
Dwarskrachtweerstand gebaseerd op scheurwijdte

Dwarskracht in de volgende generatie Eurocode betonconstructies (1)

Betonnen plaatconstructies kunnen worden uitgevoerd zonder dwarskrachtwapening, als de rekenwaarde van de optredende dwarskracht V_{Ed} kleiner is dan de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand van de plaat zonder dwarskrachtwapening $V_{Rd,c}$. De huidige formulering voor $V_{Rd,c}$ is empirisch afgeleid. Nieuwe inzichten laten duidelijk de beperkingen van deze aanpak zien. Daarom wordt deze formule vervangen in de volgende generatie Eurocode betonconstructies. De aangepaste formule relateert de dwarskrachtcapaciteit aan de scheurwijdte en de ruwheid van de scheur.

In dit artikel wordt de dwarskrachtweerstand besproken voor elementen zonder normaalkracht en waarbij de minimale dwarskrachtweerstand niet maatgevend is (die onderwerpen zullen in twee vervolgartikelen worden behandeld). Wanneer geen normaalkracht aanwezig is ($N_{Ed} = 0$) en de minimale dwarskrachtweerstand niet maatgevend is (v_{min} volgens formule 6.2b in de huidige Eurocode), volgt de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand voor elementen zonder dwarskrachtwapening ($V_{Rd,c}$) uit formule (verkorte weergave van formule 6.2a):

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d$$

waarin:

$C_{Rd,c}$ is de rekenwaardefactor, in Nederland gelijk aan de aanbevolen waarde van 0,12

k is de factor voor het schaafeffect, die gelijk is aan $1 + \sqrt{(200/d)}$, met $k \leq 2,0$

ρ_1 is de wapeningsverhouding voor de langswapening, die gelijk is aan $A_{sl} / (b_w d)$, met $\rho_1 \leq 0,02$

d is de effectieve hoogte van de doorsnede

b_w is gelijk aan de kleinste breedte van de dwarsdoorsnede in de zone onder trek

f_{ck} is de karakteristieke cilinderdruksterkte van beton

Deze formule is gebaseerd op de regressieanalyse volgens Rimmel [1]. Het was destijds de gedachte (Zsutty [2] en Rafla [3]) dat veel parameters de dwarskrachtweerstand van elementen zonder dwarskrachtwapening kunnen beïnvloeden, en dat het ontwikkelen van een formule gebaseerd op het fysische gedrag zou leiden tot een formule die te complex zou zijn voor toepassing in de praktijk. Voor de afleiding van de empirische formule is gebruikgemaakt van onderzoek door König en Fischer [4], waarvoor 176 experimenten zijn geselecteerd. Dit heeft geresulteerd in de aanbevolen waarde voor $C_{Rd,c}$

auteurs



DR. IR. YUGUANG YANG

Universitair Docent
Technische Universiteit
Delft



DR. IR. MARCO ROOSEN

Senior Specialist
Rijkswaterstaat

van 0,12. In Duitsland is in plaats hiervan gebruikgemaakt van de veel uitgebreidere ACI-DAfStb dwarskrachtdatabase, opgesteld door DAfStb (Deutschen Ausschuss für Stahlbeton) en ACI (American Concrete Institute). Op basis hiervan is in Duitsland de waarde van $C_{Rd,c}$ vastgesteld op 0,10. Dit toont aan dat een empirische formule afhankelijk is van de gebruikte dataset.

