

Minimale schuifspannings- weerstand

Dwarskracht in de volgende generatie Eurocode
betonconstructies (3)



In de nieuwe Eurocode is een aangepaste formule voor de minimale schuifspanningsweerstand opgenomen. Ten opzichte van de formule in de huidige Eurocode zijn de ruwheid van de scheur en de aanwezige vloeispanning van het staal als nieuwe parameters opgenomen, wat bijdraagt aan een nauwkeurigere bepaling van de minimale schuifspanningsweerstand. Door de auteurs van dit artikel is geconstateerd dat bij de afleiding door de taakgroep binnen CEN enkele niet-conservatieve aannames zijn gedaan. Daarom is in dit artikel een verbeterde formule beschreven. Uit een vergelijking met proeven blijkt dat met deze verbeterde formule de minimale schuifspanningsweerstand veilig kan worden bepaald. Deze verbeterde formule is opgenomen in (concept) wijzigingsbladen bij de NEN-EN 1992-1-1+CI:2011/NB:2016+A1:2020 en bij de NEN 8702:2023.

Minimale schuifspanningsweerstand huidige Eurocode

In de huidige Eurocode is de dwarskrachtweerstand gerelateerd aan het langswapeningspercentage. Wanneer dit langswapeningspercentage terugloopt naar nul, zou in theorie ook de dwarskrachtweerstand naar nul teruglopen. Dit fenomeen is echter nooit geconstateerd bij experimenten. Dit komt omdat proefstukken met lage langswapeningspercentages altijd eerder zullen bezwijken op buiging. De laagst mogelijke dwarskrachtweerstand wordt daarom gevonden wanneer het vloeien van de langswapening en bezwijken op dwarskracht gelijktijdig optreden [1]. Juist naar dit specifieke bezwijkmechanisme is in het verleden onderzoek gedaan door de TU Delft (foto 1).

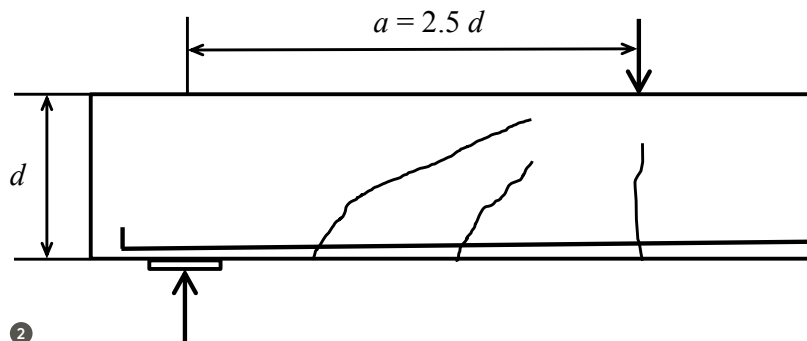
De minimale schuifspanningsweerstand is in eerste instantie afgeleid voor gewapende elementen. Het effect van de aanwezigheid van een normaalkracht op de minimale schuifspanningsweerstand wordt verderop in dit artikel toegelicht. Wanneer geen normaalkracht aanwezig is ($N_{Ed} = 0$), dan volgt rekenwaarde van de dwarskracht-

weerstand voor elementen zonder dwarskrachtwapening $V_{Rd,c}$ uit de formule (verkorte weergave van formule 6.2a in de huidige Eurocode):

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

In deze formule is:

- k De factor voor het schaal-effect, gelijk aan $1 + \sqrt{(200/d)}$, met $k \leq 2$
- ρ_1 De wapeningsverhouding voor de langswapening, die gelijk is aan $A_{sl}/(b_w d)$, met $\rho_1 \leq 0,02$
- d De effectieve hoogte van de doorsnede
- $b_w d$ Het effectieve dwarskrachtoppervlakte, waarbij b_w gelijk is aan de kleinste breedte van de dwarsdoorsnede in de zone onder trek
- f_{ck} De karakteristieke cilinderdruksterkte van beton
- $C_{Rd,c}$ De factor die is bepaald op basis van de resultaten van 176 experimenten van König en Fischer [2]. Uit een statische beschouwing volgt, bij een beoogde betrouwbaarheidsindex van 3,8, een gemiddelde \rightarrow



$C_{Rm,c}$ van 0,163, een karakteristieke waarde (5% ondergrens) van $C_{Rk,c} = 0,150$ en een rekenwaarde van $C_{Rd,c} = 0,116$ [3]. Deze laatste waarde is overigens in de huidige Eurocode afgerond naar 0,12 ($0,18/\gamma_c$).

