

Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (5)

Wapening voor lijmwerk*

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

In het eerste artikel over verlijmd steenconstructies [1] zijn de karakteristieken van ongewapend lijmwerk beschreven. Ondanks de hoge hechtsterkte tussen de stenen en de lijm mortel is ongewapend lijmwerk niet onbeperkt toepasbaar. Bij constructief metselwerk wordt in principe elke treksterkte verwaarloosd. Voor het realiseren van lateien met relatief grote overspanningen wordt het metselwerk gewapend met specifieke metselwerkwapening. Maar hoe zit dit bij lijmwerk? Wat is het effect van het wapenen van lijmwerk op het mechanisch gedrag en welk wapeningsmateriaal is hiervoor geschikt?

Onderzoek heeft aangetoond dat zowel de hechtsterkte, de buigtreksterkte als de druksterkte van lijmwerk aanzienlijk hoger zijn dan van traditioneel metselwerk. Dit biedt perspectieven voor constructieve toepassingen in lijmwerk. Lateien en geprefabriceerde lijmwerkelementen liggen hierbij voor de hand. Ondanks de betere prestaties van lijmwerk vormt het bros mechanisch gedrag een belemmering voor deze toepassingen. Evenals bij metselwerk kan het wapenen van lijmwerksoelaas bieden. Aan de TU Eindhoven is onderzocht of het aanbrengen van wapening in lijmwerk al dan niet leidt tot ductiel gedrag en of de wapening een gunstige invloed heeft op het scheurgedrag [2].

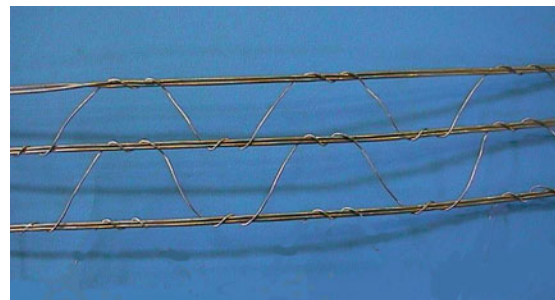
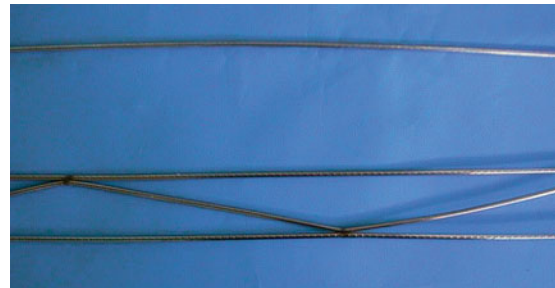
Wapenen van de lintvoegen

Traditioneel metselwerk wordt gewapend met specifieke stalen metselwerkwapening $\varnothing 4$ of 5 mm (foto 1). Deze wapening past perfect in een lintvoeg met een dikte van 10 tot 12 mm, doch kan niet meer worden toegepast bij lijmwerk met een voegdikte van amper 3 à 4 mm. Om verzekerd te zijn van een voldoende omhulling van de wapening mag de diameter van de lijmwerkwapening niet groter zijn dan $1,25$ mm. In het meest gunstige geval bedraagt de minimale lijm mortelomhulling

(tussen wapening en steen) dan iets meer dan $0,8$ mm. Is dit haalbaar en aanvaardbaar? Hierbij moet bovendien het uitvoeringsaspect in ogenschouw worden genomen. Bij lijmwerk kan de wapening niet worden geplaatst tussen twee afzonderlijk aangebrachte mortellagen, maar moet de wapening in de vooraf geplaatste lijmruipsen worden geduwd. Door het aanbrengen van de volgende laag stenen wordt de lijm mortel opengespreid over nagenoeg de breedte van de steen, zodat de wapening volledig wordt omhuld.

