

Met dank aan ir. Thijs van den Bosch
(voorheen werkstudent Witteveen+Bos,
momenteel Dura Vermeer)

RUBRIEK NORMBESTEF

Dit is het eerste artikel in *Cement*-rubriek Normbesef. In deze rubriek kunnen lezers onduidelijkheden in de constructeurspraktijk, bijvoorbeeld in de regelgeving, aankaarten.

Let wel: hoewel de artikelen worden beoordeeld door experts, betreft het de persoonlijke interpretatie van de auteur. Aan de inhoud kunnen dan ook geen rechten worden ontleend. De artikelen geven ook niet altijd een antwoord of oplossing. Het doel van de rubriek is de sector te informeren over onduidelijkheden in de norm en daarmee een discussie op gang te brengen. Dit kan leerzaam zijn, zo meent de redactie van *Cement*. Uiteraard voor de normcommissie, maar ook voor collega-constructeurs. Het uiteindelijke doel van de rubriek is meer duidelijkheid voor iedereen en in sommige gevallen misschien zelfs betere normen.

Een uitgebreidere toelichting op de rubriek staat in het artikel 'Nieuwe rubriek over normen: Normbesef' voorafgaand aan dit artikel.

Hebt u zelf ook een onderwerp voor deze rubriek, neem dan contact op met Jacques Linssen, j.linssen@aeneas.nl. Publicatie kan eventueel anoniem.

PONS- BEREKENING NADER BESCHOUWD

Bij het berekenen van de schuifspanning bij pons speelt de schuifspanningsvergrotingsfactor β een grote rol. Er bestaat de nodige onduidelijkheid over hoe deze factor bij rand- en hoekkolommen moet worden berekend, wat kan leiden tot onjuiste uitkomsten. In dit artikel wordt dit nader toegelicht en wordt een consistente methode geboden voor de bepaling van de factor β .

In EN 1992-1-1 art. 6.4 wordt beschreven hoe het bezwijkmechanisme pons moet worden getoetst. Gesteld wordt dat, wanneer de oplegreactie excentrisch is ten opzichte van de controle-omtrek, de maximale schuifspanning bepaald moet worden volgens formule 6.38:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_t d}$$

Als gevolg van de excentrische ponsbelasting is de schuifspanning v_{Ed} niet uniform verdeeld over de controle-omtrek, maar krijgt deze een momentcomponent (fig. 1). Het effect hiervan wordt in rekening gebracht door middel van de schuifspanningsvergrotingsfactor β , te bepalen volgens formule 6.39:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{u_t}{W_t}$$

auteurs



IR. PIETER SCHOUTENS

Witteveen+Bos



IR. COEN HULSEBOSCH

Witteveen+Bos

Tabel 1 Standaardgevallen ponstoets volgens Eurocode

formulenummer	formule	toepassingsgebied
6.42	$\beta = 1 + 0,6\pi \frac{e}{D + 4d}$	cirkelvormige middenkolom
6.43	$\beta = 1 + 1,8 \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_z}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2}$	rechthoekige middenkolom met belasting excentrisch ten opzichte van beide assen
6.44	$\beta = \frac{U_1}{U_r} + k \frac{U_1}{W_1} e_{par}$	randkolom waarbij de excentriciteit loodrecht op de plaatrand naar binnen is gericht en evt. een moment om een as haaks op de plaatrand. Hierbij mag k zijn bepaald volgens tabel 6.1 waarbij c_1 / c_2 is vervangen door $c_1 / 2c_2$
6.46	$\beta = \frac{U_1}{U_r}$	hoekkolom waarbij de excentriciteit naar het binnengebied van de plaat is gericht
figuur 6.21N	$\beta = 1,15$ (middenkolom)	voor constructies waarvan de zijdelingse stabiliteit niet afhankelijk is van het door de platen en kolommen gevormde raamwerk en waarvan de lengte van de opeenvolgende overspanningen niet meer dan 25% verschillen
	$\beta = 1,40$ (randkolom)	
	$\beta = 1,50$ (hoekkolom)	

