

ROBUUSTHEID VAN HORIZONTALE TREKBANDEN

RUBRIEK NORMBESEF

Dit is het zesde artikel in de *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 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' op [Cementonline](#).

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

Horizontale trekbanden worden vaak als robuustheidsmaatregel toegepast. Veelal worden deze gedimensioneerd volgens NEN-EN 1991-1-7 artikel A.5.1. Er bestaat echter onduidelijkheid over de functie ervan. Horizontale trekbanden zorgen voor belangrijke samenhang, maar zorgen ze ook voor een alternatieve draagweg door kabelwerking? Dit wordt in dit artikel met een korte analyse onderzocht.

Het doel van trekbanden is volgens artikel A.5.1(1) van NEN-EN 1991-1-7 [2] om de kolommen en wandelementen aan de gebouwconstructie te bevestigen. Dat zorgt voor samenhang. Door een minimumcapaciteit voor te schrijven, veelal hoger dan de ontwerpbelasting door wind en scheefstand, is de weerstand (bij onbekende gebeurtenissen) aanzienlijk toegenomen. Een zeer zinvolle verbetering van de robuustheid dus.

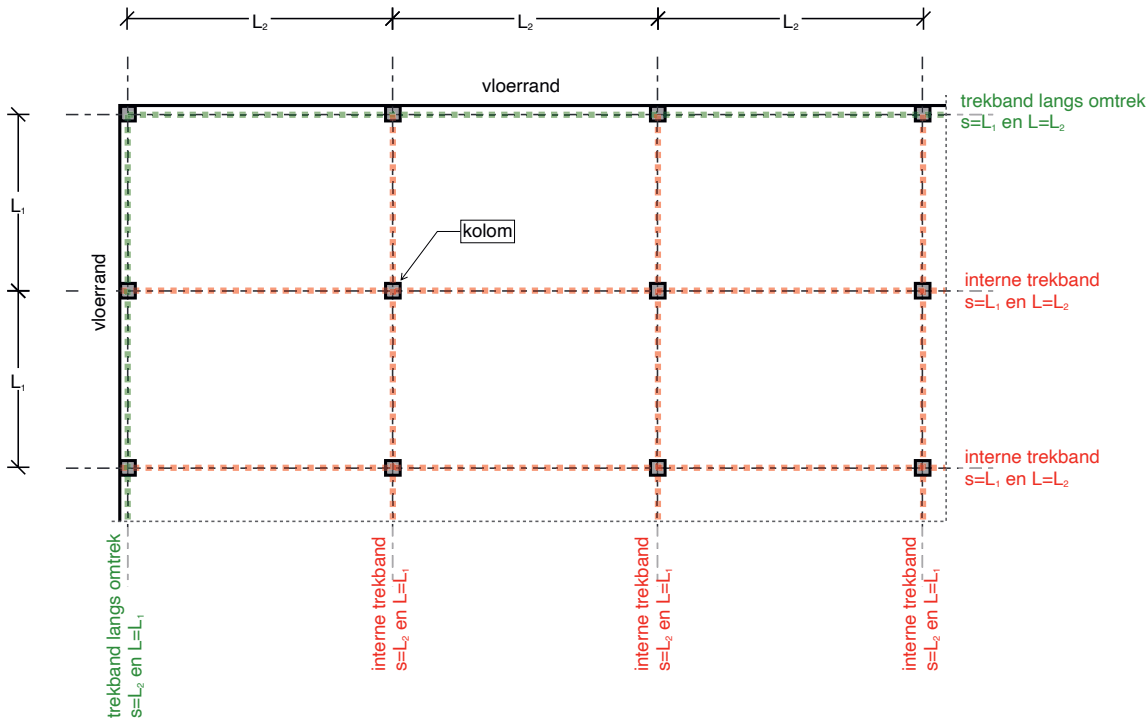
Het verwarrende is echter dat in diezelfde norm [2], in een paragraaf daarvoor (A.4.1[2]) wordt gesteld dat met de voorgeschreven strategieën, waaronder trekbanden, lokaal bezwijken moet kunnen worden doorstaan, zonder dat disproportionele voortschrijdende instorting optreedt. Dit impliceert een alternatieve draagweg, anders kan lokaal bezwijken (uitval van een element) niet worden doorstaan. Dit lijkt ook zo te

auteur



IR. MARK SPANENBURG RO

Adviseur Constructies
BAM Advies & Engineering



1 Principe trekbanden in een plattegrond

leven in de constructeurspraktijk. Een trekband die gaat doorhangen werkt als een kabel en vormt op deze wijze een alternatieve draagweg.