In de afleiding van de minimale schuifspanningsweerstand v_{min} is gebruikgemaakt van de karakteristieke waarde van de dwarskrachtweerstand:

$$V_{Rk,c} = \left[0,15k (100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d$$

De minimale schuifspanningsweerstand v_{min} is afgeleid voor de ligger in figuur 2, door het langswapeningspercentage te be-

palen waarbij vloeien van de langswapening en bezwijken op dwarskracht gelijktijdig optreden. Voor de dwarskrachtoverspanning a is $2,5d$ aangehouden, waarbij ervan wordt uitgegaan dat hierbij de kleinste verhouding tussen de bezwijkweerstand op afschuiving en buiging wordt gevonden ('het dal van Kani' [3]).

Bij het bereiken van de karakteristieke waarde van de dwarskrachtweerstand is het moment onder de puntlast gelijk aan:

$$M_{R,vk} = 2,5d V_{Rk,c} = 0,375k (100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} b d^2$$

Het karakteristieke vloeimoment is bij benadering gelijk aan:

NIEUWE GENERATIE EUROCODES

In 2012 werd in Nederland de huidige Eurocode-serie, de Europese normen voor het toetsen van de constructieve veiligheid van alle mogelijke bouwconstructies, geïntroduceerd. Binnen een aantal jaar wordt de opvolger van kracht.

De nieuwe Eurocode 2 is al in 2023 goedgekeurd. De komende tijd zal worden gewerkt aan een Nederlandse vertaling en zal de nationale bijlage bij de Eurocodes worden opgesteld.

De planning is dat alle circa 65 delen van de nieuwe Eurocode op 30 september 2027 definitief worden gepubliceerd en dat de huidige generatie op 31 maart 2028 wordt ingetrokken. Vervolgens moeten de nieuwe delen nog worden opgenomen in het Besluit bouwwerken leefomgeving (BBL).

In *Cement* wordt in diverse artikelen aandacht besteed aan de nieuwe Eurocodes, vooral toegespitst op Eurocode 2. Maar er wordt ook aandacht besteed aan Eurocode 0 (Grondslag van het constructief ontwerp) en Eurocode 1 (Belastingen op constructies).

Bekijk het Dossier 'Nieuwe generatie Eurocodes op Cementonline.



auteurs



DR. IR. MARCO ROOSEN

Senior Specialist
Betonnen Bruggen
Rijkswaterstaat



DR. IR. YUGUANG YANG

Universitair Hoofddocent
TU Delft



IR. GERRIE DIETEREN

Senior Adviseur
Constructieve Veiligheid
TNO

Ook bij de afleiding in de nieuwe Eurocode zijn er kanttekeningen te maken

$$M_{Rk} = 0,9d(\rho_1 b d)f_{yk}$$

Door $M_{R,Nk}$ en M_{Rk} aan elkaar gelijk te stellen, wordt de wapeningsverhouding voor de langswapening ρ_1 gevonden waaronder geen bezwijken op afschuifbuigbreuk valt te verwachten:

$$\rho_1 = \frac{2,68k^{3/2}f_{ck}^{1/2}}{f_{yk}^{1/2}}$$

Wanneer deze ρ_1 wordt ingevuld in de formule voor $V_{Rd,c}$ (met $C_{Rd,c} = 0,163$) en wordt uitgegaan van een maximale waarde voor f_{yk} van 500 N/mm^2 , dan wordt de rekenwaarde voor de schuifspanningsweerstand gevonden zoals opgenomen in de huidige Eurocode:

$$v_{\min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$$

Kritische kanttekeningen bij de afleiding formule huidige Eurocode

Er zijn drie kanttekeningen te maken ten aanzien van bovenstaande afleiding:

1 Voor de dwarskrachtweerstand is uitgegaan van de algemene formule in de huidige Eurocode. Het schaaleffect en de ruwheid van de scheur zijn in deze algemene formule onvoldoende beschouwd waardoor de dwarskrachtweerstand significant kan worden onder- of overschat [4]. Omdat de minimale schuifspanningsweerstand v_{\min} is gebaseerd op deze algemene formule voor de dwarskrachtweerstand, kan ook v_{\min} significant worden onder- of overschat. Dit zal verderop in dit artikel worden gedemonstreerd (fig. 3).

2 Het uitgangspunt $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ is een conservatieve aanname wanneer f_{yk} lager is dan 500 N/mm^2 .

3 Het zou een verdedigbare keuze zijn geweest om het grenswapeningspercentage te bepalen op basis van de gemiddelde waarden van de dwarskrachtweerstand [5], immers de betrouwbaarheid wordt al bereikt door het berekende grenswapeningspercentage in te vullen in de formule voor de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand.

