

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening in vloeren

Joost Walraven, Em. Prof. TU Delft

Typen dwarskrachtwapening

Dwarskrachtwapening volgens de huidige Eurocode 1992-1-1 Artikel 9.2.2(2) kan bestaan uit:

- a. Beugels die de langswapening omsluiten;
- b. Opgebogen staven;
- c. Wapeningskorven, ladders, etc. die zijn aangebracht zonder dat de langswapening is omsloten, maar die *“voldoende in de druk- en trekzone zijn verankerd”*

NEN-EN 1992-1-1. artikel 9.2(2):

- Categorieën (b) en (c) mogen alleen worden toegepast in combinatie met categorie (a) als deze minstens 50% van de rekenkundige dwarskracht opneemt
- Als $V_{ed} \leq 1/3 V_{Rd,max}$ vervalt deze eis



Publicatie in Cement 2011, Nr. 5

Auteurs:

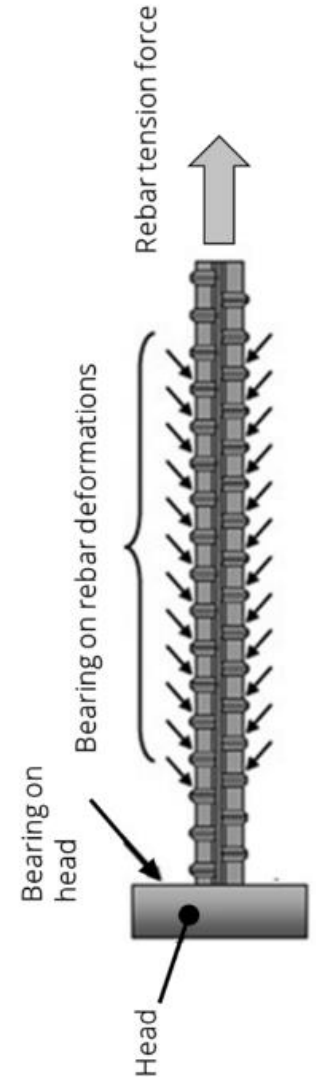
P.A. Teeuwen, Witteveen+Bos

J.C. Walraven, TU Delft



Voordelen van kopdeuvelstaven ten opzichte van de traditionele beugels (1)

De verankering van de kop gedraagt zich aanzienlijk stijver dan die van een omgebogen wapeningsstaaf. De optredende slip ter plaatse van de verankering is verwaarloosbaar. Er is dus een betere scheurwijdte beheersing. Fijnere dwarskrachtscheuren geven een hoger afschuifdraagvermogen (aggregate interlock).



Voordelen van kopdeuvelstaven ten opzichte van de traditionele beugels (2)



Toepassing resulteert in lagere wapeningsconcentraties, eenvoudiger vlechtwerk, snellere wapeningsmontage en lagere arbeidskosten

Kanttekening in Cement 2011: “De positie van de koppen van de deuvelstaven ten opzichte van de hoofdwapening is cruciaal voor het adequaat kunnen functioneren van de kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening. Een nauwkeurige uitvoering onder inachtnahme van de gegeven toelaatbare toleranties is een vereiste”

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening

Toepassingen:

E.O.N centrale Rotterdam

Metro Stations Rokin en

Vijzelgracht Amsterdam ($d = 2,5-3,5\text{m}$)



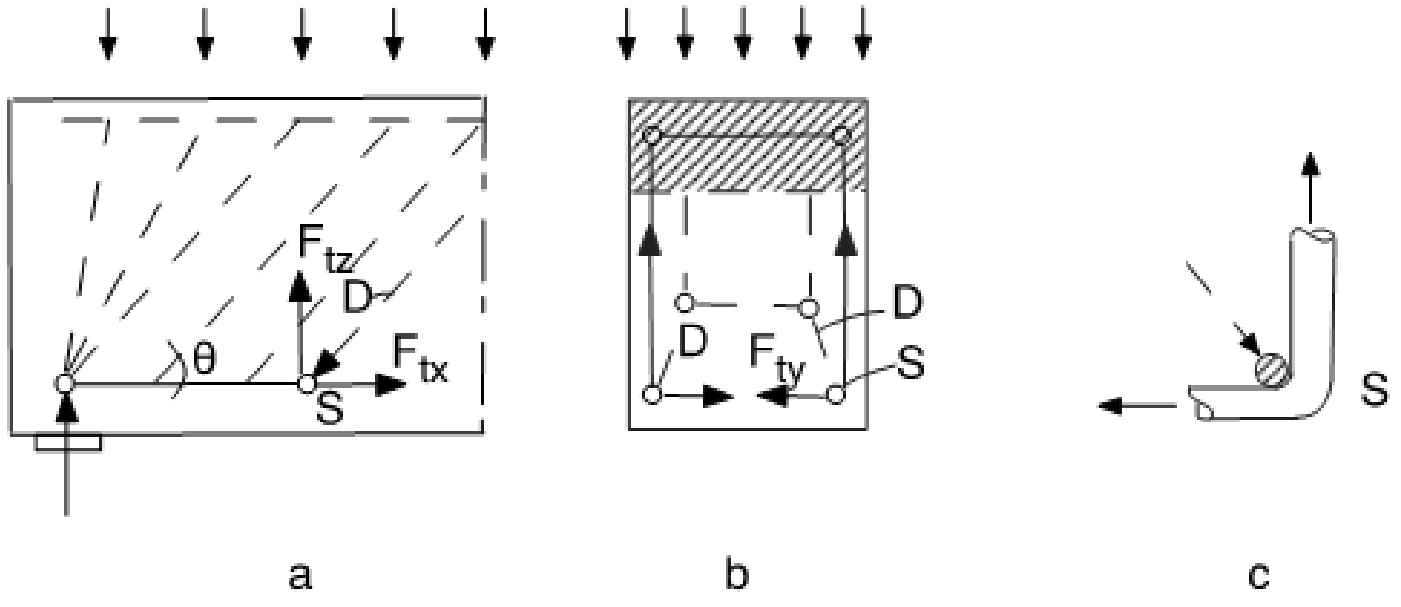
Mahanakon Tower Bangkok (2016)



Tunnelementen Fehmarnbelt (2025)

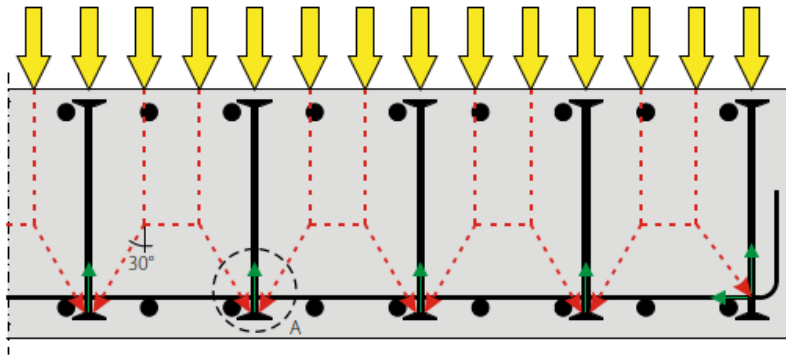
Het principe van de vakwerkanalogie

Functie gesloten beugel in vakwerk bij ontwerp op dwarskracht

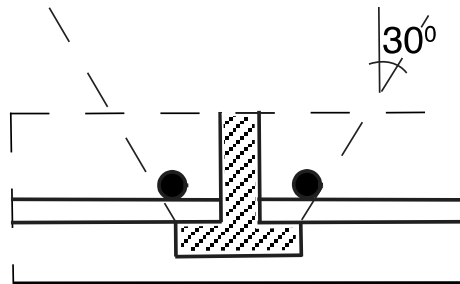
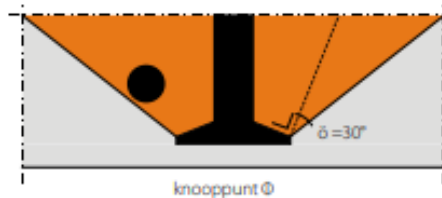


- a. Vakwerkstaven voor lastopname in hoofddraagrichting;
- b. Lastspreiding in dwarsrichting;
- c. Knooppunt beugel – langswapeningsstaaf.