In dit artikel wordt onderzocht of met de toepassing van horizontale trekbanden, gedimensioneerd volgens A.5.1 [2], naast samenhang ook kabelwerking kan ontstaan. Verticale trekbanden worden buiten de beschouwing gelaten.

Horizontale trekbanden volgens NEN-EN 1991-1-7

NEN-EN 1991-1-7 A.5.1 geeft de volgende regels voor de op te nemen trekkracht van trekbanden:

1. Interne trekbanden:

$$H_i = 0,8(g_k + \psi q_k) s L, \text{ maar minimaal } 75 \text{ kN} \quad (1a)$$

2. Trekbanden langs de omtrek:

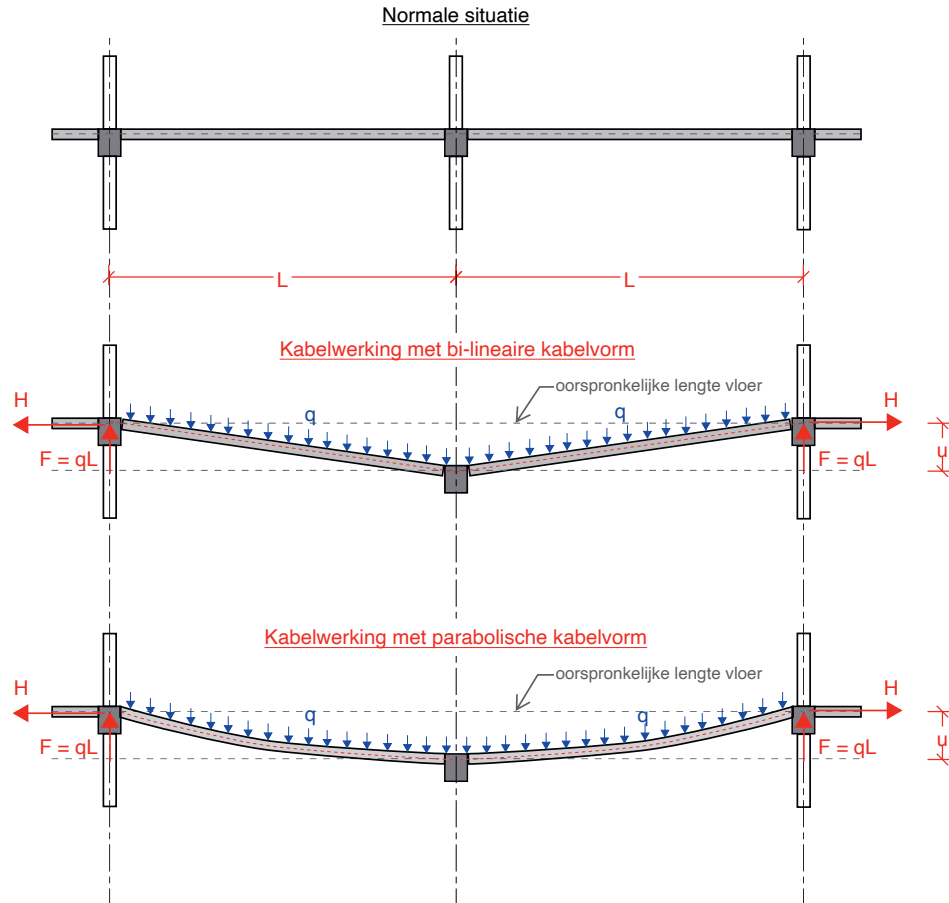
$$H_p = 0,4(g_k + \psi q_k) s L, \text{ maar minimaal } 75 \text{ kN} \quad (1b)$$

Hierin is s de afstand tussen de trekbanden en L de lengte van de trekband, ofwel de h.o.h.-afstand tussen de kolommen in de lengterichting van de trekbanden. De trekbanden moeten loodrecht op elkaar in het vloerveld en zoveel mogelijk geconcentreerd in de kolomlijnen worden aangebracht. In figuur 1 is dit schematisch weergegeven in een fictieve plattegrond.

