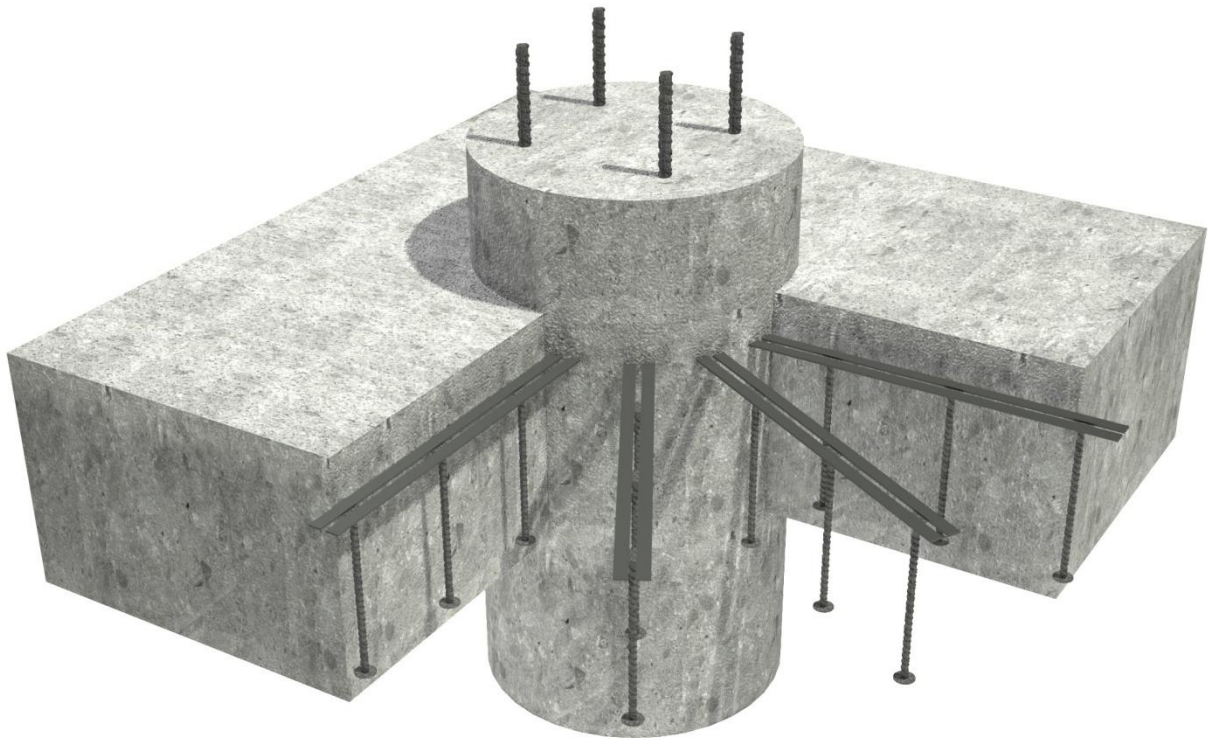


# Bachelor Eindwerk

Een literatuurstudie naar de Eurocode 2 ponsscheurhelling



Jarno Frankenmolen  
4315626

Begeleiders:  
dr. ir. drs. C.R. Braam  
dr. ir. P.C.J. Hoogenboom

Technische Universiteit Delft  
Juni 2017



## **VOORWOORD**

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Bachelor Eindwerk (Civiele Techniek) aan de Technische Universiteit Delft. Het was voor mij een zeer leerzame ervaring die ook een andere kant van de studie Civiele Techniek heeft laten zien. Dit eindwerk heeft mij ervan overtuigd dat de MSc Structural Engineering de juiste keuze is voor mij.

Graag wil ik mijn begeleiders dr. ir. drs. C.R. Braam en dr. ir. P.C.J. Hoogenboom voor hun ondersteuning en hulp tijdens de uitvoering van dit Bachelor Eindwerk.

*Jarno Frankenmolen*

*Delft, Juni 2017*

# INHOUDSOPGAVE

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SAMENVATTING .....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>INLEIDING .....</b>                                  | <b>4</b>  |
| <b>1. SYMBOLEN .....</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>2. INVLOEDSFACTOREN SCHEURHOEK .....</b>             | <b>6</b>  |
| 2.1 RELATIE SCHEURHOEK EN SCHUIFSPANNING .....          | 6         |
| 2.2 HERKOMST SCHEURHOEK .....                           | 7         |
| 2.3 INVLOEDSFACTOREN .....                              | 7         |
| 2.3.1 EFFECTIEVE HOOGTE .....                           | 7         |
| 2.3.2 BETONSTERKTE KLASSE .....                         | 8         |
| 2.3.3 LANGSWAPENINGSVERHOUDING .....                    | 8         |
| <b>3. KWANTITATIEVE ANALYSE VAN DE SCHEURHOEK .....</b> | <b>10</b> |
| 3.1 MODEL .....                                         | 10        |
| 3.2 VERIFICATIE MODEL .....                             | 11        |
| 3.3 RELATIE MET DE PONSCAPACITEIT .....                 | 12        |
| <b>4. BIJDRAGE AAN DE PONSCAPACITEIT .....</b>          | <b>13</b> |
| 4.1 VERGELIJKING VAN DE PERIMETERS .....                | 13        |
| 4.2 HETEROGENITEIT VAN BETON .....                      | 14        |
| <b>5. CONCLUSIE .....</b>                               | <b>16</b> |
| <b>REFERENTIES .....</b>                                | <b>17</b> |
| <b>BIJLAGE A .....</b>                                  | <b>18</b> |
| <b>BIJLAGE B .....</b>                                  | <b>19</b> |

## SAMENVATTING

De scheurhoek is afhankelijk van verschillende factoren: de effectieve hoogte, de betonsterkte klasse en de langswapeningsverhouding. Al deze factoren bepalen de scheurhoek wanneer er sprake is van bezwijken door pons. De scheurhoek is echter lastig te voorspellen vanwege de heterogeniteit van beton. Daarom is in de Eurocode een vaste scheurhoek aangehouden, namelijk  $26.6^\circ$ .

Bompa en Onet<sup>[2]</sup> kwamen met een model waardoor de ponscapaciteit nauwkeurig kan worden berekend dan de huidige Eurocode. Tevens was de volgens dit model berekende scheurhoek een goede benadering van de werkelijkheid. In het onderzoek werden 209 testresultaten meegenomen. Het voorgestelde model presteerde erg goed. De  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1.00$  en  $CoV = 0.14$ , tegenover  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1.02$  en  $CoV = 0.15$  bij de Eurocode berekening. Daarentegen is de berekening van Bompa en Onet een stuk complexer dan de berekening die is toegepast in EC2. Hierdoor is deze berekening minder makkelijk toepasbaar dan de berekening volgens de Eurocode.