Anker van de T-headed bar als onderdeel van het vakwerkmechanisme



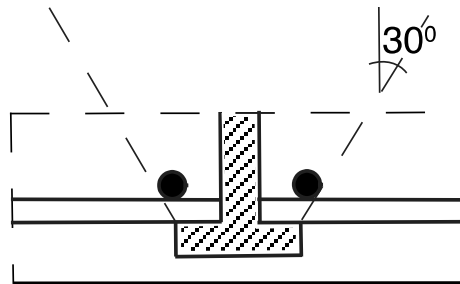
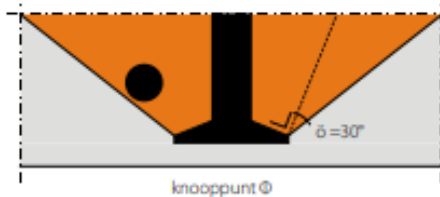
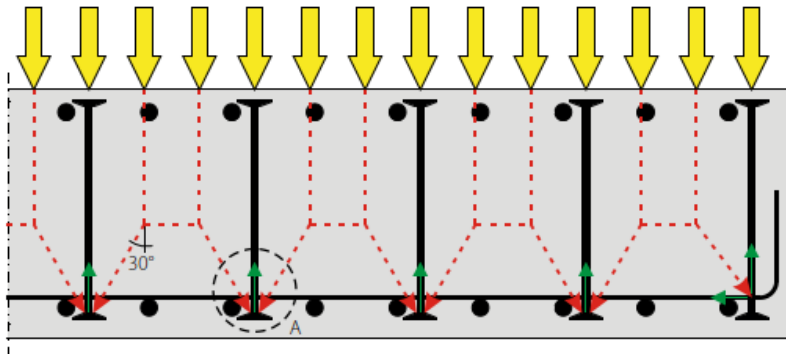
Opvangen van
uitwaaierende
diagonaalkrachten



Artikel Cement 2011:

“Kopdeuvels als
dwarskrachtwapening”

Optimale detaillering van de knooppunten



Opmerking: deze wijze van detailleren is qua uitvoering onpraktisch.

Vraag: is voor de detaillering van kopdeugelstaven een variantoplossing mogelijk?

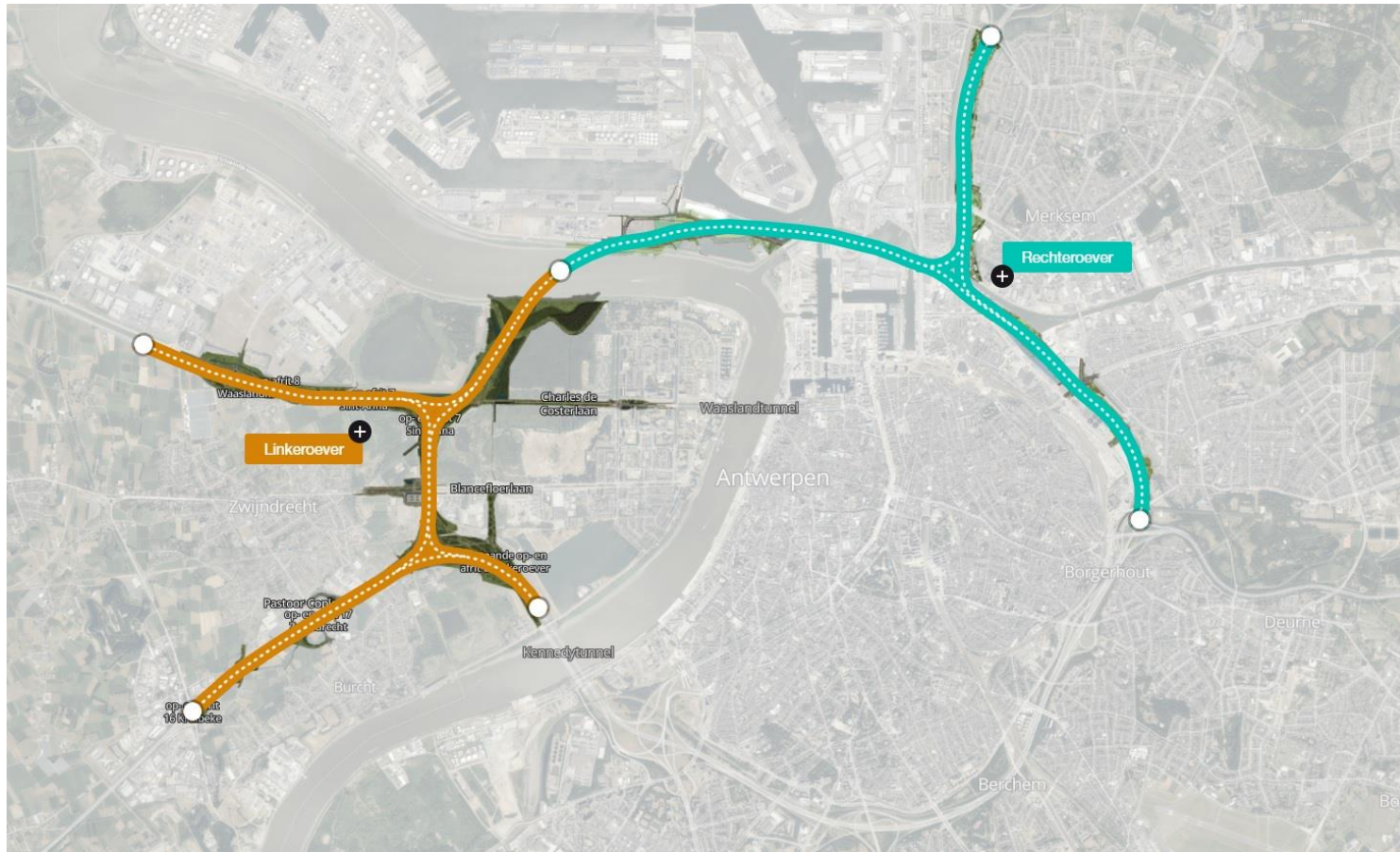
Vragenstellers:

F. De Beukelaer

J. Meijdam

(Boskalis)