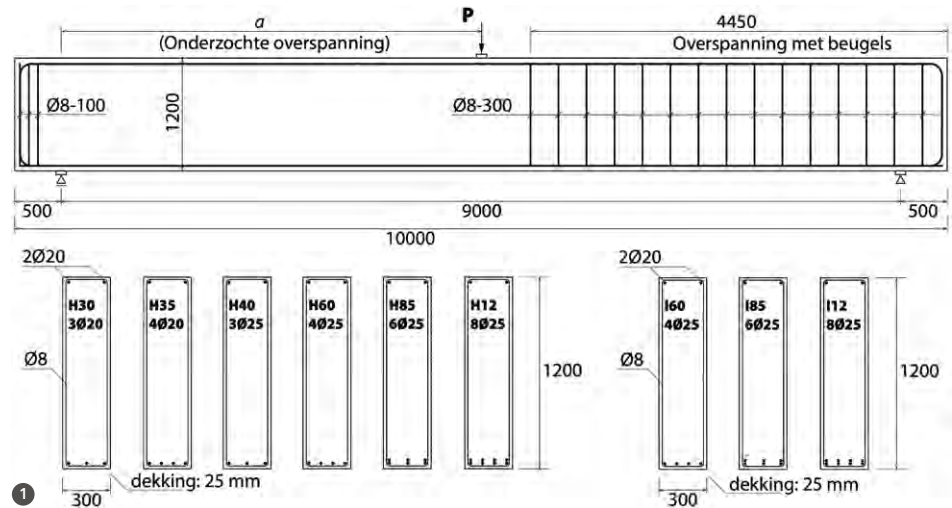
Nadelen huidig empirisch model

Ondanks de inspanningen om de empirische formule te verbeteren door van een uitgebreidere set experimenten gebruik te maken, zoals in Duitsland, is het grootste nadeel van formule 6.2a dat het een empirische formule is, die uitsluitend is gebaseerd op regressieanalyse. Het afgelopen decennium, waarin nieuw experimenteel onderzoek heeft plaatsgevonden en waarin theorieën zich verder hebben ontwikkeld, is dit nadeel steeds duidelijker geworden.

In het achtergronddocument horende bij de volgende generatie Eurocode betonconstructies [18] worden vijf wezenlijke aspecten genoemd die ten grondslag liggen aan de wijzigingen van de formule voor $V_{Rd,c}$:

- 1 De huidige formule onderschat de invloed van het schaafeffect.
- 2 De huidige formule is te conservatief voor elementen onderworpen aan axiale trek.
- 3 De invloed van de maximale korrelafmeting wordt niet meegenomen in de formule.
- 4 Het effect van de dwarskrachtslankheid wordt niet meegenomen in de huidige formule. Hierdoor is de formule mogelijk onveilig voor slanke elementen en te conservatief voor gedrongen elementen.
- 5 De dwarskrachtweerstand is empirisch afgeleid op basis van bestaande experimenten. Dit is potentieel gevaarlijk wanneer de huidige formule wordt gebruikt buiten het bereik van een parameter waarvoor de formule empirisch is afgeleid.

Dwarskrachtslankheid De dwarskrachtslankheid is voor een ligger op twee steun- →



punten, belast met een puntlast, gedefinieerd als de verhouding tussen de lengte van de dwarskrachtoverspanning a en de effectieve hoogte d . Hierbij is de dwarskrachtoverspanning a gelijk aan de hart-op-hartafstand tussen de aangebrachte puntlast en de ondersteuning (fig. 1). Meer generiek, dus ook voor doorgaande liggers en verdeelde belastingen, wordt de dwarskrachtslankheid gedefinieerd als M_{Ed}/V_{Ed} . Hierin is M_{Ed} het buigend moment en is V_{Ed} de dwarskracht.

In de nieuwe Eurocode wordt de dwarskracht gerelateerd aan de scheurwijdte door middel van de dwarskrachtslankheid: hoe hoger het moment, hoe hoger, bij een gegeven V_{Ed} , de dwarskrachtslankheid, hoe hoger de rek in de langswapening, hoe groter de scheurwijdte en dus hoe lager de dwarskrachtweerstand. De tussen deze parameters aangenomen relaties worden in het vervolg van het artikel verder toegelicht.

Bereik parameters Als aanvulling op het genoemde vijfde aspect is volgens de auteurs van dit artikel eveneens de verdeling van de parameters binnen het beschouwde bereik van belang. Om dit te demonstreren, kan worden gekeken naar de ruim 1000 betonnen plaatbruggen in het Nederlandse Rijkswegennet. De wapeningsverhouding voor de langswapening ρ_l van deze bruggen is relatief laag, namelijk tussen 0,6% en 1,2%. Tevens heeft meer dan de helft van de plaat-

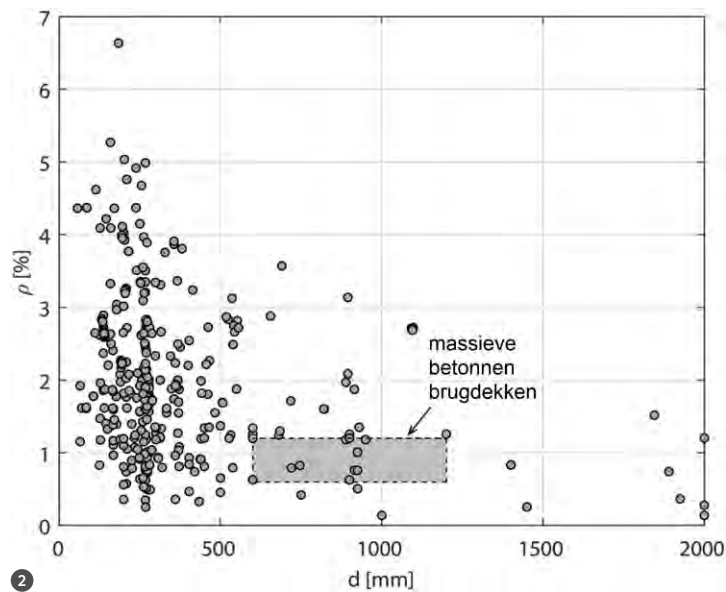
bruggen een grotere effectieve hoogte dan 600 mm. Wanneer naar bijvoorbeeld de 784 relevante experimenten uit de ACI-DafStb dwarskrachtdatabase wordt gekeken, hebben maar tien proefstukken een grotere hoogte dan 600 mm en een ρ_l van tussen de 0,6% en de 1,2%. Dit is getoond in figuur 2 (het grijs gemarkeerde gebied). Wanneer de experimenteel gebruikte data niet representatief zijn voor de beoogde toepassing van de formule, kan de formule onnauwkeurige voorspellingen geven die mogelijk onveilig zijn. Omdat de formule geen fysische basis heeft, wordt een dergelijke invloed ook niet 'vanzelf' gecorrigeerd.