Kabelwerking

Kabelwerking treedt op als de verticale verplaatsing van de constructie groter is dan de dikte van de constructie. Hierdoor gaat de constructie tussen de steunpunten in hangen, onder de aanname dat deze niet zijdelings kunnen verplaatsen. In figuur 2 staat het principe van kabelwerking weergegeven bij het wegvallen van een middenkolom. De constructie hangt u [m] door en er ontstaat een horizontaalkracht H [kN] in de vloer. De krachten, verplaatsingen en rekken als gevolg van kabelwerking in de vloer worden op basis van deze schema's geanalyseerd. Dit wordt eerst gedaan op basis van het statische evenwicht, dynamische effecten worden vooralsnog buiten beschouwing gelaten.

Regan (1975) [6] heeft formules afgeleid om de rek van een lijnvormige constructie als functie van de verplaatsing uit te drukken. Hierbij zijn een bilineaire en parabolische kabelvorm beschouwd (fig. 2). Er wordt verondersteld dat de constructie dusdanig is bezweken dat deze als een zuivere kabel tussen de opleggingen hangt en dat de rek evenredig over de kabel lengte kan worden verdeeld. De rek wordt bepaald door de nieuwe lengte van de kabel te bepalen en te vergelijken met de oorspronkelijke (rechte) lengte. →



2 Het principe van een constructie met kabelwerking

De evenwichtsvergelijking in verplaatste toestand is:

$$Hu = \frac{qL^2}{2} = \frac{FL}{2} \quad (2a) \quad \rightarrow \quad \frac{H}{F} = \frac{1}{2} \frac{L}{u} \quad (2b)$$

De formule van Regan voor een bilineaire kabelvorm geeft:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{u}{L} \right)^2 \quad (3a) \quad \rightarrow \quad \frac{u}{L} \cong \sqrt{2\varepsilon} \quad (3b)$$

$$\frac{H}{F} = \frac{1}{2} \frac{L}{u} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\varepsilon}} \quad (4a) \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{1}{8} \left(\frac{F}{H} \right)^2 \quad (4b)$$

De formule van Regan voor een parabolische kabelvorm geeft:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cong \frac{2}{3} \left(\frac{u}{L} \right)^2 \quad (5a) \quad \rightarrow \quad \frac{u}{L} \cong \sqrt{\frac{3}{2}\varepsilon} \quad (5b)$$

$$\frac{H}{F} = \frac{1}{2} \frac{L}{u} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3\varepsilon}} \quad (6a) \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{1}{6} \left(\frac{F}{H} \right)^2 \quad (6b)$$

Waar de rekken optreden is afhankelijk van het type constructie. Bij monoliete, doorgaande constructies of constructies met volledig sterke verbindingen (verbindingen zijn sterker dan de staaf) wordt de rek verdeeld over de volledige lengte van de staaf en klopt de aanname van Regan. Bij constructies met onvolledig sterke verbindingen (verbindingen zijn minder sterk dan de staaf) treedt bezwijken op in de verbinding. De staaf blijft dan elastisch en de rek gaat volledig in de verbinding zitten.