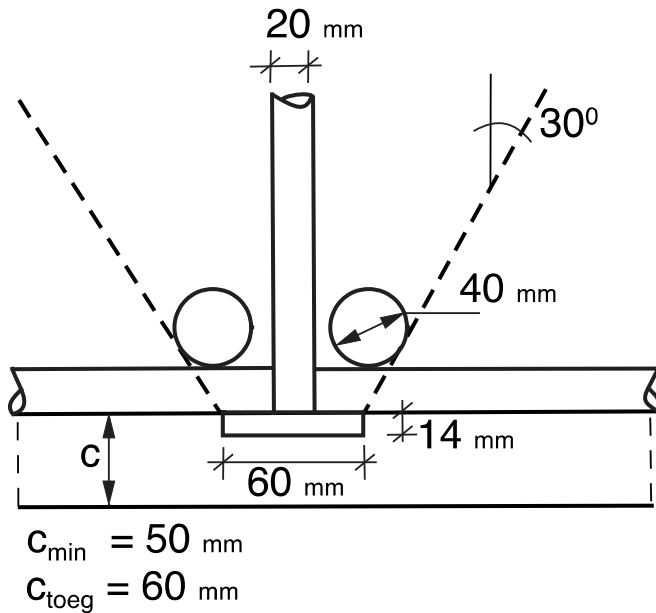
Toepassing kopdeuvelstaven in Oosterweel-verbinding (Antwerpen)



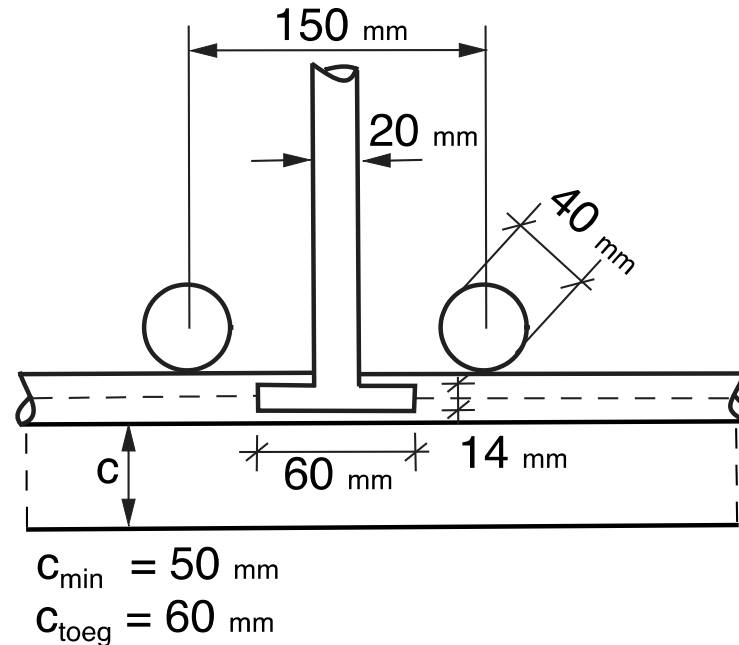
Toepassing in Oosterweelverbinding Antwerpen



Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening

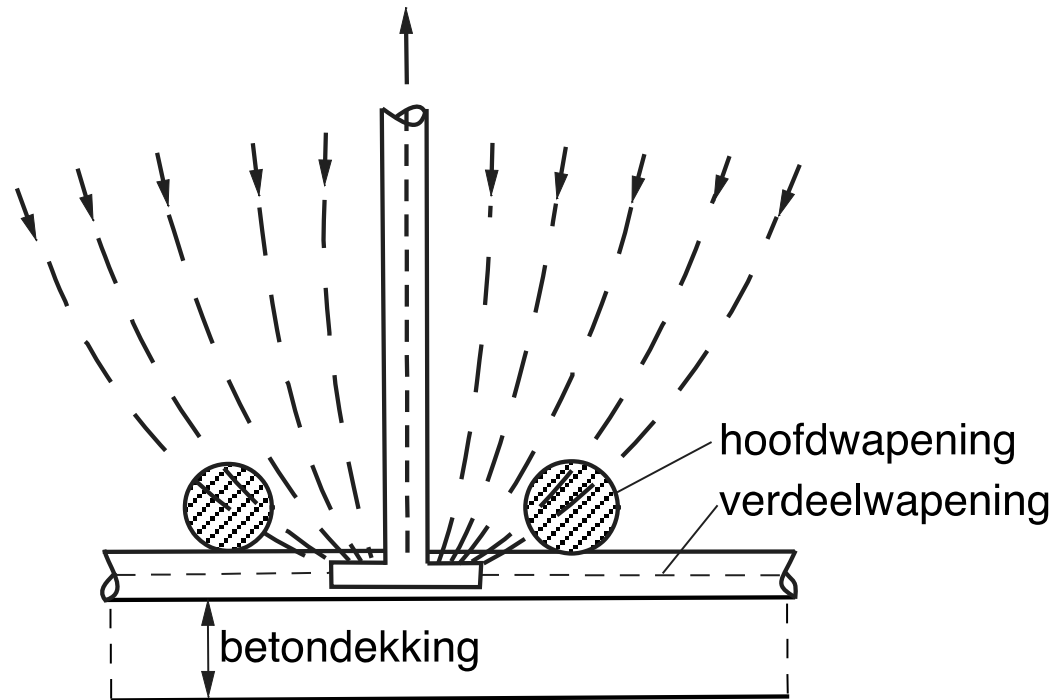


Oplossing volgens
“Cement 2011”



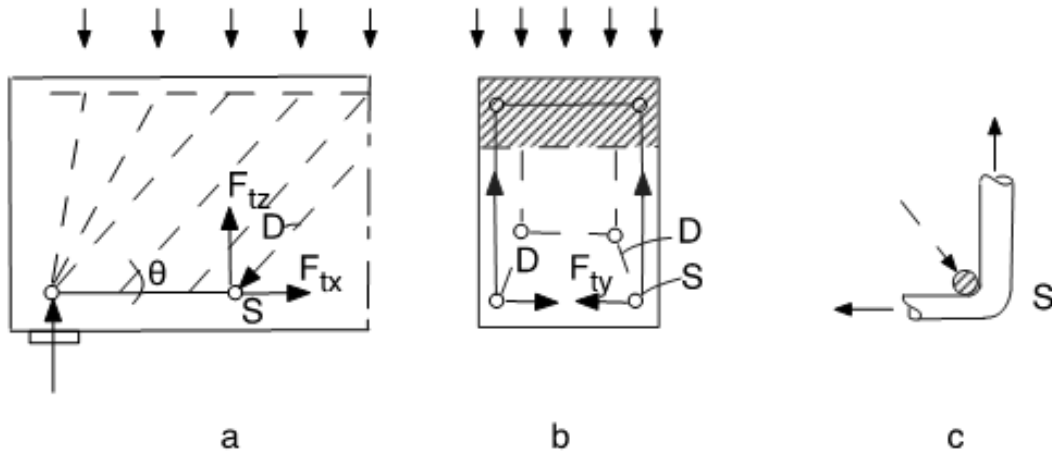
Voorgestelde variant-oplossing
met kopdeuvel tussen staven in
buitenste wapeningslaag

