

Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (13)

Opneembaar moment van gewapend metselwerk in Eurocode 6 gelimiteerd?

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

Bij het opstellen van de Europese voorschriften voor metselwerk is duidelijk gebleken hoe groot de verschillen zijn tussen de nationale regelgevingen. Voor gewapend metselwerk zijn er evenwel niet veel nationale normen. Aangezien in Groot-Brittannië dergelijke voorschriften wel bestaan, stond de 'British Standard' model voor wat in Eurocode 6 is opgenomen. Bij nader onderzoek blijkt dat deze voorschriften niet steeds up-to-date zijn, zodat hun bruikbaarheid beperkt is.



Tot op heden is de berekening van gewapend metselwerk (foto 1) in de Nederlandse normen stiefmoederlijk behandeld. Voor het ontwerp en de berekening van gewapend en voorgespannen metselwerk dient de constructeur zijn toevlucht te zoeken in CUR-rapport 98-4 [1]. Binnen afzienbare termijn zal hierin verandering komen. Op het ogenblik dat Eurocode 6 [2] definitief is goedgekeurd, kan beroep worden gedaan op deze Europese norm voor de berekening van constructie-elementen in gewapend en voorgespannen metselwerk.

Inzichtelijk?

Maar laat ons geen ijdele hoop opwekken. De regels die in Eurocode 6 zijn opgenomen voor ge-

wapend en voorgespannen metselwerk, zijn heel beperkt. Ten gevolge van ettelijke discussies over diverse onderdelen zijn de bepalingen dusdanig uitgedaald, dat Eurocode 6 zonder enige toelichting niet echt bruikbaar is. Voor de praktijk zal het dan ook noodzakelijk zijn aan de constructeurs een handboek ter beschikking te stellen waarin de principes van Eurocode 6 concreet worden uitgewerkt. Om een dergelijk handboek te kunnen maken, is het nuttig inzicht te hebben in de uitgangspunten die ten grondslag liggen aan de formules en voorschriften. In dit artikel zal worden nagegaan wat de achtergrond is van de formule die een beperking oplegt aan het maximaal opneembaar moment

van een gewapende rechthoekige doorsnede. Volgens Eurocode 6 dient dit opneembaar moment M_{Rd} te worden gelimiteerd tot:

$$M_{Rd} \leq \beta f_d b d^2 \quad (1)$$

waarin:

- β is een coëfficiënt afhankelijk van het type steen;
- f_d is de rekenwaarde van de druksterkte van het metselwerk;
- b is de breedte van de rechthoekige doorsnede (fig. 4);
- d is de nuttige hoogte van de doorsnede (fig. 4).

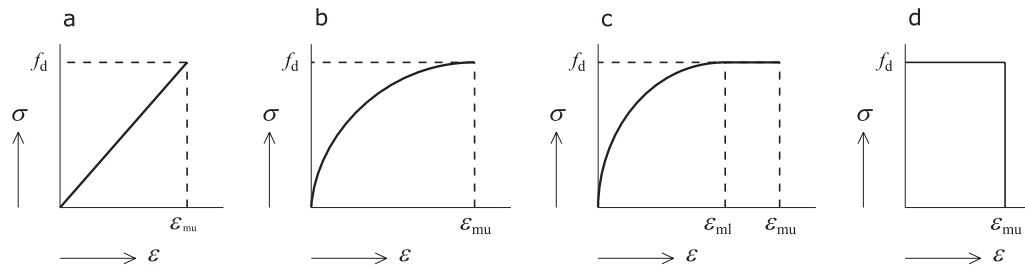
Zoals verder zal blijken kan er geen twijfel zijn over de vorm van formule (1). Alleen de waarde van β is discutabel.

Hypothesen

Om te kunnen begrijpen waarover de discussie gaat, is het nuttig even terug te grijpen naar de basisprincipes van de berekening van gewapend metselwerk. Evenals bij gewapend beton wordt uitgegaan van de volgende hypothesen:

- vlakke doorsneden blijven vlak;
- de wapening ondergaat dezelfde vervorming als het omringende metselwerk;
- de treksterkte van het metselwerk wordt verwaarloosd;
- het σ - ϵ -diagram van de wapening is bilineair conform Eurocode 2 (gewapend beton);
- het σ - ϵ -diagram van het metselwerk kan lineair, parabolisch, parabool-rechthoekig of rechthoekig zijn (fig. 2).