Roestvast staal

Door de steeds groeiende markt van baksteen- en betonsteenlijmwerk was het een uitdaging voor NV Bekaert, fabrikant van metselwerkwapening, een alternatieve wapening voor lijmwerk te ontwikkelen. In samenwerking met de TU Eindhoven werden verschillende wapeningstypen ontworpen en getest. Dit ontwikkelingsproces heeft geresulteerd in een wapeningstype bestaande uit drie gladde dubbele draden $\varnothing 1,25$ mm, verbonden door diagonaal gevlochten draden $\varnothing 0,7$ mm (foto 2) en met een totale doorsnede van de langswapening van $7,36$ mm² per laag. De dwarsdraden fungeren als afstandhouder en hebben een positieve invloed op



de mortelhechting. Aangezien de afstand tussen de langsdraden 25 mm (1 inch) bedraagt, is de totale breedte van de wapening beperkt tot 50 mm. Hierdoor is de wapening ook toepasbaar bij de speciaal ontwikkelde smallere lijmgevelstenen die ongeveer 80 mm breed zijn. Door de kleine diameter van de wapening is het mogelijk om deze op rol te leveren in een lengte van 50 m. Elke wapening kan op de juiste lengte worden afgeknipt, waardoor moeilijke uitvoerbare overlappings overbodig zijn. Door de fabrikant is een apparaat ontwikkeld waarmee de opgerolde wapening kan worden gerecht (foto 3).

Rekening houdend met de beperkte omhulling van de wapening is om duurzaamheidsrede-



1 | Traditionele metselwerkwapening

2 | Stalen lijmwerkwapening

3 | Rechten van lijmwerkwapening

* Dit is het tweede deel in een drietal artikelen over Verlijmd steenconstructies. Voor deel 1 zie *Cement* 2001 nr. 8; deel 3 verschijnt in *Cement* 2002 nr. 4.

nen gekozen voor roestvast staal AISI 304. De elasticiteitsmodulus bedraagt $188\,000\text{ N/mm}^2$, de 0,2%-rekgrens en de treksterkte bedragen respectievelijk 450 en 780 N/mm^2 . Aan de TU Eindhoven werden diverse uittrekproeven uitgevoerd waarmee kon worden aangetoond dat de hechting van dit type wapening vrij groot is, zodat een verankeringslengte van 300 mm voldoet. Door praktijkproeven is tevens aangetoond dat bij de specifieke verwerkingsmethode van lijmwerk met twee lijm-mortelrupsen de wapening voldoende wordt omhuld (foto 4).

4 | Omhulling van lijmwerk-wapening bij uitvoering met lijmpistool



5 | Aramidewapening voor metselwerk en lijmwerk

Alternatief in kunststof?

Naast staal als traditioneel wapeningsmateriaal doen ook de kunststoffen hun intrede. Voor metselwerk is er een speciaal wapeningsnet in aramide ontwikkeld. Door de kleine dikte van het netwerk kan deze wapening zowel voor metselwerk als voor lijmwerk worden toegepast (foto 5). Een essentieel verschil tussen stalen wapening en aramidewapening betreft het mechanisch gedrag. Waar staal een vloeitraject heeft, is aramide gekenmerkt door een zuiver lineair-elastisch gedrag tot

aan de breuk (lineair σ - ϵ -diagram). Dit betekent dat metselwerk of lijmwerk gewapend met aramide bros bezwijkt, waardoor een andere berekeningsmethode en een andere veiligheidsfilosofie noodzakelijk zijn dan bij de ductiele stalen wapening. Aangezien er tot op heden op dit type wapening weinig onderzoek is verricht, zal dit artikel verder worden beperkt tot stalen lijmwerkwapening.

Grenzen wapeningspercentage

Metselwerk en beton worden gewapend om de draagkracht te verhogen of de scheurvorming te beperken. Hierbij worden grenzen gesteld aan de vereiste hoeveelheid wapening [3]. Bij een te hoog wapeningspercentage zal de wapening niet vloeien, hetgeen resulteert in een ongewenste brosse breuk. De ondergrens van het toelaatbaar wapeningspercentage wordt bepaald door verschillende criteria. Om een bros bezwijkgedrag te voorkomen moet het opneembaar moment van de gescheurde doorsnede groter zijn dan het scheurmoment. Anderzijds is de maximale rek van de wapening beperkt. Deze voorwaarde leidt eveneens tot een minimum-wapeningspercentage. Een derde eis ten aanzien van de ondergrens van de wapeningshoeveelheid heeft betrekking op de beperking van de scheurwijdte in gewapend metselwerk of beton.

