

## Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (8)

# Druksterkte van lijmwerk wanden\*

prof.ir.-arch. D.R.W. Martens, Leerstoel Stapelbouw TU/e; Studiebureau Dirk Martens bvba, Zingem (B)

Het verlijmen van blokken en elementen voor dragende wanden is niet nieuw. Kalkzandsteenelementen en cellenbetonblokken worden reeds sinds vele jaren met succes verlijmd. Constructief lijmwerk met keramische blokken daarentegen is een ontwikkeling van het laatste decennium terwijl lijmwerk met betonblokken in Nederland nog in de kinderschoenen staat. Als belangrijk voordeel van lijmwerk wordt dikwijls de hogere druksterkte genoemd, maar is deze eigenschap wel geldig voor alle steentypen? Een vergelijking tussen de theoretische druksterkte van lijmwerk en metselwerk in cellenbeton, kalkzandsteen, baksteen en betonsteen kan hierover enig uitsluitsel geven.

Lijmwerk als nieuwe bouwtechniek kent steeds meer succes. Dit betreft niet alleen buitenspouwbladen van gebouwen, maar eveneens dragende binnenwanden. In tegenstelling tot gevellijmwerk waarbij esthetiek de drijvende kracht is, zijn bouwfysische, mechanische en rentabiliteitseisen de belangrijkste motieven voor ontwikkeling van lijmwerk bij binnenwanden. Dankzij de hogere hechting tussen lijm mortel en steen is de buigtreksterkte van lijmwerk aanmerkelijk hoger dan van metselwerk, maar gaat deze redenering ook op voor de druksterkte?

## Verlijmen van cellenbeton blokken

Bij cellenbeton heeft lijmwerk een dubbel voordeel ten opzichte van metselwerk. Indien cellenbeton wordt toegepast omwille van de gunstige thermische eigenschappen, is het voor de hand liggend om de nadelige invloed van de meer thermisch geleidende mortelvoeg te minimaliseren. Het verlijmen van de blokken met een voegdikte van amper 1 à 3 mm biedt hiervoor een geschikte oplossing. Voor het realiseren van dergelijke dunne



voegen wordt meestal een lijm kam gebruikt (foto 1). Dankzij het vlakke oppervlak van de cellenbetonblokken kan hiermee de lijm mortel egaal over het element worden verdeeld.

Het verhogen van de draagkracht door het verlijmen van cellenbetonblokken is een tweede gunstig effect van deze uitvoeringstechniek. Volgens de Nederlandse norm NEN 6790 (TGB Steen) [1] bedraagt de representatieve druksterkte van lijmwerk opgebouwd uit cellenbetonblokken met een gemiddelde steendruksterkte van 4,5 en 6,8 N/mm<sup>2</sup>, respectievelijk 3,0 en 4,3 N/mm<sup>2</sup>.

Voor de berekening van de karakteristieke druksterkte van

metselwerk en lijmwerk volgens de Europese norm voor steenconstructies Eurocode 6 [2] dienen de volgende formules te worden gebruikt:

$$\text{metselwerk: } f_k = K f_b^{0,7} f_m^{0,3} \quad (1)$$

$$\text{lijmwerk: } f_k = K f_b^{0,85} \quad (2)$$

waarin:

$f_k$  is de karakteristieke druksterkte van het metselwerk of lijmwerk (in N/mm<sup>2</sup>);

$f_b$  is de gemiddelde druksterkte van de steen (in N/mm<sup>2</sup>);

$f_m$  is de gemiddelde druksterkte van de mortel (in N/mm<sup>2</sup>);

K is een factor afhankelijk van het type steen (tabel 3.3 in Eurocode 6).