Invloed effectieve hoogte

Het overschatten van de dwarskrachtweerstand voor grote effectieve hoogten (het eerdergenoemde schaafeffect) is een goed voorbeeld van dat de experimenteel gebruikte data niet representatief zijn voor de toepassing in de praktijk.

Onderzoek TU Delft Dat voor grotere effectieve hoogten de dwarskrachtweerstand wordt overschat, blijkt onder andere uit experimenteel onderzoek dat recentelijk in opdracht van Rijkswaterstaat is uitgevoerd door de TU Delft [9-11]. Dit onderzoek richtte zich op de dwarskrachtweerstand van gewapende betonnen elementen zonder dwarskrachtwapening. De hierbij gebruikte parameters zijn representatief voor de bestaande massieve betonnen brugdekken in

Een van de belangrijke uitgangspunten bij het ontwikkelen van een model voor de dwarskrachtweerstand is het verbeteren van de invloed van het schaafeffect

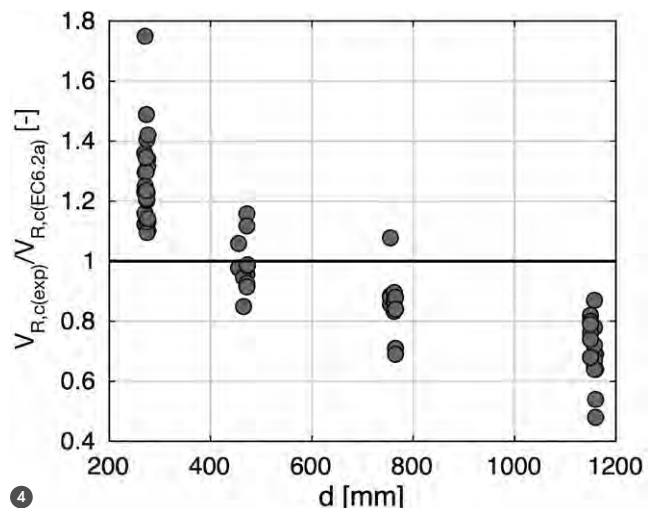


Nederland. Zo had een deel van de proefstukken een effectieve hoogte van 1200 mm en was een wapeningsverhouding van de langwapening gebruikt tussen 0,3% en 1,2%. Een typische testopstelling voor de uitgevoerde dwarskrachtproeven is gegeven in figuur 1. Hierin zijn eveneens de geometrie en de wapening aangegeven. Foto 3 toont een proefstuk dat is bezweken op dwarskracht.

In figuur 4 zijn de experimenteel gevonden waarden van de dwarskrachtweerstand, $V_{R,c(exp)}$, vergeleken met de dwarskrachtweerstand die is voorspeld met formule 6.2a van de huidige Eurocode,

$V_{R,c(EC6.2)}$. Hierbij is $V_{R,c(EC6.2)}$ in tegenstelling tot formule 6.2a, gebaseerd op gemiddelde waarden zonder partiële veiligheidsfactoren. Bij een ideaal model is $V_{R,c(EC6.2)}$ altijd gelijk aan $V_{R,c(exp)}$. De ratio van $V_{R,c(exp)}$ en $V_{R,c(EC6.2)}$ is in deze figuur uitgezet tegen de effectieve hoogte d . De ratio van $V_{R,c(exp)}$ en $V_{R,c(EC6.2)}$ neemt duidelijk af bij toename van d .

