

Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (10)

Tweedimensionaal belast metselwerk onderzocht*)

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

B.M. Ng'Andu MSc. en ir. A.T. Vermeltoort, TU/e, leerstoel Steenconstructies

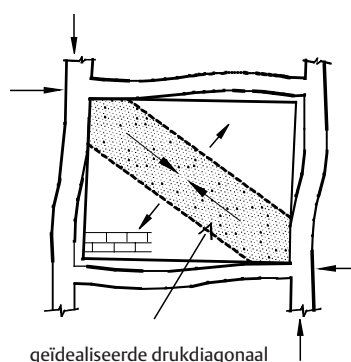
Metselwerk wanden worden meestal belast door al dan niet excentrische verticale drukkrachten. Indien deze wanden een stabiliserende functie hebben, dienen ze tevens weerstand te bieden aan de horizontale windbelasting. In dit geval worden de metselwerk wanden onderworpen aan een tweedimensionale drukbelasting.

In het kader van een promotieonderzoek naar de toepassing van stabiliserende invulwanden met kalkzandsteenelementen in raamwerken, is een vooronderzoek uitgevoerd naar de mechanische eigenschappen van dergelijk biaxiaal belast metselwerk. In deze voorstudie is vooral aandacht besteed aan de ontwikkeling van een geschikte proefopstelling.

1 | Drukdiagonaal bij stabiliserende invulwanden in raamwerken

Invulwanden die als stabiliserend element in raamwerken worden toegepast, worden belast door een diagonale drukkracht, waarbij de vervorming van het metselwerk

2 | Proefopstelling



loodrecht op de belasting in belangrijke mate wordt verhinderd (fig. 1). De bepaling van de draagkracht van metselwerk of lijmwerk onder een dergelijke belasting is noch in NEN 6790 (TGB Steen) noch in Eurocode 6 voorgeschreven. Voor de modellering van het mechanisch gedrag van invulwanden is het evenwel onontbeerlijk te beschikken over informatie betreffende de stijfheid en de bezwijkcriteria van het metselwerk [2]. Als onderdeel van het promotieonderzoek van B.M. Ng'Andu MSc. werd in het Pieter van Musschenbroek-laboratorium van de TU/e een proefopstelling ontwikkeld, waarmee deze informatie experimenteel kan worden bepaald. Hierbij is gebruikge-

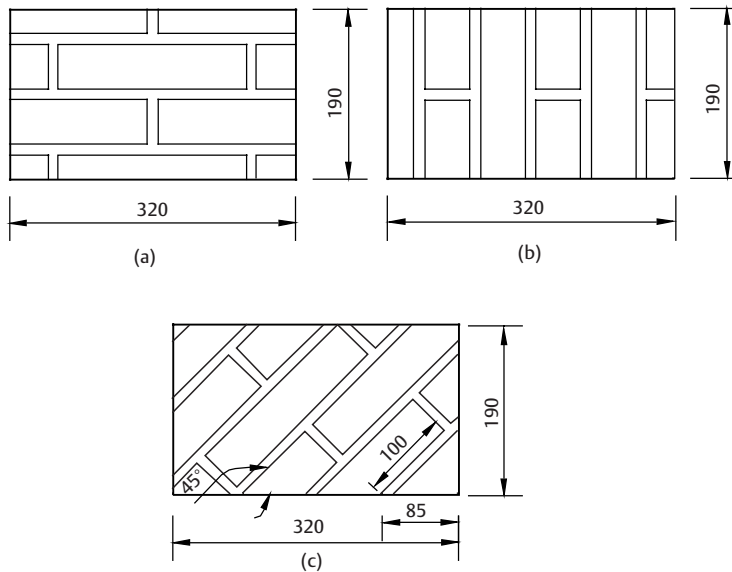
maakt van de in het laboratorium beschikbare 3D-drukbank.

Proefopstelling

Meer dan vijftien jaar geleden is een proefopstelling ontwikkeld ten behoeve van onderzoek naar het softeningeffect bij beton onder multiaxiale belasting [3]. Deze proefopstelling is door andere onderzoekers aangepast voor hun specifiek onderzoek. De testbank kan in drie onderling loodrechte richtingen krachten van respectievelijk 5000, 2000 en 1000 kN op het proefstuk uitoefenen. De vijzels zijn opgehangen aan staalkabels en werken onafhankelijk van elkaar (foto 2). Voor het onderzoek met tweedimensionale drukproeven zijn alleen de horizontale en verticale vijzels nodig. Aangezien de horizontale vijzels aan kabels zijn opgehangen, kunnen ze horizontaal vrij bewegen, waardoor de verticale aslijn van het proefstuk altijd, ook na vervorming van het proefstuk, samenvalt met de aslijn van de verticale vijzels.