Een analyse van verschillende codes (en perimeters) wees uit dat in principe de grootte van de perimeter, en daarmee de scheurhoek, niet veel uitmaakte voor de uiteindelijk berekende ponscapaciteit. Het blijkt dat een aanname van de scheurhoek zeer goed mogelijk is, zolang dit gegeven maar meegenomen wordt in de berekening van de ponscapaciteit.

## INLEIDING

Pons is een type bezwijkmechanisme bij betonnen kolommen en vloeren die samen in het werk zijn gegoten. Doordat er vaak grote krachten op deze kolommen staan, zullen er lokaal erg grote dwarskrachten (en momenten) worden gegenereerd. Volgens de theorie geldt  $v_{Ed,d} = \frac{V_{Ed}}{2\pi R \cdot d_{eff}}$ . Dit betekent dat wanneer de controle perimeter, t.o.v. het normaalkrachtencentrum, van de kolom naar nul gaat de dwarskrachtspanning oneindig groot wordt. Dit gebeurt natuurlijk in de praktijk niet, maar geeft wel aan dat de schuifspanningen rondom de kolom erg groot kunnen worden. Vaak zijn deze spanningen zelfs maatgevend.

In de Eurocode 2<sup>[1]</sup> wordt dit opgelost door twee grenzen te stellen aan de scheurhoek die kan optreden bij pons. Deze scheurhoek is gerelateerd aan de controle perimeter, die op zijn beurt weer een directe relatie heeft met de schuifspanning.

De scheurhoek, volgens Eurocode 2<sup>[1]</sup>, ligt tussen de 21.8° en 45°. Echter, in de praktijk, wordt een scheurhoek van 26.6° toegepast om de eerste controle perimeter,  $u_1$  uit te rekenen. Dit komt overeen met een scheurhoek van 1:2.

*Het doel van dit rapport is om na te gaan of deze empirisch bepaalde scheurhoek van 26.6° wel mag worden aangenomen en gebruikt.* Dit wordt gedaan met behulp van reeds uitgevoerde experimenten. Er wordt nagegaan of deze aanname van de scheurhoek correct is, of dat er eventuele verbeteringen in de normen kunnen worden aangebracht. Hierbij zal worden gekeken naar vloeren zonder dwarskrachtwapening.

Uiteindelijk blijkt dat EC2 zeer goed in staat is om de ponscapaciteit goed te voorspellen, alhoewel in deze methode de aangenomen scheurhoek vaak niet overeenkomt met de waargenomen scheurhoek.

**Python codes zijn op aanvraag beschikbaar.**

# 1. SYMBOLEN

Hieronder zullen enkele definities worden gegeven van verschillende symbolen, die worden gebruikt door het gehele werk heen.

|                 |                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $v_{Ed,d}$      | rekenwaarde van de optredende schuifspanning t.g.v. de $V_{Ed}$                                                                                                                                                          |
| $V_{Ed}$        | rekenwaarde van de optredende dwarskracht                                                                                                                                                                                |
| $R$             | de radius (controle perimeter) t.o.v. het normaalkrachtencentrum                                                                                                                                                         |
| $R_p$           | de radius (controle perimeter) t.o.v. de rand van de doorsnede                                                                                                                                                           |
| $d_{eff}$       | de effectieve hoogte                                                                                                                                                                                                     |
| $\beta$         | vergrotingsfactor excentriciteit                                                                                                                                                                                         |
| $\theta$        | theoretische scheurhoek (bij bezwijking op pons)                                                                                                                                                                         |
| $c$             | afmeting van de zijde van een <i>vierkante</i> kolom                                                                                                                                                                     |
| $u_1$           | eerste controle perimeter                                                                                                                                                                                                |
| $v_{Rd,c}$      | ponsweerstand (schuifspanning)                                                                                                                                                                                           |
| $\rho$          | langswaapeningsverhouding                                                                                                                                                                                                |
| $f_y$           | vloeigrens van de langswaapening                                                                                                                                                                                         |
| $f_{ck}$        | karakteristieke waarde voor de cylinder betondruksterkte                                                                                                                                                                 |
| $\omega$        | mechanische langswaapeningsverhouding                                                                                                                                                                                    |
| $\theta_{gem}$  | de geobserveerde scheurhoek volgens $\theta_{gem} = \frac{1}{2} \cdot (\theta_{links} + \theta_{rechts})$ waarin $\theta_{links}$ en $\theta_{rechts}$ de scheurhoeken respectievelijk links en rechts van de kolom zijn |
| $\theta_{calc}$ | de hoek volgens $\tan \theta = 0.6 + \omega \cdot \left(\frac{d_{eff}}{265}\right)^{\frac{1}{2}}$                                                                                                                        |
| $V_{R,calc}$    | de berekende ponscapaciteit                                                                                                                                                                                              |
| $V_{u,test}$    | gemeten ponscapaciteit                                                                                                                                                                                                   |
| $\tau_{Rd}$     | basis schuifspanning                                                                                                                                                                                                     |
| $k$             | de vergrotingsfactor                                                                                                                                                                                                     |
| $f_{ctk}$       | karakteristieke waarde van de axiale treksterke van beton                                                                                                                                                                |
| $f_{cm}$        | gemiddelde cilinderdruksterkte van het beton                                                                                                                                                                             |
| $\gamma_c$      | materiaalfactor voor beton = 1.5                                                                                                                                                                                         |

## 2. INVLOEDSFACTOREN SCHEURHOEK

De scheurhoek is een complexe grootheid die van een aantal verschillende parameters afhangt. De belangrijkste parameters die van invloed zijn op de scheurhoek, zijn te noemen: de effectieve hoogte, de betonsterkte klasse en de langswapeningsverhouding<sup>[2]</sup>.

In deze paragraaf wordt getracht een duidelijker beeld te scheppen van de verschillende factoren die van invloed zijn op de scheurhoek. Eerst zal wat achtergrondinformatie worden gegeven.

