

Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (32)

Momentreductie door wand-vloerinteractie (1): State-of-the-art

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

De draagkracht van ongewapende metselwerkwallen die hoofdzakelijk in het verticale vlak worden belast, hangt in belangrijke mate af van de excentriciteit van de belasting. De bepaling van deze excentriciteit gebeurt doorgaans met een lineair-elastische raamwerkberekening uitgaande van starre wand-vloer-knoopverbindingen. Dit levert relatief grote theoretische buigende momenten (M_{ca}) en derhalve aanzienlijke excentriciteiten op. In werkelijkheid zal er scheurvorming ontstaan ter plaatse van de wand-vloeraansluiting en zal het buigend moment dat door de vloer aan de wand effectief wordt overgedragen (M_{eff}) kleiner zijn. Een wetenschappelijk onderbouwde methode voor de theoretische bepaling van deze momentreductie is momenteel nog niet voorhanden.

Het bepalen van de invloed van het niet-lineair gedrag van de wand-vloerinteractie is reeds meer dan een eeuw onderwerp van onderzoek. Een fundamentele aanpak van het probleem kwam er pas in 1959 door het onderzoek van prof. Sahlin [1]. In zijn pro-

motieonderzoek onderzocht hij de invloed van de scheurvorming ter plaatse van de wand-vloeraansluiting op het draagvermogen van een ongewapende gemetselde wand. Hierbij ging hij uit van lineair-elastisch gedrag van het metselwerk en verwaarloosde hij de tweede-orde-effecten.

Theorie van Sahlin

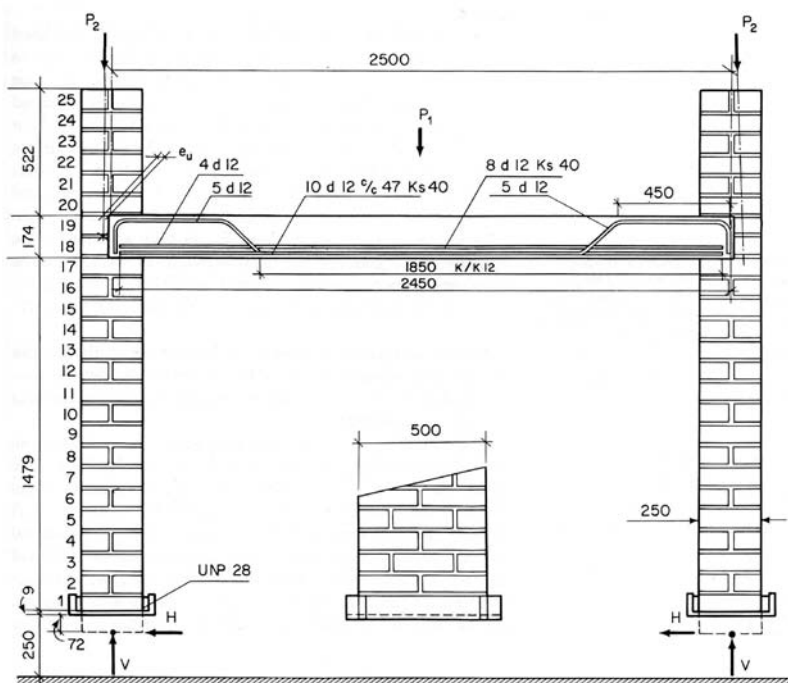
De theorie die Sahlin heeft ontwikkeld voor de bepaling van de momentreductie door de wand-vloerinteractie is geldig voor baksteen metselwerkwallen in combinatie met ter plaatse gestorte betonnen vloerplaten (fig. 1). Op het ogenblik dat de bekisting onder de vloerplaat wordt weggenomen zal de vloerplaat doorbuigen waardoor de uiteinden van de vloerplaat een rotatie ondergaan. Als de verbinding tussen de vloerplaat en de bovenzijde van de wand een starre knoop vormen, moet de rotatie van het vloereinde gelijk zijn aan de rotatie van de bovenzijde van de wand. In dit geval zal de wand de rotatie van het vloereinde gedeeltelijk verhinderen, waardoor een inklemmingsmoment ontstaat. De grootte van het inklemmingsmoment is afhankelijk van de stijfheden van de vloer en de wand. Voor een correcte berekening van de rotatie moet rekening worden gehouden met de invloed van scheurvorming in vloerplaat en metselwerkwand. Bij niet-starre knoopverbindingen zal de hoekverdraaiing van het vloereinde niet steeds gelijk zijn aan de rotatie van de wand zoals in figuur 2 is voorgesteld.