Om ook de horizontale aslijn van het proefstuk steeds te laten samenvallen met de aslijn van de horizontale vijzels, wordt het testframe op luchtkussens geplaatst, in combinatie met schokdempers. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de proefopstelling wordt verwezen naar [3]. Om een gelijkmatige verdeling van de spanningen onder de drukplaat te kunnen verzekeren, ook indien de zij- en kopvlakken van het proefstuk niet perfect evenwijdig zijn, is in het vooronder-

*) Dit artikel is gebaseerd op een lezing die begin november 2002 op de '6th International Masonry Conference' te London is gepresenteerd door B.M. Ng'Andu MSc. [1].



zoek tussen vijzels en drukplaten een sferische kop aangebracht. Om de invloed van de wrijving te minimaliseren [4], zijn tussen proefstuk en lastplaten twee 0,05 mm dikke teflonfolies aangebracht. Om ook na het bereiken van de maximale drukbelasting metingen te kunnen verrichten, is gekozen voor een vervormingsgestuurde belasting via een gecombineerd hydraulisch en elektronisch regelsysteem.

Proefstukken

In dit onderzoek is gebruikgemaakt van gele strengpersgevelsteen van Joosten bv. De afmetingen van de stenen waren $204 \times 98 \times 50 \text{ mm}^3$ (lengte x breedte x hoogte). Bij eerdere aan de TU/e uitgevoerde proeven [2] zijn de druksterkte en de volumieke massa van de stenen bepaald op respectievelijk 66 N/mm^2 en 1997 kg/m^3 .

De gebruikte mortel was een bastaardmortel met een volumeverhouding van portlandcement 32,5 R : kalk : zand van 1 : 1 : 6; korrelgrootte van het zand < 3 mm. Om de kwaliteit van de mortel te evalueren, werden driepuntsbuigproeven en drukproeven op mortelbalkjes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ uitgevoerd conform NEN 3835 [5]. De gemiddelde buigtreksterkte bedroeg $2,02 \text{ N/mm}^2$,

de gemiddelde druksterkte $5,7 \text{ N/mm}^2$.

De proefmuurtjes hadden als afmetingen $320 \times 190 \times 98 \text{ mm}^3$. Er zijn drie typen muurtjes vervaardigd, waarbij de hoek tussen de lintvoegen en de verticaal respectievelijk 0° , 45° en 90° bedroeg (fig. 3). De proefelementen werden gezaagd uit grotere muren, die in het laboratorium traditioneel waren gemetseld. Elk proefstuk werd nadien in een rechthoekige stalen mal geplaatst, waarbij de 3 tot 5 mm brede opening tussen de mal en het metselwerk werd opgevuld met een geprefabriceerde hogesterktemortel van het type Rhinofil-Metsger met een druksterkte van 100 N/mm^2 . Na één dag verharden werden de proefstukken ingepakt in folie en bewaard in de klimaatkamer van het laboratorium.

Metingen

In totaal werden er zes proeven uitgevoerd, twee proeven van elk type (tabel 1). Bij elke proef werden de volgende metingen uitgevoerd (foto 4):

- kracht in de verticale richting;
- verplaatsing van de verticale vijzel;
- kracht in de horizontale richting;
- verplaatsing van de horizontale vijzel;

- verticale vervorming van het proefstuk (meetlengte 80 mm);
- horizontale vervorming van het proefstuk (meetlengte 100 mm);
- verplaatsing van de lastplaten (1 LVDT aan elk uiteinde).