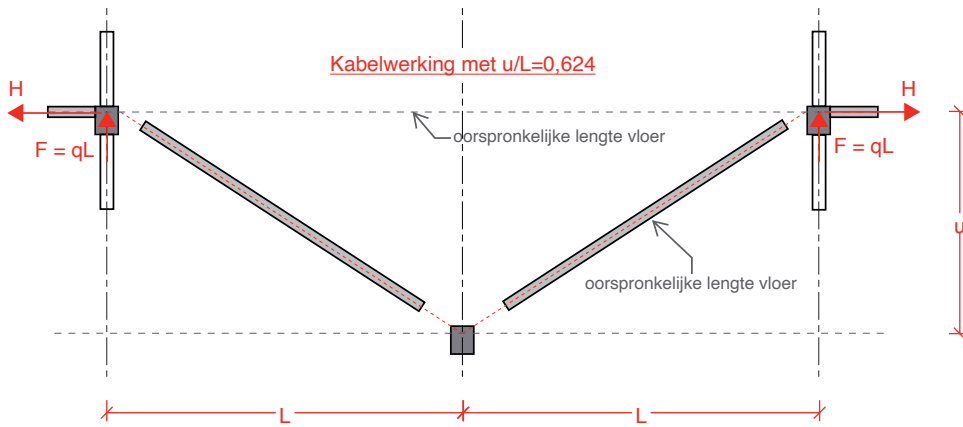
Stel dat de lengte van de verbinding $\sim 0,1L$ is, dan wordt:

$$\varepsilon_{onvol} \cong \frac{\Delta L}{0,1L} = 10\varepsilon_{val} \quad (6)$$

Een ander punt van aandacht zijn de rotaties ter plaatse van de knikpunten in de constructie. Hier treden naast axiale rekken ook buigrekken op en dit is in bovenstaande formules verwaarloosd. Uit experimenten blijkt dat de buigrekken een belangrijke rol spelen en dat breuk vaak optreedt ter plaatse van de knikpunten. Daarom moet de rotatie en/of relatieve

Tabel 1 Vervormingen en verplaatsingen trekband volgens rekenregels NEN-EN 1991-1-7

Vorm trekband	H/F	$\epsilon (= \epsilon_{vol})$	ϵ_{onvol}	u/L
Bilineair	0,8	0,195 (19,5%)	1,95 (195%)	0,624
Parabool	0,8	0,260 (26,0%)	2,60 (260%)	0,624



3 Verplaatste constructies met kabelwerking uitgaande van de rekenregels van NEN-EN 1991-1-7

doorbuiging (u/L) worden beperkt. Het is echter nog niet duidelijk welke maximale rotaties en relatieve doorbuigingen voor verschillende constructietypen en verbindingen mogen worden aangehouden.

De formules van Regan kunnen wel worden gebruikt om een indicatie te krijgen van de optredende verplaatsingen en rekken wanneer de dimensioneringsregels volgens A.5.1 [2] worden gehanteerd. De bovenbelasting F bij een interne trekband is $F_i = (g_k + \psi q_k)sL$ en bij een trekband langs de omtrek $F_p = 0,5(g_k + \psi q_k)sL$. De kabelkracht als verhouding van de belasting H/F wordt dan met formules (1a) en (1b):

1. Interne trekbanden:

$$H_i/F_i = 0,8(g_k + \psi q_k)sL / 1,0(g_k + \psi q_k)sL = 0,8$$

2. Trekbanden langs de omtrek:

$$H_p/F_p = 0,4(g_k + \psi q_k)sL / 0,5(g_k + \psi q_k)sL = 0,8$$

Voor zowel interne trekbanden als trekbanden langs de omtrek geldt dus $H/F = 0,8$. Dit kan in de formules van Regan worden ingevuld en de uitkomsten zijn samengevat in tabel 1 en getoond in figuur 3. Uit deze resultaten blijkt dat de relatieve doorbuiging en de rek erg hoog is.

