

De nieuwe TGB Staal is bedoeld om een constructie te toetsen. Toch hanteren veel constructeurs de eenheidstoets uit de TGB als hulpmiddel bij het ontwerpen. In dat geval is oplettendheid geboden, omdat de belasting niet altijd lineair in de toetsingsregel staat. De eenheidstoets geeft dan een vertekend beeld van zowel de benuttingsgraad als van de reservecapaciteit van kolommen. Dat is de eerste valkuil. Een tweede valkuil betreft de aanpendelende belasting, waarvoor in de praktijk vaak geen onderscheid wordt gemaakt tussen geschoorde en ongeschoorde raamwerken.

Valkuilen in de TGB Staal

Toelichting op de stabiliteit van kolommen

prof. ir. H.H. Snijder

TU-Eindhoven, Faculteit Bouwkunde en Holland Railconsult, Utrecht

ir. F.S.K. Bijlaard en ir. H.M.G.M. Steenbergen

TNO Bouw, Rijswijk

Met de nieuwe TGB Staal is een aantal jaren ervaring opgedaan. In de praktijk is gebleken dat er nogal wat artikelen in de normen staan, waarvan de strekking niet direct duidelijk is of die tot verschillende interpretaties leiden. In de rubriek Vraag & Antwoord van dit tijdschrift komen regelmatig vragen over deze zaken aan de orde. Vaak is een nadere toelichting of opheldering voldoende en volstaat een relatief kort antwoord.

In dit artikel komen twee vragen over de toetsing van kolommen volgens de TGB Staal [1, 2] uitgebreid aan bod. Het betreft in feite twee valkuilen, waar men in zou kunnen trappen bij toepassing van de toetsingsregels voor de stabiliteit, namelijk:

- het beoordelen van de reservecapaciteit op basis van eenheidstoetsen;
- het toepassen van de toetsingsregels met betrekking tot aanpendelende belasting bij raamwerken.

Voordat deze beide onderwerpen worden behandeld, is het nodig eerst in te gaan op de achtergronden van de toetsingsregels voor op druk en op druk en buiging belaste kolommen.

Op druk belaste kolommen

Voor de toetsing van op druk belaste kolommen kan gebruik worden gemaakt van de toetsingsregels volgens NEN 6770 en NEN 6771. Beide mogelijkheden komen hier ter sprake.

NEN 6770

Voor centraal gedrukte kolommen (afb. 1) geldt volgens NEN 6770, art. 12.1, voor beide hoofdrichtingen afzonderlijk de volgende toetsingsregel:

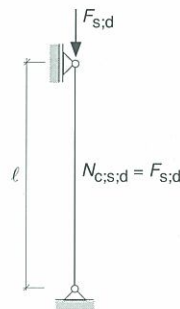
$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{buc} N_{c;u;d}} \leq 1 \quad (1)$$

De knikfactor ω_{buc} hangt af van de relatieve slankheid λ_{rel} , die kan worden bepaald volgens:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\lambda_e} \quad \text{met: } \lambda = \frac{\ell_{buc}}{i}; \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{en } \lambda_e = \pi \sqrt{\frac{E_d}{f_{y;d}}}$$

of met:

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{N_{c;u;d}}{F_E}} \quad \text{met: } N_{c;u;d} = A f_{y;d} \quad \text{en } F_E = \frac{\pi^2 E_d I}{\ell_{buc}^2}$$



1. Op druk belaste kolom.

Commissie SG/TC8 Stabiliteit

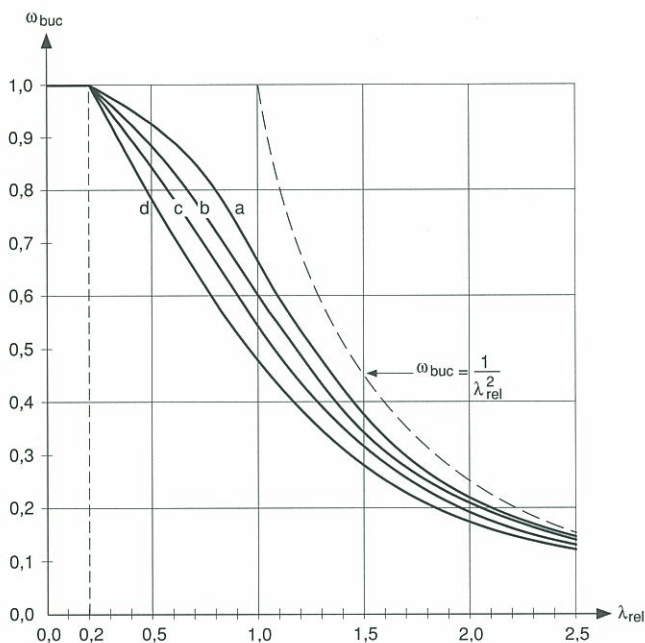
De technische commissie TC8 van het Staalbouwkundig Genootschap heeft een inventarisatie gemaakt van de onderzoeksonderwerpen op het gebied van stabiliteit van staalconstructies, die aan de praktijk zijn ontleend. Uit de mogelijke onderwerpen hebben de volgende vier de hoogste prioriteit gekregen:

- stabiliteit van U-profielen;
- stabiliteit van gekromde staven;
- vereenvoudigde ontwerpregels en rekenregels voor staalconstructies;
- kipstabiliteit.

Op deze vier aandachtsgebieden legt de commissie SG/TC8 de komende periode het accent. Daarnaast vindt in de commissie regelmatig een technisch inhoudelijke discussie plaats over onderwerpen op het gebied van de stabiliteit van staalconstructies. Sommige hiervan lenen zich voor publikatie. Dit artikel is de eerste die namens commissie SG/TC8 wordt gepubliceerd.

Deze formules gelden voor profielen van doorsnedeklasse 1, 2 en 3. NEN 6770 geeft de relatie tussen de knikfactor ω_{buc} en de relatieve slankheid λ_{rel} voor het gemak in de vorm van een tabel, een grafiek (afb. 2) en een formule. De formule voor de knikfactor ω_{buc} , gebaseerd op de zogeheten Perry-Robertson formule, luidt:

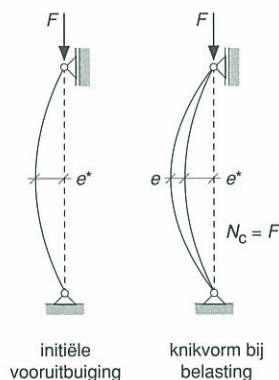
$$\omega_{buc} = \frac{1 + \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2}{2\lambda_{rel}^2} - \frac{1}{2\lambda_{rel}^2} \sqrt{(1 + \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2)^2 - 4\lambda_{rel}^2} \quad (2)$$



2. Knikcurven geven het verband tussen de knikfactor ω_{buc} en de relatieve slankheid λ_{rel} .

De Perry-Robertson formule is af te leiden door uit te gaan van het elastisch spanningscriterium als grenstoestand voor een gedrukte kolom met een initiële vooruitbuiging e^* (afb. 3). In feite beschrijft deze formule het vloeien van de uiterste vezel van de doorsnede bij evenwicht van de kolom in vervormde toestand. Voor de maximumspanning in de kolom geldt:

$$\sigma = \frac{N_c}{A} + \frac{M}{W} \quad (3)$$



3. Imperfekte gedrukte kolom.

Het moment bij evenwicht in vervormde toestand is:

$$M = N_c(e^* + e)$$

Hierin is e de doorbuiging ten gevolge van het niet-lineaire uitbuigingsgedrag. Nu geldt:

$$e^* + e = \frac{n}{n-1} e^* \quad \text{met} \quad n = \frac{F_E}{N_c}$$

zodat het moment M gelijk is aan

$$M = N_c \frac{n}{n-1} e^* \quad (4)$$

Invullen van (4) in (3) geeft:

$$\sigma = \frac{N_c}{A} + \frac{n}{n-1} \frac{N_c e^*}{W} \quad (5)$$

Met:

$$W = \frac{I}{z} = \frac{i^2 A}{z}$$

$$\frac{n}{n-1} = \frac{\frac{F_E}{N_c}}{\frac{F_E}{N_c} - 1} = \frac{1}{1 - \frac{N_c}{F_E}}$$

volgt:

$$\sigma = \frac{N_c}{A} + \frac{z}{i^2 A} \frac{N_c e^*}{1 - \frac{N_c}{F_E}} \quad (6)$$

De kolom bereikt zijn grenstoestand voor $\sigma = f_y$, zodat:

$$\frac{N_c}{A} + \frac{z}{i^2 A} \frac{N_c e^*}{1 - \frac{N_c}{F_E}} = f_y \quad (7)$$

Deze grenstoestand kan ook worden bescheven met de gemiddelde drukspanning σ_{buc} in de kolom: $\sigma_{buc} = N_c/A$. Voorts geldt:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E_d}{\lambda^2} = \frac{F_E}{A} \quad \text{en} \quad \frac{N_c}{F_E} = \frac{\sigma_{buc}}{\sigma_E}$$