Tabel 2 Tabel 6.1 uit EN 1992-1-1 met waarden voor k van rechthoekige belaste gebieden

c_1 / c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

Het handmatig bepalen van β blijkt in de praktijk vaak lastig en erg bewerkelijk. De Eurocode geeft daarom voor enkele standaardgevallen vereenvoudigde bepalingsmethodes voor β (zie hierna). De standaardgevallen zijn helaas zeer beperkt in hun toepassing en geven soms twijfelachtige resultaten. Vanwege hun eenvoud wordt er echter regelmatig ten onrechte op teruggerepen, met potentieel onveilige ontwerpen tot gevolg.

Standaardgevallen volgens de Eurocode

Voor enkele standaardgevallen geeft de Eurocode een aantal bepalingsmethodes voor de β -factor, die zijn samengevat in tabel 1. De waarden voor k uit formule 6.44 kunnen bepaald worden volgens EN 1992-1-1 tabel 6.1 (tabel 2 in dit artikel).

Beperkingen volgens de Eurocode

Het is interessant te weten welke situaties niet voldoen aan de standaardgevallen uit de Eurocode en waarbij β dus met formule 6.39 moet worden bepaald:

- controle-omtrekken op een afstand kleiner dan $2d$ (zoals bedoeld in EN 1992-1-1 art. 6.4.2 (2) en 6.4.4 (2));
- controle-omtrekken met invloed van een naburige sparing in de plaat (zoals bedoeld in EN 1992-1-1 art. 6.4.2 (3));
- rand- of hoekkolommen met een naar buiten gerichte excentriciteit;
- rand- of hoekkolommen op enige afstand vanaf de plaatrand;

- in alle voorgenoemde situaties waarbij bovendien figuur 6.21N niet mag worden toegepast.

De vraag of de excentriciteit naar binnen of naar buiten gericht is, is discutabel. Artikel 6.4.3 (4) omschrijft dit als 'een moment om een as evenwijdig aan de plaatrand' dat naar binnen gericht is. Op zichzelf is dit een onbeduidende definitie: voor elke ponsbelasting is er een as evenwijdig aan de plaatrand denkbaar ten opzichte waarvan de ponsbelasting een naar binnen gerichte excentriciteit heeft.

De excentriciteit is in formules 6.42 en 6.43 gedefinieerd als $e = M_{Ed} / V_{Ed}$. In de praktijk wordt dit veelal geïnterpreteerd als de excentriciteit die volgt uit het moment en de normaalkracht in de kolomkop. Zodoende zou men kunnen redeneren dat de excentriciteit die volgt uit de krachten in de kolomkop bepalend is of het moment naar binnen of naar buiten gericht is. De excentriciteit moet echter worden beschouwd ten opzichte van het *zwaartepunt van de controle-omtrek*, zoals genoemd in EN 1992-1-1 art. 6.4.3(3). De interpretatiewijze van de excentriciteit e is verduidelijkt in de zinsnede toegevoegd in [C1] aan art. 6.4.3 (4):

Als de excentriciteit loodrecht op de plaatrand niet naar binnen is gericht, is vergelijking (6.39) van toepassing. Bij het berekenen van W_1 behoort de excentriciteit e te zijn gemeten vanuit de zwaartepuntas van de controle-omtrek. →

Dit moet worden gelezen in combinatie met de definitie van e onder formule 6.40:

e is de afstand d_l tot de as waarrond het moment M_{Ed} aangrijpt.

Bedoeld wordt dus dat het moment M_{Ed} rond de zwaartepuntas van de controle-omtrek moet aangrijpen. Bij een rand-/hoekkolom ligt het zwaartepunt van de controle-omtrek verschoven ten opzichte van de as van de kolomkop. Het optredende moment in de kolomkop moet hiervoor dus worden gecorrigeerd: $M_{Ed} = M_{Ed,col} - V_{Ed} \cdot y(z)_0$, waarbij de afstand y_0 respectievelijk z_0 de afstand is tussen het hart van de kolomkop en het zwaartepunt van de controle-omtrek in y - en z -richting.