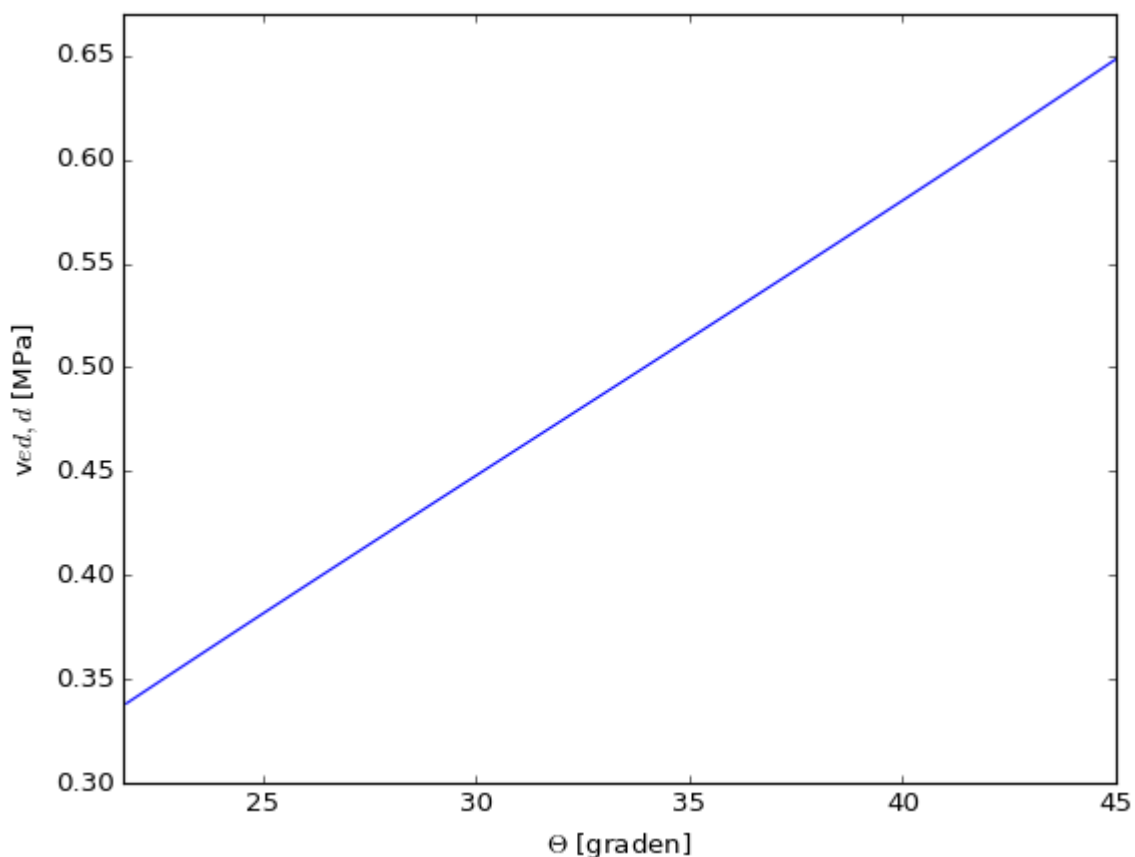
### 2.1 RELATIE SCHEURHOEK EN SCHUIFSPANNING

Om een goed overzicht te geven van de invloed van de scheurhoek op de optredende schuifspanning wordt hieronder een grafiek getoond die deze relatie weergeeft. Bij deze figuur horen de volgende parameters:  $V_{Ed} = 150 \text{ kN}$ ,  $d_{eff} = 150 \text{ mm}$ ,  $\beta = 1.0$  en vierkante kolom  $150 \times 150 \text{ mm}$

De schuifspanning kan nu worden berekend m.b.v.  $v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 \cdot d_{eff}}$  <sup>[1]</sup>

Dit is dus een berekening *alleen* op basis van de eerste controle perimeter  $u_1$ .

De range van de figuur hieronder is  $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$



Figuur 1 - relatie tussen scheurhoek en schuifspanning

Deze grafiek lijkt lineair te zijn, dit is echter schijn vanwege het feit dat  $\tan(x)$  op het domein  $[-1,1]$  bijna kan worden benaderd door een lineaire grafiek. Interessant is wel dat er geconcludeerd kan worden dat er bij benadering dus kan worden gezegd dat de scheurhoek en de optredende schuifspanning rechtevenredig zijn. Er is namelijk maar een toename van 7% (relatief gezien t.o.v. een rechte evenredige relatie) in de schuifspanning bij  $45^\circ$  t.o.v. de schuifspanning van bij  $21.8^\circ$ .

## 2.2 HERKOMST SCHEURHOEK

In eerdere versies van de Eurocode 2 werd als controle perimeter  $1.5d$  aangehouden<sup>[3]</sup>. Deze wordt bijvoorbeeld nog steeds in de Duitse voorschriften aangehouden. Echter, door nieuw verkregen inzichten werd duidelijk dat deze formulering niet afdoende was. Zeker in het geval van het zogenaamde hogesterktebeton. Daarom werd de formulering uit CEB-FIB Model Code 1990 vanaf dat moment toegepast in de Eurocode 2. Dit betekende dat een controle perimeter van  $2.0d$  werd aangehouden.

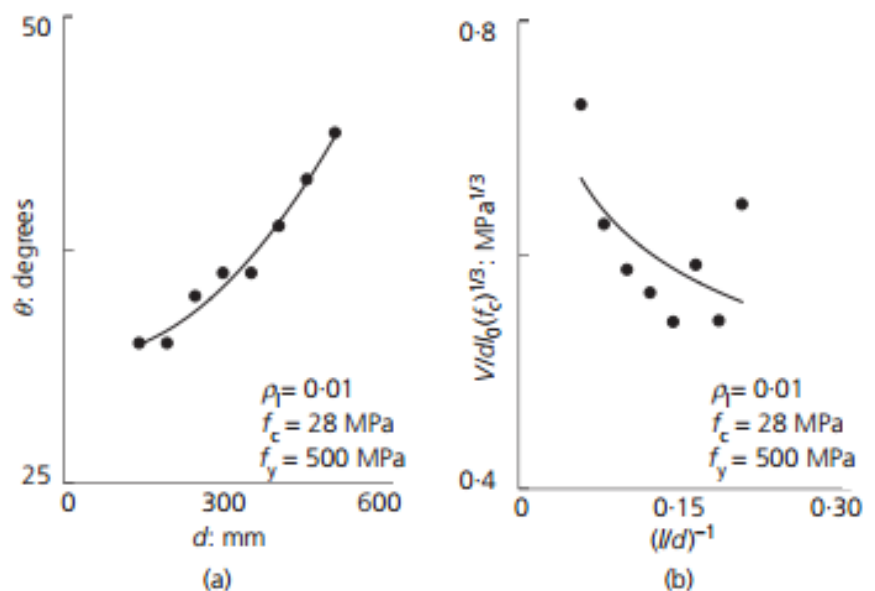
Het voordeel van deze formulering is dat de schuifspanning meer uniform is bij verschillende kolomafmetingen. Daarnaast kon aan de weerstandszijde dezelfde formule worden gebruikt als de check die reeds werd toegepast bij betonnen balken (belast op dwarskracht).

## 2.3 INVLOEDSFACTOREN

Zoals eerder gezegd, zijn er verschillende factoren van invloed op de grootte van de scheurhoek. In de volgende paragrafen zullen deze worden besproken. Dwarskrachtwapening valt buiten de scope van dit onderzoek.