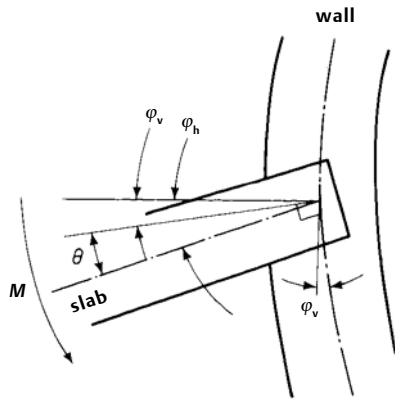
In zijn promotieonderzoek heeft Sahlin grafieken opgenomen die een snelle controleberekening mogelijk maken uitgaande van de differentiële knooprotatie. Aangezien er geen theoretische modellen bestaan voor de berekening van de differentiële knooprotatie, moet deze volgens Sahlin worden bepaald met experimenteel onderzoek.

Henry's knooppstijfheidsfactor

In Engeland heeft Henry [2] onderzoek verricht op proefstukken op ware grootte. Op basis van de resultaten van dit onderzoek heeft hij een momentreductiefactor afgeleid die hij de 'joint fixity factor' (knooppstijfheidsfactor) noemt. Deze factor is gedefinieerd als de verhouding van het reële inklemmingsmoment tot het theoretische inklemmingsmoment bij starre knoopverbinding:

1 | Experimenteel onderzoek op wand-vloeraansluiting door Sahlin [1]





$$\eta = \frac{M_{\text{eff}}}{M_{\text{cal}}} \quad (1)$$

De knoepstijfheidsfactor kan volgens Hendry worden benaderd met de volgende formule (fig. 3):

$$\eta = \frac{1}{0,44\alpha + 1,1} \quad (2)$$

met

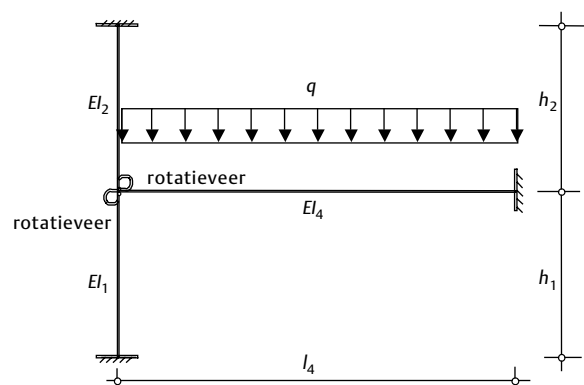
$$\alpha = \frac{h}{L} \cdot \frac{E_s I_s}{E_w I_w} \quad (3)$$

waarin

- α is de vloer-wand-stijfheidsverhouding;
- h is de hoogte van de wand;
- L is de lengte van de vloerplaat;
- $E_w I_w$ is de stijfheid van de wand;
- $E_s I_s$ is de stijfheid van de vloerplaat.

Experimenten van Lewicki

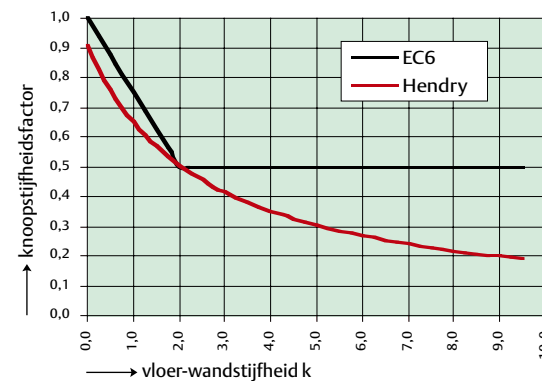
In Polen heeft prof. Lewicki [3] verschillende experimenten uitgevoerd om een relatie te bepalen tussen het inklemmingsmoment en de differentiële knoeprotatie bij verschillende waarden van de verticale belasting op de wand. Op basis van de resultaten van zijn onderzoek heeft hij een grafische methode ontwikkeld voor de bepaling van het effectief inklemmingsmoment (fig. 4). Tevens heeft hij vastgesteld



dat de momentreductie afhankelijk is van de grootte van de oplegging van de vloerplaat op de wand, van het type metselwerk en van de normaalkracht in de wand.