Toelaatbare rekken van diverse constructiematerialen

De formules van Regan geven niet aan wanneer de maximale rek van een materiaal is bereikt. Deze is afhankelijk van het materiaal dat wordt toegepast. Hieronder wordt de maximale rek onderzocht voor de

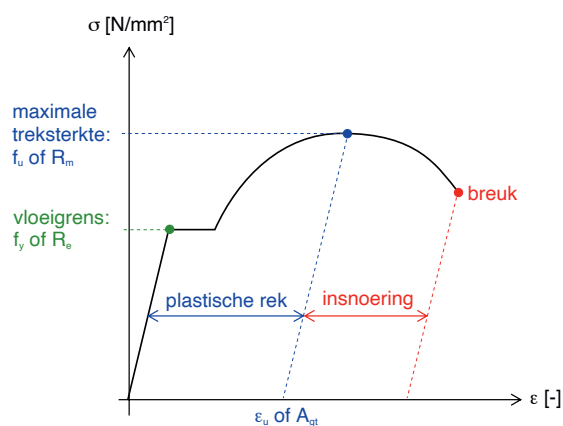
drie meest gangbare constructiematerialen, namelijk constructiestaal, gewapend beton en hout.

Constructiestaal

Voor constructiestaal geeft NEN-EN 1993-1-1 twee rekgrenzen:

1. De verlenging bij breuk over een lengte van $5,65\sqrt{A_0}$ mag niet minder zijn dan 15%.
2. De rek bij de treksterkte f_u (rek bij maximale belasting) moet $\epsilon_u \geq 15\epsilon_y$. Dit geeft 1,7-2,5% voor S235 en S355.

De eerste rekgrens geldt voor het gebied waar insnoering optreedt ($L = 5,65\sqrt{A_0}$, waarbij A_0 de initiële dwarsdoorsnede is). Dit is een kort gebied en kan niet →



4 Spannings-rekfiguur constructiestaal en betonstaal

voor een gemiddelde rek van een gehele staaf worden gebruikt. Daarom wordt de tweede eis als rekgrens gehanteerd, namelijk $\epsilon_u = 1,7-2,5\%$. In figuur 5 zijn deze gebieden schematisch aangegeven. Als deze rekgrenzen worden vergeleken met de optredende rekken uit tabel 1, dan zijn de rekken bij zowel bij constructies met volledig sterke als onvolledig sterke verbindingen niet opneembaar.

Gewapend beton

Betonstaal heeft volgens de NEN 6008 een minimale rek bij maximale belasting (A_{gt} , fig. 4) van 3,0%/5,0%/7,5%, afhankelijk van de staalkwaliteit (klasse A/B/C). Maar gewapend beton is een composit materiaal, waarbij de staalspanning maximaal is ter plaatse van de scheur en tussen de scheuren afneemt door de aanhechting met het beton (fig. 6). De rek in het betonstaal treedt dus voornamelijk op ter plaatse van een scheur en is daartussen veel minder. Daardoor is de gemiddelde toelaatbare rek van gewapend beton aanzienlijk minder dan die van betonstaal zelf. De toelaatbare rek van gewapend beton als functie van de rek van het betonstaal is onder andere onderzocht in Denemarken [5]. De resultaten hiervan zijn getoond in figuur 7. Hieruit blijkt dat de toelaatbare rek in gewapend beton bij gangbare wapeningspercentages in de praktijk ($\rho_s = 0,3\%-1,0\%$) en klasse A of B betonstaal ongeveer 15%-45% van de toelaatbare rek van het betonstaal is. Dit is omgerekend voor gewapend met beton met betonstaal klasse A $\epsilon_u = 0,45\%-1,35\%$ en klasse B $\epsilon_u = 0,75\%-2,25\%$. Dit is aanzienlijk minder dan de benodigde rekken voor kabelwerking met capaciteiten volgens NEN-EN 1991-1-7,

zelfs wanneer de constructie monoliet (volledig sterke verbinding) is uitgevoerd.