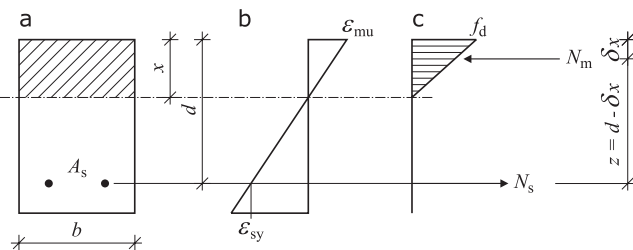
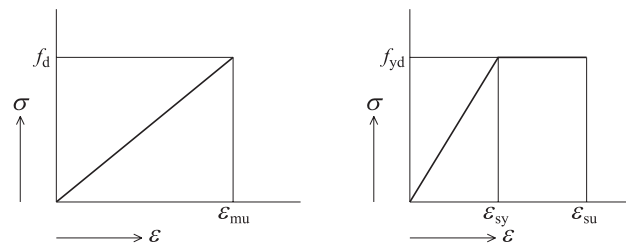
1 | Klassieke toepassing van geprefabriceerde wapening bij lateien in gewapend metselwerk



2 | Verschillende σ - ϵ -diagrammen die bij de berekening van metselwerk kunnen worden gebruikt volgens Eurocode 6:

- a: lineair;
- b: parabolisch;
- c: parabool-rechthoekig;
- d: rechthoekig

Wanneer welk diagram moet worden toegepast is niet ondubbelzinnig bepaald. Wel is aangegeven dat voor stenen die behoren tot groep 1 (stenen met minder dan 25% holten) de maximale stuik ϵ_{mu} niet groter mag zijn dan $3,5\text{‰}$, terwijl voor de andere steentypen de maximale stuik



3 | Spanning- ϵ -diagrammen bij lineair gedrag van metselwerk

4 | Spannings- en vervormingstoestand bij lineair gedrag

- a. doorsnede;
- b. vervormingen;
- c. spanningen

beperkt is tot 2‰ . Aangenomen mag worden dat voor stenen van groepen 2, 3 en 4 (meer dan 25% holten) het materiaalgedrag goed correspondeert met een lineair σ - ϵ -diagram, terwijl bij stenen van groep 1 de andere diagrammen het best de realiteit benaderen. Het is nuttig te vermelden dat de meeste formules die in Eurocode 6 zijn vermeld, zijn gebaseerd op het rechthoekig σ - ϵ -diagram.

Lineair gedrag

Bij lineair gedrag van het metselwerk en bilineair gedrag van de wapening (fig. 3) wordt het maximaal opneembaar moment bereikt als de stuik in de wapening

gelijk is aan de maximaal toelaatbare stuik ϵ_{mu} en de rek in de wapening gelijk is aan de vloeirek ϵ_{sy} (fig. 4). Omwille van de vereiste ductiliteit wordt immers geëist dat bij bezwijken de wapening moet vloeien.

Uitgaande van deze vervormingstoestand kan door middel van de evenwichtsvergelijkingen, de compatibiliteitsvergelijkingen en de constitutieve relaties het opneembaar moment worden berekend.

Translatie-evenwicht:

$$N_m = \alpha \cdot b \cdot x \cdot f_d$$

$$N_s = A_s \cdot f_{yd}$$

waarin:

N_m is de spanningsresultante van de drukspanningen in de metselwerkdoorsnede;

$\alpha = N_m / b \cdot x \cdot f_d$;
 x is de hoogte van de gedrukte doorsnede (fig. 4);

N_s is de spanningsresultante van de trekspanningen in de wapening;

A_s is het oppervlak van de doorsnede van de wapening;

f_{yd} is de rekenwaarde van de vloeigrens van de wapening.

waaruit volgt dat:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha \cdot b \cdot f_d} = \frac{\omega \cdot d}{\alpha} \tag{2}$$

waarin:

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_d}$$

(mechanisch wapeningspercentage)

Rotatie-evenwicht:

$$M_u = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta \cdot x) = \omega \cdot b \cdot d^2 \cdot f_d \cdot \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \cdot \omega\right)$$

waarin:

M_u is het maximaal opneembaar moment;

$\delta \cdot x$ is de afstand tussen N_m en de bovenste vezel van de doorsnede (fig. 4).

waaruit volgt dat:

$$\beta = \omega \cdot \left(1 - \frac{\delta}{\alpha} \cdot \omega\right)$$

De waarden van α en δ zijn afhankelijk van het type σ - ϵ -diagram dat van toepassing is; het maximaal mechanisch wapeningspercentage ω_{max} wordt bepaald door de eis dat de wapening moet vloeien in de bezwijktoestand.

Bij lineair gedrag is $\alpha = 1/2$ en $\delta = 1/3$, terwijl het maximaal wapeningspercentage kan worden afgeleid uit de compatibiliteitsvoorwaarde:

$$\frac{\epsilon_{mu}}{x} = \frac{\epsilon_{mu} + \epsilon_{sy}}{d}$$

Rekening houdend met (2) kan hieruit worden afgeleid dat:

$$\omega_{max} = \frac{\alpha \cdot \epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{sy}}$$

en

$$\beta = \frac{\alpha \cdot \epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{sy}} \cdot \left(1 - \frac{\delta \cdot \epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{sy}}\right) \tag{3}$$

Het is duidelijk dat de waarde van β afhankelijk is van het gebruikte σ - ϵ -diagram en de vloeigrens van de wapening. Voor gewapend metselwerk met stenen van groepen 2, 3 of 4 zijn in tabel 1 de β -waarden berekend voor verschillende staalkwaliteiten, rekening houdend met een E-modulus van het staal van 200 000 N/mm².

Parabolisch en parabool-rechthoekig diagram

Een analoge berekening kan worden uitgevoerd voor het parabool-rechthoekig diagram (fig. 5), wat resulteert in dezelfde formule

(3), maar waarbij α en δ respectievelijk gelijk zijn aan:

$$\alpha = \frac{\epsilon_{mu} - \frac{1}{3}\epsilon_{ml}}{\epsilon_{mu}} \text{ en}$$

$$\delta = \frac{6\epsilon_{mu}^2 - 4\epsilon_{mu}\epsilon_{ml} + \epsilon_{ml}^2}{12\alpha\epsilon_{mu}^2}$$

waarin:

ϵ_{ml} is de elasticiteitslimiet van het metselwerk (fig. 2);

ϵ_{mu} is de uiterste stuijk in het metselwerk (fig. 2).

Voor gewapend metselwerk met stenen van groep 1 zijn ϵ_{ml} en ϵ_{mu} respectievelijk gelijk aan 0,002 en 0,0035 wat resulteert in de volgende waarden van α en δ :

$$\alpha = 0,8095;$$

$$\delta = 0,4160.$$

Het parabolisch diagram is een bijzonder geval van het parabol-rechthoekig diagram waarbij $\epsilon_{ml} = \epsilon_{mu}$ ($\alpha = \frac{2}{3}$ en $\delta = \frac{3}{8}$).

Aangezien het rechthoekig σ - ϵ -diagram (fig. 6) is afgestemd op het parabol-rechthoekig diagram, is het logisch dat in dit geval nagenoeg dezelfde resultaten worden gevonden als bij het parabol-rechthoekig diagram ($\alpha = 0,8$ en $\delta = 0,4$).

Het invullen van deze gegevens in formule (3) resulteert in de β -waarden die in tabel 2 zijn weergegeven.