Bij lijmwerk baart het maximum-wapeningspercentage geen zorgen. Dit kan evenwel niet worden gezegd van het minimum-wapeningspercentage. Door de hoge buigtreksterkte is het scheurmoment veel groter dan bij metselwerk, wat resulteert in een vrij grote waarde van ondergrens van de benodigde wapening. Bij dunne lintvoegen is het niet mogelijk om staven met een grote diameter toe te passen, waardoor de praktisch uitvoerbare wapeningsdoorsnede meestal lager is dan de geëiste minimale hoeveelheid.

Betekent dit dat wapenen van lijmwerk zinloos is? Neen, het wapenen van lijmwerk is zeker nuttig, maar de doelstellingen zijn wezenlijk anders dan bij gewapend metselwerk of gewapend beton.

Ontwerpfilosofie

Door de hoge en betrouwbare buigtreksterkte is een lijmwerkelement meestal in staat de belastingen zonder scheurvorming op te nemen. Bij het ontwerpen van een lijmwerklatei kan worden volstaan te controleren of de rekenwaarde van de buigtrekspanning kleiner is dan de rekenwaarde van de buigtreksterkte van het lijmwerk. Hierbij dienen twee kanttekeningen te worden gemaakt [4]. Het bezwijken van een dergelijke latei gebeurt op een brosse manier, zonder waarschuwingseffect door initiële scheurvorming. Bovendien is het niet ondenkbeeldig dat het in situ lijmwerk niet voldoet aan de vooropgestelde kwaliteitseisen. Een afwijking in de fabricage van de mortel, onzorgvuldige uitvoering of nadelige klimatologische omstandigheden kunnen hiervan de oorzaak zijn. In dit geval is de veiligheid van de constructie niet meer verzekerd. Het wapenen van het lijmwerk kan hier een afdoende oplossing bieden. Door het wapenen zal het opneembaar moment van de latei niet toenemen, maar kan wel het plotseling bezwijken ervan worden voorkomen. De lijmwerkwapening fungeert dus als veiligheidswapening, waarbij geen eisen worden gesteld aan de grootte van de scheurwijdte.

Belasting op lijmwerklateien

Het eigen gewicht van de latei hangt samen met het aantal lagen stenen om de drukboog op te bouwen, afhankelijk van de overspanning. Is de latei borstwering van een volgende verdieping dan dient als overlast het gewicht van het aanwezige raamkozijn in rekening te worden gebracht, evenals de belasting veroorzaakt door per-

sonen en meubilair bij verhuisactiviteiten. In de meeste gevallen zal de totale overlaster minder dan 1 kN/m bedragen, tenzij een balkonplaat op de latei rust.

Ongescheurde toestand

Aangezien er geen beperkingen worden gesteld aan de scheurwijdte, is het noodzakelijk om lateien in eerste instantie te dimensioneren op basis van de buigtreksterkte:

$$\sigma_{t,d} = M_d / W_e \leq f_x / \gamma_m \quad (1)$$

waarin:

- $\sigma_{t,d}$ is de rekenwaarde van de buigtrekspanning in de latei;
- M_d is de rekenwaarde van het buigend moment in de latei;
- W_e is het elastisch weerstandsmoment van de latei;
- f_x is de karakteristieke waarde van de buigtreksterkte van het lijmwerk;
- γ_m is de materiaalfactor voor het lijmwerk (partiële veiligheidsfactor), volgens Eurocode 6 variërend van 1,7 tot 3,0 [5].

Door de buigtrekspanningen in de rektoestand te beperken tot de rekenwaarde van de buigtreksterkte is de kans op scheurvorming in de gebruiksgrenstoestand vrij klein.

Om deze ontwerpmethode te kunnen toepassen dient de waarde van f_x bekend te zijn. In de Europese regelgeving is geen methode voorzien voor het bepalen van de buigtreksterkte van lateien. Voor zover de treksterkte van de stenen groter is dan de hechtsterkte kan overeenkomstig de Nederlandse normen NEN 6790 en NEN 3835 voor de gegarandeerde karakteristieke buigtreksterkte 0,6 N/mm² worden aangenomen. Deze waarde is gelijk aan 1,5 keer de gegarandeerde karakteristieke hechtsterkte, die voor lijmwerk minimaal 0,4 N/mm² moet bedragen. De meeste lijmwerkfabrikanten garanderen evenwel een karakteristieke

hechtsterkte van minimaal 0,7 N/mm², wat overeenstemt met een f_x van 1,05 N/mm². In het Pieter van Musschenbroeklaboratorium van de TU Eindhoven zijn bij buigproeven op academisch lijmwerk met gevulde stootvoegen (foto 6) karakteristieke waarden hoger dan 1,4 N/mm² gemeten [2].