Voor bestaande constructies zou nog rekening gehouden kunnen worden met gebruik van glad staal (lagere dwarskrachtweerstand) en de hogere weerstand bij platen ten opzichte van balken (plaatfactor). Daarnaast kan aanname 2 vooral voor bestaande constructies leiden tot conservatieve resultaten. Deze invloeden zullen worden toegelicht in een volgende artikel, dat specifiek gericht is op het beoordelen van bestaande constructies in combinatie met de nieuwe Eurocode.

Opgemerkt wordt dat in principe een formule voor v_{\min} niet nodig is. Immers, wanneer de weerstand tegen bezwijken op moment hoger is dan het optredende moment, zal de dwarskrachtweerstand volgens de algemene formule altijd hoger uitvallen. Desondanks kan de formule interessant zijn voor ontwerpers, omdat hiermee eenvoudig een ondergrens voor de dwarskrachtweerstand kan worden bepaald zonder dat hierbij de hoeveelheid langswapening bekend hoeft te zijn.

Aan de eerste twee kanttekeningen wordt tegemoet gekomen in de nieuwe Eurocode. →

ARTIKELSERIE DWARSKRACHTWEERSTAND

In de nieuwe Eurocode 2 is de wijze waarop de dwarskrachtweerstand moet worden bepaald 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 in *Cement* 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 geprobeerd 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.

Dit derde deel gaat in op de bepaling van de minimale schuifspanningsweerstand. In het eerste deel werd de dwarskrachtweerstand toegelicht wanneer geen normaalkracht aanwezig is en in het tweede is de invloed van de normaalkrachten op de dwarskrachtweerstand zonder dwarskrachtwapening beschreven.

In een vervolgartikel zal worden ingegaan op de dwarskrachtweerstand van elementen mét dwarskrachtwapening. 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.

Hierin is de minimale schuifspanningsweerstand afgeleid op basis van de *Critical Shear Crack Theory* (CSCT), net als de algemene formule voor de dwarskrachtweerstand.

Verder is f_{yk} in de formule voor v_{\min} expliciet opgenomen, zodat een aanname voor f_{yk} niet nodig is.

Minimale schuifspanningsweerstand nieuwe Eurocode

In de nieuwe Eurocode wordt de rekenwaarde van de minimale schuifspanningsweerstand niet langer weergegeven als v_{\min} maar als $\tau_{\text{Rdc,min}}$. Verder moet bij het bepalen van de minimale dwarskrachtweerstand op basis van de minimale schuifspanningsweerstand rekening worden gehouden dat de definitie van het effectieve dwarskrachtoppervlakte is gewijzigd van $b_w d$ naar $b_w z$, met $z = 0,9d$.

In de nieuwe Eurocode is de dwarskrachtweerstand, zoals hiervoor aangegeven, gebaseerd op de CSCT, een semi-empirisch model ontwikkeld door Muttoni [4, 6]. In het achtergrondrapport bij de nieuwe Eurocode [7] is bij het afleiden van de gemiddelde waarde van de minimale schuifspanningsweerstand (gemiddeld, dus zonder de partiële factor) gebruikgemaakt van de van de oorspronkelijke machtsfunctie volgens de CSCT voor de dwarskrachtweerstand, hier weergegeven als V_{Rmc} .

$$V_{\text{Rmc}} = k \left[\frac{f_{\text{cm}} d_{\text{dg}}}{\varepsilon_v d} \right]^{1/2} b_w d$$

Met

$$k = 0,015 \left[\frac{a_{\text{cs}}}{d} \right]^{1/4}$$

In de formule voor de dwarskrachtweerstand is f_{cm} de gemiddelde cilinderdruksterkte van beton, beschrijft d_{dg} de gemiddelde ruwheid van de kritische scheur en is ε_v de rek in de langswapening. De factor k wordt gebruikt om de invloed van de vorm van de kritische schuifscheur op de schuifspanningsweerstand in rekening te brengen. In de formule van k is a_{cs} de effectieve dwarskrachtoverspanning gerelateerd aan de toetsnede die gelijk is aan $|M_{\text{Ed}}/V_{\text{Ed}}|$.

