

De ponsweerstand van rand- en hoekkolommen

Een studie naar de rekenmethodieken voor de ponsweerstand volgens de voorschriften



Bachelor Eindwerkopdracht
TU Delft

Douwe Haarsma
4479386

Begeleid door
Dr. ir. drs. C.R. Braam & dr. ir. P.C.J. Hoogenboom

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van het Bachelor Eindproject “De ponsweerstand van rand- en hoekkolommen”. Dit rapport is het eindresultaat van een onderzoek naar pons volgens de oude en huidige voorschriften gedurende een periode van acht weken. Daarnaast is dit rapport geschreven in het kader van de afronding van de Bachelor Civiele Techniek aan de TU Delft.

Kennis over civiele techniek in het algemeen en betonconstructies in het bijzonder wordt als bekend beschouwd tijdens het lezen van dit rapport.

Mijn dank gaat uit naar mijn begeleiders dr. ir. drs. C.R. Braam en dr. ir. P.C.J. Hoogenboom voor de begeleiding en ondersteuning tijdens dit traject. Bovendien ben ik hen erg dankbaar voor de bruikbare adviezen en antwoorden op al mijn vragen. Ten slotte wil ik mijn vader bedanken voor het meedenken en voor zijn hulp.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Houten, oktober 2018

Douwe Haarsma

Abstract

Pons is één van de bezwijkmechanismes die kan optreden bij het bezwijken van een betonnen vloer gesteund op kolommen. Vanwege de onduidelijkheid over hoe de voorschriften met betrekking tot de weerstand tegen pons zijn veranderd gedurende de jaren, moet worden onderzocht of deze voorschriften conservatiever – oftewel veiliger – zijn geworden. Een conservatiever of veiliger voorschrift zal de bezwijkkracht het meest onderschatten. Op grond van een eerder onderzoek naar middenkolommen is het onderzoek beperkt tot rand- en hoekkolommen. De twee oude en het huidige voorschrift voor pons zijn vergeleken door diverse parameters (betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte, wapeningsverhouding, excentriciteit en randafstand) te variëren en te kijken naar het effect op de weerstand tegen pons. Vervolgens is er een analyse gemaakt van de verschillen tussen de ponsweerstand die volgden uit de voorschriften. Voor de randkolom bleken de voorschriften op den duur aan conservatisme ingeleverd te hebben. Voor de hoekkolom zijn de voorschriften eerst conservatiever geworden om vervolgens met de invoering van het huidige voorschrift weer aan conservatisme in te leveren. Aanbevolen wordt in een vervolgstudie dieper in te gaan op de verschillen in de veiligheidsfilosofie van de voorschriften en de ponswapening mee te nemen in het onderzoek.

Symbolenlijst

c_{nom}	Nominale betondekking
Q_d	Rekenwaarde van de belasting
Q_k	Karakteristieke waarde van de belasting
V_{Rd}	Rekenwaarde van het ponsdraagvermogen
$\gamma_{g,G}$	Belastingfactor permanente belasting
$\gamma_{q,Q}$	Belastingfactor veranderlijke belasting
ψ	Factor veranderlijke belasting

VB 1974/1984

d	Middellijn cirkelvormig lastvlak
e	Excentriciteit van de kracht
f_b	Rekenwaarde voor de betontreksterkte
f_{bk}	Karakteristieke betontreksterkte
F_d	Rekenwaarde van de ponskracht
h	Nuttige hoogte van de plaat
γ	Belastingfactor
τ_d	Rekenwaarde van de maximale schuifspanning
τ_2	Grenswaarde maximale schuifspanning
τ_1	Uiterst opneembare schuifspanning

