

Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (36)

Gedrag van spouwankers bij brede spouwmuren

ir. G. Bertram, Leerstoel Steenconstructies TU Eindhoven
prof.ir.-arch. D.R.W. Martens, Leerstoel Steenconstructies TU Eindhoven, Bureau Dirk Martens bvba, Zingem (B)

In Nederland worden de meeste woningen gebouwd in metselwerk [4]. De Nederlandse winters zijn vaak tamelijk koud en de zomers nat, wat heeft geleid tot de introductie van de spouwmuur aan het begin van de 20ste eeuw. Bij dit bouwsysteem fungeert het buitenspouwblad als regenscherm. De thermische eisen worden vervuld door de isolatie in de luchtspouw. Door de toenemende energie-eisen zullen in de toekomst dickere isolatiepakketten ($R = 3 \text{ m}^2\text{K/W}$ en meer) nodig zijn. Dit zal leiden tot bredere spouwen met breedtes tot 200 mm.

Tegenwoordig worden de buitenwanden van woongebouwen in Nederland veelal uitgevoerd als spouwmuur met een baksteenmetselwerk buitenblad (ca. 100 mm), een dragend binnenblad van lijmwerk met kalkzandsteenelementen (ca. 100-120 mm) en een spouw van 80 tot 120 mm, gedeeltelijk gevuld met isolatie (ca. 60-100 mm). Volgens de huidige Nederlandse normen is een R -waarde (thermische weerstand) van $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ voor buitenwanden vereist. Dit betekent dat een 80 tot 100 mm dikke laag isolatie nodig is. Door de toenemende energie-eisen zullen in de toekomst dickere isolatiepakketten van $R = 3 \text{ m}^2\text{K/W}$ en meer nodig zijn. Dit zal leiden tot bredere spouwen met breedtes tot 200 mm.

Aangezien de bestaande spouwankers ontworpen zijn voor spouwbreedtes van 80 tot 120 mm, is er weinig kennis voor het ontwerp van spouwmuren met spouwen groter dan 120 mm. In het Pieter van Musschenbroeklaboratorium van de TU Eindhoven is een oriënterend experimenteel onderzoeksproject met twee proevenseries (in 2004 en 2005) opgestart om meer inzicht te krijgen in het mechanisch gedrag van de spouwankers bij spouwmuren met brede spouw onder laterale windbelasting [1,2,7]. Tijdens de proeven werd een gelijkmatig verdeelde laterale belasting via een luchtbed op de buitenkant van het buitenblad aangebracht [5]. Dit type laterale belasting is de meest kritische situatie voor de spouwankers. In de praktijk treedt enige drukvereffening op, wat resulteert in kleinere krachten in de spouwankers. Tijdens het onderzoek is dit effect niet in beschouwing genomen.

Tabel 1 | Maten van de stenen, blokken en elementen

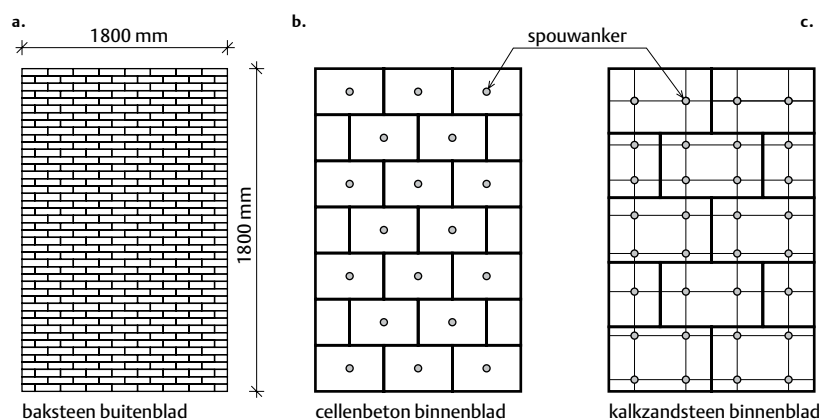
stenen/blokken/elementen	maten [mm ³]
baksteen	206 x 96 x 50
cellenbeton	600 x 400 x 100
kalkzandsteen	900 x 600 x 100