Hout

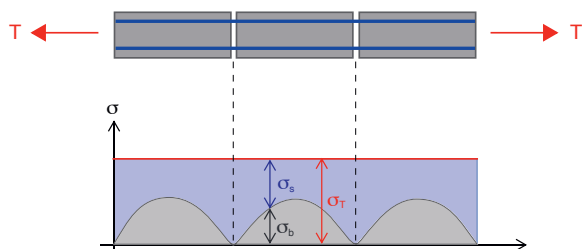
Een houten balk bezwijkt elastisch op trek en kent geen plastisch gedrag. De (elastische) breuk rek voor GL24h bijvoorbeeld is $\epsilon_u = \epsilon_t = (16,5/11600) \cdot 100\% = 0,14\%$. Dit is ordes kleiner dan de benodigde waarden uit tabel 1. Daarnaast is bij hout bekend dat de verbindingen vaak de zwakste schakel zijn en bepalend zijn voor de staafafmetingen om de verbindingen in de staaf kwijt te kunnen. In dat geval moet de volledige verplaatsing door kabelwerking ter plaatse van de verbinding worden opgenomen. Ter illustratie: een balklengte van 3,0 m veroorzaakt bij een rek van 19,5% een verlenging van 585 mm, ofwel 293 mm per verbinding. Zonder verder onderzoek te doen kan worden geconcludeerd dat dit voor normale houtverbindingen niet opneembaar is.

Conclusie

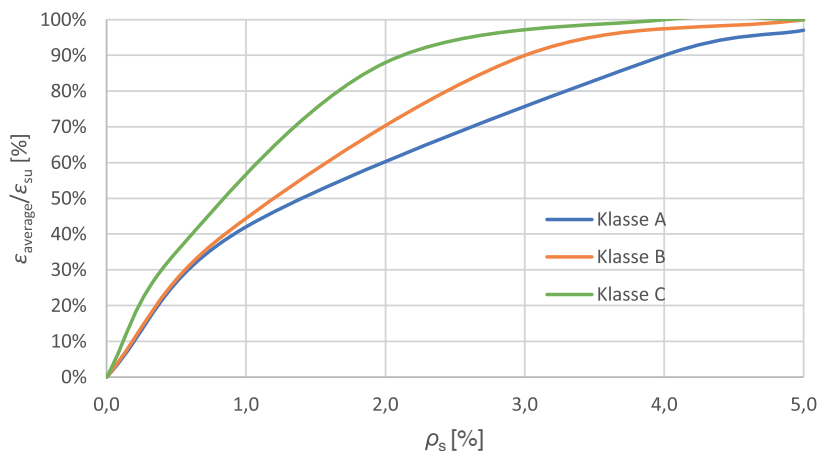
De rekken zijn voor horizontale trekbanden gedimensioneerd met [2] te groot om met kabelwerking een alternatieve draagweg te kunnen realiseren. Trekbanden in [2] zijn dus bedoeld voor de (strategie) samenhang. Een erg zinvolle en functionele strategie, maar duidelijk anders dan die van een alternatieve draagweg.

Hoe ontwerpen op kabelwerking?

Om kabelwerking te kunnen laten optreden, moeten de (plastische) rekken voldoende klein blijven om breuk te voorkomen. Uit voorgaande paragrafen bleek dat monoliete, doorgaande of volledig sterke verbonden



5 Schematische weergave van het gedrag van een gewapend betonnen staaf op trek



6 Invloed van het wapeningspercentage op de breukrek van een gewapende betonnen trekstaaf. De breukrek is uitgedrukt als functie van de breukrek van het betonstaal