1 | Verlijmen van cellenbeton met de lijm kam

Aan de hand van deze formules kan een vergelijking worden gemaakt tussen de theoretische karakteristieke druksterkte van lijmwerk en metselwerk. Voor de bepaling van de K-waarden worden de stenen ingedeeld in vier groepen, afhankelijk van het volumegehalte aan holten. Groep 1 omvat de stenen waarbij het totale volume holten kleiner is dan 25%, terwijl bij stenen van de groepen 2 tot en met 4 meer perforaties aanwezig zijn (tabel 3.1 in Eurocode 6). Aangezien alleen volle cellenbetonblokken worden geproduceerd, zijn bij de vergelijking van de druksterkte van lijmwerk versus metselwerk in tabel 1 alleen stenen van groep 1 in ogenschouw genomen. Uit deze tabel blijkt dat volgens de Europese voorschriften de op-

\* Dit is het laatste van een drietal artikelen over Verlijmd steenconstructies. De vorige delen verschenen in *Cement* 2001 nr. 8 en *Cement* 2002 nr. 2.

Tabel 1 | Karakteristieke druksterkte van lijmwerk versus metselwerk van cellenbetonsteen volgens Eurocode 6 (in N/mm<sup>2</sup>)

groep	gemiddelde	gemiddelde	K	karakter.	K	karakter.	verhouding
	steendruksterkte	morteldruksterkte		metselwerk		druksterkte	
			metselwerk		lijmwerk		
1	4,5	5	0,55	2,55	0,80	2,87	1,12
	4,5	10	0,55	3,14	0,80	2,87	0,91
	6,8	5	0,55	3,41	0,80	4,08	1,20
	6,8	10	0,55	4,20	0,80	4,08	0,97

neembare drukkrachten bij lijmwerk groter zijn dan bij metselwerk van cellenbeton. Tevens kan worden vastgesteld dat de karakteristieke druksterkte van cellenbetonlijmwerk volgens Eurocode 6 iets lager is dan de representatieve sterkte overeenkomstig de Nederlandse norm. De karakteristieke waarde van de druksterkte is evenwel niet het enige getal dat de uiteindelijke rekenwaarde van de draagkracht van de wand bepaalt. Een eerlijke vergelijking tussen de theoretische draagkracht conform Eurocode 6 en NEN 6790 dient ook rekening te houden met de gebruikte belastings- en materiaalfactoren die corresponderen met beide normen.

#### Verlijmen van kalkzandsteen

Het verlijmen van kalkzandsteenblokken en -elementen is een techniek die in Nederland algemene bekendheid geniet omwille van de gunstige mechanische eigenschappen. Dankzij de grote draagkracht van kalkzandsteenlijmwerk kunnen in dit materiaal middelhoge gebou-

wen probleemloos worden uitgevoerd. De populariteit van deze bouwtechniek heeft ook te maken met de verregeande mechanisering van de verwerking van kalkzandsteenelementen. Door de ontwikkeling van geschikte hijsmiddelen (foto 2) en hulpmiddelen voor het verlijmen (foto 3), heeft kalkzandsteen als constructief materiaal een belangrijk marktaandeel weten te veroveren. En de tijd staat niet stil: het bouwen van dragende wanden in geprefabriceerd kalkzandsteenlijmwerk is in volle ontwikkeling. Hierdoor kan het toepassingsgebied van kalkzandsteen nog verder worden uitgebreid.

De berekening van de draagkracht van lijmwerkwanden in kalkzandsteen is in NEN 6790 goed geregeld. Op basis van de gemiddelde druksterkte van de kalkzandsteenblokken en -elementen kan via tabel 1 van deze norm de druksterkte van het lijmwerk worden bepaald. Voor een gemiddelde steendruksterkte van 15 en 25 N/mm<sup>2</sup> bedraagt de representatieve druksterkte

van het lijmwerk respectievelijk 6,0 en 8,5 N/mm<sup>2</sup>. Volgens Eurocode 6 dient de berekening van de karakteristieke druksterkte van kalkzandsteenlijmwerk op eenzelfde manier te gebeuren als bij cellenbeton (tabel 2). Bij volle kalkzandsteenelementen blijkt de theoretische druksterkte van kalkzandsteenlijmwerk tot 30% hoger te zijn dan van metselwerk. Een vergelijking tussen de waarden uit NEN 6790 en Eurocode 6 toont tevens aan dat de karakteristieke druksterkte volgens Eurocode 6 tot 30% hoger kan zijn dan de representatieve druksterkte volgens NEN 6790. De introductie van Eurocode 6 zal voor de kalkzandsteenindustrie duidelijk geen windeieren leggen.