Volgens de hiervoor gedefinieerde definitie wordt de gemiddelde minimale dwarskrachtweerstand $V_{\text{Rmc,min}}$ bereikt wanneer de gemiddelde rek in de langswapening gelijk is aan de vloeirek, dus $\varepsilon_{\text{vm}} = f_{\text{ym}}/E_s$. Wanneer verder wordt uitgegaan van een slankheidsratio a_{cs}/d van 4 en een E_s van 200.000 N/mm², dan wordt voor de minimale dwarskrachtweerstand gevonden:

$$V_{\text{Rmc,min}} = 9,48 \left[\frac{f_{\text{cm}} d_{\text{dg}}}{f_{\text{ym}} d} \right]^{1/2} b_w d$$

De rekenwaarde van de minimale schuifspanningsweerstand $\tau_{\text{Rdc,min}}$ wordt gevonden door $\tau_{\text{Rmc,min}}$ te delen door γ_v , de partiële factor voor de dwarskrachtweerstand wanneer geen dwarskrachtwapening aanwezig is. De aanbevolen waarde voor γ_v is 1,4. Wanneer gedeeld wordt door het effectieve dwarskrachtoppervlakte $b_w z$, f_{cm} wordt vervangen door f_{ck} en f_{ym} door f_{yd} , en de berekende 10,53 vervolgens wordt afgerond naar 11, dan wordt $\tau_{\text{Rdc,min}}$ gevonden zoals opgenomen in de nieuwe Eurocode:

$$\tau_{\text{Rdc,min}} = \frac{11}{\gamma_v} \sqrt{\frac{f_{\text{ck}} d_{\text{dg}}}{f_{\text{yd}} d}}$$

Kritische kanttekeningen bij de afleiding formule nieuwe Eurocode

In de nieuwe Eurocode blijkt de minimale schuifspanningsweerstand op een eenvoudige fysisch logische manier te kunnen worden afgeleid door uit te gaan van de vloeirek van de langswapening. Toch zijn er drie kanttekeningen te maken ten aanzien van bovenstaande afleiding:

1 In het bepalen van een waarde voor k is uitgegaan een slankheidsratio a_{cs}/d van 4. In de formule voor V_{Rmc} is k een factor om de invloed van de locatie en de vorm van de kritische dwarskrachtscheur op de dwarskrachtweerstand in rekening te brengen. Wanneer de kritische dwarskrachtscheur zich bevindt op een toetsnede met een kleinere a_{cs}/d , zal door de relatief hoge dwarskracht de kritische scheur zich steiler ontwikkelen en zal de dwarskrachtweerstand lager zijn. Bij voorgespannen elementen kan het vloeien van staal al worden bereikt bij een waarde van a_{cs}/d van bijvoorbeeld 2. Het hanteren van het uitgangspunt van een a_{cs}/d

SCHUIFSPANNINGSWEERSTAND VERSUS DWARSKRACHTWEERSTAND

Zowel de huidige als de nieuwe Eurocode geeft een formule voor de minimale schuifspanningsweerstand. Daarom wordt in dit artikel niet gesproken over de minimale dwarskrachtweerstand, maar over de minimale schuifspanningsweerstand. De minimale dwarskrachtweerstand kan gevonden worden door de minimale schuifspanningsweerstand te vermenigvuldigen met de effectieve dwarskrachtoppervlakte. In het artikel wordt wel veelvuldig de term dwarskrachtweerstand gebruikt, omdat voor de afleiding van de minimale schuifspanningsweerstand gebruik wordt gemaakt van de algemene formule voor de dwarskrachtweerstand.

Er is een verbeterde formule opgesteld voor de minimale schuifspanningsweerstand

gelijk aan 4 kan dus een overschatting van de minimale schuifspanningsweerstand tot gevolg hebben.

2 In de afleiding is f_{ym} vervangen door f_{yd} . Voor het bepalen van de minimale schuifspanningsweerstand is blijkbaar uitgegaan van de formules voor de ontwerpwaardes van de dwarskrachtweerstand en momentweerstand. Echter door f_{ym} te vervangen door f_{yd} , wordt $\tau_{Rdc,min}$ niet lager maar hoger. Deze aanname kan dus een overschatting van de minimale schuifspanningsweerstand tot gevolg hebben.

3 In de nieuwe Eurocode is voor de dwarskrachtweerstand voor elementen met een $d > 500$ mm een correctiefactor voor het schaaffect k_{vd} geïntroduceerd van $1,35(100\rho_1 d_{dg}/d)^{1/10}$. Deze factor is niet gebruikt in de afleiding van $\tau_{Rdc,min}$ en kan dus een overschatting van de minimale schuifspanningsweerstand tot gevolg hebben voor platen met een grotere constructiehoogte.

Gezien bovenstaande punten, wordt in het vervolg van dit artikel de (gemiddelde) minimale schuifspanningsweerstand opnieuw bepaald uitgaande van $a_{cs}/d = 2$ en door het invoeren van een additionele schaaffect voor elementen met een $d > 500$ mm. Vervolgens zal de ontwerpwaarde van de minimale schuifspanningsweerstand rechtstreeks worden bepaald door gebruik te maken van een set van relevante experimenten die door de auteurs voor dit doel is samengesteld.