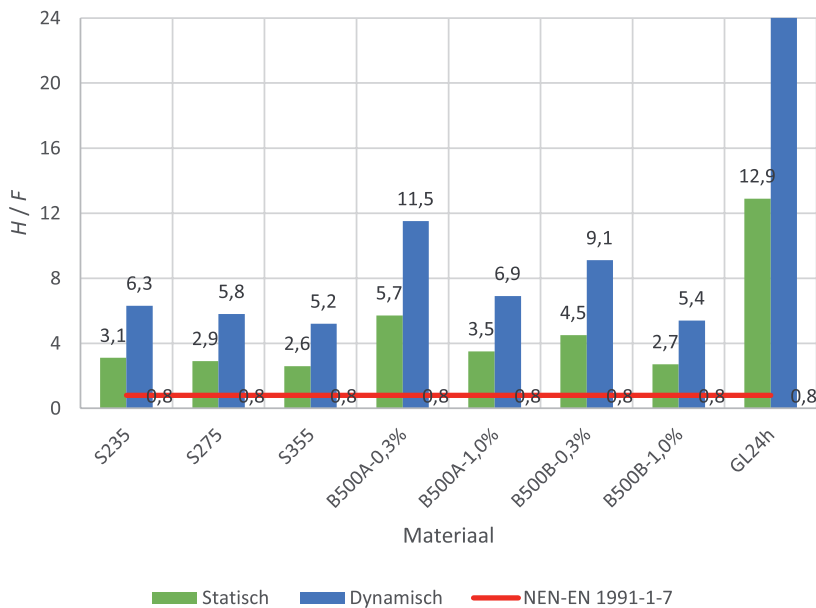
constructies hiervoor het meeste potentie hebben. Bij prefab betonconstructies geldt een andere rekenmethode [7] en blijkt dat de hoeveelheid wapening voor kabelwerking meer is dan praktisch uitvoerbaar is. Dit wordt daarom verder buiten beschouwing gelaten.

Een ander belangrijk aspect is de snelheid van bezwijken. Tot dusver is uitgegaan van een statische situatie, waarbij de belasting en de verplaatsing in de kabel langzaam wordt opgebouwd. Bij plotseling bezwijken van bijvoorbeeld een kolom, ontstaat een dynamisch effect doordat de kabel initieel recht is en in een zeer korte tijd een verticale verplaatsing ondergaat. De statische verplaatsing moet dan met een factor φ_{dyn} worden vermenigvuldigd [2]:

$$u_{\text{dyn}} = \varphi_{\text{dyn}} u_{\text{stat}} \quad (7)$$

Bij plotseling bezwijken geldt $\varphi_{\text{dyn}} = 2,0$ (stapbelasting, artikel C.2.2(3) [2]) en bij zeer langzaam (statisch) bezwijken geldt $\varphi_{\text{dyn}} = 1,0$. De waarde van $\varphi_{\text{dyn}} = 2,0$ kan voor plastisch vervormde kabels ook worden bewezen met behulp van het principe van arbeid en energie. Dit bewijs valt buiten dit artikel.

Wanneer de invloed van de buigrekken ter plaatse van de knikpunten wordt verwaarloosd en de maximale rek van een materiaal bekend is, kunnen formules (4a) en (6a) worden gebruikt om de kabelkrachten te bepalen. Zoals eerder gesteld is de invloed van de buigrekken ter plaatse van de knikpunten wel essentieel voor →



7 Horizontaalcrachten bij zuivere kabelwerking voor verschillende materialen

Tabel 2 Maximale rekken, relatieve doorbuigingen en kabelkrachten voor verschillende materialen bij zuivere kabelwerking van constructies met volledig sterke verbindingen

		toelaatbare plastische rek	verticale verplaatsing	statisch ($\varphi_{\text{dyn}} = 1$)	dynamisch ($\varphi_{\text{dyn}} = 2$)
		ϵ_u [-]	u/L [-]	H/F [-]	H/F [-]
constructiestaal	S235	0,017	0,16	3,1	6,3
	S275	0,020	0,17	2,9	5,8
	S355	0,025	0,19	2,6	5,2
betonstaalklasse A	$\rho_s = 0,3\%$	0,005	0,09	5,7	11,5
	$\rho_s = 1,0\%$	0,014	0,15	3,5	6,9
betonstaalklasse B	$\rho_s = 0,3\%$	0,008	0,11	4,5	9,1
	$\rho_s = 1,0\%$	0,023	0,19	2,7	5,4
hout	GL24h	0,001	0,04	12,9	25,8

de bezwijklast en zijn de uitkomsten van deze formules waarschijnlijk nog te gunstig. Hiervoor is meer onderzoek nodig. Uitgaande van een parabolische kabelvorm kan de volgende ontwerpformule worden bepaald:

$$\frac{H}{F} = \frac{1}{2} \frac{L}{u} = \frac{\varphi_{\text{dyn}}}{2} \sqrt{\frac{2}{3\varepsilon}} \quad (8)$$