Spouwmuren

Bij de twee proevenseries zijn twee extreme situaties voor de stijfheidsverhoudingen van de spouwbladen bestudeerd. In de eerste serie is een relatief zwak binnenblad van cellenbetonblokken lijmwerk (AAC, tabel 1) beproefd in combinatie met een sterker buitenblad van baksteenmetselwerk (tabel 1) en een nieuw type spouwanker (fig. 1a, 1b, 2a en 2b). In de tweede serie werd een spouwmuur met standaard materialen gebruikt, met een relatief sterk binnenblad van lijmwerk met kalkzandsteenelementen (KZS, tabel 1) in combinatie met een zwakker buitenblad van baksteenmetselwerk en standaard slagspouwankers (fig. 1c en 2c). De buiten- en binnenspouwbladen waren in beide series $1800 \times 2800 \text{ mm}^2$ groot, met een niet-geïsoleerde spouw van 180 mm breed. De spouwankers werden volgens een regelmatig grid (fig. 1b en 1c) geplaatst, met vier spouwankers per m^2 voor de AAC-wand en zes voor de KZS-wand.

1 | Spouwbladen

2 | Spouwankers



3 | Proefopstelling



Proefopstelling

De proefopstelling en het meetframe zijn opgebouwd uit HE300B- en HE160B-profielen (foto 3). Figuur 4 geeft de schematische weergave van de proefopstelling.

Het draagvermogen van de spouwankers onder laterale belasting werd onderzocht, door het meten van de luchtdruk in het luchtbed, de vervormingen van het buiten- en binnenspouwblad en het bestuderen van het bezwijkgedrag van de spouwbladen en de spouwankers.

Figuur 5 laat de meetposities op de spouwmuur zien. De meetposities, die gemerkt zijn met de letter M symboliseren Mitutoyo klokken, terwijl de letters A, LVDT's voorstellen.

Maximale laterale belasting en stijfheid

Figuren 6 en 7 tonen de deformaties in het midden van het binnen- en buitenspouwblad als functie van de laterale belasting op een AAC-spouwmuur (fig. 6) en een KZS-spouwmuur (fig. 7). Tot de eerste scheur laten de grafieken een nagenoeg lineair gedrag zien. Na de top neemt het draagvermogen af tot een bijna constante waarde (horizontale asymptoot). Vóór de eerste scheur werken het binnen- en buitenspouwblad samen en ondergaan dezelfde vervorming. Na de eerste scheur (in het binnenspouwblad) heeft het binnenspouwblad een grotere vervorming dan het buitenspouwblad.

De maximale gemeten laterale belastingen bedroegen voor de AAC-spouwmuuren 0,95-1,2 kN/m² en voor de KZS-spouwmuuren 1,6-1,9 kN/m².

Zoals te zien is in de figuren 6 en 7 is de stijfheid van

een AAC-spouwmuur kleiner dan van een KZS-spouwmuur.

Tabel 2 geeft de gemiddelde vervormingen in het midden van de spouwmuuren bij de maximale belasting.

Uitgaande van lineair-elastisch gedrag en een identieke vervorming van beide spouwbladen kan de verhouding tussen de stijfheden van beide spouwmuuren als volgt worden berekend:

$$\frac{F_{\max;AAC}/\delta_{AAC}}{F_{\max;KZS}/\delta_{KZS}} \cdot 100\% = \frac{1,1/2,6}{1,8/2,3} \cdot 100\% = 54\% \quad [1]$$

met:

F = maximale belasting;

δ = vervorming in het midden van de spouwmuur bij de maximale belasting.

Volgens vergelijking 1 en met de gegevens in tabel 2, is de stijfheid van de AAC-spouwmuur ongeveer de helft van die van de KZS-spouwmuur. Dit komt overeen met de verhouding van de sommen van de E-moduli van beide spouwbladen voor respectievelijk de AAC- en de KZS-wand, als hierbij de E-moduli volgens NEN 6790 worden ingevoerd (vergelijking 2):

$$\frac{E_{AAC} + E_B}{E_{KZS} + E_B} \cdot 100\% = \frac{2300 + 6000}{9000 + 6000} \cdot 100\% = 55\% \quad [2]$$

met:

E = E-modulus.

De reële waarden van de E-moduli van de buigtreksterktes werden niet experimenteel bepaald, aangezien het oriënterend onderzoek primair gericht was op het gedrag van de spouwankers. De treksterkte en druksterkte van de ankers werden wel experimenteel bepaald.