Voor rand- en hoekkolommen is het zwaartepunt van de controle-omtrek vrijwel altijd naar binnen gelegen ten opzichte van hart kolom. Een zeer belangrijke

implicatie hiervan is dat een ponskracht, met een geringe naar binnen gerichte excentriciteit ten opzichte van de kolomkop, ten opzichte van het zwaartepunt van de controle-omtrek juist naar buiten gericht kan zijn. Een verkeerde interpretatie van de excentriciteit leidt zo tot ongeoorloofde toepassing van formules 6.44/6.46.

Indien de kolom bovendien dicht op de plaatrand staat is de afstand tussen hart kolom en zwaartelijns controle-omtrek vrij groot. Als het moment op de kolomkop klein is (of naar buiten gericht), leidt dit tot aanzienlijk ongunstiger β -factoren dan de benaderde waarden gegeven in figuur 6.21N en formules 6.44/6.46.

Op basis van het voorgaande mag duidelijk zijn dat de methode zoals beschreven in EN 1992-1-1 art. 6.4.3 in de praktijk niet altijd juist geïnterpreteerd en toegepast wordt. Een eenduidige methode is daarom noodzakelijk.

Ponstoetsing nader beschouwd

Om te komen tot een uniforme en eenduidige bepalingswijze van de schuifspanningsvergrotingsfactor β wordt voorgesteld de volgende methodiek te hanteren:

1. Bepaal de lengte van de controle-omtrek u_1 conform EN 1992-1-1 art. 6.4.2;

2. Bepaal het statisch moment S_y resp. S_z van de controle-omtrek ten opzichte van een referentiepunt (voor rand- of hoekkolommen bij voorkeur de plaatrand):

$$S_y = \sum L_i y_i \quad S_z = \sum L_i z_i$$

L_i is de lengte van segment i langs de perimeter; y_i ; z_i is de afstand van zwaartepunt segment i tot referentiepunt in y - en z -richting;

3. Bepaal de afstand van hart kolom/lastvlak tot het zwaartepunt van de controle-omtrek:

$$y_0 = S_y / u_1 - a_y \quad z_0 = S_z / u_1 - a_z$$

a_y ; a_z is de afstand van hart kolom tot referentiepunt in y - en z -richting;

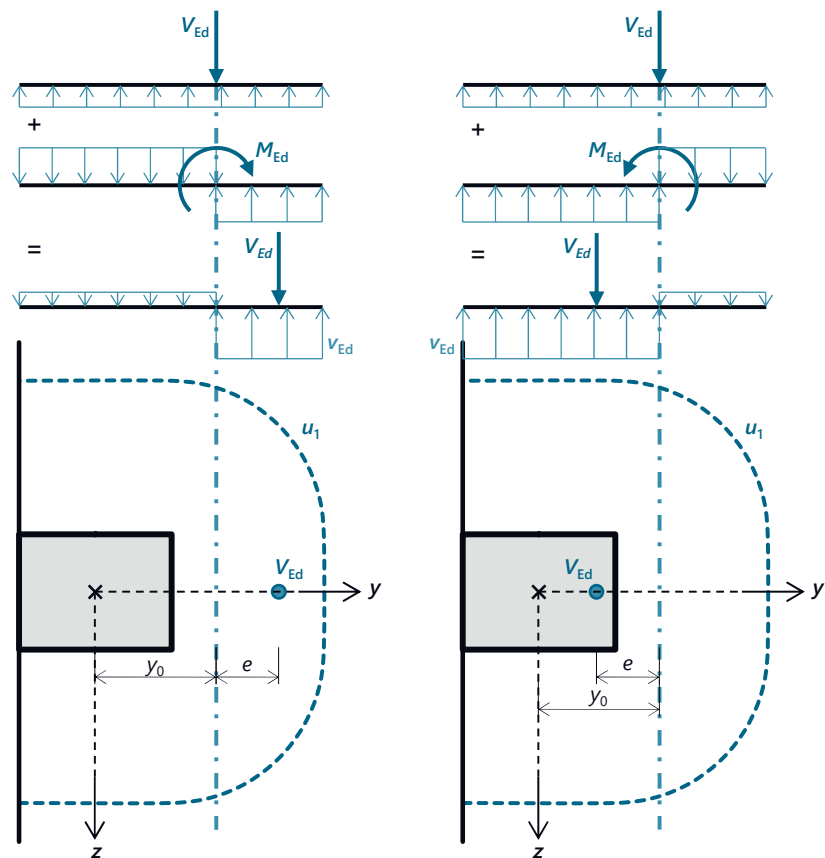
4. Bepaal het effectieve moment in het zwaartepunt van de controle-omtrek:

$$M_{Ed,y} = M_{Ed,y,col} - V_{Ed} y_0 \quad M_{Ed,z} = M_{Ed,z,col} - V_{Ed} z_0$$

5. Bepaal het plastische weerstandsmoment van de controle-omtrek ten opzichte van het zwaartepunt van de controle-omtrek conform formule 6.40. Deze is te herschrijven als:

$$W_{1,y} = \sum L_i |e_{y,i}| \quad W_{1,z} = \sum L_i |e_{z,i}|$$

fig. 1 Bepaling excentriciteit e waarbij de resultante V_{Ed} naar binnen is gericht t.o.v. kolom, maar naar buiten (links) of naar binnen (rechts) is gericht t.o.v. zwaartelijns controle-omtrek, bron: [1] fig. 2.2.4



L_i is de lengte van segment i langs de controle-omtrek;

$e_{y_i} ; e_{z_i}$ is de afstand van zwaartepunt segment i tot het de zwaartelij van de controle-omtrek in y - respectievelijk z -richting;

6. Bepaal de schuifspanningsvergrotingsfactor β , waarbij gebruik wordt gemaakt van de veralgemeende formule NA.6.39.1 zoals ook wordt gehanteerd in DIN-EN 1992-1-1/NA:

$$\beta = 1 + \sqrt{\left(k_y \frac{M_{Ed,y}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,y}}\right)^2 + \left(k_z \frac{M_{Ed,z}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,z}}\right)^2}$$

Bij deze methode gelden de volgende kanttekeningen:

- Voor ronde of rechthoekige middenkolommen zonder invloed van sparingen (als bedoeld in art. 6.4.2 (3)) geldt dat het zwaartepunt van de controleperimeter samen valt met het hart van de kolom. Stap 2 t/m 4 kunnen in dit geval achterwege blijven ($y_0 = z_0 = 0$).
- Voor ronde randkolommen of rechthoekige randkolommen met ribbe parallel aan plaatrand, zonder invloed van sparingen, geldt dat de zwaartelij van de controleomtrek haaks op de plaatrand door het hart van de kolom gaat ($z_0 = 0$ indien de plaatrand parallel aan de z -as ligt).
- De veralgemeende formule 6.39 geeft de mogelijkheid om voor situaties met momenten in twee orthogonale richtingen de β -factor te bepalen. Formules 6.39, 6.42 en 6.43 worden bovendien door deze formule afgedekt, waarmee deze niet strijdig is met de Eurocode.
- Voor ronde kolommen geldt $k_y = k_z = 0,6$ voor $c_1 = c_2$. Dit overeenkomstig formule 6.42, welke met bovenstaande methodiek is af te leiden voor $k = 0,6$.
- Formules 6.44 en 6.46 worden niet toegepast.