Hiermee is (7) te schrijven als:

$$\sigma_{buc} + \frac{z}{i^2} \frac{\sigma_{buc} e^*}{1 - \frac{\sigma_{buc}}{\sigma_E}} = f_y \quad (8)$$

en na herschrijven:

$$\sigma_{buc}^2 - \sigma_{buc} \left(\sigma_E \left(1 + \frac{z e^*}{i^2} \right) + f_y \right) + f_y \sigma_E = 0 \quad (9)$$

De kleinste wortel leidt tot de maatgevende oplossing

$$\sigma_{buc} = \frac{1}{2} \left(\sigma_E \left(1 + \frac{z e^*}{i^2} \right) + f_y \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\sigma_E \left(1 + \frac{z e^*}{i^2} \right) + f_y \right)^2 - 4 f_y \sigma_E} \quad (10)$$

met $\omega_{buc} = \frac{\sigma_{buc}}{f_y}$ en $\frac{\sigma_E}{f_y} = \frac{1}{\lambda_{rel}^2}$ volgt:

$$\omega_{buc} = \frac{1 + \frac{z e^*}{i^2} + \lambda_{rel}^2}{2\lambda_{rel}^2} - \frac{1}{2\lambda_{rel}^2} \sqrt{\left(1 + \frac{z e^*}{i^2} + \lambda_{rel}^2 \right)^2 - 4\lambda_{rel}^2} \quad (11)$$

Op grond van proeven en computersimulaties van het bezwijkgedrag van op druk belaste kolommen hebben Rondal en Maquoi de volgende uitdrukking vastgesteld [3]:

$$\frac{ze^*}{i^2} = \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) \quad (12)$$

Deze uitdrukking ingevuld in (11) geeft de op Perry-Robertson gebaseerde formule (2), die de karakteristieke waarde voor het bezwijken van de kolom weergeeft:

$$\omega_{buc} = \frac{1 + \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2}{2\lambda_{rel}^2} + \frac{-1}{2\lambda_{rel}^2} \sqrt{(1 + \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2)^2 - 4\lambda_{rel}^2} \quad (2)$$

De numerieke waarde voor e^* kan nu worden bepaald door het invullen van $W = I/z = i^2 A/z$ in (12), hetgeen leidt tot:

$$e^* = \alpha_k(\lambda_{rel} - \lambda_o) \frac{W}{A} \quad (13)$$

Hiermee is tevens aangetoond dat als alternatief voor formule (1) en (2) als toetsingsregels voor centrisk gedrukte kolommen ook formule (5) en (13) zijn te gebruiken.

NEN 6771

De formules (5) en (13) vormen de basis voor de toetsingsregels in art. 12.3 van NEN 6771 voor op druk en buiging belaste kolommen. Uitgaande van (5) en $\sigma = f_{y;d}$, met $N_{c;u;d} = Af_{y;d}$ en $M_{u;d} = Wf_{y;d}$, volgt:

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n}{n-1} \frac{N_{c;s;d}e^*}{M_{u;d}} = 1 \quad (14)$$

Door een ongelijkheidsteken in te voeren, wordt deze formule herschreven in de vorm van een toetsingscriterium:

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n}{n-1} \frac{N_{c;s;d}e^*}{M_{u;d}} \leq 1 \quad (15)$$

Dit is de formule voor centrisk gedrukte kolommen. Deze formule is vergelijkbaar met de toetsingsformules in art. 12.3 van NEN 6771 door bij deze toetsingsformules te stellen:

- $M_{y;equ;s;d} = M_{z;equ;s;d} = 0$ (centrisk gedrukt, dus geen moment);
- $\omega_{kip} = 1$ (niet gevoelig voor torsieknik);
- $F_{tot;s;d} = N_{c;s;d}$ (geen aanpendelende belasting).

Conclusie

Voor de toetsing van op druk belaste kolommen kan gebruik worden gemaakt van de toetsingsregels volgens:

- art. 12.1 van NEN 6770; of
- art. 12.3 van NEN 6771.

De kniklengte is de bepalende grootte voor λ_{rel} en daarmee ook voor ω_{buc} , e^* en n . Door middel van de kniklengte worden tweede-orde effecten in rekening gebracht.

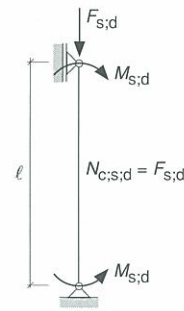
Op druk en buiging belaste kolommen

Voor de toetsing van op druk en buiging belaste kolommen kan gebruik worden gemaakt van de toetsingsregels volgens NEN 6770 en NEN 6771. Beide mogelijkheden komen hier ter sprake.