Bezwijkmechanismen

De spouwmuuren bezweken door het scheuren van het binnenspouwblad. De scheur trad op in één voeg in het midden van de wand (foto. 8a). Bij twee AAC-spouwmuuren verbogen de spouwankers van de bovenste rij (foto. 8b) tegelijkertijd met het ontstaan

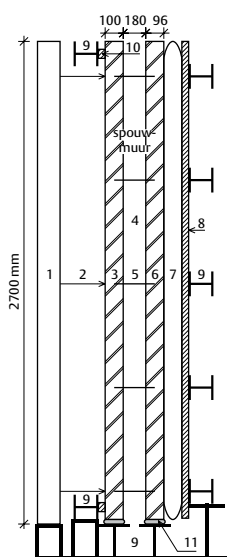
Tabel 2 | Maximale belasting en bijbehorende vervormingen

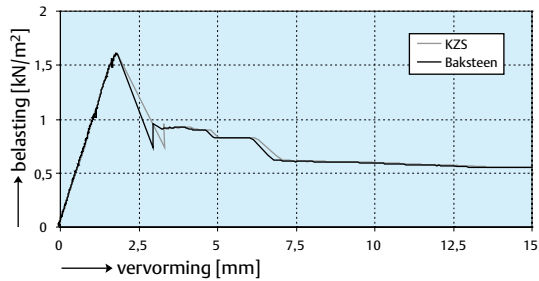
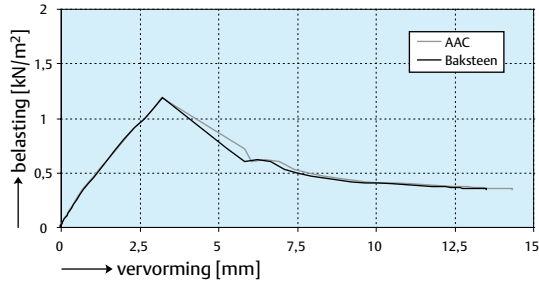
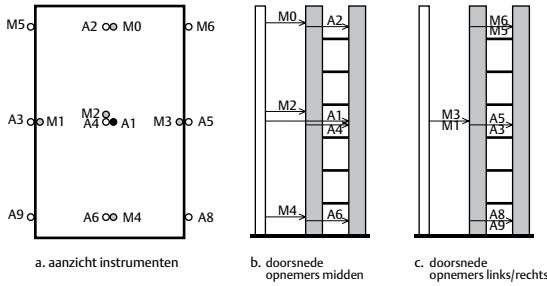
proefstuk	max. belasting [kN/m ²]	vervorming [mm]	
		binnen-spouwblad midden	buiten-spouwblad midden
gem. AAC	1,1	2,7	2,6
gem. KZS	1,8	2,3	2,3

(NB. Proefstuk AAC 1 had een iets andere ondersteuning boven aan het binnenspouwblad)

4 | Schema waarin:

1. meetframe
2. verplaatsingsopnemer
3. binnenspouwblad
4. spouw
5. spouwanker
6. buitenspouwblad
7. luchtbed
8. bamboe multiplex 12 mm
9. testframe
10. houten strip
11. mortel voeg





van de scheur in het binnenspouwblad. Bij de derde AAC-spouwmuur en de drie KZS-spouwmuuren ging na de eerste scheur het buitenspouwblad hol staan (foto. 8c).

Computermodellen

Voor een beter begrip van het mechanisch gedrag van de (AAC) spouwmuuren onder laterale belasting werd een vereenvoudigde computersimulatie in MatrixFrame S3.0 uitgevoerd. Het model is ongeveer gelijk aan het model dat beschreven staat in CUR-Aanbeveling 71 [3, 6]. De grootste verschillen met het CUR-model zijn: de niet geknikte spouwankers, het horizontaal gesteunde binnenblad en de beperking tot één bouwlaag.

Het bezwijkmechanisme van de AAC-spouwmuuren werd gekarakteriseerd door het scheuren van het binnenspouwblad in combinatie met het uitbuigen van de bovenste rij spouwankers. Aangezien het onduidelijk was welk fenomeen het eerst plaatsvond, werd een lineair elastische berekening uitgevoerd volgens figuur 9, gebaseerd op de werkelijke proefopstelling (fig. 3, 4). Het model voor de spouwmuur heeft rollen als horizontale ondersteuning van het binnenblad en de spouwankers zijn door middel van scharnieren verbonden aan de spouwbladen.

Door stapsgewijs kleine wijzigingen aan te brengen in de computermodellen werden de waargenomen fenomenen gesimuleerd. Er werden in totaal vier verschillende modellen bestudeerd. De laterale belasting

werd in de modellen systematisch verhoogd totdat scheurvorming in de spouwbladen of vloeien of uitbuigen van de spouwankers optrad.