3 | Afmetingen van de drie typen proefstukken (maten in mm)
 $\alpha = 90^\circ$ (a), $\alpha = 0^\circ$ (b),
 $\alpha = 45^\circ$ (c)

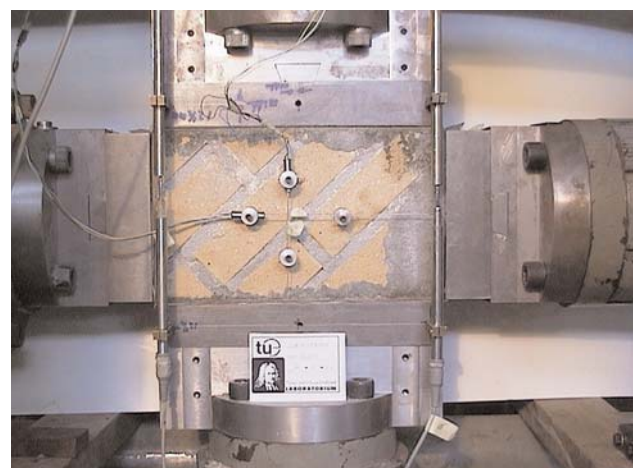
Om de drie seconden werd door de computer automatisch een meting geregistreerd. De elektronische waarden werden via callibratiefactoren omgezet in verplaatsingen in mm en krachten in kN.

Verloop van de proeven

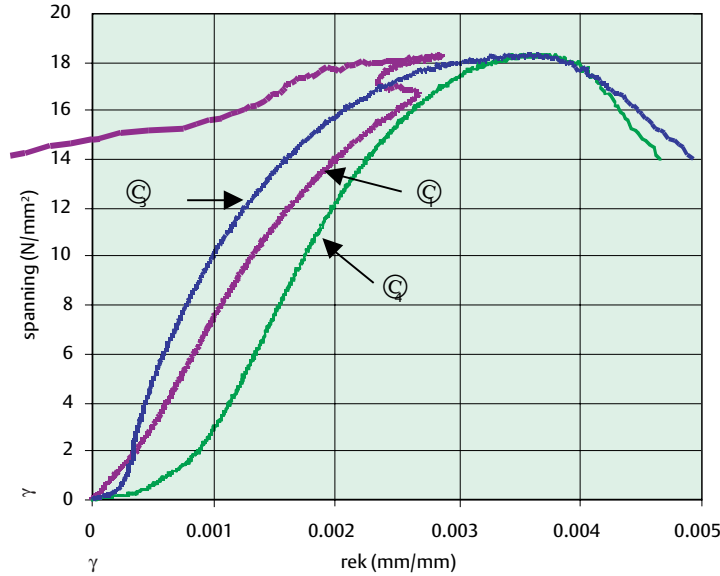
Bij aanvang van de proef werd het proefstuk gefixeerd door een horizontale klemkracht van 5,0 kN. Tijdens de test werd de positie van de horizontale lastplaten ongewijzigd gehouden, terwijl de verplaatsing van de verticale vijzel systematisch werd opgevoerd met een snelheid van 30 mm/min. Door de toenemende verticale belasting nam ook de dwarsvervorming toe, hetgeen resulteerde in een verhoging van de horizontale vasthoudkracht.

De eerste scheurgeluiden werden waargenomen bij een verticale kracht van ongeveer 80% van de maximale belasting. Na het bereiken van de maximale belasting nam de verticale drukkracht vrij snel af (fig. 5). Bij proef nr. 2 ($\alpha = 0^\circ$) werd vroegtijdig een eerste scheur waargenomen. Bij nader onderzoek is gebleken dat lokaal

4 | Meetapparatuur



5 | Spanning-rek-diagram gemeten bij proef nr. 6
 @: stuik gemeten op het proefstuk
 @ en @: stuik gemeten tussen de lastplaten



6 | Typisch scheurpatroon
 a. zijaanzicht proefstuk
 b. onderaanzicht proefstuk



bezwijken van een hoek van het proefstuk hiervan de oorzaak was. Dit fenomeen kan wellicht verklaren waarom de draagkracht in dit geval aanzienlijk lager was dan bij proef nr. 1.

Eenzelfde lokaal bezwijken werd vastgesteld bij proef nr. 3 ($\alpha=45^\circ$). In dit geval was dit wellicht te wijten aan het afschuiven van een lintvoeg.

Scheurpatronen

Bij alle testen traden verticale splitscheuren op, de scheurvlakken evenwijdig met het voorvlak van het proefstuk (foto 6). Dit scheurpatroon is karakteristiek voor twee-assige belasting, aangezien in dit geval alleen trekspanningen loodrecht op de belastingen kunnen ontstaan. Bij de proeven nr. 5 en 6, waarbij de verticale drukbelasting loodrecht op de lintvoegen aangreep, ontstonden er drie scheurvlakken. De metselwerkschijven tussen de scheurvlakken varieerden in dikte van

boven naar beneden. Alleen in het geval waarbij $\alpha=0^\circ$ werden verticale scheuren in de lintvoegen vastgesteld.