#### Verlijmen van baksteen

Sinds enkele jaren is ook bij de baksteenindustrie interesse ontstaan om dragende wanden uit te voeren in lijmwerk, voornamelijk in Duitsland en België. Het lijmwerk wordt meestal gerealiseerd met sterk geperforeerde blokken (snelbouwblokken), die het lichte gewicht en de isolerende eigenschappen als voordeel hebben.

De voornaamste reden voor het introduceren van het lijmen van geperforeerde keramische blokken is het verhogen van het rendement bij de uitvoering. Hiertoe werd de geometrie van de klassieke blokken aangepast. Het verlijmen vereist immers kleine toleranties, die bij een gebakken product moeilijk realiseerbaar zijn. Om de maatvastheid te kunnen garanderen worden de legvlakken van de stenen vlak en parallel geslepen. Een tweede

2 | Hijsmiddelen voor het verlijmen van kalkzandsteenelementen (foto links)



3 | Lijmbak voor het verlijmen van kalkzandsteenelementen (foto rechts)



Tabel 2 | Karakteristieke druksterkte van lijmwerk versus metselwerk van kalkzandsteen volgens Eurocode 6 (in N/mm<sup>2</sup>)

groep	gemiddelde steendruksterkte	gemiddelde morteldruksterkte	K metselwerk	karakter.	K	karakter.	verhouding
				druksterkte metselwerk	lijmwerk	druksterkte lijmwerk	lijmwerk/metselwerk
1	15	10	0,50	6,64	0,80	7,99	1,20
	15	12,5	0,50	7,10	0,80	7,99	1,13
	25	10	0,50	9,50	0,80	12,34	1,30
	25	12,5	0,50	10,15	0,80	12,34	1,22
2	15	10	0,45	5,98	0,55	5,50	0,92
	15	12,5	0,45	6,39	0,55	5,50	0,86
	25	10	0,45	8,55	0,55	8,48	0,99
	25	12,5	0,45	9,14	0,55	8,48	0,93

aanpassing heeft betrekking op de vorm van de kopse kanten van de blokken. Aangezien het verlijmen van de stootvoegen moeilijk en tijdrovend is, zijn de kopse kanten van de blokken met een vertanding uitgevoerd, waardoor het verlijmen van de stootvoegen overbodig wordt. De luchtdichtheid van het binnenspouwblad moet dan volledig door het pleisterwerk worden verzekerd. Dit is mogelijk dankzij de vormstabiliteit van de keramische stenen. Voor de uitvoering van het lijmwerk zijn door de diverse fabrikanten verschillende lijmtechnieken ontwikkeld. In Duitsland gebeurt het verlijmen meestal door het dompelen van de blokken in een lijm mortelbad (foto 4), terwijl in België de lijmrol werd geïntroduceerd (foto 5). De dompeltechniek is alleen toepasbaar bij vuil werk, terwijl met de lijmbaktechniek eveneens schoon lijmwerk kan worden gerealiseerd.

Kenmerkend voor beide technieken is de zeer dunne lijmvoeg die maximaal 2 mm bedraagt. Dit heeft tot gevolg dat het lijm mortelverbruik heel laag is en dat het bouwafval veel beperkter is dan bij traditioneel metselwerk. Sinds enkele jaren is de baksteenindustrie ook volop bezig met het ontwikkelen van technieken voor het vervaardigen van geprefabriceerde verlijmde wanden. In dit geval kan het bouwafval nog verder worden verminderd.