### 2.3.1 EFFECTIEVE HOOGTE

Eén van de parameters die een grote invloed heeft op de scheurhoek is de effectieve hoogte. Uit studie<sup>[2]</sup> is gebleken dat de relatie tussen de scheurhoek en de effectieve diepte zelfs niet-lineair is, zie ook figuur 2(a). Een grotere scheurhoek betekent in principe een kleinere controle perimeter en dus ook een grotere schuifspanning. De effectieve diepte neemt echter sneller toe dan de tangens van de scheurhoek.



Figuur 2(a) - relatie tussen effectieve hoogte en scheurhoek

Figuur 2(b) - relatie tussen de slankheid en genormaliseerde ponsweerstand

Hieruit volgt dat  $R_p = \frac{d_{eff}}{\tan \theta}$  toeneemt en dus  $u_1 = 4 \cdot c + 2\pi \cdot R_p$  ook. Met als gevolg dat de schuifspanning in de controle perimeter omlaag gaat.

Een belangrijk punt om op te merken is, zoals in figuur 2(b) is weergegeven, dat wanneer de optredende schuifspanning omlaag gaat de genormaliseerde ponsweerstand die geleverd kan worden ook omlaag gaan. Een aanpassing van de dikte van 200mm naar 260mm kan bij een langswapeningsverhouding van 1.25% en lage betonsterkte klasse ( $f_c < 20\text{MPa}$ ) leiden tot een afname van de ponsweerstand van wel 28%<sup>[4]</sup>. Dit effect is ook zichtbaar bij lagere wapeningspercentages, maar in mindere mate.

Het is opmerkelijk dat dit gebeurt, aangezien Eurocode 2 geen rekening houdt met de effectieve hoogte bij de berekening van de ponsweerstand, behalve in de k waarde ( $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eff}}} \leq 2.0$ ). Maar deze is onafhankelijk van de langswapeningsverhouding en verklaart niet de grootte van de afname van de ponscapaciteit in alle gevallen. Het is namelijk niet consistent met de waardes die worden gevonden bij verschillende studies.

Het is interessant om te onderzoeken waar dit effect vandaan komt en hoe hier rekening mee wordt gehouden in de Eurocode.

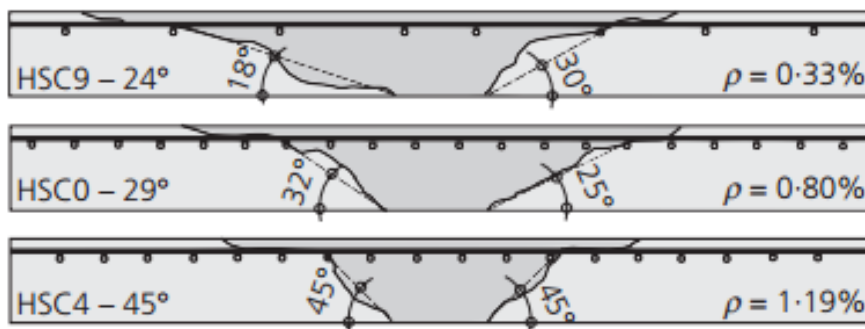
### 2.3.2 BETONSTERKTE KLASSE

Een ander aspect waar rekening mee moet worden gehouden, is de betonsterkte klasse. Door een serie van experimenten kwamen Elstner en Hognestad<sup>[5]</sup> erachter dat de grootte van de scheurhoek afneemt naarmate de betonsterkte toeneemt (niet-linear). Dit betekent dat de optredende schuifspanning uiteindelijk omlaag gaat. Daarnaast neemt de ponscapaciteit ook toe volgens

$$v_{Rd,c} = 0.12k \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}. \text{ Hierin zit al de materiaalfactor van beton } \gamma_c.$$

### 2.3.2 LANGSWAPENINGSVERHOUDING

De langswapeningsverhouding is ook van invloed op de scheurhoek die ontstaat. Zoals te zien is in de onderstaande figuur neemt de grootte van de scheurhoek toe bij een toename van de langswapeningsverhouding.



Figuur 3 - Relatie tussen langswapeningsverhouding en scheurhoek

Wederom blijkt de relatie tussen de langswapeningsverhouding en de scheurhoek niet-lineair. De toename van de scheurhoek zorgt voor een kleinere controle perimeter  $u_1$  en dus een hogere optredende schuifspanning.

Tegelijkertijd wordt door de toename van de langswapeningsverhouding ook de ponscapaciteit ( $v_{Rd,c}$ ) verhoogd, aangezien deze een directe relatie met elkaar hebben. Het blijkt dat de invloed van de betonsterkte klasse en de langswapeningsverhouding nauw aan elkaar gerelateerd zijn d.m.v. de mechanische langswapeningsverhouding  $\omega$  (zie hoofdstuk 3).

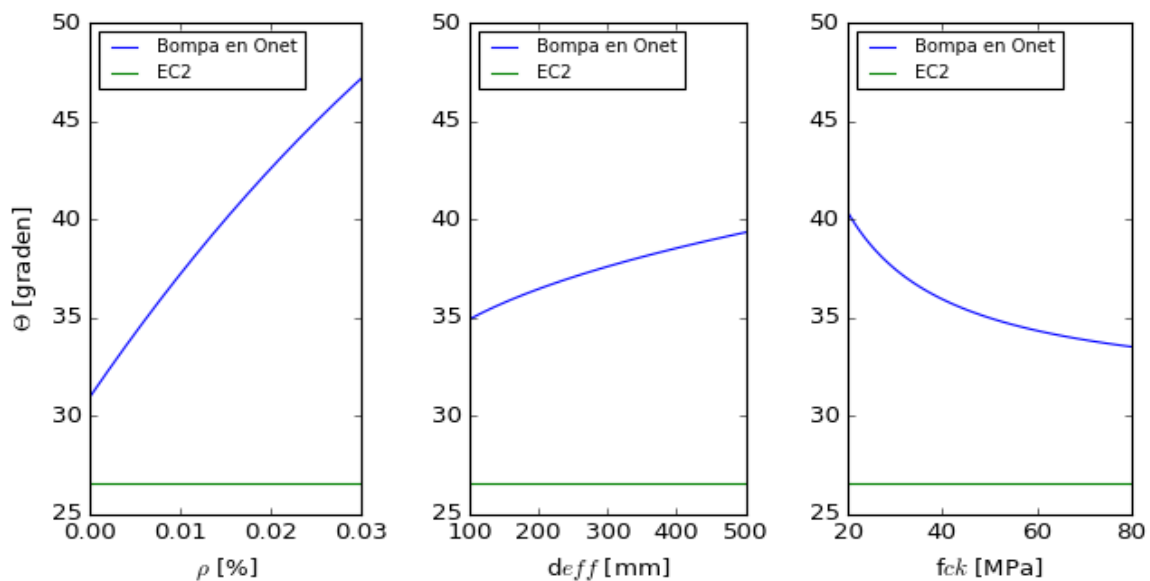
### 3. KWANTITATIEVE ANALYSE VAN DE SCHEURHOEK

In het onderzoek van Bompa en Onet<sup>[2]</sup> wordt getracht een betere voorspelling te maken wat de uiteindelijke ponscapaciteit is. Hierbij wordt de grootte van de scheurhoek meegenomen in de berekeningen. Het model dat voorgesteld wordt zal in dit hoofdstuk besproken worden.