Verbeterde formule

Naar aanleiding van bovenstaande is een verbeterde formule opgesteld voor de minimale schuifspanningsweerstand, waarvan de afleiding is opgenomen in een rapport van de TU Delft [8]. Voor de minimale schuifspanningsweerstand wordt voorgesteld om in plaats van k_{vd} , een vereenvoudigde correctiefactor voor het schaaffect te gebruiken, namelijk $k_{v,min}$. Omdat in de afleiding van de formule voor de minimale schuifspanningsweerstand al wordt uitgegaan van de vloeirek van het staal en d_{dg} slechts een beperkte invloed heeft op het de correctiefactor, hoeft enkel het effect van d te worden beschouwd:

$$k_{v,min} = \frac{4,7}{d^{1/4}} \leq 1,0$$

In de verbeterde formule wordt uitgegaan van een slankheidsratio a_{cs}/d van 2 en worden f_{cm} en f_{ym} vervangen door de iets conservatievere combinatie van f_{ck} en f_{yk} . Wanneer de berekende 8,86 naar beneden wordt afgerond, wordt voor de gemiddelde schuifspanningsweerstand gevonden:

$$\tau_{Rmc,min} = 8,8k_{v,min} \sqrt{\frac{f_{ck} d_{dg}}{f_{yk} d}}$$

Validatie met proevendatabase

Om de nauwkeurigheid van de verbeterde formule te onderzoeken, is deze vergeleken met proefresultaten. Hierbij hebben de auteurs gebruikgemaakt van twee bronnen. De eerste bron betreft een set van 38 experimenten uitgevoerd door de TU Delft. Deze proefstukken bezweken op dwarskracht, terwijl de langswapening tegelijkertijd vloeide en zijn daarom exact representatief voor het beoogde bezwijkmechanisme. In 30 van deze proefstukken is geribd wapeningsstaal toegepast en in 8 proefstukken glad staal (gladde staven vallen strikt genomen buiten het toepassingsgebied van de Eurocode voor nieuwbouw).

De tweede bron betreft de uitgebreide ACI-DAfStb dwarskrachtdatabase, opgesteld door DAfStb (Deutschen Ausschuss für Stahlbeton) en ACI (American Concrete Institute) [9]. Deze testen bevatten echter geen experimenten waarbij de langswapening bij bezwijken op dwarskracht vloeit en deze zijn dus eigenlijk niet geschikt voor de validatie. Om toch gebruik te kunnen maken van deze internationale database, zijn 29 proefstukken geselecteerd waarbij de rek in de langswapening bij bezwijken op dwarskracht minimaal gelijk was aan 75% van de vloeirek. In alle 29 experimenten uit deze dwarskrachtdatabase is geribd wapeningsstaal gebruikt. →

De hier aangegeven correctiefactor voor het schaaffect is in de nieuwe Eurocode alleen aangegeven voor de beoordeling van bestaande bouw maar is in principe ook van toepassing voor nieuwbouw. Deze waarde is daarom hier verwerkt in de ontwerpvergelijking.

Om de nauwkeurigheid van de verbeterde formule te onderzoeken, is deze vergeleken met proefresultaten

Alle van de in totaal 67 geselecteerde proefstukken betreffen gewapende betonnen liggers zonder dwarskrachtwapening.

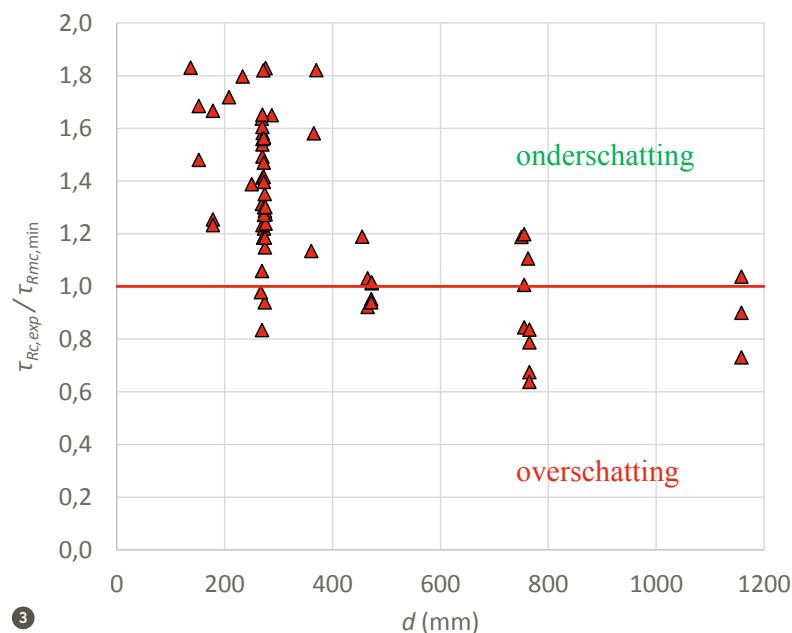
De auteurs van dit artikel hebben de experimenteel gevonden schuifspanningsweerstand $\tau_{Re,exp}$ vergeleken met de gemiddelde minimale schuifspanningsweerstand $\tau_{Rmc,min}$ (dus zonder partiële factor) volgens de huidige Eurocode (fig. 3), de nieuwe Eurocode (fig. 4) en de verbeterde formule (fig. 5). Voor de huidige Eurocode is de gemiddelde schuifspanning $\tau_{Rmc,min}$ gelijk aan $0,047k^{3/2}f_{cm}^{1/2}$. Deze formule wordt gevonden door de afleiding van $\tau_{Rmc,min}$ in [5] te combineren met $f_{ym} = 539 \text{ N/mm}^2$ (wat overeenkomt met een f_{yk} van 500 N/mm^2). Voor de nieuwe Eurocode is uitgegaan van de formule voor $\tau_{Rdc,min}$. Deze is vertaald naar een gemiddelde waarde door uit te gaan van $\gamma_v = 1$ en door f_{ck} en f_{yd} te vervangen door f_{cm} en f_{ym} . Voor de verbeterde formule is uitgegaan van de hierboven beschreven formule voor $\tau_{Rmc,min}$ en een correctie voor de scheurafstand voor de 8 proefstukken waarin glad staal is toegepast. Deze correctie zal in een volgend artikel over bestaande constructies verder worden toegelicht.