Voor een effectieve hoogte van de proefstukken van nabij de 1200 mm, is de voorspelde dwarskrachtweerstand altijd hoger dan de werkelijke dwarskrachtweerstand. In een extreem geval is deze verhouding zelfs kleiner dan 0,5. Dit betekent dat de huidige Eurocode de werkelijke dwars- →



2 Verdeling van effectieve hoogte d en wapeningsverhouding ρ , voor de relevante experimenten in de ACI-DAFStb dwarskrachtdatabase [8]

3 Proefstuk H351 na bezwijken op dwarskracht ($d = 1160$ mm, $\rho_l = 0,36\%$)

4 Vergelijking tussen experimentele en de voorspelde (formule 6.2a) weerstand voor de Delftse dwarskrachtdataset

krachtweerstand een factor 2 overschat. Duidelijk is dat formule 6.2a het schaaleffect van de dwarskrachtweerstand onderschat. Met andere woorden, de factor k in formule 6.2a houdt onvoldoende rekening met de reductie van de gemiddelde schuifspanningsweerstand met een toenemende effectieve hoogte.

Toronto dwarskrachtproef Een ander sprekend voorbeeld van een relevant experiment is de Toronto dwarskrachtproef [12] (foto 5). De proef is uitgevoerd op een betonnen balk met een hoogte van bijna 4 m. Voorafgaand aan het dwarskrachtexperiment zijn voorspellingen gedaan met de dwarskrachtformules uit de belangrijkste ontwerprichtlijnen wereldwijd, waaronder de Eurocode. Het experimentele resultaat toonde aan dat vrijwel alle voorspellingen de invloed van het schaaleffect onderschatten. Ook voor dit experiment overschatte de huidige Eurocode

de werkelijke dwarskrachtweerstand met een factor 2.

Het verbeteren van de invloed van het schaaleffect is een belangrijke uitgangspunt geweest bij het ontwikkelen van een model voor de dwarskrachtweerstand in de nieuwe Eurocode. De commissieleden van TG4 stelden bovendien voor om uit te gaan van een model met een duidelijke fysische basis, gezien de beperkingen die zijn ondervonden met de huidige empirisch afgeleide formule.

Relatie tussen dwarskrachtweerstand, scheurwijdte en ruwheid scheur

Naast het uitvoeren van het experimenteel onderzoek hebben meerdere onderzoekers gewerkt aan het ontwikkelen van nieuwe theoretische modellen die het op dwarskracht bezwijken van elementen zonder dwarskrachtwapening kunnen verklaren, zoals Vecchio en Collins [13], Yang [14], Cavagnis [15] en Classen [16]. Bij de experimentele onderzoeken is veelvuldig gebruik gemaakt van *Digital Image Correlation* (DIC). DIC is een techniek waarbij een pixelpatroon wordt aangebracht op de oppervlakte van een proefstuk, waarvan gedurende het uitvoeren van het experiment digitale foto's worden gemaakt. Op basis van een analyse van de foto's kunnen de relatieve verplaatsingen worden bepaald. Daarmee is het mogelijk, beter dan in het verleden, een gedetailleerde analyse te maken van het zich openen van een kritische dwarskrachtscheur (fig. 6). Op deze manier kan de overdracht van schuifspanningen langs een kritische dwarskrachtscheur beter worden onderzocht. Het is echter nog steeds niet mogelijk gebleken deze ontwikkelingen direct te implementeren in een weerstandsformule die geschikt is voor de praktijk. De nieuw ontwikkelde modellen hebben echter wel geleid tot het inzicht dat de dwarskrachtweerstand van gewapende betonnen elementen zonder dwarskrachtwapening gerelateerd kan worden aan het zich openen van een kritische dwarskrachtscheur. Ook de *Critical Shear Crack Theory* (CSCT), een semi-empirisch model dat is ontwikkeld door Muttoni [17], gaat uit van dit inzicht.

ARTIKELENSERIE DWARSKRACHT IN DE VOLGENDE GENERATIE EUROCODE

In 2012 werd in Nederland de huidige Eurocode NEN-EN 1992-1-1 geïntroduceerd als de officiële norm voor het ontwerp en de berekening van betonconstructies. De opvolger hiervan zal naar verwachting begin 2026 beschikbaar komen. Deze is inmiddels zo ver gered dat hierover formeel kan worden gestemd. Het is niet de verwachting dat de norm nog zal wijzigen.

Voor de wijze waarop de dwarskrachtweerstand moet worden bepaald, is fundamenteel gewijzigd. Deze wijzigingen zullen aanzienlijke gevolgen hebben voor de bouwpraktijk. Aan de dwarskrachtformules is sinds 2012 gewerkt door een taakgroep binnen CEN (CEN/TC250/SC2/WG1/TG4). In Nederland zijn onderzoekers van de TU Delft, TNO en Rijkswaterstaat hierbij betrokken geweest.

In een serie artikelen wordt de aangepaste methodiek voor het bepalen van de dwarskrachtweerstand beschreven en vergeleken met de huidige methodiek. Hierbij zal ook aandacht zijn voor de vraag of het wijzigen van de dwarskrachtregels wel nodig is. Met deze serie artikelen wordt getracht inzicht te geven in de achtergronden van de volgende generatie Eurocode betonconstructies, zodat op deze manier kan worden bijgedragen aan een soepelere invoering in Nederland.