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening

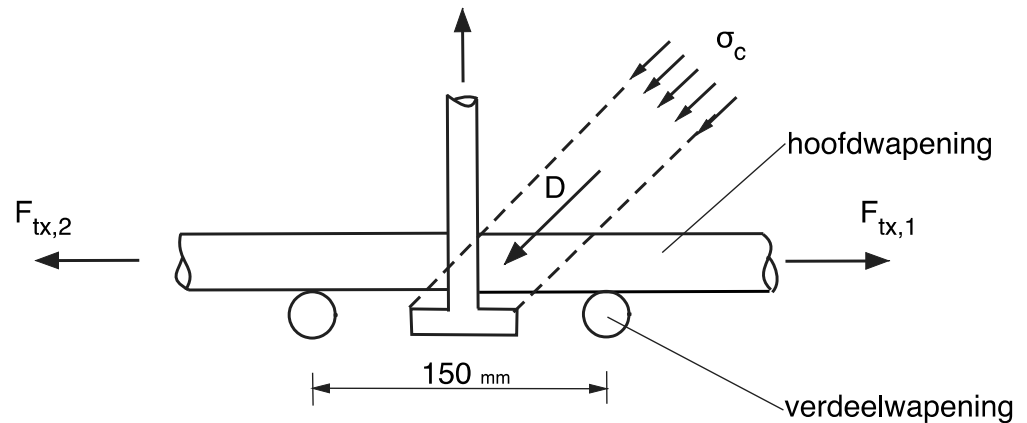


Betondrukspanningstrajectorieen op weg naar deuvelkop

Vakwerkmechanisme in geval van plaatsing kopdeuvels tussen de hoofdwapeningsstaven

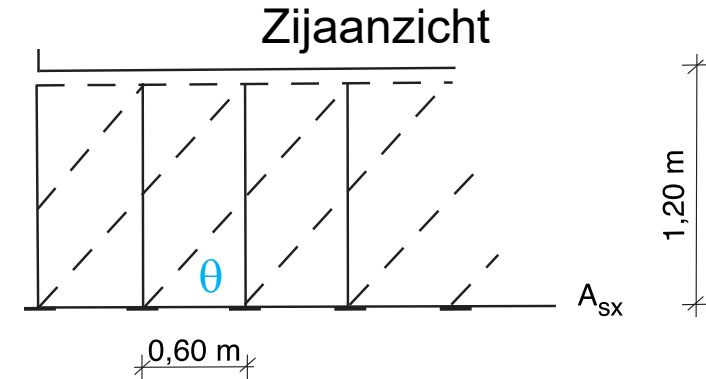
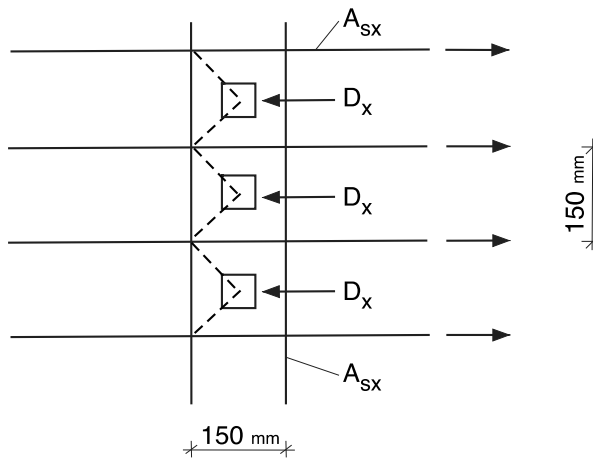
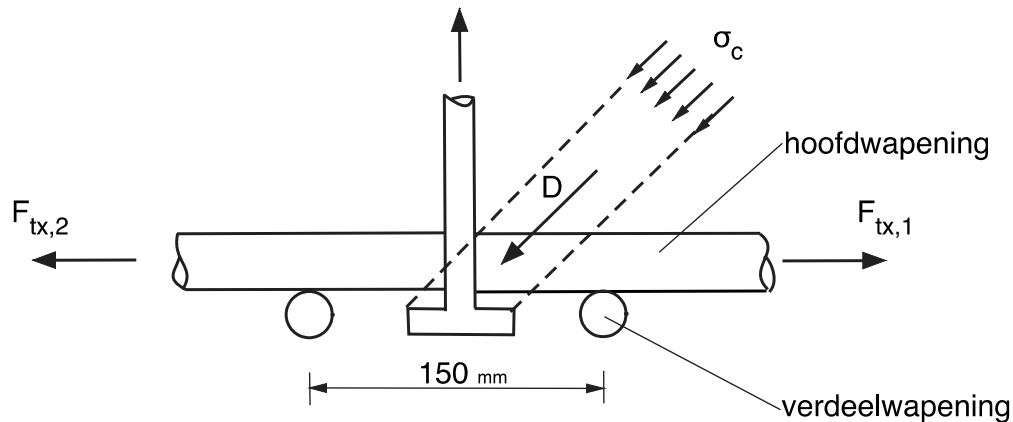


Klassieke oplossing met beugels die langswapening omsluiten



Variant-oplossing met T-headed bars

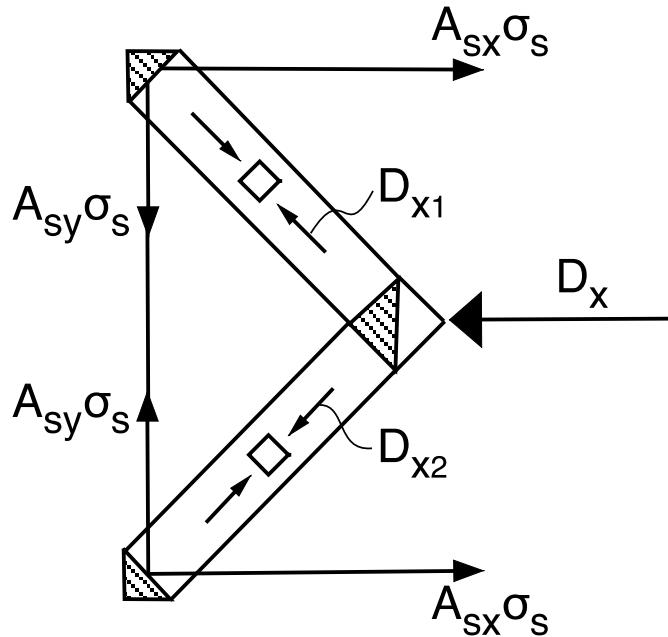
Vraag: welke diagonaalhelling θ en welke σ_c op kopdeuvel toelaatbaar?



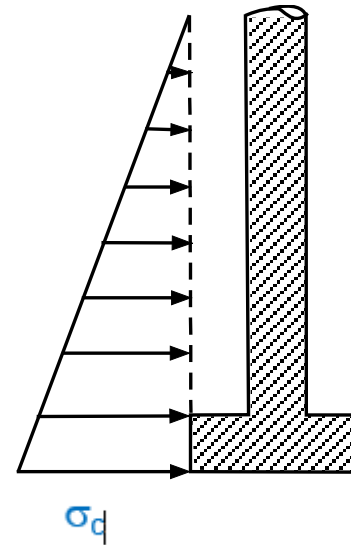
Bij oriënterende berekening Oosterweel verbinding aangehouden $\cot \theta = 2,0$ ($\theta = 26,6^\circ$)

Bovenaanzicht

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening



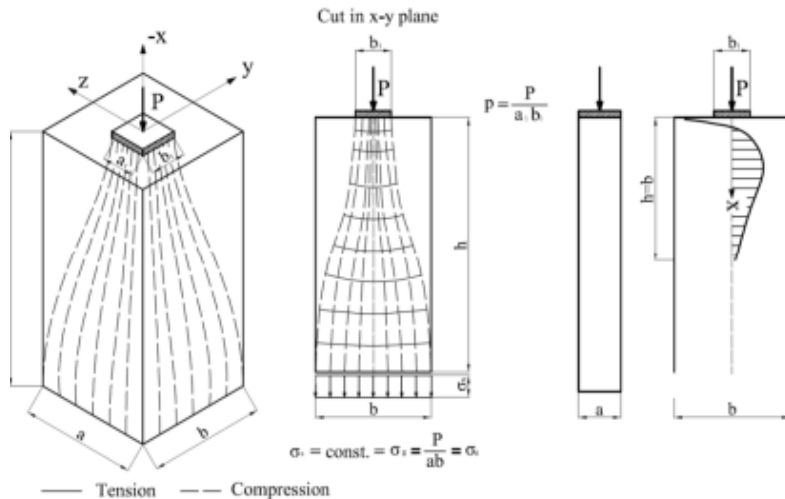
Bovenaanzicht inleiding D_x
in langs- en verdeelwapening



Zijaanzicht T-headed stud

Maximale betondrukspanningen σ_c
op zijkant deuvel en onderzijde
trekstaaf?