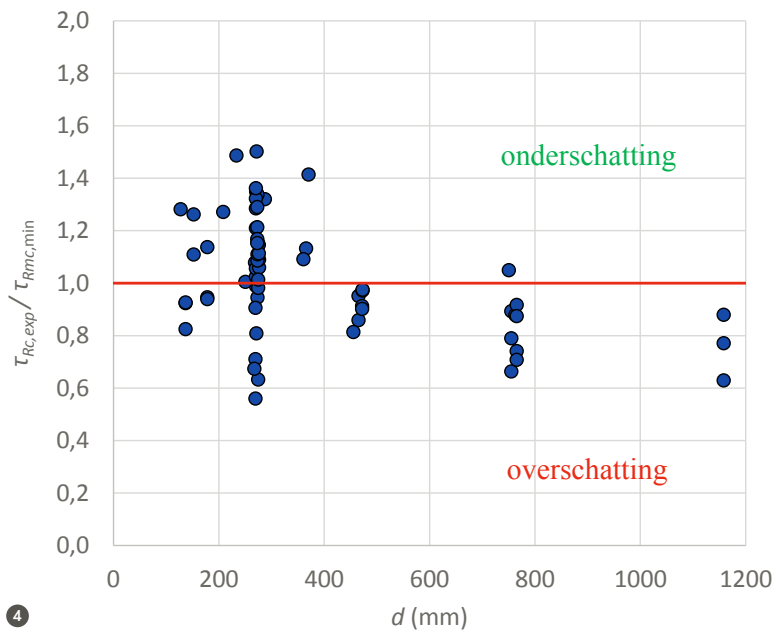
Uit de figuren blijkt dat de huidige Eurocode de minimale schuifspanningsweerstand niet erg consistent kan bepalen. Voor lage proefstukken wordt de minimale schuifspanningsweerstand onderschat en

voor hoge proefstukken wordt deze overschat. De bepaling van de minimale schuifspanningsweerstand met de nieuwe Eurocode blijkt veel consistentier te zijn, maar geeft nog steeds een overschatting voor hoge proefstukken. Een correctie voor het schaal-effect is daarom noodzakelijk. Alleen de verbeterde formule geeft consistente voorspellingen voor zowel lage als hoge proefstukken. Het schaal-effect is dus goed gecorrigeerd.