Model 1

Het beginmodel (model 1) stelt de ongescheurde situatie voor, met onderaan ingeklemde spouwbladen. In dit geval, bij een belasting van 1,5 kN/m, is het buigend moment in het onderste deel van het buitenspouwblad (0,87 kNm) praktisch even groot als het theoretisch scheurmoment van 0,9 kNm (buigtreksterkte van 0,3 N/mm² volgens NEN 6790):

$$M_s = \frac{\sigma_b \cdot I}{z} = \frac{0,3 \cdot \frac{1}{12} \cdot 1800 \cdot 100^3}{50} = 0,9 \text{ kNm} \quad [3]$$

met:

- M_s = theoretisch scheurmoment;
- σ_b = buigtreksterkte;
- I = kwadratisch oppervlaktemoment;
- z = afstand tot de neutrale lijn.

Dit leidt tot het scheuren van de mortel bij de inklemming onderaan. Tegelijkertijd overschrijdt de druk in de bovenste rij spouwankers (1,51 kN voor drie ankers) de druksterkte van 0,5 kN per spouwanker (uit proeven op de ankers), waardoor men ervan mag uitgaan dat de kracht in deze spouwankers niet meer zal toenemen bij toenemende vervorming.

Model 2

In model 2 werd onderaan het buitenspouwblad een rol geïntroduceerd en werd aan de kracht in de bovenste rij spouwankers een constante waarde van 1,5 kN gegeven (fig. 9, pijlen 2). Dit betekent dat de bovenste rij ankers tot hun maximale druksterkte van 0,5 kN per anker worden belast. In dit geval, bij een belasting van 1,62 kN/m, is het buigend moment in het onderste deel van het binnenspouwblad (0,89 kNm) praktisch even groot als het theoretisch scheurmoment.

Model 3

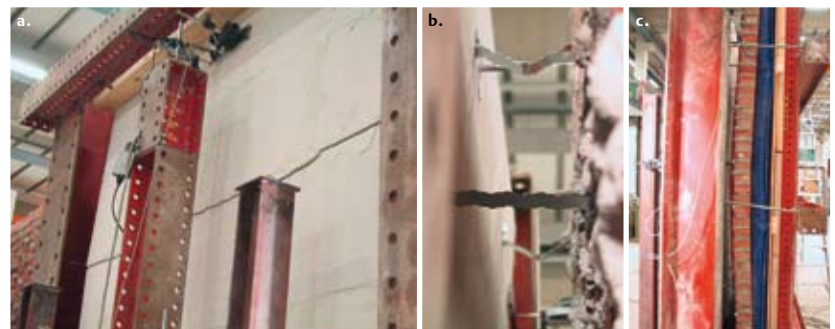
In het derde model werd een scharnier in het onderste deel van het binnenspouwblad geïntrodu-

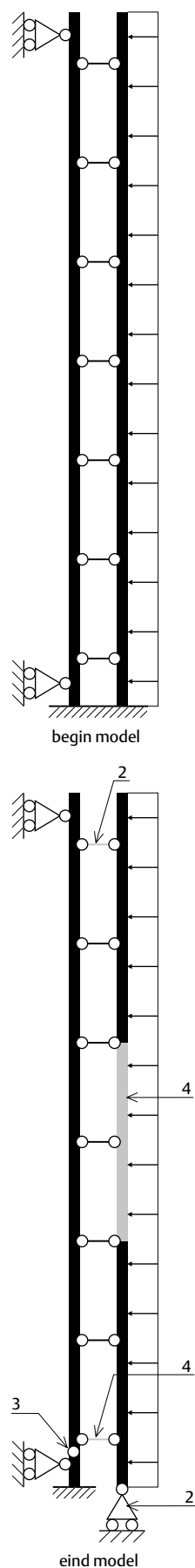
5 | Posities opnemers

6 | Vervormingen van een spouwmuur met AAC-binnenspouwblad

7 | Vervormingen van een spouwmuur met KZS-binnenspouwblad

8 | Bezwijkmechanismen





ceerd (fig. 9, pijl 3). Bij (nog steeds) een belasting van 1,62 kN/m, bereikt het buigend moment in het midden van het buitenspouwblad het scheurmoment (0,87 kNm). De momenten zijn praktisch constant over een hoogte van 1000 tot 1800 mm (0,74 - 0,87 - 0,75 kNm); daardoor zullen in dit deel van de wand de lintevoegen scheuren, wat leidt tot het uitbuigen van het buitenspouwblad, zoals te zien was in bezwijkmechanisme 2. Tegelijkertijd overschrijdt de druk in de onderste rij spouwankers de druksterkte (1,74 kN).