Hoogte gewapende latei

Nadat de afmetingen van de latei in de ongescheurde toestand zijn bepaald, dient te worden gecontroleerd of deze hoogte ook voldoet in de gescheurde toestand. Zoals bij gewapend metselwerk en gewapend beton kan de minimale nuttige hoogte d_{\min} voor lateien als volgt worden berekend:

$$d_{\min} = \beta_{\min} \sqrt{\frac{M_d}{bf'_{md}}} \quad (2)$$

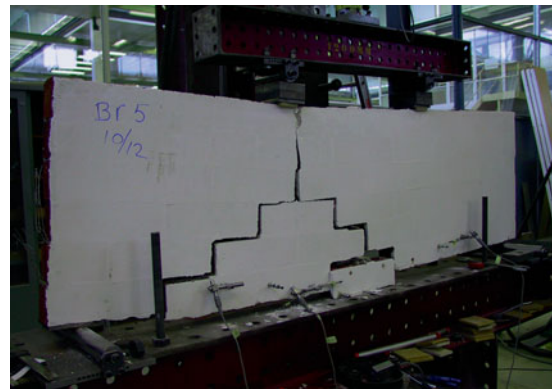
$$\beta_{\min} = \frac{3,5 + 1000 \frac{f_{yd}}{E_r}}{\sqrt{5,1 + 2250 \frac{f_{yd}}{E_r}}} \quad (3)$$

waarin:

- d_{\min} is de minimale nuttige hoogte van de wapening;
- M_d is de rekenwaarde van het buigend moment in de latei;
- b is de breedte van de latei;
- f'_{md} is de rekenwaarde van de druksterkte van het lijmwerk;
- f_{yd} is de rekenwaarde van de vloeigrens van de wapening;
- E_r is de elasticiteitsmodulus van de wapening.

Deze formules zijn gebaseerd op het bilineair σ - ϵ -diagram van metselwerk zoals voorgeschreven in NEN 6790. Als $f_{yd} = 450/1,15 = 391$ N/mm² en $E_r = 188\,000$ N/mm² is $\beta_{\min} = 1,78$.

Aangezien de wapening steeds in de lintvoegen wordt aangebracht, dient de druksterkte van het lijmwerk loodrecht op de stootvoegen bekend te zijn. Deze waarde kan worden bepaald uit drukproeven op muurtjes, loodrecht op de stootvoegen. Bij ontstentenis van



dergelijke proefresultaten kan de karakteristieke waarde van de druksterkte evenwijdig met de lintvoegen volgens Eurocode 6 [5] ook worden berekend met de volgende formules:

$$f_k = K_1 f_b^{0,7} f_m^{0,3} \text{ voor traditioneel metselwerk} \quad (4)$$

$$f_k = K_2 f_b^{0,85} \text{ voor lijmwerk} \quad (5)$$

waarin:

- K_1 en K_2 zijn een constante die afhangt van het type steen en mortel;
- f_b is de genormaliseerde druksterkte van de stenen in de richting van de toegepaste drukbelasting;
- f_m is de gemiddelde druksterkte van de mortel.

Benodigde wapeningsdoorsnede

De modellering van gewapend lijmwerk is niet anders dan bij gewapend metselwerk. De berekening van de vereiste wapeningsdoorsnede $A_{r,ber}$ kan gebeuren overeenkomstig de principes van Eurocode 6:

6 | Buigproeven op gewapend lijmwerk

$$A_{r,ber} = \frac{bf'_{md}}{f_{yd}} \left[d - \sqrt{d^2 - \frac{2M_d}{bf'_{md}}} \right] \quad (6)$$

waarbij d de werkelijke nuttige hoogte van de wapening voorstelt. De waarde van d is afhankelijk van het aantal wapeningslagen, waardoor in bepaalde gevallen een beperkte iteratieve berekening nodig is. De vermelde formule wijkt iets af van CUR-rapport 98-4 [6], omdat in Eurocode 6 wordt uitgegaan van een rechthoekig σ - ϵ -diagram, terwijl de formules in CUR-rapport 98-4 zijn gebaseerd op het bilineair diagram volgens NEN 6790.