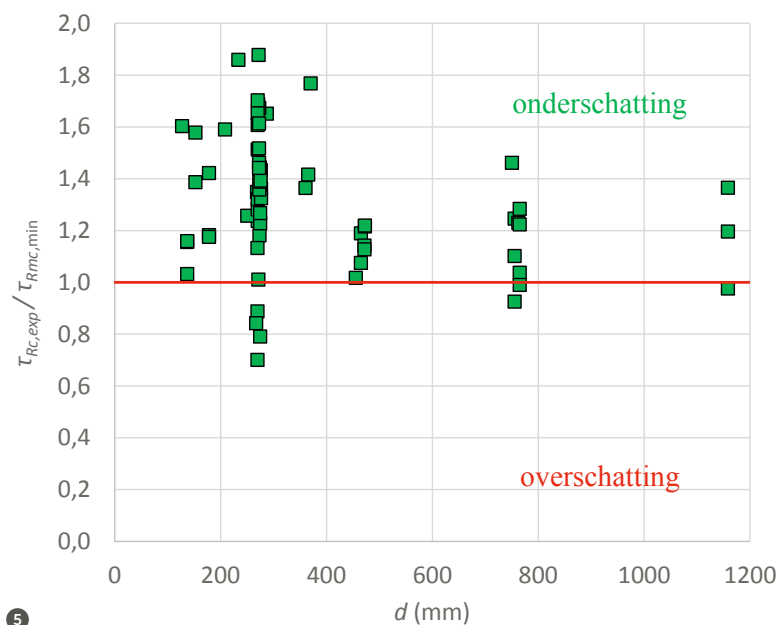
Bepalen rekenwaarde verbeterde formule

Op basis van de 67 ratio's $\tau_{Re,exp} / \tau_{Rmc,min}$ kan de correctie voor de rekenwaarde X_d voor de dwarskrachtweerstand worden bepaald en de bijbehorende benodigde partiële factor $\gamma_v (=1/X_d)$. Hiervoor is gebruikgemaakt van Annex D7.3 van [10]. Uitgaande van berekende ratio's, een lognormale verdeling, een beoogde β van 3,8 en het hanteren van een bekende waarde voor de variatiecoëfficiënt V_x , wordt voor de verbeterde formule een X_d gevonden van 0,705 wat neer komt op een benodigde γ_v van 1,42 (zie tabel 1). Deze waarde komt vrijwel overeen met de aanbevolen waarde voor γ_v van 1,4. Deze waarde is in Europees verband bepaald uit experimentele data voor de algemene formule voor de dwarskrachtweerstand. Uit tabel 1 blijkt overigens dat voor de huidige Eurocode en





4



5

de nieuwe Eurocode een veel hogere γ_v nodig zou zijn om de beoogde β te halen.

De rekenwaarde voor de verbeterde formule kan worden bepaald met de formule:

$$\tau_{Rdc, \min} = \frac{8,8}{\gamma_v} k_{v, \min} \sqrt{\frac{f_{ck} d_{dg}}{f_{yk} d}}$$

Deze verbeterde formule is opgenomen in (concept) wijzigingsbladen bij de NEN-EN 1992-1-1+C1:2011/NB:2016+A1:2020 en bij de

NEN 8702:2023. Hierin zijn de regels voor de dwarskrachtweerstand voor elementen zonder dwarskrachtwapening opgenomen, vooruitlopend op de invoering van de nieuwe Eurocode. Opgemerkt wordt dat in deze wijzigingsbladen in plaats van een factor 8,8 een factor 8,5 is opgenomen. Dit komt op de eerste plaats omdat het effectieve dwarskrachtoppervlakte volgens de huidige Eurocode gelijk is aan $b_w d$, terwijl deze in de nieuwe Eurocode is gedefinieerd als $z d (= 0,9 b_w d)$. →

Tabel 1 Rekenwaardes afgeleid voor drie formules van de minimale dwarskrachtweerstand

Norm	Gemiddelde	Variatiecoëfficiënt	X_d	Benodigde γ_v
Huidige Eurocode	1,32	35%	0,562	1,78
Nieuwe Eurocode	1,03	21%	0,520	1,93
Verbeterde formule	1,31	19%	0,705	1,42

Op de tweede plaats maakt de huidige Eurocode nog niet expliciet gebruik van een partiële factor voor dwarskracht en daarom is in de ontwerpwijzigingsbladen gebruikgemaakt van γ_c ($\gamma_c = 1,5$) in plaats van γ_v van ($\gamma_v = 1,4$).

Effect voorspanning

In tegenstelling tot de v_{\min} -formule uit de huidige Eurocode, waarin het effect van voorspanning/een normaalkracht expliciet wordt beschouwd met een aanvullende term $0,15\sigma_{cp}$, is in de nieuwe Eurocode geen extra term nodig. De reden is dat de nieuwe Eurocode de dwarskrachtweerstand relateert aan de scheurwijdte van een kritisch aangenomen dwarskrachtscheur. De scheurwijdte wordt gerelateerd aan het product van de rek in de langswapening ϵ_v en de scheurafstand. Voor de scheurafstand bij geribd wapeningsstaal wordt voor de eenvoud de effectieve hoogte d aangehouden. Het effect van voorspanning kan dus direct worden meegenomen door de scheurwijdte te baseren op de toename van de spanning in de langswapening nadat het beton scheurt. Voor een voorspanelement met een werkvoorspanningsniveau σ_{pw} kan de kritische scheurwijdte worden gerelateerd aan de totale rek minus $\sigma_{pw,cr}/E_p$ vermenigvuldigd met d . De minimale dwarskrachtweerstand wordt gevonden wanneer bezwijken op dwarskracht gelijktijdig optreedt met het vloeien van de langswapening. Wanneer in het geval van een voorspanelement in plaats van de vloei-grens, de 0,1%-rekgrens wordt gebruikt, kan ϵ_v worden vervangen door $(f_{p0,ik} - \sigma_{pw,cr})/E_p$. Het effect van de voorspanning kan dus worden meegenomen door in de formule voor minimale schuifspanningsweerstand de waarde f_{yk} te vervangen door $(f_{p0,ik} - \sigma_{pw,cr})$, zoals opgenomen in de nieuwe Eurocode. Voor een combinatie van wapeningsstaal en voorspanstaal kan conservatief de hoogste van f_{yk} en $(f_{p0,ik} - \sigma_{pw})$ worden ingevuld in de formule voor de minimale schuifspanningsweerstand.