Het eerste (onderhavige) artikel richt zich op de dwarskrachtweerstand van elementen zonder dwarskrachtwapening. Over dit onderwerp zullen nog twee vervolgartikelen verschijnen, namelijk (i) het effect van de normaalkracht op de dwarskrachtweerstand en (ii) de minimale dwarskrachtweerstand van elementen zonder dwarskrachtwapening. Ook over de dwarskrachtweerstand van elementen met dwarskrachtwapening zal een artikel volgen. Vervolgens zal een artikel worden gewijd aan het bepalen van de dwarskrachtweerstand bij de beoordeling van bestaande constructies. De serie artikelen zal worden afgesloten met twee artikelen over de impact van de wijzigingen voor de bouwpraktijk, één voor infrastructurele werken en één voor de utiliteitsbouw.



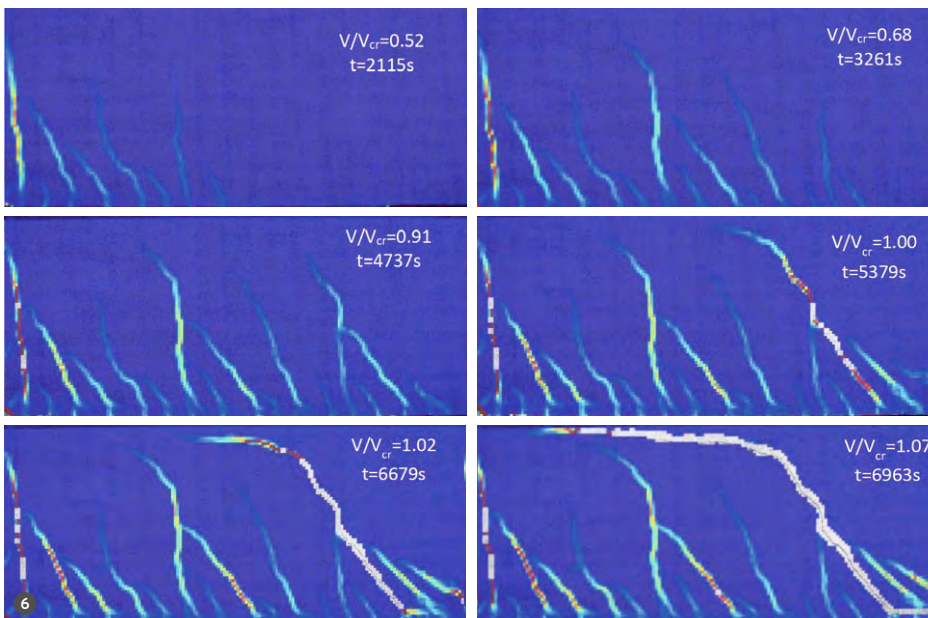
Deze CSCT vormt de basis voor de dwarskrachtweerstand in de nieuwe Eurocode.

In de CSCT zijn een aantal vereenvoudigingen doorgevoerd, zodat een praktische dwarskrachtformule voor de praktijk kon worden ontwikkeld met behoud van het eerdergenoemde fysische inzicht. Zo is als vereenvoudiging aangenomen dat het zich openen van een dwarskrachtscheur kan worden uitgedrukt met de gemiddelde scheurwijdte. Deze gemiddelde scheurwijdte w kan worden gerelateerd aan het product van de

rek van de langswaopening (ϵ_v) en de scheurafstand, waarvoor voor de eenvoud d wordt aangehouden. Aangezien ϵ_v direct gerelateerd is aan het buigend moment M ($\epsilon_v = M / z_{As} E_s$), kan de dwarskrachtslankheid (a / d of M_{Ed} / V_{Ed}) direct in de weerstandsformule worden opgenomen. In de CSCT is verder de dwarskrachtweerstand van elementen met verschillende dwarsdoorsneden en de cilinderdruksterkten genormaliseerd met de term: $V_{R,c} / (b_w d \sqrt{f_{cm}})$.