Voor de berekening van verlijmde geperforeerde baksteenblokken zijn in de Nederlandse norm geen voorschriften opgenomen. De theoretische bepaling van de druksterkte kan wel geschieden volgens Eurocode 6 door toepassing van formules (1) en (2) met gebruik van de specifieke K-waarden als functie van de perforatiegraad van de blokken. In een eerdere versie van Eurocode 6 waren de K-waarden heel ongunstig voor baksteenlijmwerk met sterk geperforeerde blokken [3], maar in de laatste versie zijn deze aangepast tot meer realistische waarden. In tabel 3 is een vergelijking gemaakt tussen de karakteristieke druksterkte van lijmwerk en metselwerk van baksteen. Lijmwerk met volle bakstenen blijkt sterker te zijn dan metselwerk, terwijl de omgekeerde conclusie van toepassing is op lijmwerk met geperforeerde stenen of blokken. De fabrikanten van geperforeerde baksteenblokken zijn evenwel van mening dat

de druksterkte van lijmwerk met stenen van de groepen 2 en 3 ook sterker is dan van metselwerk. Bijkomend experimenteel onderzoek zal moeten uitwijzen wie het bij het rechte eind heeft.

#### Verlijmen van betonsteen

Het verlijmen van betonsteen voor dragende wanden wordt momenteel in Nederland nog nauwelijks toegepast. Volgens de Nederlandse norm bedraagt de representatieve druksterkte van betonsteenlijmwerk met gemiddelde steendruksterkte van 15 en 25 N/mm<sup>2</sup>, respectievelijk 5,5 en 8,5 N/mm<sup>2</sup>. De berekening van de karakteristieke druksterkte volgens Eurocode 6 kan plaatshebben met dezelfde formules, weliswaar met aangepaste K-waarden zoals aangegeven in tabel 4. Een blik op deze tabel leert dat volgens Eurocode 6 lijmwerk van betonblokken in alle gevallen sterker is dan metselwerk, in het bijzonder voor blokken die behoren tot groep 2. Bovendien is de theore-



4 | Verlijmen met dompeltechniek

5 | Verlijmen met lijmroltechniek

Tabel 3 | Karakteristieke druksterkte van lijmwerk versus metselwerk van baksteen volgens Eurocode 6 (in N/mm<sup>2</sup>)

groep	gemiddelde		K	karakter.		K	karakter.	
	steendruksterkte	morteldruksterkte		metselwerk	lijmwerk		lijmwerk	metselwerk
1	10	10	0,50	5,00	0,75	5,31	1,06	
	10	12,5	0,50	5,35	0,75	5,31	0,99	
	15	10	0,50	6,64	0,75	7,49	1,13	
	15	12,5	0,50	7,10	0,75	7,49	1,06	
2	10	10	0,45	4,50	0,55	3,89	0,87	
	10	12,5	0,45	4,81	0,55	3,89	0,81	
	15	10	0,45	5,98	0,55	5,50	0,92	
	15	12,5	0,45	6,39	0,55	5,50	0,86	
3	10	10	0,40	4,00	0,45	3,19	0,80	
	10	12,5	0,40	4,28	0,45	3,19	0,74	
	15	10	0,40	5,31	0,45	4,50	0,85	
	15	12,5	0,40	5,68	0,45	4,50	0,79	
4	10	10	0,35	3,50	0,35	2,48	0,71	
	10	12,5	0,35	3,74	0,35	2,48	0,66	
	15	10	0,35	4,65	0,35	3,50	0,75	
	15	12,5	0,35	4,97	0,35	3,50	0,70	