Maximaal toelaatbare beton-drukspanning σ_c



$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1} / A_{c0}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}$$

EN 1992-1-1 Art. 6.7 “Gedeeltelijk belaste gebieden”: Maximale drukspanning in geval van deelvlakbelasting met opsluitende werking: $3,0 \cdot f_{cd}$

CEN/TC 250/SC 2 N2087

Studie Perez/Caldentey/Marchetto:

“Partially loaded areas” 2023. Conclusie: Grenswaarde 3,0 is extreem conservatief.

Voorstel: verhogen naar $7,0 \cdot f_{cd}$

Eerste oriënterende berekeningen zijn uitgevoerd (Oosterweel verbinding) waarbij is uitgegaan van een verhoging van de druksterkte naar maximaal $5,0 \cdot f_{cd}$.

Essentieel is hierbij welke diagonaalhelling $\cot. \theta$ mag worden aangehouden

Noot: bij $\sigma_{cd,max} = 5,0 f_{cd} \rightarrow \cot \theta \leq 2,0$ so $\theta = 26,6^\circ$
 $\sigma_{cd,max} = 3,0 f_{cd} \rightarrow \cot \theta \leq 1,2$ so $\theta = 50,2^\circ$

Vergelijking bestaande regelgeving met experimenten (12) (Yang, 2021)



(g) Specimen 900-9T-3 (south span)



(h) Specimen 900-9T-3-R (north span)



(i) Specimen 900-9S-3 (north span)

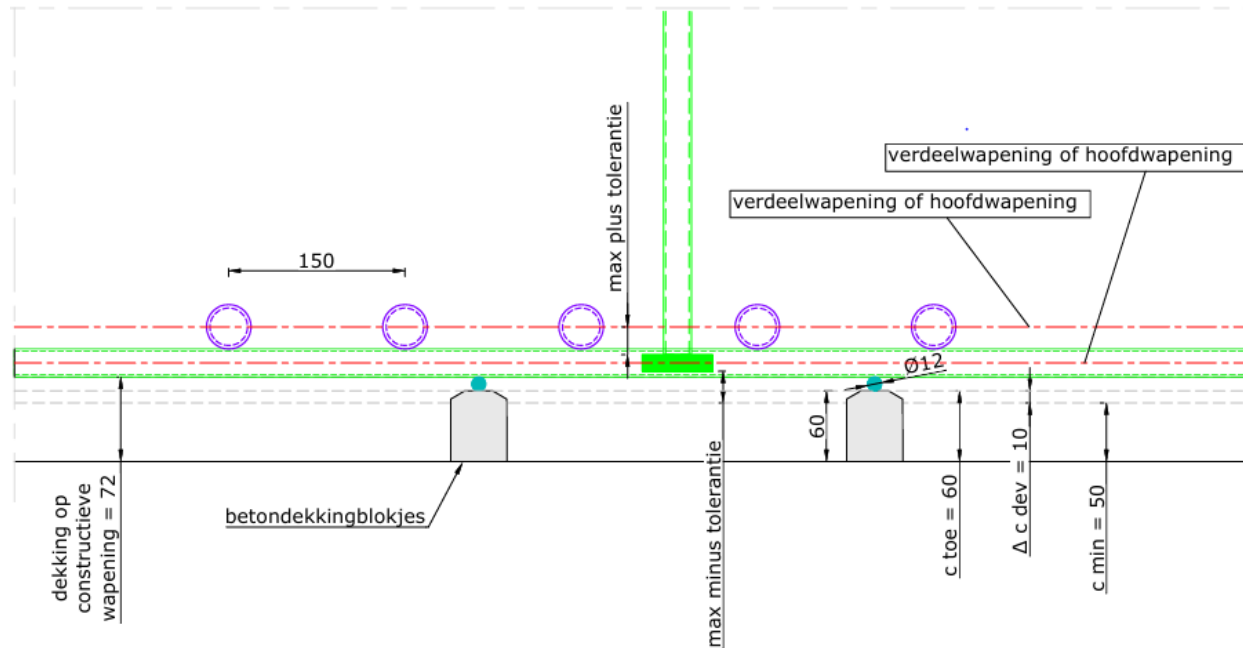


(j) Specimen 600-5T-3 (south span)



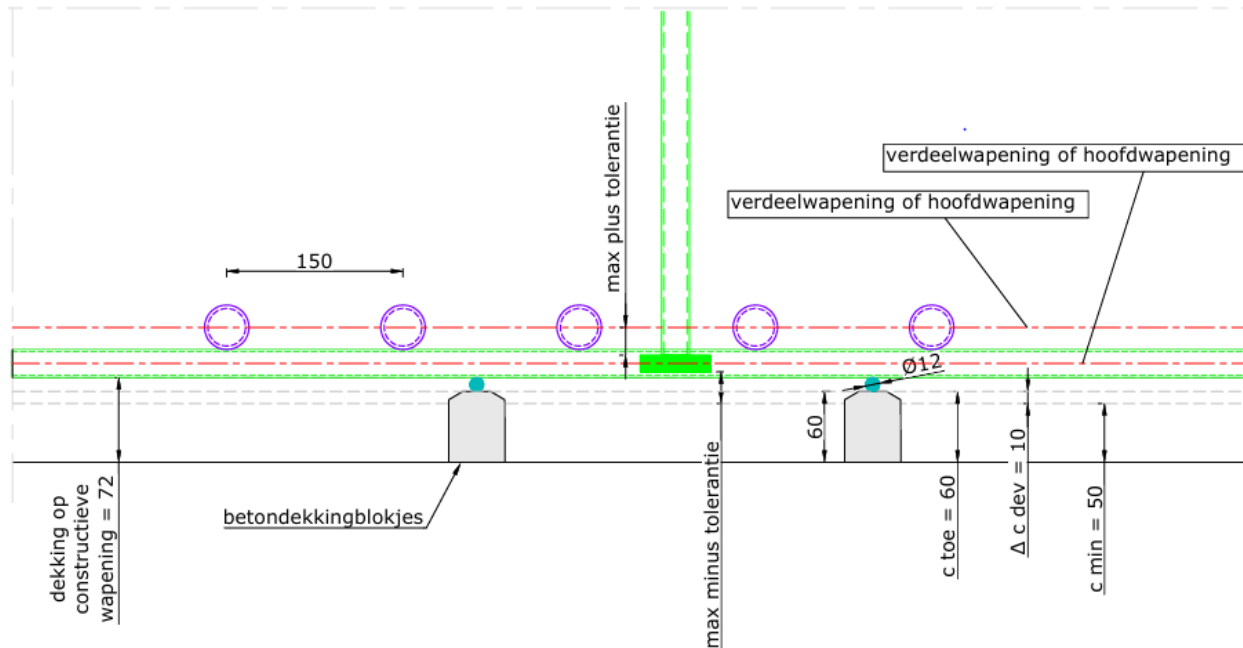
- T-headed bars zijn een geschikt alternatief voor dwarskrachtwapening bestaande uit beugels in nucleaire constructies;
- De Amerikaanse voorschriften ACI 349-13 en ACI 318-19, en voorschriften afkomstig uit 5 andere landen (waaronder EN 1992-1-1) kunnen worden gebruikt voor een conservatieve inschatting van het dwarskrachtdraagvermogen van balken met T-headed bars.