In tegenstelling tot volledig empirische of volledig theoretische modellen, is bij →

Door uit te gaan van een formule met een fysische basis wordt de invloed van de dwarskrachtslankheid (of de scheurwijdte) meegenomen net als de invloed van de maximale korrelafmeting



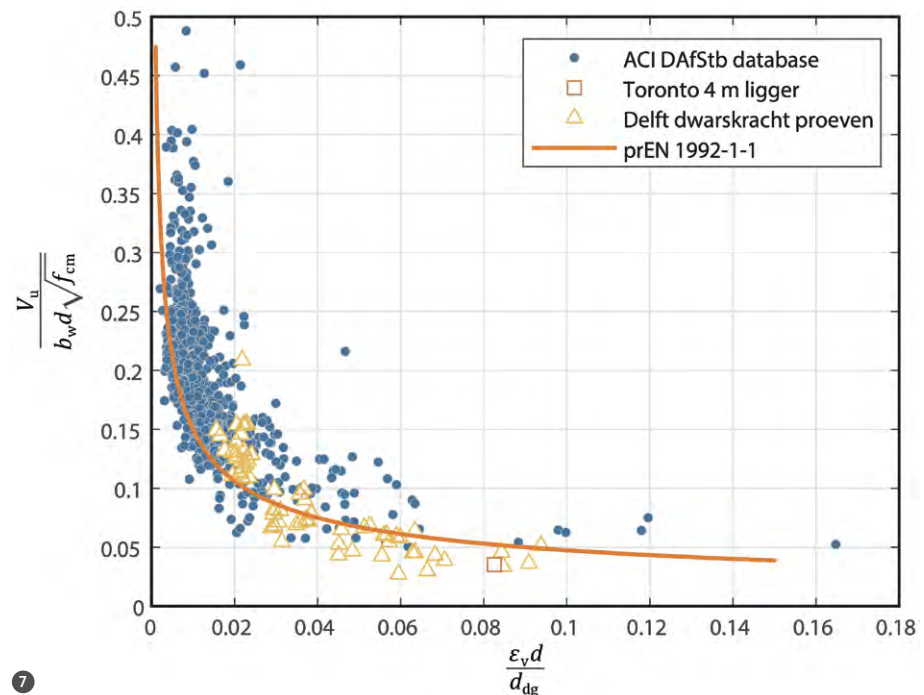
5 Dwarskrachtexperiment op een betonnen balk van 4 m hoog in Toronto

6 De ontwikkeling van scheuren tijdens een dwarskrachtexperiment aan de TU Delft verkregen uit DIC-analyse

de ontwikkeling van de CSCT een tussenstap genomen. Hierbij is aangenomen dat $V_{Rc} / (b_w d \sqrt{f_{cm}})$ kan worden gerelateerd aan de gemiddelde scheurwijdte w . In plaats van een complex model te ontwikkelen, heeft CSCT een regressieanalyse toegepast om een eenvoudige formule te kunnen afleiden. Deze regressieanalyse is gebaseerd op een selectie van in totaal 285 experimenten. Figuur 7 toont de uit de regressieanalyse afgeleide hyperbolische vergelijking. De parameter d_{dg} , die wordt gebruikt in de term $\varepsilon_v d / d_{dg}$, refereert aan de gemiddelde ruwheid van de kritische scheur en is afhankelijk van de gebruikte maximale korrelafmeting en de cilinderdruksterkte van beton.

In de nieuwe Eurocode is de hyperbolische vergelijking alleen opgenomen in de annex voor de beoordeling van bestaande constructies (prEN 1992-1-1, Annex I). Voor de hoofdtekst van de nieuwe Eurocode is deze hyperbolische relatie verder vereenvoudigd door Cavagnis [15], zodat de vorm lijkt op formule 6.2a in de huidige Eurocode. Om iteraties te voorkomen, is deze formule in een gesloten vorm afgeleid. De uiteindelijke formulering wordt verderop in dit artikel gegeven en verder uitgelegd (onder kopje

'Schuifspanningsweerstand'). Een nadelig gevolg van deze eenvoudige formulering is dat voor elementen met een effectieve hoogte groter dan 500 mm nog steeds een correctiefactor k_{vd} nodig is om het schaaleffect te corrigeren ($k_{vd} = 1,35 (100 \rho_1 d / d_{dg})^{1/10}$). Het voordeel van de gehanteerde aanpak is dat, in tegenstelling tot veel puur theoretische modellen, een niet al te ingewikkeld model kon worden afgeleid. Anderzijds biedt het model nog steeds een duidelijke fysieke verklaring van het dwarskrachtgedrag. De formule is daarom minder gevoelig voor de selectie van de data in vergelijking tot een puur empirisch afgeleide formule. Hoewel hij is afgeleid van een veel kleinere dataset, blijkt de formule de dwarskrachtweerstand goed te kunnen voorspellen voor een zeer uitgebreide dataset, waaronder de ACI-DAfStb dwarskrachtdatabase, de Delftse dwarskrachtproeven op platen en zelfs de 4 m hoge balk die is beproefd in Toronto (fig. 7). Hoewel bij deze dwarskrachtexperimenten zeer verschillende combinaties van parameters zijn gebruikt, hebben alle gegevenspunten een zeer sterke cohesie. Een gedetailleerde afleiding van de formule naar zijn huidige vorm is te vinden in het achtergronddocument van



7

de volgende generatie Eurocode beton-constructies [18].