VBC 1995

a	Middellijn cirkelvormig lastvlak
a_r	Afstand van het zwaartepunt van het lastvlak tot de rand van de plaat (randafstand)
d	Nuttige hoogte van de plaat
e_x	Excentriciteit van de ponskracht ten opzichte van het zwaartepunt van de kolomdoorsnede in x-richting
e_y	Excentriciteit van de ponskracht ten opzichte van het zwaartepunt van de kolomdoorsnede in y-richting
e_z	Excentriciteit van het zwaartepunt van de periferie ten opzichte van het zwaartepunt van de kolomdoorsnede
f_b	Rekenwaarde van de betondruksterkte
F_d	Rekenwaarde van de ponskracht
k_2	Reductiefactor
k_d	Schaalfactor
p	Perimeter
α_e	Excentriciteitsfactor
α_x	Factor bij een moment in x-richting
α_y	Factor bij een moment in y-richting
γ_m	Materiaalfactor
τ_d	Rekenwaarde van de maximale schuifspanning
τ_1	Uiterst opneembare schuifspanning
ω_0	Wapeningspercentage

Eurocode 2

c_1	Kolomafmeting evenwijdig aan de excentriciteit van de belasting
c_2	Kolomafmeting loodrecht op de excentriciteit van de belasting

d	Gemiddelde effectieve hoogte van de vlakke plaatvloer
d_y	Effectieve hoogte van de vloerdoorsnede in y-richting
d_z	Effectieve hoogte van de vloerdoorsnede in z-richting
e_{par}	Excentriciteit evenwijdig aan de plaatrand
f_{cd}	Rekenwaarde van de betondruksterkte
f_{ck}	Karakteristieke betondruksterkte
k	Schaalfactor
M_{Ed}	Rekenwaarde van het moment
M_{Edy}	Rekenwaarde van het moment in y-richting
r_x	Randafstand in x-richting
r_y	Randafstand in y-richting
u_0	Minimale omsluitende perimeter
u_1	Eerste toetsingsperimeter
u_{1*}	Verkleinde perimeter
u_i	Beschouwde perimeter
u_{out}	Uiterste toetsingsperimeter vanaf waar geen wapening meer benodigd is
v_{Ed}	Rekenwaarde van de maximale schuifspanning
v_{min}	Minimale opneembare schuifspanning
$v_{Rd,c}$	Rekenwaarde van de uiterst opneembare schuifspanning
$v_{Rd,max}$	Rekenwaarde van de maximale opneembare schuifspanning
V_{Ed}	Rekenwaarde van de ponskracht
W_1	Weerstandsmoment van de eerste periferie
β	Excentriciteitsfactor
γ_c	Materiaalfactor
ρ_l	Wapeningsverhouding

Figurenlijst

Figuur 1: Kegelvormige breuk na bezwijking door pons.	10
Figuur 2: Kolom-plaat verbinding met lengteparameters [5].....	12
Figuur 3: Maatgevende perimeter bij een rechthoekige kolom [3].	12
Figuur 4: Rand- en hoekkolom met aangegeven lengteparameters [6].....	13
Figuur 5: De verkleinde perimeter $u_1 *$ en de eerste toetsingsperimeter u_1 van de rand- en hoekkolom [7].	16
Figuur 6: Invloed betonsterkteklasse {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	23
Figuur 7: Invloed effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	24
Figuur 8: Invloed excentriciteit in y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	25
Figuur 9: Invloed excentriciteit in x-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	26
Figuur 10: Invloed randafstand {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}....	27
Figuur 11: Histogram A_{rand} invloedparameters.	28
Figuur 12: Invloed betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.	29
Figuur 13: Invloed excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.	30

Figuur 14: Invloed betonsterkteklasse en excentriciteit {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.....	30
Figuur 15: Histogram B_{rand} parametercombinaties.....	31
Figuur 16: Invloed betonsterkteklasse {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	33
Figuur 17: Invloed effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	33
Figuur 18: Invloed excentriciteit in y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	34
Figuur 19: Invloed excentriciteit in x-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	35
Figuur 20: Invloed randafstand {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}....	36
Figuur 21: Histogram A_{hoek} invloedparameters.....	37
Figuur 22: Invloed betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	38
Figuur 23: Invloed excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	39
Figuur 24: Invloed betonsterkteklasse en excentriciteit {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	39
Figuur 25: Histogram B_{hoek} parametercombinaties.	40
Figuur 26: Voorbeeldfiguren effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding.	47
Figuur 27: Invloed excentriciteit in x- en y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	48
Figuur 28: Invloed excentriciteit in x- en y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.	48