Druksterkte en elasticiteitsmodulus

Voor de modellering van tweedimensionaal belast metselwerk zijn zowel de druksterkte als het spanning-rek-diagram van belang. Door in de proeven de horizontale vervorming van de zijranden constant te houden, werd de spanningstoestand bij invulwanden gesimuleerd en kan alleen de spanning-rek-relatie in verticale richting worden geëvalueerd.

In tabel 1 is een overzicht gegeven van de druksterkten en de elasticiteitsmoduli die bij de zes proeven werden gemeten. In het geval waarbij de drukkracht loodrecht op de lintvoegen aangrijpt, is de gemiddelde druksterkte $16,5 \text{ N/mm}^2$. Deze waarde is aanmerkelijk hoger dan de theoretische representatieve druksterkte die uit tabel 1 van NEN 6790 [6] kan worden afgeleid. Een berekening van de karakteristieke druksterkte volgens Eurocode 6 [7], op basis van de druksterkte van de stenen en de mortel, levert het volgende resultaat:

- genormaliseerde gemiddelde steendruksterkte (vormfactor = $0,75 \times 1,1 = 0,825$):
 $f_b = 66 \text{ N/mm}^2 \times 0,825 = 54,45 \text{ N/mm}^2$
- gemiddelde morteldruksterkte: $f_m = 5,7 \text{ N/mm}^2$
- karakteristieke uniaxiale metselwerkdruksterkte:
 $f_k = 0,50 \times 54,45^{0,7} \times 5,7^{0,3} = 13,83 \text{ N/mm}^2$

Tabel 1 | Experimenteel bepaalde maximale krachten, druksterkten en elasticiteitsmoduli

proef	α (°)	H_{max} (kN)	V_{max} (kN)	druksterkte (N/mm ²)	elasticiteitsmodulus (N/mm ²)		
					E_1	E_3	E_4
1	0	15,4	487,5	15,3	7752	7063	12373
2	0	23,0	304,0	9,3	1447	10785	3106
3	45	49,8	409,5	13,1	2729	6990	3027
4	45	67,2	513,0	16,2	3346	6726	6130
5	90	26,2	461,5	14,7	12318	8892	4533
6	90	10,1	575,5	18,3	8716	10248	9862

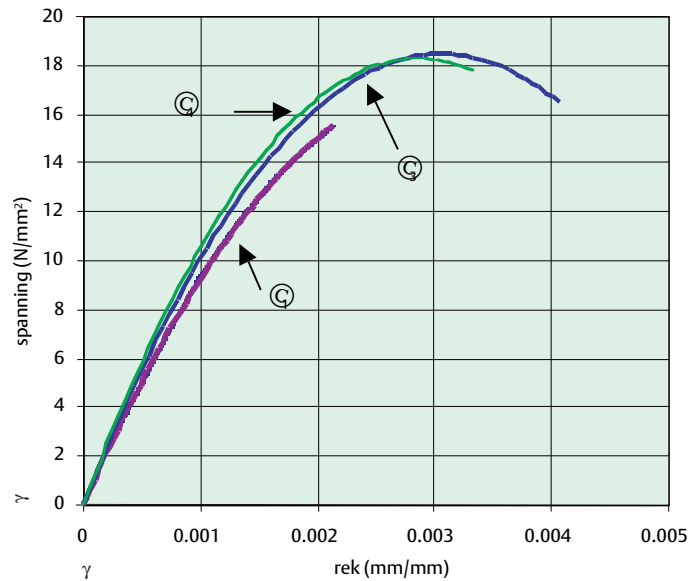
De gemeten biaxiale druksterkte ligt dus ongeveer 20% hoger dan de uniaxiale druksterkte. Dit geldt evenwel niet voor de elasticiteitsmodulus. Uit tabel 1 volgt dat de gemiddelde E-modulus, berekend uit de vervormingen van het proefstuk, $E_1 = 10\,517 \text{ N/mm}^2$. Deze waarde is zelfs lager dan de E-modulus bij éénassige belasting die volgens Eurocode 6 theoretisch gelijk is aan $1000f_k = 13\,830 \text{ N/mm}^2$.