Rekenvoorbeeld

Ter illustratie van de bepalingswijze waarin de methodiek uit de Eurocode tekort schiet, wordt een rekenvoorbeeld van een hoekkolom gegeven. Hiervoor worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

Rekenwaarde ponskracht:	$V_{Ed} = 200 \text{ kN}$
Moment y -richting:	$M_{Ed,col,y} = 40 \text{ kNm}$
Moment z -richting:	$M_{Ed,col,z} = 50 \text{ kNm}$
Plaatdikte:	$h = 400 \text{ mm}$
Gewogen effectieve plaatdikte:	$d = 350 \text{ mm}$

Overige geometrie is gegeven in figuur 2.

Aangezien de resultante van de ponskracht V_{Ed} naar binnen is gelegen ten opzichte van hart kolom, zou geredeneerd kunnen worden dat de excentriciteit naar binnen gericht is. In dat geval zou geredeneerd kunnen worden dat de β -factor volgens EN 1992-1-1 art. 6.4.3 (5) en formule 6.46 bepaald mag worden. Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} u_1 &= c_1 + c_2 + \pi d = 300 + 400 + 350\pi = 1800 \text{ mm} \\ u_{1*} &= \frac{1}{2}c_1 + \frac{1}{2}c_2 + \pi d = 150 + 200 + 350\pi = 1450 \text{ mm} \\ \beta &= u_1 / u_{1*} = 1800 / 1450 = 1,24 \end{aligned}$$

Uit de methodiek in dit artikel volgt echter:

1. Bepaal u_1

$$u_1 = 1800 \text{ mm}$$

2. Bepaal S_y en S_z

Genomen ten opzichte van plaatrand, met positieve z -as parallel aan plaatrand links, positieve y -as parallel aan plaatrand boven:

$$S_y = 1.264.867 \text{ mm}^2$$

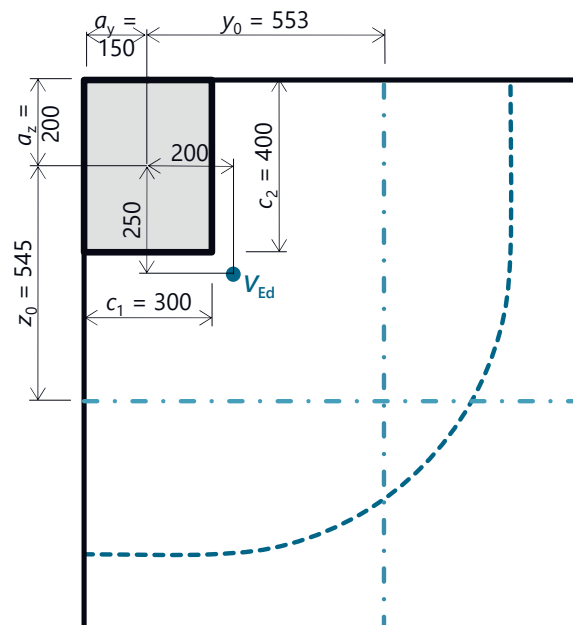
$$S_z = 1.339.823 \text{ mm}^2$$

3. Bepaal y_0 en z_0

$$y_0 = S_y / u_1 - a_y = 1.264.867 / 1800 - 150 = 553 \text{ mm}$$

$$z_0 = S_z / u_1 - a_z = 1.339.823 / 1800 - 200 = 545 \text{ mm}$$

fig. 2 Geometrie voorbeeldberekening hoekkolom [mm]



4. Bepaal $M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$

$$M_{Ed,y} = M_{Ed,y,col} - V_{Ed} y_0 = 40 - 200 \cdot 0,553 = -70,6 \text{ kNm}$$
$$M_{Ed,z} = M_{Ed,z,col} - V_{Ed} z_0 = 50 - 200 \cdot 0,545 = -60,0 \text{ kNm}$$

Hieruit volgt een negatief moment. De excentriciteit is dus naar buiten gericht!