Tabellenlijst

Tabel 1: Belastingfactoren per veiligheidsklasse en per belastingscombinatie volgens de VBC [8].	18
Tabel 2: Belastingfactoren per veiligheidsklasse en per belastingscombinatie volgens de Eurocode.....	18
Tabel 3: Basissituatie met gestandaardiseerde invloedparameters.....	19
Tabel 4: Basissituatie met gestandaardiseerde invloedparameters.....	44

Vergelijkingenlijst

{1} Rekenwaarde van de maximale schuifspanning in de VB 1974/1984.....	11
{2} Uiterst opneembare schuifspanning in de VB 1974/1984.....	13
{3} Eis met betrekking tot de veiligheid zonder ponswapening in de VB 1974/1984.....	13
{4} Rekenwaarde van de maximale schuifspanning in de VBC 1995.....	13
{5} Excentriciteitsfactor in de VBC 1995.....	13
{6} e_z voor de randkolom.....	14
{7} e_z voor de hoekkolom.....	14
{8} Perimeter van de randkolom in de VBC 1995.....	14
{9} Perimeter van de hoekkolom in de VBC 1995.....	14
{10} Uiterst opneembare schuifspanning in de VBC 1995.....	14

{11}	Eis met betrekking tot de veiligheid zonder ponswapening in de VBC 1995.....	14
{12}	Rekenwaarde van de maximale schuifspanning in de Eurocode 2.....	15
{13}	Excentriciteitsfactor voor de randkolom in de Eurocode 2.....	15
{14}	Excentriciteitsfactor voor de hoekkolom in de Eurocode 2.....	15
{15}	Excentriciteitsfactor bij naar buiten gerichte excentriciteit in de Eurocode 2.....	15
{16}	Perimeter van de randkolom in de Eurocode 2.....	15
{17}	Perimeter van de hoekkolom in de Eurocode 2.....	15
{18}	Uiterst opneembare schuifspanning in de Eurocode 2.....	16
{19}	Eis ten aanzien van de maximale schuifspanning in de Eurocode 2.....	16
{20}	Ondergrenswaarde uiterst opneembare schuifspanning in de Eurocode 2.....	17
{21}	Eis met betrekking tot de veiligheid zonder ponswapening in de Eurocode 2.....	17
{22}	Eis ten aanzien van de uiterste toetsingsperimeter in de Eurocode 2.....	17
{23}	Rekenwaarde van de belasting in de VB 1974/1984.....	17
{24}	Belastingcombinatie 1 in de VBC 1995.....	18
{25}	Belastingcombinatie 2 in de VBC 1995.....	18
{26}	Belastingcombinatie 1 in de Eurocode 2.....	18
{27}	Belastingcombinatie 2 in de Eurocode 2.....	18
{28}	Ponsdraagvermogen (V_{Rd}) in de VB 1974/1984.....	20
{29}	Ponsdraagvermogen (V_{Rd}) in de VBC 1995.....	20
{30}	Ponsdraagvermogen (V_{Rd}) in de Eurocode 2.....	20