#### 3.1 MODEL

Bompa en Onet stellen dat de scheurhoek een functie is van de effectieve hoogte, betonsterkte klasse, de vloeigrens van de langswapening en de langswapeningsverhouding. De scheurhoek kan worden berekend volgens  $\tan \theta = 0.6 + \omega \cdot \left(\frac{d_{eff}}{265}\right)^{\frac{1}{2}}$  waarbij  $\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}$ . Deze vergelijking is gekalibreerd op een gemiddelde effectieve diepte van 265 mm. Opmerkelijk is het feit dat de hoek volgens deze vergelijking, niet kleiner worden dan  $\tan \theta = 0.6$ , terwijl de eurocode  $\tan \theta = 0.5$  aanhoudt.

Hierdoor ontstaat een verschil in de scheurhoek die wordt aangenomen bij EC2 en de scheurhoek die wordt berekend volgens het model van de auteurs (zie figuur 4 hieronder). Echter blijkt uiteindelijk wel dat EC2 zeer goed in staat is om de ponscapaciteit uit te rekenen.



Figuur 4 - Relatie tussen  $\rho$ ,  $d_{eff}$ ,  $f_{ck}$  en de scheurhoek, volgens Bompa en Onet en de scheurhoek volgens EC2

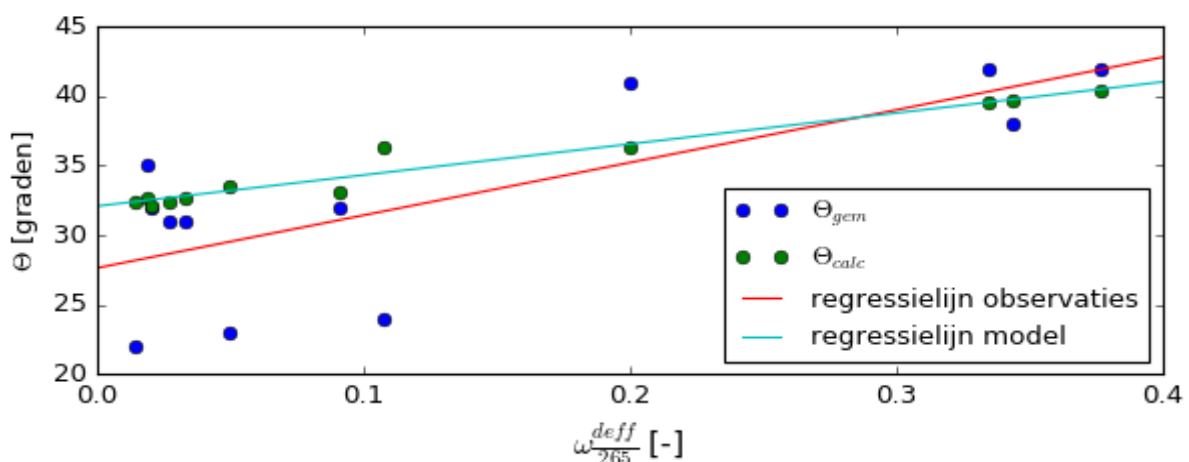
Voor de figuren zijn gebruikt  $f_y = 500$  MPa,  $\rho = 0.01$ ,  $d_{eff} = 265$  mm en  $f_{ck} = 30$  MPa (behalve wanneer een van deze variabelen is). Er wordt in dit hoofdstuk niet verder ingegaan op de invloed van de vloeigrens  $f_y$  omdat in de praktijk de vloeigrens van het wapeningstaal vrijwel altijd rond de 500-550 MPa ligt (enkele uitzonderingen daargelaten).

Zoals duidelijk te zien is in de figuur (in overeenstemming met de formule), zijn de grootste invloedsfactoren de langswapeningsverhouding en de betonsterkte klasse.

De effectieve hoogte werkt in mindere mate door in de gecalculeerde scheurhoek. Men moet zich wel realiseren dat deze grafieken bij andere waarden van de invloedsparameters wel veranderen.

### 3.2 VERIFICATIE MODEL

Om het gekozen model te verifiëren zijn een aantal experimentele waarden<sup>[6][7][8]</sup> (zie bijlage A), van de scheurhoek, uit de literatuur genomen ( $\theta_{gem}$ ) die niet in de studie van Bompaa en Onet zijn gebruikt. Deze zijn, net als de waarden volgens het model ( $\theta_{calc}$ ), uitgezet tegen de  $\omega \frac{d_{eff}}{265}$  om een duidelijk beeld te krijgen van de scheurhoek t.o.v. de mechanische langswapeningsverhouding en effectieve diepte. Vervolgens zijn voor zowel de geobserveerde scheurhoeken en berekende theoretische scheurhoeken de lineaire regressielijnen geplot (zie figuur 5).



Figuur 5 - relatie scheurhoek en de mechanische langswapeningsverhouding/effectieve hoogte

Uit bovenstaande figuur wordt duidelijk dat het model een goede benadering is t.o.v. de relatie die in de werkelijkheid geldt. Bompaa en Onet toonde al aan dat deze relatie lineair mag worden benaderd.

De gevonden regressielijn van de observaties is  $\theta = 32.1 + 22.3 \cdot \omega \frac{d_{eff}}{265}$  [graden] en van het model

$$\theta = 27.6 + 37.9 \cdot \omega \frac{d_{eff}}{265}$$

Het model benadert de geobserveerde waarden goed. Het blijkt dat het gemiddelde voor  $\frac{\theta_{gem}}{\theta_{calc}} = 0.93$ . De zogenaamde 'residual mean square error' (RMSE) van de geplotte regressielijn van het model t.o.v. de gemeten scheurhoeken komt uit op 7.53 graden. Opmerkelijk is wel dat er enkele uitschieters in de metingen zitten. Hierdoor wordt de regressiebenadering verstoord. Dit heeft voor een groot deel te maken met de heterogeniteit van beton. Tijdens het stortproces kunnen allerlei externe invloeden ervoor zorgen dat de betonkwaliteit (en ook de wapening) wordt aangetast. Door middel van materiaalfactoren kan hier beter op worden ingespeeld bij het ontwerp van betonconstructies.