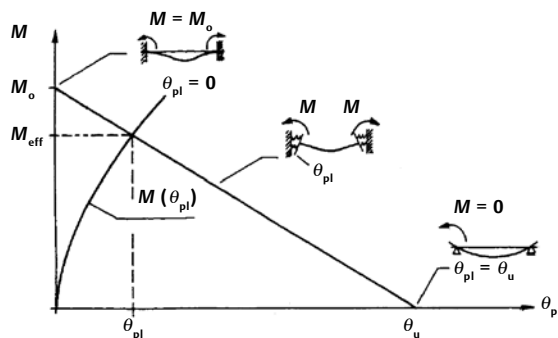
EEM-berekeningen door Baier

In Duitsland heeft Baier [4] in zijn promotieonderzoek een groot aantal eindige-elementenberekeningen doorgevoerd. Deze berekeningen werden met 'full-scale' experimenten gevalideerd. Verder heeft hij een theoretisch model ontwikkeld gebaseerd op het statisch schema dat in figuur 5 is voorgesteld. Met dit model kunnen de resultaten van de EEM-berekeningen goed worden benaderd. Voor praktische berekeningen is dit model vooralsnog niet toepasbaar omwille van het ontbreken van een eenvoudige methode voor de bepaling van de rotatieveerconstanten. In zijn proefschrift heeft Baier dan ook tabellen opgenomen waarmee de excentriciteit van de belas-



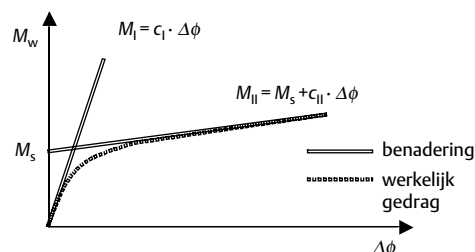
2 | Differentiële knoeprotatie

3 | Knoepstijfheidsfactor als functie van de vloer-wandstijfheidsverhouding volgens Hendry en EC6



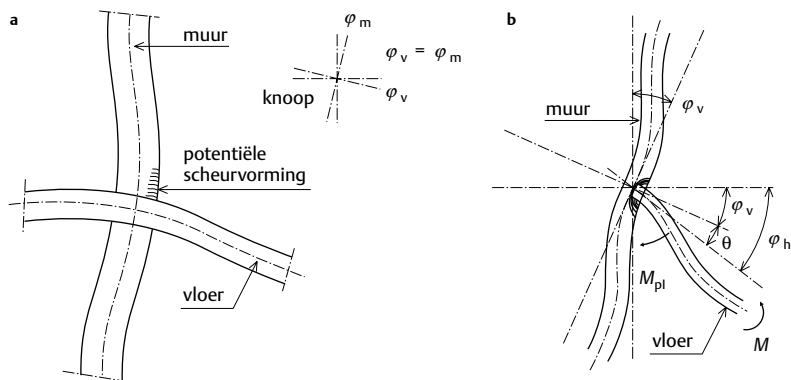
4 | Grafische methode voor het bepalen van het effectief inklemmingsmoment

5 | Theoretisch model van Baier voor de berekening van het effectief inklemmingsmodel



Wanddikte t [m]: 0,365 Spannweite l [m]: 6,0 Einspanngrad $n=4$
 Deckendikte d [m]: 0,20 E-Modul-Decke E_{Decke} [N/mm²]: 30000

