat zich met de bestekschrijverij bezighouden, ook in druk.
Een twintigtal daarvan werden geanalyseerd.

Daarnaast zijn er de vroege bouwkundige handboeken en vroege “ normbladen ”, zoals bijv de “ Haagse Keur”.

- Kalkboek
Ten slotte is daar de jongste uitgave van historisch-bouwkundig en materiaalkundige aard, het op 10 september 2003 in Breda gepresenteerde “ KALKboek”.

Gezien het onderwerp staat daar maar zijdelings iets in over baksteen en meestal in de vorm van citaten uit de hierboven eerder genoemde werken.