NEN 6771

De toetsingsregels voor op druk en buiging belaste kolommen (afb. 4) in art. 12.3 van NEN 6771 zijn gebaseerd op formule (15). Deze formule is uitgebreid met een momentterm:

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n}{n-1} \frac{M_{equ;s;d} + N_{c;s;d}e^*}{M_{u;d}} \leq 1 \quad (16)$$



4. Op druk en buiging belaste kolom.

Voor deze formulering is gekozen, omdat formule (15) voor op druk belaste kolommen eenvoudig is uit te breiden tot formule (16) voor op druk en buiging belaste kolom. Bovendien ligt aan (15) en (16) een fysisch model voor imperfecte kolommen ten grondslag, terwijl dit fysische model bij (1) minder herkenbaar is. In de meest algemene vorm zien de toetsingsregels van art. 12.3 van NEN 6771 er als volgt uit:

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{M_{y;equ;s;d} + F_{y,tot;s;d}e_y^*}{\omega_{kip} M_{y;u;d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \frac{\chi_y M_{z;equ;s;d}}{M_{z;u;d}} \leq 1 \quad (17a)$$

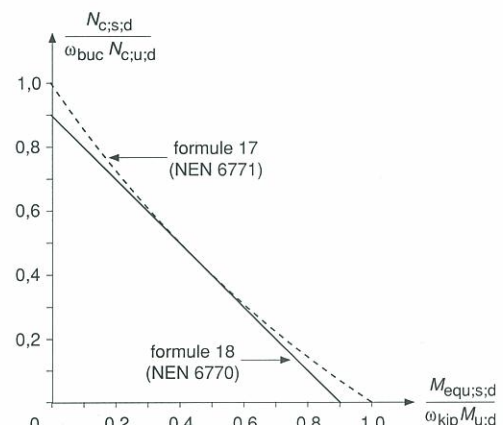
$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n_y}{n_y - 1} \frac{\chi_z M_{y;equ;s;d}}{\omega_{kip} M_{y;u;d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \frac{M_{z;equ;s;d} + F_{z,tot;s;d}e_z^*}{M_{z;u;d}} \leq 1 \quad (17b)$$

Er zijn twee formules nodig: één voor de combinatie van knik om de sterke as met dubbele buiging (17a) en één voor knik om de zwakke as met dubbele buiging (17b). Het equivalente moment brengt de momentenverdeling over de kolom in rekening. Bij instabiliteit is immers de gehele momentenlijn langs de as van de kolom van belang en niet zozeer het moment in één bepaalde doorsnede. Voor kolommen in geschoorde raamwerken is het equivalente moment M_{equ} gebaseerd op de eindmomenten en op het moment in de middendoorsnede van de kolom. Voor kolommen in ongeschoorde raamwerken wordt dit moment in hoofdzaak bepaald door het grootste eindmoment. Deze toetsingsregels (17a en 17b) sluiten aan bij de oude TGB Staal (NEN 3851) [4]. Het effect van aanpendelende belasting wordt in rekening gebracht door $F_{tot;s;d}$. Dat is de som van de normaalkrachten waarvoor de kolom de stabiliteit moet verzorgen. Is er geen aanpendelende belasting en verzorgt de kolom uitsluitend de eigen stabiliteit, dan geldt $F_{tot;s;d} = N_{c;s;d}$. De gevoeligheid voor torsieknik komt tot uiting in de kipfactor ω_{kip} .

NEN 6770

In NEN 6770, art. 12.3, zijn vereenvoudigde formules opgenomen die een uitbreiding zijn van formule (1) met een momentterm:

$$1,1 \frac{N_{c;s;d}}{\omega_{buc} N_{pl;d}} + 1,1 \frac{M_{equ;s;d}}{\omega_{kip} M_{u;d}} \leq 1 \quad (18)$$



5. Formule (18) als veilige benadering van formule (17).

De vereenvoudiging ten opzichte van (17) gaat ten koste van de economie. In het algemeen leidt (17) tot een meer economisch ontwerp dan (18). Dat komt onder meer doordat de factoren 1,1 zijn toegevoegd. Roik en Kindmann [5, 6] hebben aangetoond dat formule (18) veilige resultaten geeft ten opzichte van formule (17) (afb. 5). Nader onderzoek heeft aangetoond dat dit uitsluitend het geval is voor knikkrommen b, c en d. Voor knikkromme a moet de factor 1,1 eigenlijk worden vervangen door 1,125. Dit verschil is echter marginaal.