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening: plaatsingstoleranties



Hart van de kop van de T-head gelijk met het hart van onderste wapenings-laag. Bovenkant kop niet hoger dan hartlijn van bovenste wapeningslaag. Op deze wijze is omsnoerende werking van de staven gewaarborgd. Aan de onderzijde moet de onderkant van de kopdeuvel minstens op de dekking $c_{\min}$ liggen

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening

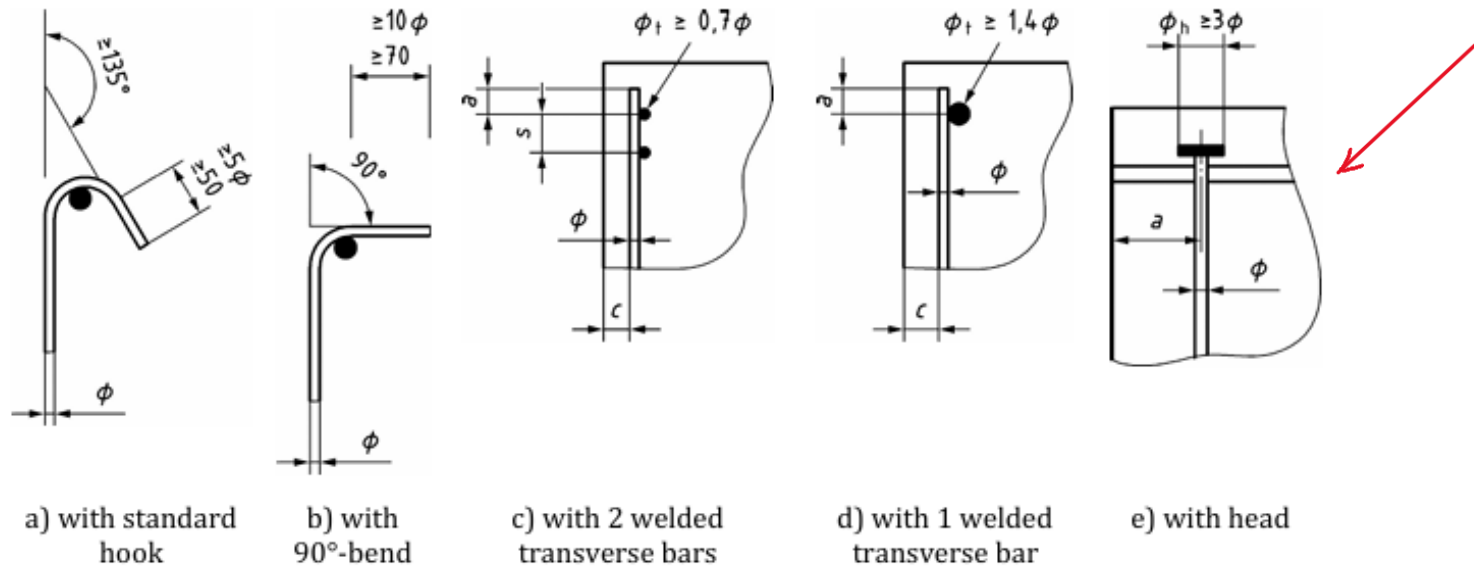


ACI 421.1R-99 chapter 2:

“Effective anchorage is essential and its location must be as close as possible to the structural member’s outer surfaces. This means that the vertical part of the shear reinforcement must be as tall as possible to avoid the possibility of cracks passing above or below it. When the shear reinforcements are not as tall as possible, they may not intercept all inclined shear cracks”.

Toelaatbare typen dwarskrachtwapening volgens de nieuwe Eurocode EN-1992-1-1

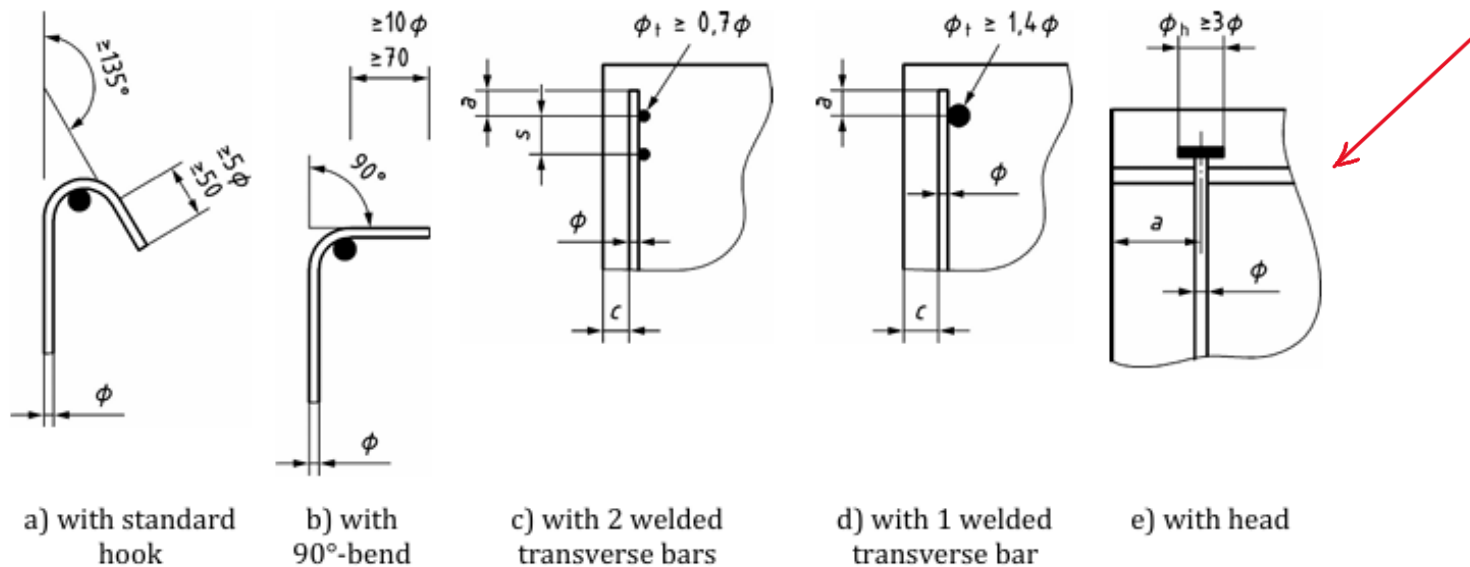
Art. 12.3.3.(1) “Dwarskrachtwapening mag bestaan uit een combinatie van:



Volgens de komende versie van EN 1992-1-1 mag de dwarskrachtwapening geheel uit T-headed studs bestaan als $\tau_{Ed} \leq 0,08f_{cd}$ bij verticale kopdeuvelstaven (vrijwel hetzelfde als in de huidige versie van 1992-1-1)