Gezien de fysische basis van de formule kon deze op een consistente manier worden uitgebreid naar elementen zonder dwarskrachtwapening onderworpen aan een axiale druk (voorgespannen platen) of trek. In een volgend artikel zal verder worden ingegaan op de het effect van de normaalkracht op de dwarskrachtweerstand van elementen zonder dwarskrachtwapening.

Schuifspanningsweerstand

Nu de theoretische achtergrond is beschreven, zal de formulering volgens de nieuwe Eurocode worden toegelicht. In de nieuwe Eurocode wordt niet langer de dwarskrachtweerstand beschreven maar de schuifspanningsweerstand. Dit vereenvoudigt de formulering en maakt de in de praktijk gevonden weerstanden beter herkenbaar. De rekenwaarde van de schuifspanningsweerstand van elementen zonder dwarskrachtwapening kan worden bepaald met de formule:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,66}{\gamma_v} \left(100 \rho_l f_{ck} \frac{d_{dg}}{d} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Hierin is γ_v de partiële factor voor de dwarskrachtweerstand als er geen dwarskrachtwapening aanwezig is. De parameter d_{dg} beschrijft de gemiddelde ruwheid van de kritische scheur. Hierbij is d_{dg} gelijk aan:

→ $d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{\text{onder}} (\leq 40 \text{ mm})$ voor beton met $f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$

→ $d_{dg} = 16 \text{ mm} + D_{\text{onder}} (60/f_{ck})^2 (\leq 40 \text{ mm})$ voor beton met $f_{ck} > 60 \text{ MPa}$

Hierbij wordt met D_{onder} gerefereerd aan de korreldiameter en is D_{onder} gedefinieerd als de kleinste waarde van de grootste zeefmaat D voor de grofste korrelgroep volgens de specificatie van het beton. Wanneer in de praktijk geen ondergrens wordt gehanteerd, zal D_{onder} moeten worden voorgeschreven door de constructeur. De dwarskrachtweerstand neemt toe wanneer een grotere maximale korrelafmeting wordt gebruikt door toename van de scheurwrijving (aggregate interlock). Voor $f_{ck} > 60 \text{ MPa}$ is deze toename beperkter, omdat de scheuren zich door het

toeslagmateriaal in plaats van eromheen vormen. Hierdoor neemt de relatieve toename van scheurwrijving af.

De parameter d is de effectieve hoogte. In de formule kan voor de eenvoud d worden ingevuld om de weerstand te bepalen. Op deze manier wordt zonder veel inspanning een conservatieve waarde voor $\tau_{Rd,c}$ gevonden. Maar de d kan ook worden vervangen door de mechanische dwarskrachtoverspanning a_v die, onder de voorwaarde dat $a_{cs} < 4d$, gelijk is aan:

$$a_v = \sqrt{\frac{a_{sc}}{4} \cdot d}$$

In deze formule is a_{cs} de effectieve dwarskrachtoverspanning gerelateerd aan de toetsdoorsnede. Hierbij is a_{cs} gelijk aan $|M_{Ed} / V_{Ed}| \geq d$. Als a_v in plaats van d wordt gebruikt, wordt rekening gehouden met de invloed van het moment (en dus de rek in de langswapening en de gemiddelde scheurwijdte) op de dwarskrachtweerstand. De maatgevende toetsdoorsnede moet worden gezocht en voor elke toetsdoorsnede moet worden nagegaan welke belastingscombinatie leidt tot de maatgevende combinatie van snedekrachten. Hierdoor kan een hogere waarde voor de dwarskrachtweerstand worden gevonden dan wanneer eenvoudigweg d wordt ingevuld, zij het met aanzienlijk meer inspanning.

Voor het beoordelen van de dwarskrachtweerstand bij bestaande bouw wordt de weerstand expliciet gerelateerd aan de gemiddelde scheurwijdte. Dit komt tot uiting in de formule voor de rekenwaarde voor de schuifspanningsweerstand $\tau_{Rd,c}$ (Annex I.8.3.2(1)), die is gerelateerd aan het product van de rek in de langswapening ϵ_v en de effectieve hoogte d (de hyperbolische relatie, volgens figuur 7). Door gebruik te maken van de originele formule zonder vereenvoudigingen ontstaat meer flexibiliteit in de toepassing van de formule voor complexe gevallen.