5. Bepaal $W_{1,y}$ en $W_{1,z}$

$$W_{1,y} = 499.042 \text{ mm}^2$$
$$W_{1,z} = 556.916 \text{ mm}^2$$

6. Bepaal β

$$c_1 / c_2 = 300 / 400 = 0,75 \rightarrow k_y = 0,53 \quad (\text{tabel 6.1})$$
$$c_2 / c_1 = 400 / 300 = 1,33 \rightarrow k_s = 0,63 \quad (\text{tabel 6.1})$$

$$\beta = 1 + \sqrt{\left(k_y \frac{M_{Ed,y} u_1}{V_{Ed} W_{1,y}} \right)^2 + \left(k_s \frac{M_{Ed,z} u_1}{V_{Ed} W_{1,z}} \right)^2}$$

$$\beta = 1 + \sqrt{\left(0,53 \frac{-70,6 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^3} \frac{1800}{499.042} \right)^2 + \left(0,63 \frac{-60,0 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^3} \frac{1800}{556.916} \right)^2}$$

$$\beta = 1,90$$

Geconstateerd wordt niet alleen dat formule 6.46 in deze situatie niet toegepast mag worden, formule 6.46 geeft in dit geval ook een zware onderschatting van de β -factor. Ook de waarde uit figuur 6.21N, $\beta = 1,50$ voor een hoekkolom, is in dit geval te optimistisch.

Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze beschouwing over het bezwijkmechanisme pons worden de volgende aanbevelingen gedaan aan constructeurs:

- De methode beschreven in dit artikel is bewerkelijk voor individuele toetsingen, maar laat zich goed automatiseren. Maak hier gebruik van.
- Bedenk dat, om te bepalen of formules 6.44 en 6.46 toegepast mogen worden, stap 1 t/m 4 altijd doorlopen moeten worden.
- Maak daarom, tenzij voldoende onderbouwd, geen gebruik van EN 1992-1-1 formules 6.44, 6.46 of figuur 6.21N.
- Maak bij twee-assige buiging voor de bepaling van β gebruik van de veralgemeende formule NA.6.39.1 zoals gehanteerd in DIN-EN 1992-1-1/NA.
- In het document 'Durchstanznachweis nach EC2' van Prof. Dr.-Ing. Rudolf Baumgart [1] zijn in tabel 2.2.2 bepalingmethoden opgenomen van het plastische weerstandsmoment van de controle-omtrek voor diverse kolomvormen en -posities.

Vooruitblik: pons in de nieuwe Eurocode

Momenteel is een nieuwe versie van de Eurocode 2 in ontwikkeling. In deze nieuwe versie wordt de toetsing op pons volledig herzien, waarmee de bezwaren die in dit artikel worden aangestipt grotendeels worden ondervangen. In de toekomstige versie komt een duidelijkere toelichting op de bepalingwijze van de excentriciteit van de ponskracht. Ook zal in de herziene bepalingmethode van de schuifspanningsvergrotingsfactor β geen gebruik meer worden gemaakt van het plastische weerstandsmoment van de toetsperimeter. De versimpelde bepalingmethoden voor de factor β uit de huidige norm komen grotendeels te vervallen.

Met deze herziene toetswijze bestaat de hoop dat de methode eenduidiger zal worden en dat de kans op (onbedoeld) onveilige ontwerpen wordt verkleind. Wanneer de nieuwe versie van Eurocode 2 verschijnt, is vooralsnog niet exact bekend, maar dat zal nog zeker enkele jaren duren. ●

MEER OVER PONS IN DE NIEUWE EUROCODE

Voor een uitgebreidere toelichting op de verschillen tussen de ponsstoets in de huidige en toekomstige Eurocode 2 zal binnenkort een separaat artikel verschijnen in *Cement*. Ook verschijnt een artikelenserie over dwarskracht in de nieuwe Eurocode.

Referenties

1. Durchstanznachweis nach EC2, Prof. Dr.-Ing. Rudolf Baumgart (5-10-2020).
2. DIN-EN 1992-1-1/NA (2013), Duitse Nationale Annex bij Eurocode 2-1-1.
3. NEN-EN 1992-1-1+C2/A1 (2015) + NB+A1 (2020), Nederlandse Eurocode 2-1-1 inclusief Nationale Annex.