		E [N/mm ²]																			
\	q	1000		2000		3000		4000		5000		6000		7000		8000		9000		10000	
		e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2
40	15	-0,5	13,8	-0,7	16,1	-0,4	16,7	-0,7	16,9	-0,4	17,1	-0,7	17,1	-0,4	17,1	-0,7	17,2	-0,4	17,2	-0,7	17,2
40	16	-0,5	14,1	-0,7	16,2	-0,4	16,8	-0,7	17,0	-0,4	17,1	-0,6	17,1	-0,4	17,2	-0,6	17,2	-0,4	17,2	-0,6	17,2
S ₁₀	5	-1,3	7,6	-1,5	10,5	-1,3	12,3	-1,6	13,5	-1,3	14,1	-1,6	14,7	-1,4	14,9	-1,6	15,2	-1,4	15,3	-1,6	15,5
S ₁₀	6	-1,2	8,3	-1,4	11,6	-1,1	13,4	-1,4	14,5	-1,1	15,0	-1,4	15,4	-1,1	15,6	-1,4	15,8	-1,1	15,9	-1,4	16,0
S ₁₀	7	-1,1	9,0	-1,2	12,6	-1,0	14,3	-1,2	15,1	-1,0	15,6	-1,2	15,9	-1,0	16,0	-1,2	16,2	-1,0	16,3	-1,2	16,3
S ₁₀	8	-1,0	9,6	-1,1	13,4	-0,9	14,9	-1,1	15,6	-0,9	15,9	-1,1	16,2	-0,8	16,3	-1,1	16,4	-0,8	16,5	-1,1	16,5
S ₁₀	9	-0,9	10,2	-1,0	14,0	-0,8	15,3	-1,0	15,9	-0,8	16,2	-1,0	16,4	-0,8	16,5	-1,0	16,6	-0,8	16,6	-1,0	16,7
S ₁₀	10	-0,8	10,8	-1,0	14,4	-0,7	15,6	-1,0	16,1	-0,7	16,4	-1,0	16,5	-0,7	16,6	-1,0	16,7	-0,7	16,8	-1,0	16,8
S ₁₀	11	-0,8	11,2	-0,9	14,8	-0,7	15,9	-0,9	16,2	-0,7	16,5	-0,9	16,7	-0,7	16,8	-0,9	16,9	-0,7	16,9	-0,9	16,9
S ₁₀	12	-0,7	11,8	-0,9	15,1	-0,7	16,1	-0,9	16,5	-0,6	16,6	-0,9	16,8	-0,6	16,8	-0,9	16,9	-0,6	16,9	-0,9	17,0
S ₁₀	13	-0,7	12,2	-0,8	15,4	-0,6	16,2	-0,8	16,6	-0,6	16,7	-0,8	16,8	-0,5	16,9	-0,8	17,0	-0,5	17,0	-0,8	17,0
S ₁₀	14	-0,7	12,6	-0,8	15,6	-0,6	16,3	-0,8	16,6	-0,5	16,8	-0,8	16,9	-0,5	17,0	-0,8	17,0	-0,5	17,1	-0,8	17,1
S ₁₀	15	-0,6	12,9	-0,8	15,7	-0,5	16,4	-0,8	16,7	-0,5	16,9	-0,8	17,0	-0,5	17,0	-0,8	17,1	-0,5	17,1	-0,7	17,1
S ₁₀	16	-0,6	13,2	-0,7	15,9	-0,5	16,5	-0,7	16,8	-0,5	16,9	-0,7	17,0	-0,5	17,1	-0,7	17,1	-0,4	17,1	-0,7	17,1
S ₁₀	5	-1,5	7,0	-1,6	9,8	-1,4	11,1	-1,7	12,3	-1,5	13,0	-1,8	13,7	-1,6	14,0	-1,9	14,4	-1,6	14,5	-1,9	14,8
60	6	-1,3	7,6	-1,5	10,5	-1,3	12,3	-1,6	13,5	-1,3	14,1	-1,6	14,7	-1,4	14,9	-1,6	15,2	-1,4	15,3	-1,6	15,5



6 | Ontwerptabellen van Baier voor de bepaling van de excentriciteiten in de metselwerkwallen

7 | Scheurvorming in wandvloeraansluiting (a) en Differentiële knooprota-tie volgens NBN B-24-301 (b)

8 | Opgelegde excentricitei-ten in NBN B24-301 (1980)

ting en dus ook het inklemmingsmoment aan de bovenzijde van de gemetselde wand kunnen worden afgeleid (fig. 6). Deze tabellen zijn gebaseerd op de eindige-elementenberekeningen.

Eindige differentiemethode

Een alternatief voor de eindige-elementenberekening is het toepassen van de eindige differentiemethode, waarbij wand en vloer worden opgedeeld in kleine moten. Op basis van de berekende normaalkracht en het buigend moment kan voor elke moot de corresponderende kromming worden bepaald uitgaande van het corresponderende $M-N$ - κ -diagram. Integratie van de krommingen levert de hoekverdraaiing aan de uiteinden van wand en vloer. Door een iteratieve berekening kan het tweede-orde-effect in rekening worden gebracht. Uit de gelijkstelling van de berekende knooprota-ties volgt het inklemmingsmoment. Deze methode wordt momenteel verder uitgewerkt aan de TU/e.