Deze formule is ingevuld met de maximale toelaatbare rekken uit de vorige paragraaf. De resultaten staan in tabel 2 en figuur 7. De kabelkrachten bij zowel constructiestaal als gewapend beton zijn aanzienlijk hoger dan $H/F = 0,8$ die in NEN-EN 1991-1-7 wordt aangehouden. Bij hout valt het op dat de relatieve doorbuiging erg klein moet zijn om de rekken te beperken en dat daardoor zeer hoge kabelkrachten ontstaan. Een alternatieve draagweg op basis van buiging lijkt bij hout daarom logischer dan met kabelwerking.

Bij interne kabels die loodrecht op elkaar liggen en een ongelijke kabellengte hebben (fig. 1), moet nog een correctie op de kabelkracht in de lange kabel (L_2) worden gemaakt. Beide kabels buigen evenveel door, maar in de kortste kabel (L_1) ontstaat de hoogste rek (zie ook formules (3a) en (5a)). Dit bepaalt de toelaatbare doorbuiging van beide kabels. De kabelkracht in de korte kabel (H_1/F_1) kan worden bepaald met formule (8). De kabelkracht in de lange kabel kan dan als volgt worden berekend:

$$\frac{H_2}{F_2} = \frac{H_1}{F_1} \frac{L_2}{L_1} \quad (9)$$

Ten slotte moet worden opgemerkt dat kabelwerking bij hoekkolommen niet mogelijk is, omdat er dan geen evenwicht in de kabel mogelijk is. Hier is dus geen alternatieve draagweg met kabelwerking mogelijk (maar wel samenhang!).

Conclusie en aanbeveling

Trekbanden zijn een zinvolle robuustheidsmaatregel om de samenhang van de constructie te waarborgen. Samenhang wil zeggen: kolommen en wandelementen aan de bouwconstructie bevestigen. Hoewel de norm impliceert dat met de dimensioneringsregels van A.5.1 [2] voor horizontale trekbanden ook een alternatieve draagweg met kabelwerking mogelijk is, blijkt dit uit deze beschouwing niet het geval. Een alternatieve draagweg met kabelwerking is wel mogelijk, maar dan moeten de kabels op aanzienlijk hogere trekkrachten worden gedimensioneerd dan in A.5.1 [2] is aangegeven. Daarnaast is meer onderzoek nodig om invloed

van de rotaties ter plaatse van de knikpunten op de bezwijkbelasting van de constructie bij kabelwerking te onderzoeken.

Als laatste verdient het aanbeveling om de definitie van robuustheid in paragraaf A.4.1 [2] aan te passen naar die van hoofdstuk 3.3(1)P [2]. Hierin staat: "Bij het ontwerp moet de mogelijkheid van bezwijken van de constructie die ontstaat door een onbekende oorzaak, zijn beperkt". Dit sluit beter aan bij de strategieën voor samenhang (en kritische elementen) en voorkomt onbedoelde misinterpretaties. ●

Referenties

- 1 Wijte, S., Eisen aan robuustheid. *Cement* 2015/4.
- 2 NEN-EN 1991-1-7: Belastingen op constructies, stootbelastingen en ontploffingen.
- 3 NEN-EN 1993-1-1: Ontwerp en berekening van staalconstructies, algemene regels en regels voor gebouwen staalconstructies.
- 4 NEN 6008: Betonstaal.
- 5 Hagsten, L.G., Rasmussen, A.B., Fisker, J., Strain capacity of reinforced concrete members subjected to uniaxial tension. *Procedia Engineering* 172 (2017), p. 338-346.
- 6 Goeverneur, D., Experimental and Numerical Analysis of Tensile Membrane Actions in Reinforced Concrete Slabs in the Framework of Structural Robustness. PhD-thesis U-Gent, 2014.
- 7 Heezemans, J.J., Het voorkomen van voortschrijdende instorting bij prefab betonconstructies. MSc-thesis TU-Eindhoven, 2012.