Tabel 4 | Karakteristieke druksterkte van lijmwerk versus metselwerk van betonsteen volgens Eurocode 6 (in N/mm<sup>2</sup>)

groep	gemiddelde		K	karakter.		K	karakter.	
	steendruksterkte	morteldruksterkte		metselwerk	lijmwerk		lijmwerk	metselwerk
1	15	10	0,55	7,31	0,80	7,99	1,09	
	15	12,5	0,55	7,81	0,80	7,99	1,02	
	25	10	0,55	10,45	0,80	12,34	1,18	
	25	12,5	0,55	11,17	0,80	12,34	1,10	
2	15	10	0,45	5,98	0,80	7,99	1,34	
	15	12,5	0,45	6,39	0,80	7,99	1,25	
	25	10	0,45	8,55	0,80	12,34	1,44	
	25	12,5	0,45	9,14	0,80	12,34	1,35	
3	15	10	0,40	5,31	0,60	6,00	1,13	
	15	12,5	0,40	5,68	0,60	6,00	1,06	
	25	10	0,40	7,60	0,60	9,26	1,22	
	25	12,5	0,40	8,12	0,60	9,26	1,14	

tische druksterkte volgens Eurocode 6 aanmerkelijk hoger dan berekend volgens NEN 6790. Of dit al dan niet met de realiteit overeenstemt dient nog verder te worden onderzocht.

#### Vloer-wandinteractie volgens Eurocode 6

Als de druksterkte van het lijmwerk materiaal bekend is, dient voor de berekening van de draagkracht van een lijmwerkwand de invloed van de excentriciteit van de belasting te worden bepaald.

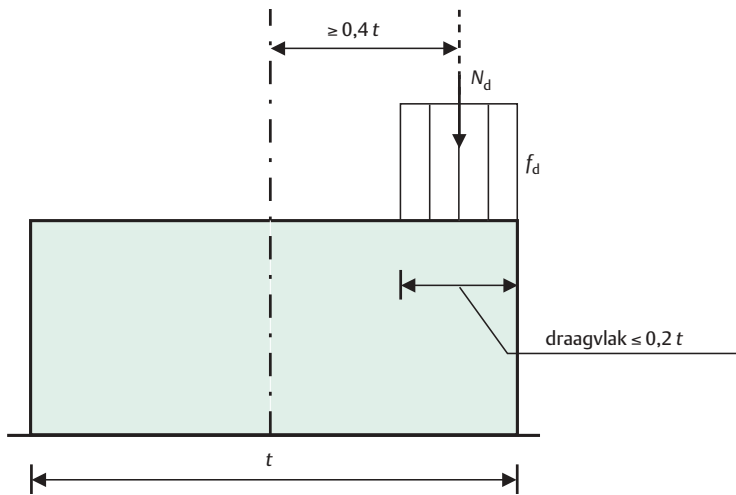
Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van een raamwerkberekening of kan men zijn toevlucht nemen tot de vereenvoudigde methode die in bijlage C van Eurocode 6 is opgenomen. Aangezien de stijfheid van lijmwerk wanden meestal vrij groot is in vergelijking met de stijfheid van de vloeren, zal de aldus berekende excentriciteit over het algemeen groter zijn dan 0,4 maal de dikte van de wand. Dit impliceert dat de eerste-orde excentriciteit mag worden berekend uitgaande van het

rechthoekig spanningsdiagram dat in figuur 6 is weergegeven. Omwille van de beperking van de grootte van de gedrukte zone tot 0,2  $t$  is de rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalcracht in dit geval gelijk aan:

$$N_{d,max} = 0,2 t f_d \quad (3)$$

waarin:

$N_{d,max}$  is de rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalcracht van de wand per lengte;



$f_d$  is de rekenwaarde van de druksterkte van het lijmwerk;  
 $t$  is de dikte van de wand.

Voor zover de rekenwaarde van de drukbelasting kleiner is dan  $N_{d,max}$  is de sterkte van de wand ter hoogte van de oplegging van de vloerplaat verzekerd.