Toelaatbare typen dwarskrachtwapening volgens de nieuwe Eurocode EN-1992-1-1

Art. 12.3.3.(1) “Dwarskrachtwapening mag bestaan uit een combinatie van:



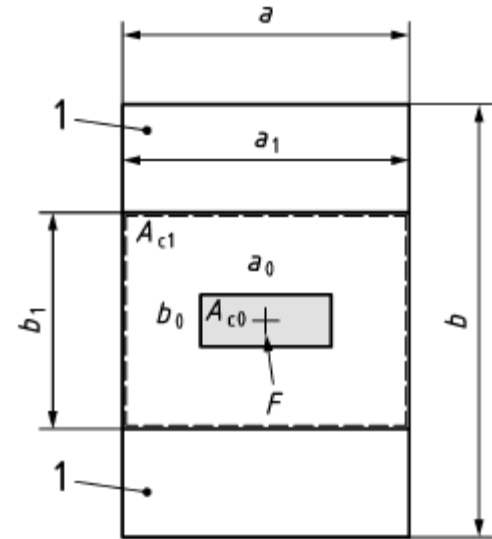
Over de verankering van de T-headed studs wordt slechts vermeld dat sprake moet zijn van een “effectieve verankering” “zowel in de trek- als in de drukzone 12.2.2.(2), evenals bij de andere typen dwarskrachtwapening

Gedeeltelijk belaste gebieden

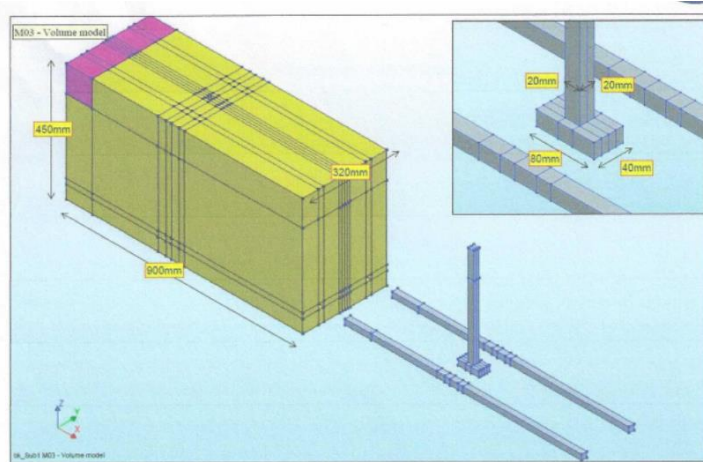
De maximaal toelaatbare betondrukspanning op een gedeeltelijk belast gebied wordt in de nieuwe versie van EN 1992-1-1, hoofdstuk 8.6 gedefinieerd als

$$\sigma_{Rdu} = f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq v_{part} f_{cd}$$

waar v_{part} de omsluitingsfactor is waarbij $v_{part} = 3,0$ **tenzij een grotere weerstand kan worden aangetoond op basis van een verfijnde analyse inclusief trekspanningen door belasting of verhinderde vervorming, waar relevant**



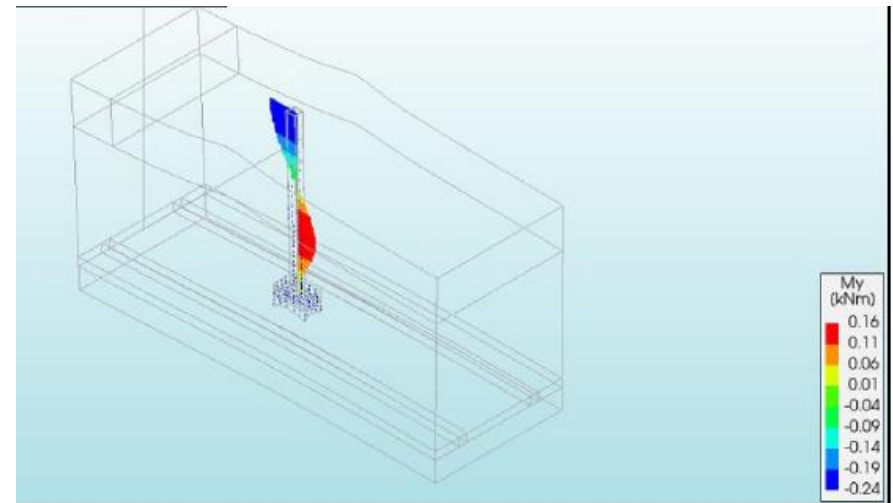
NLFEM Analysis



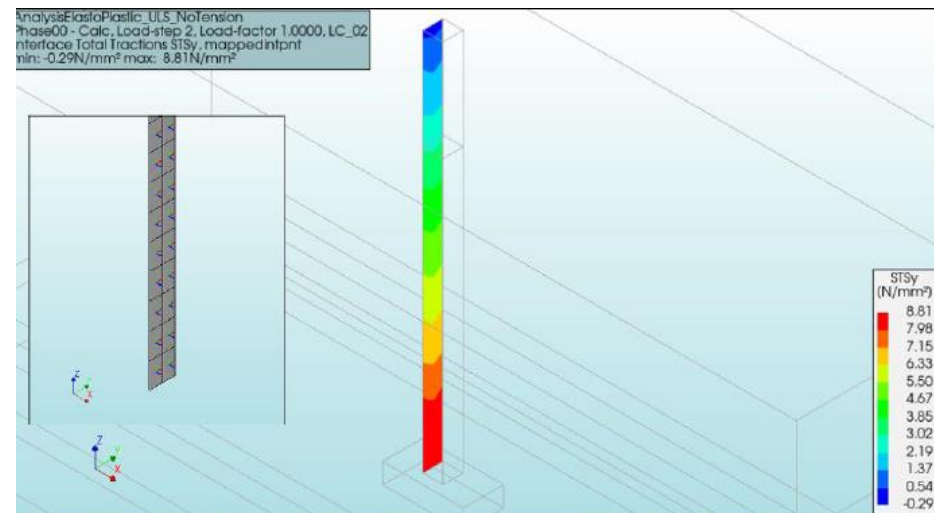
NLFEM Analysis

Serge Vandemeulenbroecke

Conclusie: het eerder ontwikkelde vereenvoudigde model geeft de resultaten realistisch weer