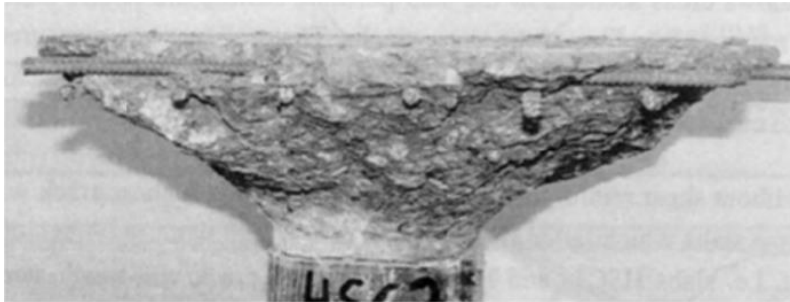
Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
Abstract	3
Symbolenlijst.....	4
Figurenlijst.....	5
Tabellenlijst.....	6
Vergelijkingenlijst.....	6
1 Inleiding	10
2 Pons volgens de voorschriften	11
2.1 Voorschriften	11
2.2 VB 1974/1984.....	11
2.3 VBC 1995	13
2.4 Eurocode 2	15
3 Veiligheidsfilosofie van de voorschriften	17
3.1 Grenstoestand VB 1974/1984.....	17
3.2 Grenstoestand VBC 1995	18
3.3 Grenstoestand Eurocode	18
4 Methode	19
4.1 Uitgangspunten	19
4.2 Werkwijze	20
4.2.1 Weerstand	20
4.2.2 Parametercombinaties	21
5 Resultaten randkolom	22
5.1 Invloedparameters.....	22
5.1.1 Betonsterkteklasse	22
5.1.2 Effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding.....	23
5.1.3 Excentriciteit	24
5.1.4 Randafstand	26
5.1.5 Histogram A_{rand}	27
5.2 Parametercombinaties	28
5.2.1 Betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding	28
5.2.2 Excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding.....	29
5.2.3 Betonsterkteklasse en excentriciteit	30
5.2.4 Histogram B_{rand}	31
5.2.5 Vergelijking Histogram A_{rand} en Histogram B_{rand}	31

6	Resultaten hoekkolom.....	31
6.1	Invloedparameters.....	32
6.1.1	Betonsterkteklasse	32
6.1.2	Effectieve plaatdikte en wapeningspercentage.....	33
6.1.3	Excentriciteit	34
6.1.4	Randafstand	35
6.1.5	Histogram A_{hoek}	36
6.2	Parametercombinaties	37
6.2.1	Betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding	37
6.2.2	Excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding.....	38
6.2.3	Betonsterkteklasse en excentriciteit	39
6.2.4	Histogram B_{hoek}	40
6.2.5	Vergelijking Histogram A_{hoek} en Histogram B_{hoek}	40
7	Conclusie.....	41
7.1	Discussie	41
7.1.1	Beperkingen.....	42
	Literatuurlijst.....	43
	Bijlage 1: Rekenvoorbeeld rand- en hoekkolom.....	44
	Bijlage 2: Dubbele buiging rand- en hoekkolom	48
	Bijlage 3: Besprekingsverslag startnotitie	49
	Bijlage 4: Tussenpeilingsverslag.....	50

1 Inleiding

In betonnen, vlakke plaatvloeren ontstaan hoge schuifspanningen ter plaatse van ondersteunende kolommen. Pons is het bezwijkmechanisme waarbij deze spanningen tot een kritiek punt stijgen en ervoor zorgen dat de kolom als het ware door de plaatvloer heen wordt gedrukt. Dit resulteert in een brossse, kegelvormige breuk (zie Figuur 1).



Figuur 1: Kegelvormige breuk na bezwijking door pons.

Een vloer die direct ondersteund is door kolommen moet dus op pons worden getoetst om de veiligheid te garanderen. De veiligheidsberekening met betrekking tot pons wordt gemaakt aan de hand van een voorschrift. De huidige en oude voorschriften hanteren ieder een versimpelde en andere rekenmethode voor de ponsweerstand. Ondanks vele onderzoeken is er onduidelijkheid over hoe de voorschriften ten aanzien van de veiligheid op den duur zijn veranderd. Het is daarom van belang om te bepalen of de voorschriften voor pons conservatiever¹ zijn geworden.