Uit de proevenreeks kan ook worden afgeleid dat de gemiddelde druksterkte het hoogst is bij horizontale lintvoegen ($16,50 \text{ N/mm}^2$) en het laagst bij verticale lintvoegen ($12,30 \text{ N/mm}^2$). Bij een hoek van 45° werd een tussenliggende waarde gemeten ($14,65 \text{ N/mm}^2$). In dit laatste geval bleek de horizontale vasthoudkracht meer toe te nemen dan bij horizontale of verticale lintvoegen. Dit fenomeen is te verklaren door het afglijden van een deel van het proefstuk ter plaatse van de schuine lintvoegen.

Bij alle proeven was het \hat{f}_c -diagram nagenoeg parabolvormig, zoals voorgesteld in figuur 5. Op de ordinaat is de verticale drukspanning uitgezet, terwijl horizontaal de stuik in verticale richting is voorgesteld. \hat{f}_c stelt hierbij de stuik voor die is gemeten door de LVDT's op het proefstuk, terwijl \hat{f}_c en \hat{f}_c de relatieve verticale vervormingen voorstellen die werden gemeten tussen de lastplaten. Indien de aanloopeffecten ten gevolge van het dichtdrukken van de spleten tussen de lastplaten en het proefstuk worden weggefilterd, kan, door toepassing van een regressieanalyse, het \hat{f}_c -diagram worden geïdealiseerd tot een tweedegraadparabool (fig. 7). Deze curve stemt vrij goed overeen met het parabol-rechthoekig \hat{f}_c -diagram volgens Eurocode 6.

Conclusies

Uit de beperkte reeks biaxiale drukproeven op metselwerk met verschillende oriëntatie van de



7 | Geïdealiseerd spanning-rek-diagram

\hat{f}_c : stuik gemeten op het proefstuk

\hat{f}_c en \hat{f}_c : stuik gemeten tussen de lastplaten

lintvoegen, blijkt dat de gebruikte proefopstelling geschikt is om de gewenste mechanische eigenschappen bij tweedimensionaal belast metselwerk te bepalen. Teneinde de invloed van de randen te elimineren, is het evenwel aan te bevelen de proefstukken iets groter te nemen. In dit onderzoek is geopteerd voor een gelijkmatige inleiding van de spanningen. Hierdoor hebben de lastplaten tijdens de proeven een kleine rotatie ondergaan. Indien een parallelle vervorming van de randen is vereist, dient de belasting met meerdere vjzels te worden aangebracht.

Bij bezwijken onder tweedimensionale drukbelasting treden steeds scheuren op in het vlak van de belastingen. De druksterkte van biaxiaal belast metselwerk is aanmerkelijk hoger dan van uniaxiaal belast metselwerk, terwijl de stijfheid van dezelfde grootteorde is als bij ééndimensionale belasting. In een vervolgonderzoek zullen de mechanische eigenschappen van lijmwerk onder tweedimensionale belasting worden bepaald. Hierbij zal ook de invloed van het al dan niet vullen van de stootvoegen worden onderzocht. ■

explorative research into the behaviour of a two-jack test rig, Proceedings of the 6th International Masonry Conference, London, 2002.

- Rots, G. (ed), Structural Masonry: An Experimental/Numerical Basis for Practical Design Rules. Published for CUR Gouda, A.A. Balkema, Rotterdam, 1997.
- Van Mier, J.G.M., Strain Softening of Concrete under multiaxial loading conditions. Proefschrift TU Eindhoven, 1984.
- Vermeltfoort, A.T., Effects of boundary conditions on compressive behaviour of brittle materials. Proceedings of the 7th North American Masonry Conference, South Bend, Indiana, 1996.
- NEN 3835, Mortels voor metselwerk van stenen, blokken of elementen van baksteen, kalkzandsteen, beton en gasbeton. NNI, 1991.
- NEN 6790, TGB Steen
- NVN-ENV 1996-1-1, Eurocode 6: Ontwerp en berekening van steenconstructies + NAD.
- Page, A.W., The biaxial compressive strength of brick masonry. Proceedings Institution of Civil Engineers, 71 (2), Sept 1981.

Literatuur

- Ng'Andu, B.M., Vermeltfoort A.T., Martens, D.R.W., Biaxial compression of masonry,