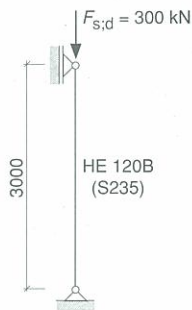
De formules in NEN 6770, art. 12.3, zijn gebaseerd op (18) en kennen een beperkt toepassingsgebied. Ze gelden slechts voor druk en enkele buiging, als er geen aanpendelende belasting aanwezig is. Is dat niet het geval, dan moeten (17a) en (17b) worden gebruikt (volgens art. 12.3 in NEN 6771). In art. 12.3 van NEN 6770 worden de formules paarsgewijs gegeven: één formule voor knik om de sterke as en één voor knik om de zwakke as. De gegeven formules hangen ook af van de vraag of de kolom onderdeel uitmaakt van een geschoord of van een ongeschoord raamwerk.

Reservecapaciteit

Voor een op druk belaste kolom is toetsing volgens formule (1) en (2) identiek aan toetsing volgens formule (13) en (15). Dit is echter uitsluitend het geval in de uiterste grenstoestand; dat wil zeggen bij een volledige benutting van de kolom. Bij een lagere benuttingsgraad is dat niet het geval.

Neem als voorbeeld een kolom HE 120B met een systeemplengte van 3 m in de staalsoort S235 (afb. 6). De kolom wordt op druk belast door een normaalkracht $F_{s;d} = 300$ kN. Bij deze belasting luidt de toetsing volgens formule (1) en (2):

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc} N_{c;u;d}} \leq 1$$



6. Voorbeeld van een op druk belaste kolom.

Voor de gegeven kolom is $\ell_{z;buc} = 3000$ mm en $i_z = 30,6$ mm, zodat voor de slankheid geldt: $\lambda_z = \ell_{z;buc}/i_z = 3000/30,6 = 98,0$. De relatieve slankheid volgt nu uit:

$$\lambda_e = \pi \sqrt{\frac{E_d}{f_{y;d}}} = \pi \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{235}} = 93,9$$

$$\lambda_{z;rel} = \frac{\lambda_z}{\lambda_e} = \frac{98,0}{93,9} = 1,05$$

Voor het profiel HE 120B geldt knikcurve c voor knik om de zwakke as, omdat $h/b = 1 \leq 1,2$ en $t \leq 80$ mm. Bij toepassing van knikcurve c en $\lambda_{z;rel} = 1,05$ volgt $\omega_{z;buc} = 0,51$. De toetsing verloopt dan als volgt:

$$N_{c;u;d} = A f_{y;d} = 3400 \cdot 235 \cdot 10^{-3} = 799 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc} N_{c;u;d}} = \frac{300}{0,51 \cdot 799} = 0,73 \leq 1 \quad (\text{voldoet})$$

Voor het gegeven profiel geldt verder $M_{z;u;d} = f_{y;d} W_{z;pl} = 235 \cdot 80,97 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 19,03$ kNm. Voor knikcurve c geldt bovendien: $\alpha_k = 0,49$ en $\lambda_o = 0,2$. De toetsing volgens formule (13) en (15) verloopt daarmee als volgt:

$$F_{z;E} = \frac{\pi^2 E_d I_z}{\ell_{buc}^2} = \frac{\pi^2 2,1 \cdot 10^5 \cdot 318 \cdot 10^4}{3000^2} \cdot 10^{-3} = 731 \text{ kN}$$

$$n_z = \frac{F_{z;E}}{N_{c;s;d}} = \frac{731}{300} = 2,44$$

$$e_z^* = \alpha_k (\lambda_{rel} - \lambda_o) \frac{M_{z;u;d}}{N_{c;u;d}} = 0,49 (1,05 - 0,2) \frac{19,03 \cdot 10^6}{799 \cdot 10^3} = 9,9 \text{ mm}$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \frac{N_{c;s;d} e_z^*}{M_{z;u;d}} = \frac{300 \cdot 10^3}{799 \cdot 10^3} + \frac{2,44}{2,44 - 1} \frac{300 \cdot 10^3 \cdot 9,9}{19,03 \cdot 10^6} = 0,64 \leq 1 \quad (\text{voldoet})$$

Worden nu de gegeven formules uitsluitend gebruikt als toetsingscriteria, dan beantwoorden ze aan hun doel. Gebruikt men de formules echter als hulpmiddel bij het ontwerp, dan heeft de constructeur een dilemma. Bij de toetsing volgens (1) en (2) blijkt de kolom te voldoen en levert de eenheidstoets de waarde 0,73. Dit suggereert een ongunstiger beeld dan de eenheidstoets volgens (13) en (15), die de waarde 0,64 geeft.