Nationale normen

Nederland

In de Nederlandse norm voor steenconstructies [5] is bepaald dat de berekening van de respons moet gebeuren volgens de niet-lineaire, de quasi-lineaire of de lineaire elasticiteitstheorie. In de norm zijn geen bepalingen opgenomen voor een momentreductie door vloer-wandinteractie. In de Nederlandse prak-

tijkrichtlijn NPR 6791 [6] zijn vereenvoudigde ontwerpregels opgenomen, waarbij eisen worden opgelegd aan de vloerslankheid. Tevens wordt de opneembare belasting van een wand beperkt in functie van de vloerslankheid in combinatie met de rotatiecapaciteit van de gemetselde wand bij fysisch en geometrisch niet-lineair gedrag. Hierbij is aangenomen dat de rotatie van het vloereinde niet groter mag zijn dan de rotatie van de bovenzijde van de wand. Bij deze methode is derhalve impliciet rekening gehouden met momentreductie door scheurvorming van het metselwerk.

België

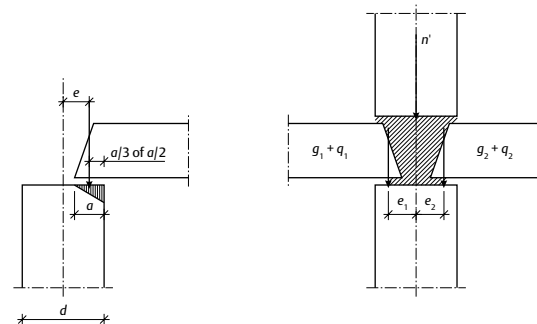
In de Belgische metselwerknorm NBN B 24-301 [7] is het fenomeen van scheurvorming en differentiële knooprota-tie grafisch geïllustreerd (fig. 7) doch er is geen methode gegeven voor de berekening van de momentreductie. De excentriciteiten mogen worden bepaald door de arbitraire aannames die in figuur 8 zijn weergegeven.

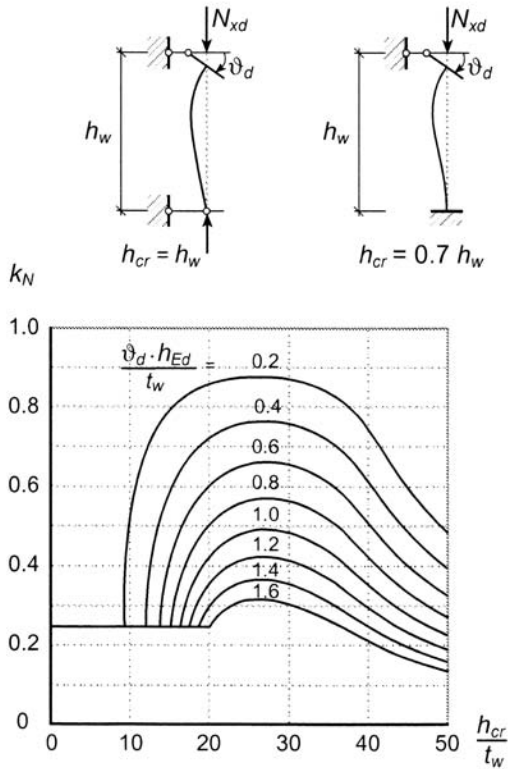
Duitsland

In de Duitse DIN 1053-1 [8] is wel expliciet vermeld dat ter plaatse van de wand-vloerknoop een momentreductie optreedt door scheurvorming. Deze momentreductie is arbitrair vastgesteld op 2/3 onafhankelijk van de stijfheden van vloeren en wanden.