Het is echter wel zo dat, hoewel het voorgestelde model een vrij brede range heeft waarin het functioneert, het toch meer excelleert in een bepaald gebied. Zeker bij waarden van  $\omega \frac{d_{eff}}{265}$  tussen de 0.15 - 0.40 blijkt het model optimaal te presteren.

Dit is overeenstemming met de bevindingen van Bompá en Onet. Volgens de analyse van de auteurs kwam eruit dat het model optimaal presteerde bij waarden van  $\omega \frac{d_{eff}}{265}$  tussen de 0.10-0.30.

Er zit dus enige discrepantie tussen de door deze heren gevonden uitkomsten en de uitkomsten uit figuur 5. Dit is echter toe te schrijven aan het feit dat er bij de verificatie minder testwaarden zijn gebruikt dan in de bovengenoemde studie, waardoor (zeker door de heterogeniteit van beton) er dus verschillen ontstaan.

### 3.3 RELATIE MET DE PONSAPACITEIT

In het model van Bompá en Onet wordt om de ponscapaciteit te berekenen de grootte van de scheurhoek meegenomen. In deze studie zijn 209 proefresultaten meegenomen. Uit de resultaten blijkt dat het gemiddelde volgens dit model  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1.00$  met een CoV = 0.14, terwijl EC2 een  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1.02$  heeft, met CoV = 0.15. Het model dat gebruikt wordt door de auteurs is dus net wat nauwkeuriger dan EC2. Tegelijkertijd geeft het natuurlijk ook aan dat EC2 dus wel degelijk heel precies is, ondanks de aanname van een hoek van  $26.6^\circ$ . Het is namelijk zo dat de scheurhoek maar één parameter is die de ponscapaciteit beïnvloed. Er is nog een heel scala aan andere factoren die van invloed zijn op de uiteindelijke ponscapaciteit.

Echter is het model dat wordt gehanteerd in de studie een stuk complexer en preciezer dan de formulering die wordt toegepast in EC2. Het is voor praktische doeleinden, zeker in een vroeg ontwerpstadium, daarom minder goed te hanteren dan de methode volgens EC2. De EC2-methode vergt minder computervermogen en is tevens makkelijker toe te passen met de hand. De minieme verschillen tussen de twee modellen zorgen ervoor dat in de meeste situaties de toepassing van EC2 eerder gewenst is dan het model van Bompá en Onet.

Toch moet er gezegd worden dat de toepassing van de EC2 methode niet altijd perfect is. Bij het checken van de ponscapaciteit van vloeren met een lage  $d_{eff}$  blijkt dat waarden van wel  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1 \pm 0.20$  mogelijk zijn<sup>[2]</sup>. Bij lage wapeningspercentages is hetzelfde fenomeen zichtbaar. De EC2 methode lijkt het dus vooral goed te doen bij de 'normale parameters'.

De scheurhoek van  $26.6^\circ$  blijkt goed toepasbaar te zijn in de meeste situaties. De formulering die opgesteld is in de Eurocode is namelijk erg 'flexibel'. Wanneer de scheurhoek bijvoorbeeld te laag wordt ingeschat, kan dat worden gecompenseerd door ook een verlaging van de  $v_{Rd,c}$  toe te passen (zie paragraaf 4.1).

Dit alles zorgt ervoor dat de methode die in Europa wordt toegepast, erg betrouwbaar en tevens makkelijk toe te passen is. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de Amerikaanse code (ACI), waar een controle perimeter van  $0.5d$  wordt toegepast en uitschieters van  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}}$  van meer dan 2.00 erg goed mogelijk zijn.

## 4. BIJDRAGE AAN DE PONS CAPACITEIT

Zoals al eerder is vermeld, is de scheurhoek maar één van de verschillende factoren die de ponsweerstand beïnvloed. In dit hoofdstuk zal worden gekeken in hoeverre een correcte scheurhoek van belang is voor een goede berekening van de uiteindelijke ponsweerstand.

### 4.1 VERGELIJKING VAN DE PERIMETERS

Er zijn verschillende manieren ontwikkeld om de ponsweerstand uit te rekenen. Veel van deze methodes gebruiken verschillende controle perimeters en dat betekent dus ook dat de aanname van de scheurhoek per methode verschilt.

In de eerdere versie van de Eurocode werd gebruik gemaakt<sup>[3]</sup> van  $V_{R,calc1} = \tau_{Rd} \cdot k (1.2 + 40\rho) \cdot d_{eff} \cdot u_1$  waarbij  $\tau_{Rd} = 0.25 \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$  en  $k = 1.6 - d_{eff} [m] \geq 1.0$ . Hierin is  $f_{ctk} = 0.21 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}$  voor betonsterkte klasse  $\leq C50/60$  en  $f_{ctk} = 1.48 \cdot \ln(1 + \frac{f_{cm}}{10})$  voor betonsterkte klasse  $> C50/60$ . Er geldt  $f_{cm} = f_{ck} + 8$ .

Bij deze formule werd een controle perimeter aangehouden van 1.5d. Een aardig verschil met de controle perimeter die tegenwoordig wordt aangehouden in EC2 (namelijk 2.0d). Deze formule gaf in principe goede resultaten, maar kon af en toe onconservatieve resultaten geven voor hogesterktebeton.

Daarom werd een, al eerder besproken, andere formulering toegepast. Namelijk

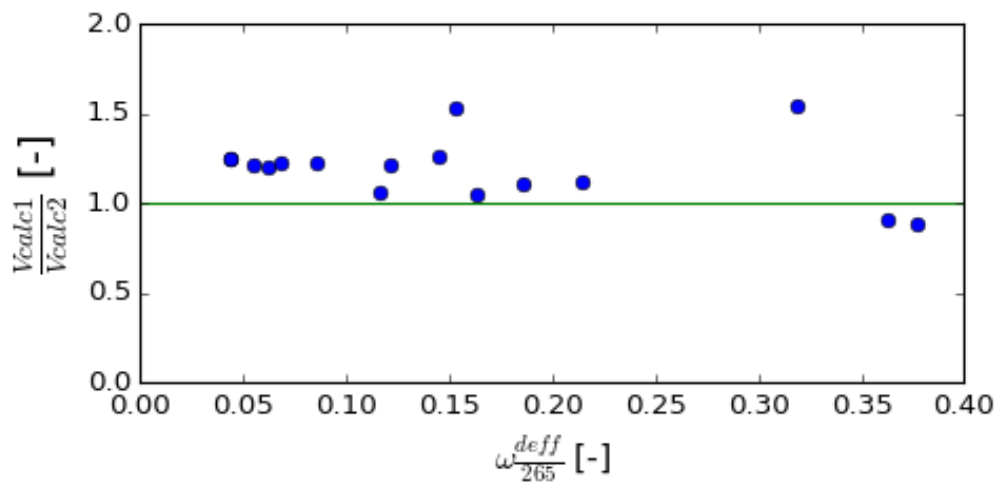
$V_{R,calc2} = 0.12k \cdot (100\rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d_{eff}$ , met  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{eff}}} \leq 2.0$ . Deze formule houdt beter rekening met het steeds meer toegepaste hogesterktebeton.