In de uiterste grenstoestand bij $N_{c;s;d} = 410,8$ kN in plaats van $N_{c;s;d} = 300$ kN verloopt de toetsing volgens (1) en (2) als volgt:

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc} N_{c;u;d}} = \frac{410,8}{0,51 \cdot 799} = 1,00 \leq 1 \quad (\text{voldoet})$$

en de toetsing volgens (13) en (15):

$$n_z = \frac{F_{z;E}}{N_{c;s;d}} = \frac{731}{410,8} = 1,78$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{N_{c;u;d}} + \frac{n_z}{n_z - 1} \frac{N_{c;s;d} e_z^*}{M_{z;u;d}} = \frac{410,8 \cdot 10^3}{799 \cdot 10^3} + \frac{1,78}{1,78 - 1} \frac{410,8 \cdot 10^3 \cdot 9,9}{19,03 \cdot 10^6} = 1,00 \leq 1 \quad (\text{voldoet})$$

In de uiterste grenstoestand leiden beide toetsingen tot een identiek resultaat, terwijl bij een lagere benuttingsgraad formule (13) en (15) een gunstiger beeld suggereren dan formule (1) en (2). Dit komt door de formulering van de eenheidstoets. Deze formulering is namelijk voor (13) en (15) onzuiver (niet-lineair). Bij een zuivere eenheidstoets wordt namelijk het effect van de belasting S , dat lineair afhangt van de uitwendige belasting, in de teller vergeleken met de sterkte R in de noemer:

$$\frac{S}{R} \leq 1 \quad (19)$$

Formule (1) voldoet aan deze lineaire vorm, omdat in de teller uitsluitend lineaire belastingeffecten staan en in de noemer uitsluitend de sterkte voorkomt. Bij (15) is dit niet het geval. De vergrotingsfactor $n/(n-1)$, die ook een belastingterm bevat, is in de norm om typografische redenen vóór de breuk geplaatst, maar behoort in feite tot de belasting in de teller. Daaruit is ook eenvoudig in te zien dat het effect van de belasting niet-lineair is. Deze onzuivere verschijningsvorm van de eenheidstoets veroorzaakt het verschil in uitkomsten tussen formule (1) en (15).

De uitkomst van de eenheidstoets van formule (1) levert een juiste schatting van de benuttingsgraad (in het voorbeeld 0,73 of wel 73%) en van de reservecapaciteit ($100 - 73 = 27\%$). De overeenkomstige schatting volgens (15) is te optimistisch (in het voorbeeld 64% resp. 36%).

Blijft de vraag waarom er onzuivere toetsingsregels bestaan. Het werkelijk gedrag van de constructie kan namelijk goed worden beschreven door het belastingeffect te lineariseren. Wil men echter economisch ontwerpen, dan zal men niet-lineaire toetsingsformules voor lief moeten nemen. Denk hierbij aan de toetsingsregels voor een op druk en buiging belaste kolom. Formule (18) is lineair voor wat betreft het belastingeffect; (17) is dat niet. Met (18) is de benuttingsgraad en daarmee de reservecapaciteit ogenschijnlijk nauwkeurig te bepalen, echter wel ten opzichte van een minder economisch grenscriterium. Bij gebruik van (17) zal een berekende benuttingsgraad en daarmee de reservecapaciteit

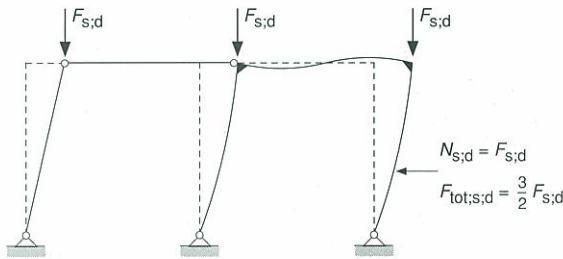
ogenschijnlijk optimistisch zijn, echter de beschrijving van de grenstoestand leidt tot een meer economische constructie.

De norm is bedoeld als toetsingsdocument en daarbij doet zich het probleem van de benuttingsgraad niet voor. Het enige wat telt, is of de constructie voldoet of niet. Gebruikt de constructeur de norm als ontwerpdocument, dan blijft oplettendheid geboden.