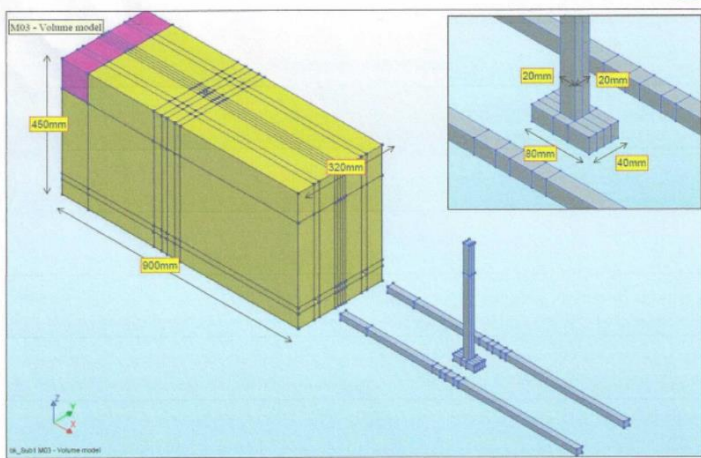


Buigmoment in de kopdeugelstaaf



Interface schuifspanningen langs de kopdeugel

NLFEM Analysis

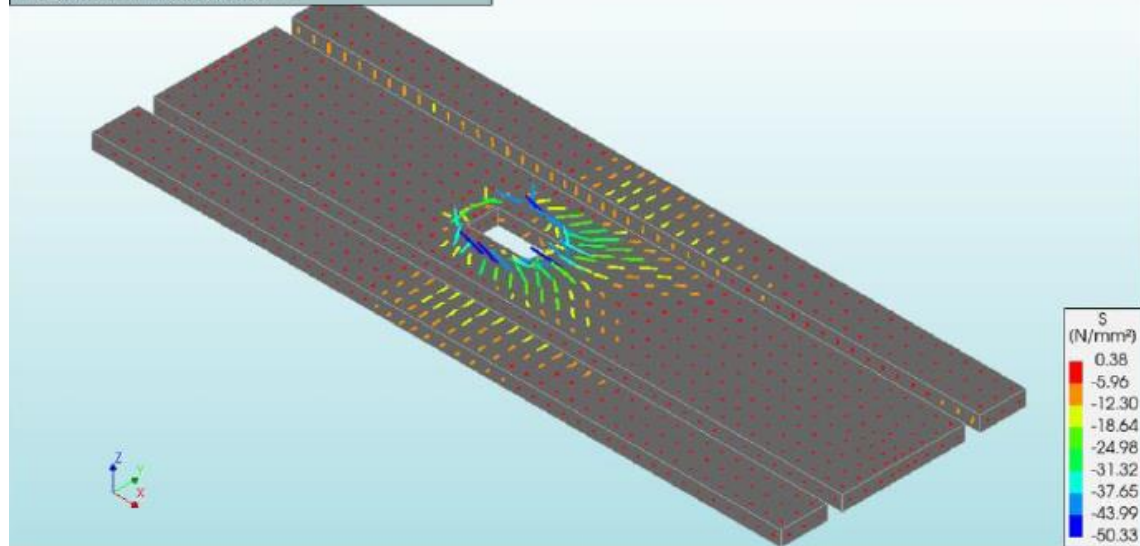


NLFEM Analysis

Serge Vandemeulenbroecke

Conclusie: het eerder ontwikkelde vereenvoudigde model geeft de resultaten realistisch weer

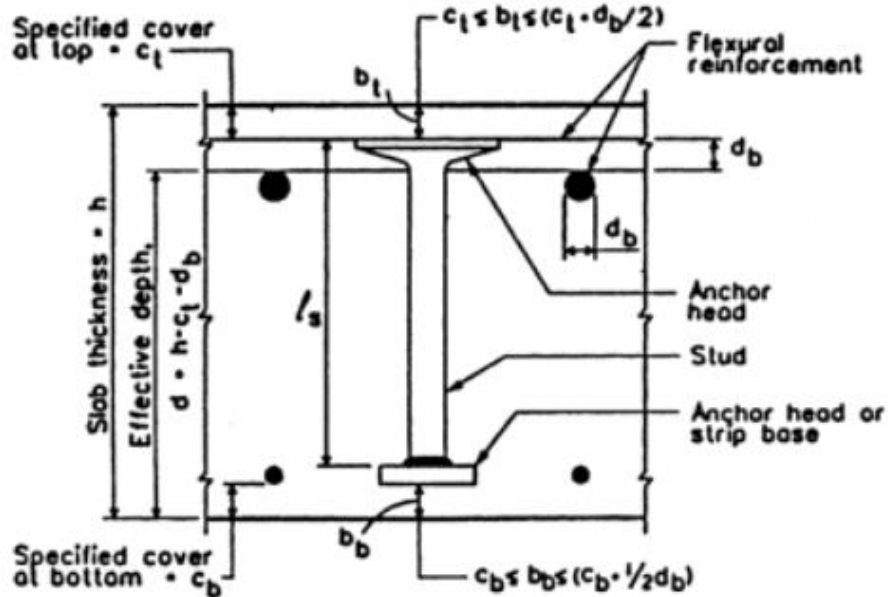
Analysis: ElasticPlastic_ULS_NoTension
Phase00 - Calc, Load-step 2, Load-factor 1.0000, LC_02
Cauchy Total Stresses principal components, mapped into pt
min: -50.33N/mm² max: 0.38N/mm²



Figuur 25: 3D model – richting van de hoofdspanning in het beton langs de voet van de kopdeugel

Hoofdspanningen rondom de deuvelkop

Kopdeuvelstaven als dwarskrachtwapening



Research on shear capacity of beams with T-headed bars:

- SINTEF, 1986
- Lequesne et al. University of Kansas, 2018
- Yang et al. Purdue University USA, 2021

T-Headed studs as shear reinforcement, ACI 421.1R-20

Conclusies

1. Het plaatsen van T-headed studs als dwarskrachtwapening in een vloer, tussen de hoofd- en verdeelwapeningsstaven, is een realistische optie. Internationale richtlijnen en resultaten van experimenten ondersteunen deze oplossing.
2. Om optimaal te functioneren moeten de kopdeuvels geplaatst worden in het vlak van de buitenste wapening, waarbij tolerantie-regels in acht moeten worden genomen.
3. Op grond van diverse internationale onderzoeksprogramma's, waarin proeven zijn uitgevoerd op constructieve elementen met T-headed studs, is geconcludeerd dat deze, mits effectief verankerd, qua dwarskrachtdraagvermogen, gelijkwaardig zijn aan balken met wapening-omsluitende beugels. Zij kunnen dus op grond van bestaande rekenregels worden ontworpen.
4. Het gebruik van kopdeuvels als dwarskrachtwapening, geplaatst in de laag met hoofd- en verdeelwapening, biedt praktische voordelen, zoals snellere montage en een kleinere kans op uitvoeringsfouten.

Conclusies (cont.)

5. In de draft van de nieuwe Eurocode 1992-1-1 worden richtlijnen gegeven voor de toepassing van T-headed studs. Dit betreft de volgende hoofdstukken:

11.4.7 Verankering van de kopdeuvelstaven

12.3.3 Erkenning als geaccepteerd type dwarskrachtwapening
Toepassing mogelijk zonder combinatie met andere typen
dwarskrachtwapening als $\tau_{Ed} \leq 0,08f_{cd}$

8.6. Partially loaded areas: relevant om kopdruk op de ankers van de T-headed studs te controleren, om zodoende de toelaatbare hoek θ van de betondrukdiagonalen te kunnen vaststellen.
Er zijn sterke aanwijzingen dat de grenswaarde van de druksterkte $\sigma_{Rdu} \leq 3f_{cd}$ sterk aan de conservatieve kant is.
Hier kan verder onderzoek leiden tot meer geavanceerde modellen en bijdragen aan een bredere en economische toepassing.

Voorlopig voorstel

- Uitgaan van een maximale drukspanning op de zijkant van de deuvelkop van $5,0f_{cd}$
- Ondergrens aanhouden voor diagonaalhelling $\cot \theta = 2,0$ ($\theta = 26,6^\circ$)
- Notitie uitbreiden tot Stufib rapport
- Nieuw artikel in Cement indienen met nieuwe bevindingen
- Invoeren als Nationally Defined Parameters in Nederlandse Nationale Bijlage