In figuur 6 is de fractie  $\frac{V_{R,calc1}}{V_{R,calc2}}$  uitgezet tegen  $\omega \frac{d_{eff}}{265}$ . De data die is gebruikt bij het maken van dit figuur (zie bijlage B) is anders dan de data die is gebruikt bij het maken van figuur 5. In totaal zijn van 17 verschillende proefstukken de data meegenomen; erop letten dat er veel verschillende combinaties van eigenschappen in zitten (lage/hoge  $d_{eff}$ ,  $f_{ck}$  en  $\rho$ ).

Het is duidelijk dat de verschillen in uitkomsten tussen  $V_{R,calc1}$  en  $V_{R,calc2}$  niet erg groot zijn. Echter is wel zichtbaar dat de oude berekeningsmethode de neiging heeft om de ponscapaciteit iets groter in te schatten dan de nieuwe EC2 berekening. De gemiddelde waarden van  $\frac{V_{R,calc1}}{V_{R,calc2}}$  komt uiteindelijk uit op 1.18. Vooral proefstukken met een grote effectieve diepte zorgden ervoor dat  $\frac{V_{R,calc1}}{V_{R,calc2}}$  naar 1.00 toe liep.

Ook als gekeken wordt naar de uitkomsten van Bompaa en Onet lijkt hetzelfde patroon zichtbaar. Bij de uitkomsten die werden gepubliceerd door het tweetal kwam naar voren dat ook de berekening volgens MC2010 (FIB) nauwkeurig was. Met een gemiddelde van  $\frac{V_{R,calc}}{V_{u,test}} = 1.08$  en  $CoV = 0.21$ .

Weliswaar een slechter gemiddelde en een grotere spreiding dan de Eurocode, maar bij MC2010 wordt een controle perimeter van slechts  $0.5d$  aangehouden. De theoretische achtergrond van MC2010 wordt achterwege gelaten vanwege de complexe aard van de berekening.



Figuur 6 - fractie van de ponscapaciteit uit de twee Eurocodes uitgezet tegen de mechanische wapeningsverhouding/effectieve hoogte

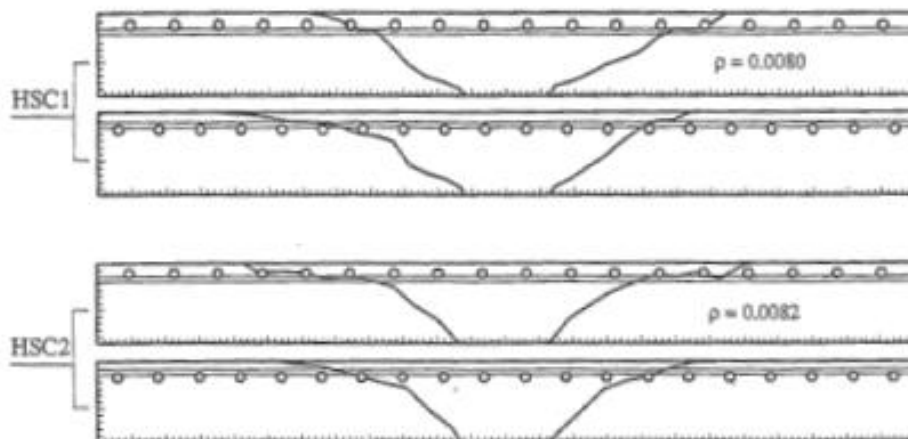
Er is dus naar drie verschillende methodes gekeken om de ponscapaciteit uit te rekenen. Allen blijken goed in staat om nauwkeurig deze ponscapaciteit te voorspellen. Dit terwijl er drie verschillende controle perimeters worden aangehouden:  $0.5d$  (MC2010),  $1.5d$  (oude EC berekening) en  $2.0d$  (nieuwe EC berekening).

Dit komt vanwege het feit dat de scheurhoek zelf, vaak niet de maatgevende parameter is bij de berekening van de ponscapaciteit. De hoek - en daarmee de controle perimeter - is namelijk een aanname die op voorhand niet te checken is. Daarom is hier slim mee omgesprongen door de auteurs van de verschillende beton codes. De eventuele fout in de hoek wordt opgevangen in de calculatie van de schuifweerstand  $v_{Rd,c}$  (zie volgende paragraaf).

#### 4.2 HETEROGENITEIT VAN BETON

De scheurhoek is van tevoren moeilijk te voorspellen. Zoals te zien is in figuur 5 gaat met het juiste model deze voorspelling vaak goed. In dezelfde figuur is ook te zien dat er enkele uitschieters in zitten die een grote mate van discrepantie laten zien tussen de waarneming en voorspelling.

Twee identieke vloeren (met vrijwel dezelfde eigenschappen) kunnen met twee verschillende scheurhoeken falen. Dit betekent dat het lastig is om van tevoren de scheurhoek precies te bepalen. Er moet dus wel een aanname worden gedaan.



Figuur 7 - Verschillende scheurhoeken bij twee proefstukken met dezelfde eigenschappen

Dit verschil wordt onder meer veroorzaakt door de heterogeniteit van beton. Vanwege deze eigenschap van beton is het goed mogelijk dat er 'zwakke' en 'sterke' delen beton zitten in één enkel proefstuk.

In figuur 7 is te zien hoe twee identieke proefstukken toch met een iets verschillende scheurhoek falen. Bij deze twee proefstukken zijn zowel de langswapeningsverhouding als de betonsterkte klasse hetzelfde. Het enige verschil is dat HSC1 een effectieve hoogte van 200mm heeft en HSC2 een effectieve hoogte van 196mm. Een verwaarloosbaar verschil.

We kunnen uiteindelijk dus stellen dat een correcte scheurhoek niet van echt van belang is voor een correcte bepaling van de ponscapaciteit. De uitdrukkingen die worden gegeven in de verschillende codes hebben niet zo zeer betrekking op de (moeilijke) bepaling van de juiste scheurhoek. De focus ligt eerder op berekening van een zo nauwkeurig mogelijke ponscapaciteit d.m.v. een correcte berekening van de schuifspanning  $\nu_{Rd,c}$  die kan 'compenseren' voor de fout aangenomen scheurhoek.