Aanpendelende belasting

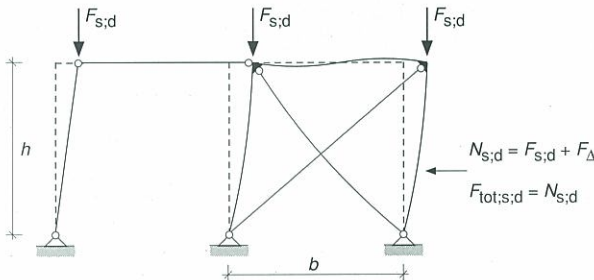
In formule (17) wordt het effect van aanpendelende belasting in rekening gebracht via de som van de normaalkrachten $F_{\text{tot};s;d}$, waarvoor de beschouwde kolom de stabiliteit moet waarborgen. In de praktijk betekent dit meestal dat de totale verticale belasting wordt gedeeld door het aantal kolommen dat de stabiliteit verzorgt. Dit geldt uitsluitend wanneer de kolommen via buiging de stabiliteit verzorgen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het ongeschoord raamwerk van afbeelding 7. De twee kolommen verzorgen behalve de eigen stabiliteit ook de zijdelingse stabiliteit van de pendelkolom:

$$F_{\text{tot};s;d} = \frac{3}{2} F_{s;d}$$



7. Aanpendelende belasting bij een ongeschoord raamwerk.

Bij geschoorde raamwerken verloopt de aanpak anders. Daar wordt de stabiliteit in hoofdzaak verzorgt door trek- en drukkrachten in kolommen, liggers en schoren. Indien een aanpendelende belasting aanwezig is, moet $F_{\text{tot};s;d}$ gelijk worden genomen aan de normaalkracht in de kolom die ontstaat bij evenwicht in de vervormde toestand (afb. 8).



8. Aanpendelende belasting bij een geschoord raamwerk.

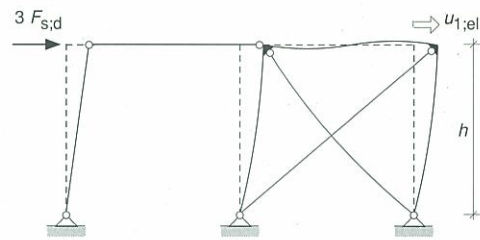
Bij star geschoorde raamwerken volgt $F_{\text{tot};s;d}$ dan uit het evenwicht in onvervormde toestand, rekening houdend met de rechtstreekse belasting op de kolom en met het effect van de aanpendelende belasting dat via scheefstand op de kolom werkt:

$$F_{\text{tot};s;d} = F_{s;d} + F_{\Delta}$$

Bij flexibel geschoorde raamwerken moet in de eerste-orde krachtsverdeling van kolommen, liggers en schoorconstructie al rekening worden gehouden met de initiële scheefstand en de aanpendelende belasting. De eerste-orde krachtsverdeling moet daarna zodanig worden gemodificeerd dat rekening wordt gehouden met tweede-orde effecten ten gevolge van zijdelingse instabiliteit van het flexibel geschoorde raamwerk.

Bij een star geschoord raamwerk geeft de maatgevende knikvorm geen zijdelingse verplaatsing van de bovenregel. Het geschoorde raamwerk van afbeelding 9 is volgens art. 10.1 van NEN 6770 star geschoord, indien geldt:

$$\frac{10u_{1;el}}{h} \leq 1 \quad (20)$$

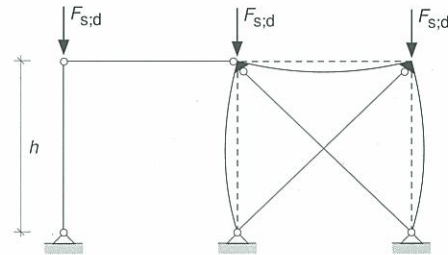


9. Geschoord raamwerk met aanpendelende belasting.

Het criterium van formule (20) komt overeen met $n > 10$, waarin n het getal is waarmee de belasting moet worden vermenigvuldigd om het raamwerk in zijdelingse richting instabiel te maken. Bij benadering geldt:

$$n = \frac{h}{u_{1;el}} \quad (21)$$

Is $n > 10$, dan is het raamwerk ongevoelig voor zijdelingse instabiliteit; het is dan star geschoord. In dat geval geldt immers $n/(n-1) < 1,1$. De invloed op de totale krachtsverdeling van de tweede-orde effecten die samenhangen met de zijdelingse instabiliteit bedraagt minder dan 10%. Deze invloed is in die gevallen verwaarloosbaar. Voor een star geschoord raamwerk is dus niet de zijdelingse knikvorm maatgevend, maar in het algemeen de lokale knikvorm van afbeelding 10.