Model 4

Model 4 (het eindmodel) stelt de spouwmuur voor vlak voor het scheuren van het binnenspouwblad. In dit model werd de E-modulus van de twee middelste secties van het buitenspouwblad gereduceerd tot een kwart van de oorspronkelijke 6000 N/mm^2 , ten gevolge van de scheuren. Na de analyse van verschillende waarden voor de E-modulus in het computermodel, bleken de resultaten bij een E-modulus van 1500 N/mm^2 het beste aan te sluiten bij de waargenomen fenomenen, met name het bezwijken van het binnenspouwblad. Daarnaast werd aan de kracht (zoals ook al in model 2) in de onderste rij spouwankers een constante waarde van 1,5 kN gegeven (fig. 9, pijlen 4). Bij een maximale belasting van 1,98 kN/m ($1,1 \text{ kN/m}^2 \times 1,8 \text{ m}$ wandbreedte) overschrijdt het berekende buigend moment in het midden van het binnenspouwblad het theoretisch scheurmoment (0,94 kNm). De momenten zijn praktisch constant over een hoogte van 1000 tot 2200 mm (0,76 - 0,94 - 0,81 - 0,73 kNm); daardoor zal de zwakste lintevoeg als eerste scheuren.

Ten gevolge van het dynamische effect bij het scheuren van de wand, zal de werkelijke kracht in de spouwankers de druksterkte van de ankers overschrijden. Er kan worden geconcludeerd dat de spouwankers in staat zijn de belasting te herverdelen.

Ten slotte

Tijdens de experimenten werden twee typen bezwijkmechanisme waargenomen. Alle spouwmuren bezweken door het scheuren van het binnenspouwblad. De scheur trad op in één voeg in het midden van de wand. In de eerste proevenserie (AAC) bezweken de spouwankers, terwijl in de andere serie (KZS) de spouwankers onbeschadigd bleven en het buitenspouwblad hol ging staan.

De vervormingsgrafieken van de proeven lieten een nagenoeg lineair gedrag van de spouwmuren zien tot de eerste scheur, oftewel de maximale laterale belasting. Na de top nam het draagvermogen af tot een bijna constante waarde. Voor de eerste scheur werkten het binnen- en buitenspouwblad samen en

ondergingen dezelfde vervorming. Na de eerste scheur had het binnenspouwblad een grotere vervorming dan het buitenspouwblad.

De maximale gemeten belasting was $0,95 - 1,2 \text{ kN/m}^2$ voor de AAC-spouwmuur en $1,6 - 1,9 \text{ kN/m}^2$ voor de KZS-spouwmuur. De stijfheid van een AAC-spouwmuur is 50% kleiner dan van een KZS-spouwmuur. De vereenvoudigde simulatie in MatrixFrame S3.0 maakt duidelijk dat door het herverdelen van de belasting over de spouwankers, bij de AAC-spouwmuren, het binnenspouwblad bezwijkt, voordat de spouwankers bezwijken.

Voor het ontwikkelen van betrouwbare rekenmodellen is het noodzakelijk om bijkomend experimenteel onderzoek te verrichten, waarbij alle materiaaleigenschappen experimenteel worden bepaald. Tevens is het wenselijk om de invloed van drukvereffening in de spouw te evalueren.

Literatuur

1. Bertram, G., en D.R.W. Martens, Meetrapport van drie luchtbedproeven op cellenbeton-baksteen spouwmuren. TU Eindhoven, Eindhoven, 2004.
2. Bertram, G. en D.R.W. Martens, Meetrapport van drie luchtbedproeven op kalkzandsteen-baksteen spouwmuren. TU Eindhoven, Eindhoven, 2005.
3. CUR Aanbeveling 71 – Constructieve aspecten bij ontwerp, berekening en detaillering van gevels in metselwerk. CUR, Gouda, 2000.
4. Pompeu Sandos, S. en D.R.W. Martens, Enclosure Masonry Wall Systems Worldwide, Chapter 1. Taylor and Francis, 2006.
5. Pluijm, R. van der, Out-of-plane bending of masonry; Behaviour and strength. Proefschrift TU Eindhoven, Eindhoven, 1999.
6. Wijte, S.N.M., CUR Aanbeveling 71 – Nieuwe benaderingswijze voor het ontwerpen van metselwerkgevels. *Cement* 2000 nr. 4.
7. Bertram, B. en D.R.W. Martens, Analyse-rapport van brede spouwmuren onder laterale belasting. TU Eindhoven, Eindhoven, 2007.