In dit rapport wordt antwoord gegeven op de vraag: zijn de voorschriften met betrekking tot de ponsweerstand van rand- en hoekkolommen in der loop der jaren conservatiever geworden? Op basis van literatuuronderzoek is er een vergelijking gemaakt tussen de voorschriften op het gebied van pons. Daarnaast is er een kwantitatief onderzoek gedaan naar de diverse parameters die invloed hebben op de weerstand tegen bezwijken. De ponsdraagvermogens van de verschillende voorschriften zijn onderling met elkaar vergeleken, waarbij de invloedparameterwaarden gevarieerd werden. De resultaten hiervan zijn gevisualiseerd aan de hand van grafieken en histogrammen, waarna een beeld ontstond over het conservatiever dan wel minder conservatief worden van de norm. Het onderzoek beperkt zich tot rand- en hoekkolommen, omdat er naar middenkolommen al onderzoek is gedaan [10].

Om de hoofdvraag van dit rapport te beantwoorden, zet hoofdstuk 2 allereerst de berekeningen van pons volgens de voorschriften uiteen. Hoofdstuk 3 beschrijft de veiligheidsfilosofie van de voorschriften. Vervolgens bevat hoofdstuk 4 de methode voor het kwantitatieve onderzoek naar de invloedparameters. In hoofdstuk 5 en hoofdstuk 6 zijn de resultaten van het parameteronderzoek naar respectievelijk de ponsweerstand van de rand- en hoekkolom te vinden. Hoofdstuk 7 bevat de conclusie of het voorschrift mettertijd conservatiever is geworden. In de bijlagen zijn rekenvoorbeelden, grafieken en besprekingsverslagen opgenomen.

¹ *Conservatiever*: een voorschrift is conservatiever wanneer hieruit de laagste bezwijkkracht volgt ten opzichte van de andere voorschriften.

2 Pons volgens de voorschriften

De maximale schuifspanning en de ponsweerstand worden in de voorschriften (2.1) op verschillende manieren berekend. De ponsberekeningen van de VB 1974/1984 (2.2), de VBC 1995 (2.3) en de Eurocode 2 (2.4) voor rechthoekige kolommen komen in dit hoofdstuk aan bod. Aan de hand van de voorschriften worden de uitdrukkingen van de schuifspanningen uitgelegd en eventuele verschillen belicht.

2.1 Voorschriften

De Eurocodes vervangen sinds 2012 de Nederlandse NEN-normen. Dit is vastgelegd in het Bouwbesluit 2012 waarin voorschriften voor onder andere constructieve veiligheid zijn opgenomen. Deze Europese normen voor de toetsing van de veiligheid van bouwconstructies zijn ingevoerd om in Europa uniformiteit te creëren met betrekking tot constructieontwerp en veiligheidscriteria [12].

In 1984 werd door het Nederlands Normalisatie-Instituut de VB 1974/1984 (NEN 3880) gepubliceerd. Hier zijn de voorschriften voor beton met onder andere een voorschrift voor pons in opgenomen. 11 jaar later verving de VBC 1995 (NEN 6720) het oude voorschrift. Sinds 2012 wordt het huidige voorschrift, de Eurocode 2 (NEN-EN 1992-1-1), gebruikt. In dit rapport worden deze drie voorschriften onderzocht.

2.2 VB 1974/1984

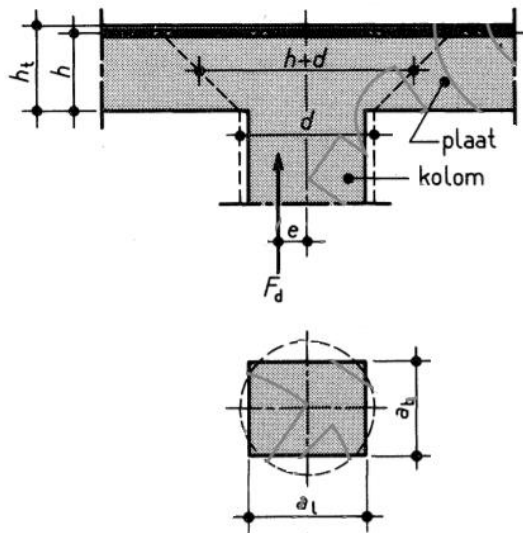
In de VB 1974/1984 (kortweg VB) [5] wordt de rekenwaarde van de **maximale schuifspanning** op de onderstaande manier uitgedrukt (zie Figuur 2). Tevens wordt hieraan een bovengrenswaarde gesteld om het bezwijken van de betondrukdiagonaal te toetsen:

$$\tau_d = \frac{F_d \left(1 + \frac{2e}{h+d} \right)}{\pi h(h+d)} \leq 0.8 * \tau_2 \quad \{1\}$$