Minimale wapeningsdoorsnede

Volgens Eurocode 6 moet voor gewapend metselwerk het wapeningspercentage minimaal gelijk zijn aan 0,1%:

$$A_{min,1} = 0,1\% bh \quad (7)$$

waarbij $A_{min,1}$ de minimale wapeningsdoorsnede en b en h respectievelijk de breedte en de totale hoogte van de latei voorstellen. Volgens CUR-rapport 98-4 is een

lager wapeningspercentage toelaatbaar als de toegepaste hoeveelheid wapening meer bedraagt dan 1,5 maal de benodigde hoeveelheid wapening om te voldoen aan de sterkte-eisen in de uiterste grenstoestand. Deze eis bepaalt een tweede ondergrens van de wapeningsdoorsnede:

$$A_{min,2} = 1,5 A_{r,ber} \quad (8)$$

De werkelijke hoeveelheid wapening A_s moet dan groter zijn dan de kleinste van deze minimumwaarden.

Ten slotte moet worden gecontroleerd of voldaan is aan de eis inzake de maximale hefboomsarm z (Eurocode 6):

$$z = d \left[1 - 0,5 \frac{A_s f_{yd}}{b d f'_{md}} \right] \leq 0,95 d \quad (9)$$

Experimentele verificatie

In het Pieter van Musschenbroek-laboratorium van de TU Eindhoven zijn reeds verschillende buigproeven uitgevoerd op gewapend lijmwerk met open en gesloten stootvoegen [2]. Uit de proefresultaten blijkt dat de hierboven vermelde rekenmethode een veilige benadering is van de werkelijkheid. Om de invloed van de wapening op het scheurgedrag te evalueren, zijn tevens trekproeven gedaan op lijmwerkmuren (foto 7). Hierbij is vastgesteld dat de scheurbepalende invloed van de lijmwerkwapening vrij gering is.

In volgende artikelen zal dieper worden ingegaan op de specifieke resultaten van dit onderzoek en in het bijzonder op het verschil in mechanisch gedrag van lijmwerk met open en gesloten stootvoegen.

Conclusie

Gewapend lijmwerk gedraagt zich niet volgens de regels die gelden voor gewapend metselwerk en gewapend beton. De afmetingen van een latei in lijmwerk moeten dusdanig worden bepaald dat er geen scheurvorming optreedt in

de uiterste grenstoestand. Om een voldoende hoog veiligheidsniveau te bereiken is het noodzakelijk deze lateien te wapenen, waarbij de roestvaste lijmwerkwapening kan worden gedimensioneerd volgens de principes van Eurocode 6 en CUR-rapport 98-4. Voor aramidewapening moeten andere formules en veiligheidsfactoren worden toegepast vanwege het zuiver lineair-elastisch gedrag van deze kunststof.

Door middel van oriënterend experimenteel onderzoek is de betrouwbaarheid van de hier voorgestelde ontwerpmethodes reeds aangetoond. Verder onderzoek is zeker noodzakelijk om een aantal aspecten zoals de invloed van open stootvoegen en de duurzaamheid nog meer in detail te onderzoeken. ■

Literatuur

1. Martens, D.R.W., Lijmwerk in de gevel. *Cement* 2001, nr. 8.
2. Bertram G., Martens D.R.W., Experimentele bepaling van de buigtreksterkte van gelijmd metselwerk met respectievelijk open en gesloten stootvoegen. BKO-rapport 98.23, TU Eindhoven, december 1998.
3. Martens, D.R.W., Vermeltoft A.Th., Bertram G., Collegedictaat Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies. TU Eindhoven, augustus 2000.
4. Martens D.R.W., Uitgangspunten voor het succesvol verlijmen van betonstenen. Syllabus studiedag Verlijmen van gevels in betonsteen, 14 februari 2001.
5. prEN 1996-1-1, Redraft 9A, Eurocode 6: Design of Masonry Structures – Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures, september 2001.
6. CUR-rapport 98-4, Gewapend en voorgespannen metselwerk. CUR, Gouda, 1998

7 | Trekproeven op gewapend-lijmwerkmuren