Dit rekenmodel is gebaseerd op ervaringen met traditioneel metselwerk. Over de krachtsverdeling ter plaatse van de vloerwandaansluiting bij lijmwerk met sterk geperforeerde stenen is momenteel weinig informatie beschikbaar. Teneinde de geldigheid van het vereenvoudigde rekenmodel volgens Eurocode 6 te controleren, zullen in de tweede helft van 2002 op de TU Eindhoven proeven worden uitgevoerd op grote wanden waarop kanaalplaten worden opgelegd. Door middel van mechanische en optische metingen zullen de vervormingen van de wanden en de vloerplaat in detail worden bestudeerd, in het bijzonder bij grote excentriciteiten.

#### Tweede-orde-effect

De rekenwaarde van de draagkracht van een lijmwerkwand  $N_{Rd}$  wordt niet alleen beïnvloed door de druksterkte en de excentriciteit van de belasting, maar evenzeer door de slankheid van de wand. Deze invloed dient volgens bijlage E van Eurocode 6 als volgt in rekening te worden gebracht:

$$N_{Rd} = \phi_m t f_d \quad (4)$$

$$\phi_m = A e^{-u^2/2} \quad (5)$$

$$A = 1 - 2 e_{mk}/t \quad (6)$$

$$u = \frac{\frac{h_{ef}}{t} - 2}{23 - 37 \frac{e_{mk}}{t}} \quad (7)$$

waarin:

$N_{Rd}$  is de rekenwaarde van de opneembare normaalkracht per lengte;

$\phi_m$  is de reductiefactor voor het tweede-orde-effect;

$t$  is de dikte van de wand;

$f_d$  is de rekenwaarde van de druksterkte van het lijmwerk;

$e_{mk}$  is de excentriciteit in het midden van de wand;

$h_{ef}$  is de effectieve hoogte van de wand (kniklengte).

Deze formules zijn initieel opgesteld voor traditioneel metselwerk en werden zonder afdoende verificatie geëxtrapoleerd voor lijmwerk. Aangezien de hechting en stijfheid van lijmwerk veel hoger zijn dan van metselwerk, is te verwachten dat de invloed van de slankheid op de draagkracht bij lijmwerkwanden kleiner zal zijn. Het toepassen van de formules uit Eurocode 6 mag bijgevolg als een veilige benadering worden beschouwd.

#### Conclusies

Lijmwerk voor dragende binnenwanden biedt een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van metselwerk. Uit de voorschriften in Eurocode 6 blijkt dat de draagkracht van lijmwerk meestal groter is dan van metselwerk, met uitzondering van lijmwerk met geperforeerde blokken. Voor de berekening van kalkzandsteen- en cellenbetonlijmwerk bestaan er voldoende onderbouwde rekenregels. Dit geldt evenwel niet voor lijmwerk met andere materialen zoals betonsteen en baksteen. De rekenmethoden die voor deze materialen worden voorgesteld dienen dan ook met de nodige omzichtigheid te worden toegepast. Om deze onzekerheid om te buigen in vertrouwen wordt bij de TU Eindhoven in samenwerking met de baksteenindustrie een onderzoeksproject opgestart waarbij zowel de druksterkte als de vloerwandaansluiting van lijmwerkwanden met geperforeerde baksteen zullen worden onderzocht. ■

#### Literatuur

1. NEN 6790, TGB 1990, Steenconstructies, Basiseisen en bepalingsmethoden.
2. prEN 1996-1-1: Draft Stage 34, Eurocode 6: Design of Masonry Structures – Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures.
3. Martens, D.R.W., Mechanische eigenschappen van baksteen- en betonsteenlijmwerk. Studiedag KVIV, 6 juni 2002.
4. Martens, D.R.W., A.Th. Vermeltfoort, G. Bertram, Collegedictaat Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies. TU Eindhoven, augustus 2000.

6 | Vereenvoudigde berekening van de eerste-orde excentriciteit  $e$  volgens Eurocode 6 als  $e > 0,4 t$