10. Lokale knikvorm bij een star geschoord raamwerk.

De kniklengte die hoort bij de lokale knikvorm is hooguit gelijk aan de hoogte van de kolom: $\ell_{\text{buc}} = \alpha h < h$. De Eulerse kniklast is dan:

$$F_E = \frac{\pi^2 E_d I}{(\alpha h)^2} \quad (22)$$

Voor het bepalen van n wordt nu zowel in de teller als in de noemer uitgegaan van de maatgevende lokale knikvorm:

$$n = \frac{F_E}{F_{y;\text{tot};s;d}} = \frac{F_E}{F_{s;d} + F_{\Delta}} \quad (23)$$

Voor de constructie volgens afbeelding 8 geldt:

$$F_{\Delta} = 3\psi \frac{h}{b} F_{s;d} = \frac{h}{91b} F_{s;d} \quad (24)$$

Hieruit blijkt dat voor veel praktische gevallen F_{Δ} verwaarloosbaar klein is, zodat voor veel star geschoorde raamwerken geldt:

$$F_{\text{tot};s;d} = F_{s;d}$$

In de praktijk blijkt echter dat bij geschoorde raamwerken voor $F_{\text{tot};s;d}$ veelvuldig dezelfde waarde wordt genomen als bij ongeschoorde raamwerken. Dit is echter onjuist, zoals is gebleken. Wellicht dat de summierse toelichting in de normen hier debet aan is. Het effect van aanpendelende belasting leidt in het gegeven voorbeeld niet tot een substantiële bijdrage aan $F_{\text{tot};s;d}$. In het voorbeeld (afb. 8) is de lokale knikvorm maatgevend en niet de zijdelingse. Daarom speelt de aanpendelende belasting in dit voorbeeld een ondergeschikte rol.

Literatuur

1. *NEN 6770* (TGB 1990. Staalconstructies. Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies).
2. *NEN 6771* (TGB 1990. Staalconstructies. Stabiliteit).
3. J. Rondal en R. Maquoi, 'Single equation for SSRC column-strength curves', *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the ASCE, vol. 105, no. St. 1, Jan. 1979, p. 247-250.
4. *NEN 3851* (TGB 1972. Staal).
5. K. Roik en R. Kindmann, 'Das Ersatzstabverfahren eine Nachweisform für den einfeldrigen Stab bei planmässig einachsiger Biegung mit Druckkraft', *Der Stahlbau*, 50(1981)12, p. 353-358.
6. K. Roik en R. Kindmann, 'Das Ersatzstabverfahren. Tragsicherheitsnachweise für Stabwerke bei einachsiger Biegung und Normalkraft', *Der Stahlbau*, 51(1982)5, p. 137-145.
7. *Bouwen met Staal*, rubriek Vraag en Antwoord, vanaf nummer 114 (1993).



GARTNER



THE FINISHING TOUCH

Gartner zorgt ervoor dat een mooi gebouw mooi blijft.
Door onverwoestbare "make up".
Gartner ontwerpt, fabriceert en monteert stalen aluminium
gevels, speciale constructies met geïntegreerde verwarming,
ventilatie en koeling alsook poorten op maat.

Josef Gartner & Co Nederland N.V., Beitel 80, 6422 PB Heerlen.



St. Jansbrug, Middelburg

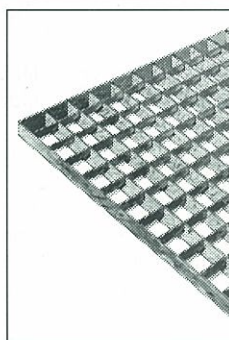
KUNSTWERKEN – STAALKONSTRUKTIES

Grenadierweg 21 – 4338 PG Middelburg – Tel. 01180-12348 – Fax. 01180-38763

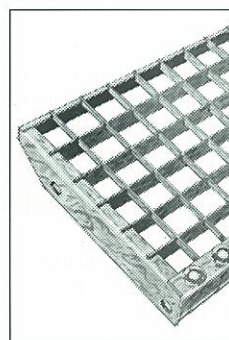
DEJO ROOSTERS



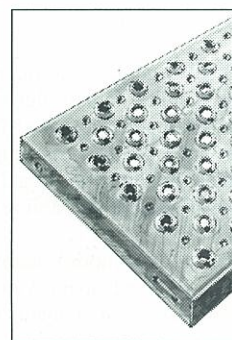
sta er op!



PERSROOSTERS



TRAPTREDEN



DEJO GRIP

Dejo Metaalindustrie B.V. Wolvega, Telefoon 05610 - 13246 Fax 05610 - 16899