Zwitserland

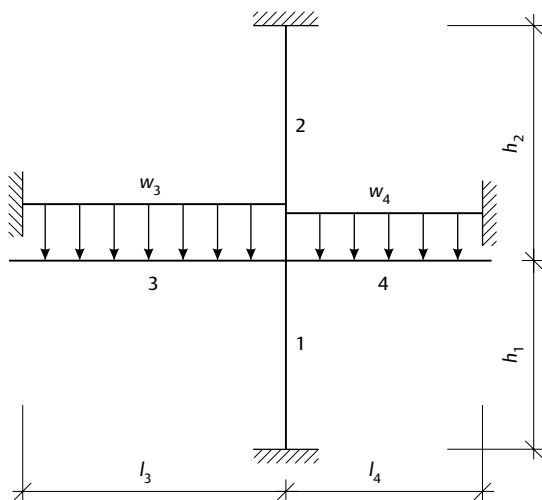
De Zwitserse SIA 77 metselwerknorm [9] is een vrij recente norm. De aanpak voor de berekening van de momentreductie door wand-vloerinteractie verschilt grondig van de andere Europese normen. Op basis van niet-lineaire berekeningen in het promotieonderzoek van Schwarz zijn ontwerpgrafieken (fig. 9) opgenomen, waaruit de factor k_N kan worden afgeleid. Deze factor is de reductiefactor voor de draagkracht van de wand, rekeninghoudend met de opgelegde rotatie aan de wandeinden en het tweede-orde-effect. Hierbij is aangenomen dat in elke situatie de rotatie van het vloereinde gelijk is aan de rotatie van de wand. Aangezien een differentiële knooprota-tie van vloer en wand niet in rekening is gebracht, neemt de draagkracht van de wand sterk af bij wandslankheden kleiner dan 20.





EC6 - methode

Volgens Eurocode 6 [10] mag een reductie van het inklemmingsmoment worden toegepast. In de informatieve annex C is hiervoor een vereenvoudigde methode opgenomen. Het buigend moment in de wand onder de vloerplaat kan als volgt worden berekend (fig. 10):



$$M_1 = \frac{\frac{n_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{h_1}}{\frac{n_1 \cdot E_1 \cdot I_1}{h_1} + \frac{n_2 \cdot E_2 \cdot I_2}{h_2} + \frac{n_3 \cdot E_3 \cdot I_3}{l_3} + \frac{n_4 \cdot E_4 \cdot I_4}{l_4}} \cdot \left[\frac{w_3 \cdot l_3^2}{4(n_3 - 1)} - \frac{w_4 \cdot l_4^2}{4(n_4 - 1)} \right] \quad (4)$$

waarin

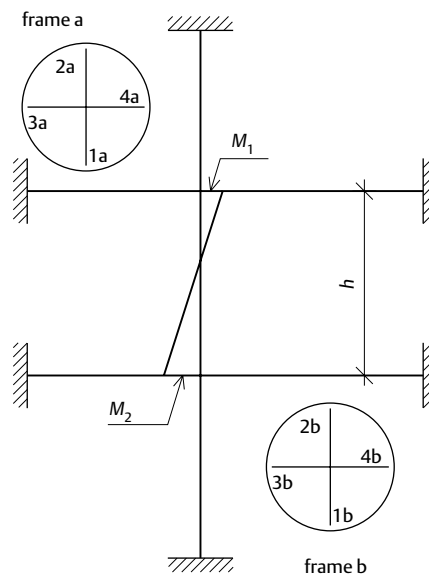
- n_1 is de stijfheidsfactor van de vloeren en wanden (gelijk aan 4 bij inklemming aan de uiteinden en 3 bij scharnierende uiteinden);
- h_i is de hoogte van wand i ;
- l_i is de overspanning van vloerplaat i ;
- $E_i I_i$ is de buigstijfheid van vloer of wand i ;
- w_i is de verdeelde belasting op vloer i .

De knoepstijfheidsfactor η kan worden bepaald met de volgende formule (fig. 3):

$$\eta = 1 - \frac{k}{4} \quad (5)$$

met

$$k = \frac{n_3 \frac{E_3 \cdot I_3}{l_3} + n_4 \frac{E_4 \cdot I_4}{l_4}}{n_1 \frac{E_1 \cdot I_1}{h_1} + n_2 \frac{E_2 \cdot I_2}{h_2}} \leq 2 \quad (6)$$