Voor een minder conservatieve waarde kan gebruik worden gemaakt van de algemene formule voor dwarskrachtweerstand.

Conclusies

→ In principe is een formule voor de minimale schuifspanningsweerstand niet nodig. Wanneer de momentweerstand hoger is dan het optredende moment, zal de dwarskrachtweerstand volgens de algemene formule altijd hoger uitvallen. Desondanks kan de formule voor de minimale dwarskrachtweerstand interessant zijn voor ontwerpers omdat hiermee eenvoudig een ondergrens voor de dwarskrachtweerstand kan worden bepaald zonder dat hierbij de hoeveelheid langswapening bekend hoeft te zijn.

→ In de formule voor de minimale schuifspanningsweerstand in de nieuwe Eurocode zijn de ruwheid van de scheur en de vloei-spanning van het staal als nieuwe parameters opgenomen. Deze dragen bij aan een nauwkeurigere bepaling van de minimale schuifspanningsweerstand.

→ Door de auteurs is geconstateerd dat bij de afleiding van de minimale schuifspanningsweerstand enkele niet conservatieve aannames zijn gedaan. Hierdoor wordt de beoogde betrouwbaarheid niet gehaald bij de aanbevolen partiële factor voor de dwarskrachtweerstand ($\gamma_v = 1,4$). Daarom is in dit artikel een verbeterde formule gepresenteerd. Hierbij is een vereenvoudigde correctiefactor voor het schaaffect geïntroduceerd. Uit een vergelijking met proeven die verzameld zijn in het kader van dit onderzoek blijkt dat met deze verbeterde formule de minimale dwarskrachtweerstand wel veilig kan worden bepaald. Dit is een verbetering ten opzichte van de huidige Eurocode waarbij de minimale dwarskrachtweerstand significant kan worden onder- of overschat. Deze verbeterde formule is opgenomen in (concept) wijzigingsbladen bij de NEN-EN 1992-1-1+C1:2011/NB:2016+A1:2020 en bij de NEN 8702:2023. ●

LITERATUUR

- Walraven, J.C., Background document for prENV 1992-1-1:2002 6.2 Shear, Report 25.5-02-36. TU Delft, oktober 2002.
- König, G., Fischer, J., Model Uncertainties Concerning Design Equations for the Shear Capacity of Concrete Members without Shear Reinforcement. *CEB Bulletin* No. 224, 1995, p. 117.
- Walraven, J.C., Minimum afschuifdraagvermogen van platen uit gewapend beton zonder schuifwapening: de waarde v_{\min} , onderzoek in opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur, C33B40. TU Delft, 4 maart 2013.
- Yang, Y., Roosen, M., Dwarskrachtweerstand gebaseerd op scheurwijdte (I). *Cement* 2023/1.
- Dieteren, G., RBK 1.2 Achtergrond-rapport Beton, TNO-2022_R10927a Eindrapport. TNO, 15 november 2022.
- Muttoni, A., Ruiz, M.F., Shear Capacity of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width. *ACI Structural Journal* 105(2), 2008, p. 163-172.
- Muttoni, A., et al., Background document to subsections 8.2.1 and 8.2.2: Shear in members without shear reinforcement, CEN/TC250/SC2/WG1/TG4. EPFL, Report EPFL-IBETON 16-06-R2, 17 maart 2023.
- Minkook Park, M., Yang, Y., Modification of τ_{\min} for ROK/RBK, Research assigned by Rijkswaterstaat, 25.5-24-05. TU Delft, februari 2025.
- Reineck, K.-H., D.A. Kuchma, Fitik, B., Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbetonbauteile mit und ohne Bügel. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* 597, 2012.
- Nederlands Normalisatie Instituut: NEN-EN 1990 Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp, 2005.