## 5. CONCLUSIE

Het mag duidelijk zijn dat de aanname van  $26.6^\circ$ , die in EC2 wordt gedaan, volstaat. Hoewel in de praktijk de scheurhoek vaak tussen de  $30^\circ$  en  $40^\circ$  ligt, is de berekeningsmethode voor de ponscapaciteit, uit EC2 toch erg betrouwbaar. *Zolang de formulering voor  $v_{Rd,c}$  voor een bepaalde aangenomen scheurhoek correct is, heeft de daadwerkelijk optredende scheurhoek geen invloed op de grootte van de berekende ponscapaciteit. Dit geldt dus ook voor de aanname die wordt gedaan in EC2. De aanname van  $26.6^\circ$  mag dus worden gedaan en is correct.*

Het voornaamste argument om niet een nieuwe formulering naar voren te brengen, of de huidige formulering aan te passen, is dat de huidige berekening uit EC2 gemakkelijk is in gebruik. In het beginstadium van een project kan een ontwerper makkelijk een eerste indicatie krijgen in hoeverre het ontwerp voldoet aan de eisen m.b.t. pons. Erg hoge nauwkeurigheid is nog niet gewenst in dit ontwerpstadium.

Natuurlijk is er de mogelijkheid om de berekening nauwkeuriger uit te voeren, zoals bij het model van Bompa en Onet, echter is deze berekening veel tijdrovender en lastiger dan de simpele methode die wordt voorgesteld in EC2. Dit geldt ook voor veel andere modellen. Voor het eerste ontwerpstadium is deze methode dan ook eigenlijk te uitgebreid. Echter zal in latere stadia van het ontwerpproces vaak gebruik worden gemaakt van computerberekeningen. Dit betekent dat dan dus ook complexere, nauwkeurigere berekeningen kunnen worden toegepast indien dit gewenst is.

## REFERENTIES

### LITERATUUR

- [1] NEN-EN 1992-1-1+C2, 'Eurocode 2: Ontwerpen en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen', November 2011
- [2] D. V. Bompá, T. Onet, 'Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns', Magazine of Concrete Research, Vol. 68(1), 30-5-2015
- [3] European Concrete Platform ASBL, 'Eurocode 2 Commentary', June 2008
- [4] D.V. Bompá, T. Onet, 'Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns', Magazine of Concrete Research, Vol. 68(1), p.27, 30-5-2015
- [5] R.C. Elstner, E. Hognestad, 'Shearing strength of reinforced concrete slabs', ACI Structural Journal, Vol. 53(7), 1-7-1956
- [6] S. Guandalini, O.L. Burdet, A. Muttoni, 'Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios', ACI Structural Journal, Vol. 106(1), 1-1-2009
- [7] J. Hegger, M. Ricker, A.G. Sherif, 'Punching Strength of Reinforced Concrete Footings', ACI Structural Journal, Vol. 106(5), 1-9-2009
- [8] M. Hallgren, Doctoral thesis 'Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs', TRITA-BKN, Bulletin 23, 1996

### FIGUREN

- 1) Afbeelding voorblad - <http://www.maxfrank.co.uk/uk/products/reinforcement-technologies/shearail-punching-shear-reinforcement.php>
- 2) Figuur 2 - D.V. Bompá, T. Onet, 'Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns', Magazine of Concrete Research, Vol. 68(1), p.30 (figure 6), 30-05-2015
- 3) Figuur 3 - D.V. Bompá, T. Onet, 'Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns', Magazine of Concrete Research, Vol. 68(1), p.25 (figure 3), 30-05-2015
- 4) Figuur 7 - M. Hallgren, Doctoral thesis 'Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs', TRITA-BKN, Bulletin 23, p. 74 (figure 4-20a), 1996

## BIJLAGE A

Hieronder vind u de proefstukken die gebruikt zijn voor het verifiëren van het model (figuur 5). De belangrijkste parameters zijn de gemeten scheurhoek  $\theta_{gem}$ ,  $\omega$  en  $d_{eff}$ . Deze scheurhoek is berekend op basis van de vorm van de zogenaamde 'punching cone', hieruit volgt  $\theta_{gem} = \frac{1}{2} \cdot (\theta_{links} + \theta_{rechts})$ . Indien mogelijk is dit het gemiddelde van twee verschillende doorsneden, die loodrecht op elkaar staan.

| Proefstuk | $\theta_{gem}$ [graden] | $\omega$ [-] | $d_{eff}$ [mm] |
|-----------|-------------------------|--------------|----------------|
| PG-2b     | 31                      | 0.0341       | 210            |
| PG-3      | 32                      | 0.0530       | 456            |
| PG-4      | 31                      | 0.0420       | 210            |
| PG-5      | 23                      | 0.0625       | 210            |
| PG-8      | 35                      | 0.0424       | 117            |
| PG-9      | 22                      | 0.0333       | 117            |
| PG-11     | 24                      | 0.1357       | 210            |
| DF6       | 42                      | 0.2528       | 395            |
| DF11      | 42                      | 0.2244       | 395            |
| DF17      | 38                      | 0.2309       | 395            |
| DF20      | 41                      | 0.1345       | 395            |
| HSC9      | 32                      | 0.0271       | 202            |

## BIJLAGE B

Hieronder vind u de data die is gebruikt om figuur 6 te creëren. De gebruikte waarden komen uit het document van Bomp en Onet<sup>[2]</sup>.

| Proefstuk | $d_{eff}$ [mm] | $f_{ck}$ [MPa] | $f_y$ [MPa] | $\rho$ [-] |
|-----------|----------------|----------------|-------------|------------|
| HSC0      | 200            | 89.2           | 643         | 0.008      |
| HSC1      | 200            | 86.7           | 627         | 0.008      |
| HSC4      | 200            | 87             | 596         | 0.012      |
| ND65-1-1  | 275            | 64.1           | 500         | 0.015      |
| ND95-1-3  | 275            | 89.7           | 500         | 0.025      |
| II/1      | 200            | 34.4           | 530         | 0.010      |
| IA-1a     | 118            | 11.1           | 332         | 0.0115     |
| IA-2a     | 114            | 10.7           | 321         | 0.0247     |
| PG-3      | 456            | 31.8           | 520         | 0.033      |
| BD-10     | 260            | 31.4           | 524         | 0.010      |
| II-P25    | 218            | 32.5           | 544         | 0.004      |
| II-P30    | 268            | 32.5           | 544         | 0.004      |
| II-P35    | 318            | 32.5           | 580         | 0.004      |
| DF6       | 395            | 19.0           | 552         | 0.087      |
| DF15      | 470            | 21.7           | 552         | 0.0085     |
| DF22      | 395            | 35.4           | 552         | 0.0087     |
| NSS1      | 313            | 40             | 460         | 0.0158     |