Waarin:

$$d = \frac{2(a_b + a_l)}{\pi}$$

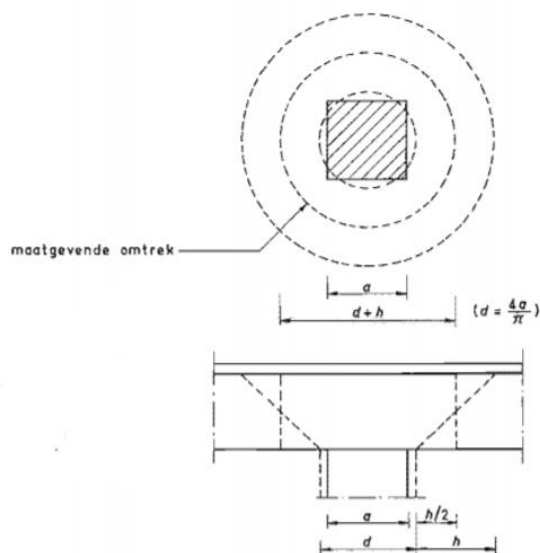
$$\tau_2 = 0.25 f'_{bk}$$



Figuur 2: Kolom-plaat verbinding met lengteparameters [5].

De maximale waarde van τ_2 bedraagt 9.0 N/mm^2 . De excentriciteitsfactor wordt in dit voorschrift gegeven door de term $1 + \frac{2e}{h+d}$. Hiermee wordt de ongelijk verdeelde schuifspanning door de excentrisch aangrijpende kracht (F_d) in rekening gebracht. De excentriciteit e is de uitkomst van het delen van het aanwezige buigend moment in de kolom door de ponskracht F_d . Opvallend is dat er bij de berekening van de maximale schuifspanning in dit voorschrift geen onderscheid wordt gemaakt tussen rand- en hoekkolommen. Bovendien kan er maar in één richting excentriciteit worden aangebracht. Doordat dit voorschrift werkt met equivalente cirkelvormige lastvlakken, kan je in theorie echter wel dubbele buiging meenemen (excentriciteit in twee richtingen).

De periferie – waar de schuifspanning wordt getoetst – ligt op een afstand van $\frac{1}{2}h$ van de rand van het cirkelvormige lastvlak van de rechthoekige kolom [3]. De perimeter of maatgevende omtrek van de periferie wordt in dit voorschrift dus uitgedrukt als $\pi(h+d)$ (zie Figuur 3).



Figuur 3: Maatgevende perimeter bij een rechthoekige kolom [3].

In deze norm wordt vervolgens de uitdrukking voor de **uiterst opneembare schuifspanning** gegeven door:

$$\tau_1 = 0.5 * f_b \quad \{2\}$$

Waarin:

$$f_b = 0.7 f_{bk}$$

Indien er niet aan eis {3} is voldaan, moet er ponswapening worden toegepast.