Evaluatie

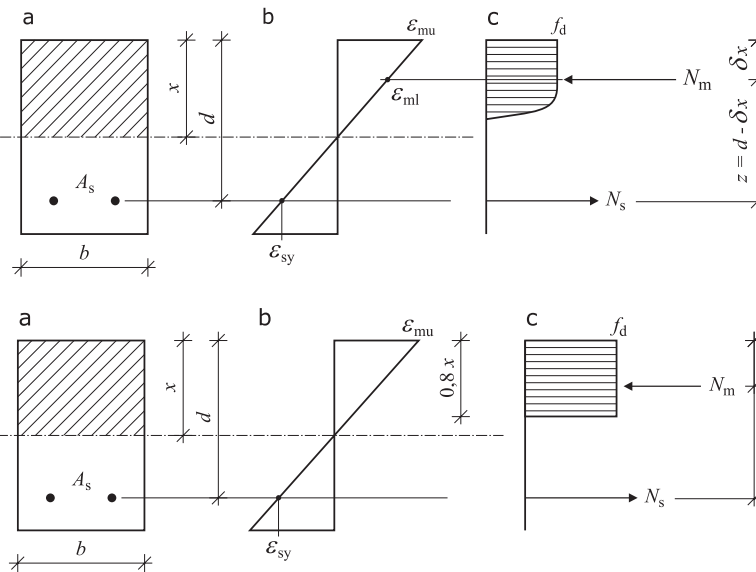
Uit de theoretische beschouwingen volgt dat het niet mogelijk is één enkele waarde voor de coëfficiënt β vast te stellen. Niet alleen het gekozen σ - ϵ -diagram, maar ook de kwaliteit van de wapening beïnvloedt de waarde van β . In Eurocode 6 is alleen de invloed van het materiaalgedrag van het metselwerk in ogenschouw genomen en worden waarden van β voorgesteld onafhankelijk van de gebruikte staalkwaliteit. Voor metselwerk met stenen van groep 1, met uit-

Tabel 1 | β -waarden bij lineair gedrag van het metselwerk voor verschillende staalkwaliteiten

	$f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$	$f_{yd} = 348 \text{ N/mm}^2$	$f_{yd} = 191 \text{ N/mm}^2$
lineair gedrag	0,2450	0,2197	0,2899

Tabel 2 | β -waarden bij parabolisch, parabool-rechthoekig en rechthoekig gedrag van metselwerk voor verschillende staalkwaliteiten

	$f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$	$f_{yd} = 348 \text{ N/mm}^2$	$f_{yd} = 191 \text{ N/mm}^2$
parabolisch diagram	0,3161	0,3338	0,3695
parabool-rechthoekig diagram	0,3712	0,3905	0,4281
rechthoekig diagram	0,3717	0,3916	0,4310



5 | Spannings- en vervormingstoestand bij parabool-rechthoekig diagram
a. doorsnede;
b. vervormingen;
c. spanningen

6 | Spannings- en vervormingstoestand bij rechthoekig diagram
a. doorsnede;
b. vervormingen;
c. spanningen

zondering van de stenen van lichtgewicht beton, is β gelijk aan 0,4. In de andere gevallen dient voor β een waarde van 0,3 te worden aangenomen. Op basis van de waarden in de tabellen 1 en 2 kan men hieruit besluiten dat de β -waarden in Eurocode 6 gebaseerd zijn op Britse regelgeving die dateert vanuit de tijd waarin alleen lage staalkwaliteiten werden toegepast. Voor de hedendaagse wapening zal de opgelegde beperking van het opneembaar moment nauwelijks enige betekenis hebben.

Conclusie

Binnen afzienbare tijd zal het mogelijk zijn gewapend metselwerk te ontwerpen en te dimensioneren overeenkomstig de voorschriften van Eurocode 6. De beperking die in deze norm wordt opgelegd aan het maximaal opneembaar moment zal in werkelijkheid nooit een beperking blijken te zijn, aangezien tegenwoordig alleen nog wapeningsstaal van hoge kwaliteit

wordt toegepast. Om de correcte waarde van het maximaal opneembaar moment te kunnen berekenen, zal de constructeur gebruik moeten maken van het juiste materiaalmodel voor het metselwerk en rekening moeten houden met de reële vloeigrens van de gebruikte wapening. De in dit artikel opgenomen formules kunnen hierbij een hulp zijn. ■

Literatuur

1. CUR-rapport 98-4, Gewapend en voorgespannen metselwerk.
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., A.Th. Vermeltfoort en G. Bertram, Collegedictaat Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies, augustus 2000.