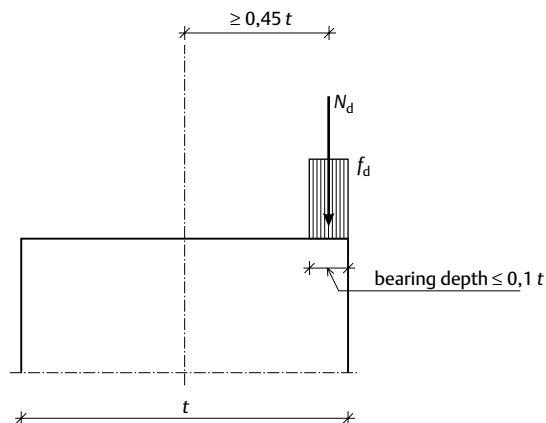


moment M_1 is found from frame a
and moment M_2 is found from frame b

9 | Ontwerpgrafiek voor opneembare normaalkracht bij opgelegde rotatie volgens Swiss code SIA 266

10 | Vereenvoudigde raamwerkberkening volgens EC6

11 | Excentriciteit volgens
het rechthoekig span-
ningsblok in EC6



Indien de aldus berekende excentriciteit groter is dan 0,45 keer de wanddikte, mag de excentriciteit in de wand worden bepaald overeenkomstig figuur 11:

$$e = \frac{1}{2} \left(t - \frac{N_d}{b f_d} \right) \quad (7)$$

Voor de controle van de draagkracht van de wand moet dan nog rekening worden gehouden met het tweede-orde-effect.

De ontwerpmethode in EC6 is tot op heden onvoldoende wetenschappelijk onderbouwd. Op verschillende plaatsen in Europa wordt momenteel onderzoek verricht om de geldigheid van de formules te verifiëren.

Conclusies

Alhoewel de momentreductie door scheurvorming en differentiële knooproductie aan de wand-vloeraan-sluiting meer dan een eeuw onderwerp is van onderzoek, is er tot op heden nog geen algemeen aanvaard rekenmodel ontwikkeld. De bestaande ontwerpmethoden zijn bovendien enkel van toepassing voor vloerplaten in ter plaatse gestort gewapend beton op traditionele metselwerkwanden. In de hedendaagse bouwpraktijk komen andere wand-vloercombinaties frequenter voor, zoals kanaalplaten opgelegd op lijmwerk met geperforeerde baksteenblokken. Voor dergelijke wand-vloercombinaties zijn nauwelijks proeven uitgevoerd. Meer experimenteel onderzoek is daarom noodzakelijk om wetenschappelijk onderbouwde ontwerpmethoden te ontwikkelen. Om het aantal proeven te beperken is het aangewezen een classificatie op te stellen van verschillende wand-vloercombinaties. Dit aspect zal in een volgend artikel uitgebreid aan bod komen.

Literatuur

1. Sahlin, S., Structural Interaction of Walls and Floor Slabs. Inst. för Byggnadsstatik KTH, Meddelande Nr. 33, Stockholm, 1959.

2. Hendry, A.W., The calculation of eccentricities in load bearing walls. The Brick Development Association, Engineering File Note, No 3.
3. Lewicki, B., R. Jarmontowicz en J. Kubica, Podstawy Projektowania Niezbrojonych Konstrukcji Murowych (Basis of Design of Unreinforced Masonry Structures). Wydawnictwa Instytutu Budowlanej, Warszawa, 2001.
4. Jager, W. en G. Baier, Der Wand-Decken-Knoten im Mauerwerksbau, Teil 2: Vorschlag für ein realistischer Berechnungsmodell auf Basis neuer Erkenntnisse. *Das Mauerwerk* 9 Heft 2, 2005.
5. NEN 6790, Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Steenconstructies – Basiseisen en bepalingsmethoden. NEN, Delft, april 2005.
6. NPR 6791, Steenconstructies, eenvoudige ontwerp-regels gebaseerd op NEN 6790. NEN, Delft, 1991.
7. BIN, NBN B24-301, Ontwerp en Berekening van Metselwerk. Brussel, 1980.
8. DIN 1053-1, Mauerwerk Teil 1: Berechnung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, 1996.
9. SIA 266, Masonry, Swiss Standard. Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), Zurich, 2003.
10. NEN-EN 1996-1-1, Eurocode 6, Ontwerp en berekening van steenconstructies. Deel 1-1: Algemene regels voor gebouwen. Regels voor gewapende en ongewapende steenconstructies. CEN, 2006.