$$\tau_d \leq \tau_1 \quad \{3\}$$

2.3 VBC 1995

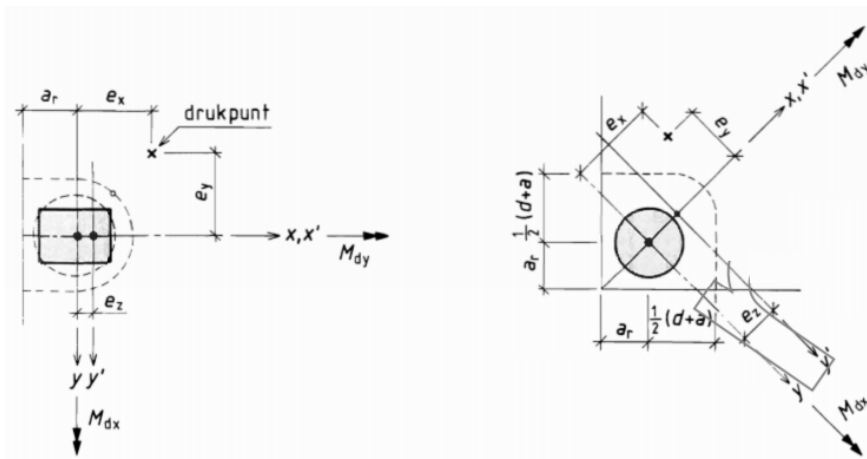
De rekenwaarde van de **maximale schuifspanning** wordt in dit voorschrift (VBC) [6] als volgt berekend:

$$\tau_d = \frac{\alpha_e F_d}{pd} \quad \{4\}$$

Waarin:

$$\alpha_e = 1 + \alpha_x \frac{|e_x - e_z|}{d+a} + \alpha_y \frac{|e_y|}{d+a} \quad \{5\}$$

In Figuur 4 is te zien dat de excentriciteiten e_x en e_y de afstanden in x- en y-richting zijn van het drukpunt van de kracht tot het zwaartepunt van de kolom. Er kan in de ponsberekening van deze norm dus in twee richtingen excentriciteit worden aangebracht. Het zwaartepunt van de kolom valt niet samen met het zwaartepunt van de periferie. Dit verschil in de plaats van het zwaartepunt wordt aangeduid met excentriciteit e_z . De meest gunstige situatie wordt bereikt als $e_x = e_z$, omdat dan het drukpunt en het zwaartepunt van de periferie samenvallen en de excentriciteitsfactor het kleinst is. De excentriciteiten boven de deelstrepen in {5} zijn de afstanden van het drukpunt tot het zwaartepunt van de periferie.



Figuur 4: Rand- en hoekkolom met aangegeven lengteparameters [6].

Er gelden verschillende uitdrukkingen voor het berekenen van e_z voor een randkolom {6} en een hoekkolom {7}:

$$e_z = \frac{0.5(d + a)^2 - a_r^2}{p} \quad \{6\}$$

$$e_z = 0.25 \sqrt{2} \frac{(d + a)^2 + 2a_r(d + a) - 2a_r^2}{p} \quad \{7\}$$

Vanwege de verschillen in e_z , α_x en α_y voor rand- en hoekkolommen is de excentriciteitsfactor α_e afhankelijk van de positie van de kolom. Ook voor de perimeter van de eerste periferie gelden voor rand- en hoekkolommen andere uitdrukkingen. De periferie ligt net als bij de VB op een afstand van $\frac{1}{2}d$ van de rand van het cirkelvormige lastvlak van de rechthoekige kolom. Echter, de uitdrukkingen van de perimeter zijn wel anders dan in de VB en staan hieronder vermeld voor de randkolom {8} en de hoekkolom {9}:

$$p = \frac{1}{2}\pi(d + a) + 2a_r \quad \{8\}$$

$$p = \frac{1}{4}\pi(d + a) + 2a_r \quad \{9\}$$

De uitdrukking voor de **uiterst opneembare schuifspanning** wordt gegeven door de onderstaande vergelijking. Bovendien wordt er een ondergrenswaarde aan gesteld:

$$\tau_1 = 0.8 f_b k_d \sqrt[3]{\omega_0} \geq 0.8 f_b \quad \{10\}$$

Waarin:

$$k_d = 1.5 - 0.6d \geq 1.0 \quad (d \text{ in meters})$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{0x} \omega_{0y}} \leq 2.0 \quad (\omega_{0x,0y} \text{ in } \%)$$