De schuifspanningsweerstand $\tau_{Rd,c}$ moet groter zijn dan de gemiddelde schuifspanning $\tau_{Ed,c}$. Voor platen wordt de

schuifspanning gevonden door de rekenwaarde van de dwarskracht per breedte-eenheid v_{Ed} te delen door z , de hefboomsarm voor het berekenen van de schuifspanning. Deze hefboomsarm z is gelijkgesteld aan $0,9d$. Voor liggers wordt $\tau_{Rd,c}$ gevonden door de rekenwaarde van de dwarskracht in de beschouwde doorsnede V_{Ed} te delen door de minimale breedte b_w en z .

Samengevat

In de nieuwe Eurocode is de maximale dwarskrachtweerstand gerelateerd aan de gemiddelde scheurwijdte en de ruwheid van de scheur. Vanwege de fysische basis is de formule minder gevoelig voor de selectie van de data in vergelijking tot een puur empirisch afgeleide formule.

→ Door uit te gaan van een formule met een fysische basis wordt de invloed van de dwarskrachtslankheid (of de scheurwijdte)

meegenomen evenals de invloed van de maximale korrelafmeting. Daarnaast wordt beter rekening gehouden met de invloed van het schaaleffect. Het effect van deze aspecten is in de huidige Eurocode onvoldoende beschouwd, waardoor de weerstand van (plaat-) elementen zonder dwarskrachtwapening significant kan worden onder- of overschat. → Het gebruik van een model met een fysische basis draagt bij aan het inzicht in het dwarskrachtgedrag en de wijze waarop verschillende parameters de weerstand beïnvloeden.

→ Om voor een optimaal ontwerp uit te kunnen gaan van de maximale dwarskrachtweerstand, is een aanzienlijke inspanning van de constructeur nodig. Hierdoor kan de formule voor dwarskrachtweerstand worden gezien als een stap terug in gebruiksgemak. Hierop wordt in een vervolgartikel verder ingegaan. ●

LITERATUUR

- 1 Rimmel, G., Zum Zugtragverhalten hochfester Betone und seinem Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit von schlanken Bauteilen ohne Schubbewehrung, in TH Darmstadt. 1992: Darmstadt.
- 2 Zsutty, T.C., Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests. *ACI Journal* 68(2), 1971, p. 138-143.
- 3 Rafla, K., Empirische Formeln zur Berechnung der Schubtragfähigkeit von Stahlbetonbalken (Empirical formulas for the calculation of shear capacity of reinforced concrete beams). *Strasse Brücke Tunnel* 23(12), 1971, p. 311-320.
- 4 König, G. and J. Fischer, Model Uncertainties Concerning Design Equations for the Shear Capacity of Concrete Members without Shear Reinforcement, *CEB Bulletin* No. 224. 1995, p. 117.
- 5 Reineck, K.-H., D.A. Kuchma, and B. Fitik, Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbetonbauteile mit und ohne Bügel. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 597, 2012.
- 6 Yang, Y., et al., Shear Capacity of 50 Years Old Reinforced Concrete Bridge Decks without Shear Reinforcement, in The 3rd Congress of the International Federation for Structural Concrete. 2010: Washington DC.
- 7 Yang, Y., et al., The shear capacity of reinforced concrete members with plain bars, in Structural faults and repair. 2016: Edinburg.
- 8 Reineck, K.H., et al., ACI-DAFStb Database of Shear Tests on Slender Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*, 2013. 110(5), p. 867-875.
- 9 Yang, Y., H. van der Ham, and M. Naaktgeboren, Shear capacity of RC slab structures with low reinforcement ratio – an experimental approach, in *fib symposium*. 2021: Lisbon.
- 10 Yang, Y. and R.T. Koekkoek, Measurement report on the transition between flexural and shear failure on RC beams without shear reinforcement. 2016, Delft University of Technology: Delft.
- 11 Yang, Y., Shear behaviour of deep RC slab strips (beams) with low reinforcement ratio. 2021, Delft University of Technology.
- 12 Collins, M.P., et al., The Challenge of Predicting the Shear Strength of Very Thick Slabs. *Concrete International* 37(11), 2015, p. 29-37.
- 13 Vecchio, F.J. and M.P. Collins, The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal* 83(2), 1986, p. 219-231.
- 14 Yang, Y., Shear Behaviour of Reinforced Concrete Members without Shear Reinforcement – A New Look at an Old Problem, in Department of Civil Engineering. 2014, Delft University of Technology: Delft, the Netherlands.
- 15 Cavagnis, F., Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models. 2017, EPFL: Lausanne.
- 16 Classen, M., Shear Crack Propagation Theory (SCPT) – The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement? *Engineering Structures*.
- 17 Muttoni, A. and M.F. Ruiz, Shear Capacity of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width. *ACI Structural Journal* 105(2) 2008, p. 163-172.
- 18 Muttoni, A., et al., Background document to subsections 8.2.1 and 8.2.2: Shear in members without shear reinforcement. 2021.