Wat opvalt ten opzichte van de VB is dat de uiterst opneembare schuifspanning afhankelijk is van de hoeveelheid buigwapening. Daarnaast moet de uiterst opneembare schuifspanning gereduceerd worden met factor k_2 als geldt dat de kolomdiameter a groter is dan $2d$. Deze factor wordt gebruikt om een vloeiende overgang naar de dwarskrachttoets te verkrijgen:

$$k_2 = \frac{4}{2 + \frac{a}{d}} \geq 0.5$$

Ten aanzien van de veiligheid met betrekking tot pons moet er aan de volgende eis zijn voldaan:

$$\tau_d \leq \tau_1 \quad \{11\}$$

Als er niet aan deze eis wordt voldaan, moet er ponswapening worden toegepast. Tevens moet nu de tweede periferie worden gecontroleerd op pons, omdat het beton hier kan bezwijken bij een te grote waarde van de maximale schuifspanning ten opzichte van de uiterst opneembare schuifspanning. Voor deze periferie geldt dat de perimeter op een afstand van $\frac{3}{2}d$ ligt van het cirkelvormige lastvlak van de rechthoekige kolom. In de uitdrukkingen voor de perimeter moet de a worden vervangen door $a + 2d$. Indien de tweede periferie ook niet voldoet, moeten de opvolgende periferieën worden getoetst totdat vergelijking {11} geldt. Voor de opvolgende periferieën geldt dat deze steeds met een afstand d opschuiven ten opzichte van het cirkelvormige lastvlak.

2.4 Eurocode 2

Op basis van meerdere controles wordt de ponsberekening in de Eurocode 2 (EC2) [7] doorlopen. Allereerst wordt de uitdrukking voor de rekenwaarde van de **maximale schuifspanning** gegeven door:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d} \quad \{12\}$$

Waarin:

$$d = \frac{d_y + d_z}{2}$$

Ook in deze norm is de excentriciteitsfactor β afhankelijk van de positie van de kolom. De uitdrukkingen voor β zijn verschillend voor rand- en hoekkolommen en voor de randkolom geldt:

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} + k \frac{u_1}{W_1} e_{par} \quad \{13\}$$

Waarin:

$$W_1 = \frac{c_2^2}{4} + c_1 c_2 + 4c_1 d + 8d^2 + \pi d c_2$$

$$e_{par} = \frac{M_{Edy}}{V_{Ed}}$$

Voor een hoekkolom geldt:

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} \quad \{14\}$$

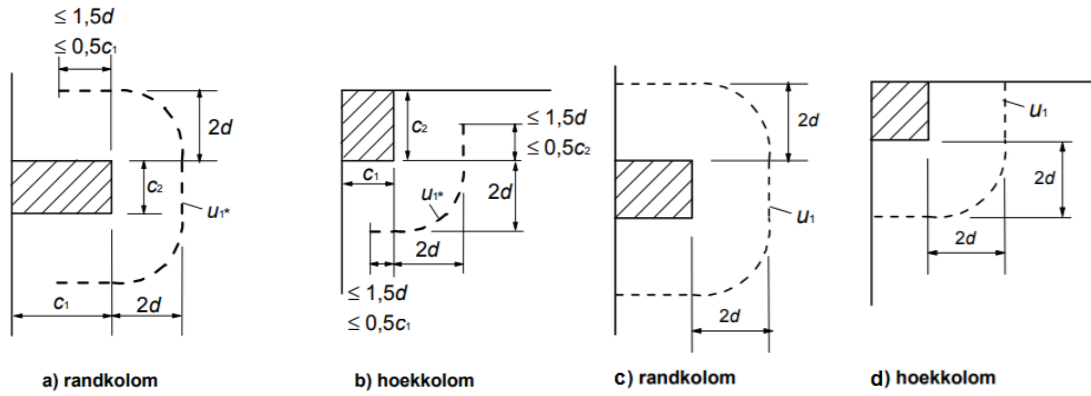
In Figuur 5 zijn de verkleinde perimeter en de eerste toetsingsperimeter gevisualiseerd. De bovenstaande uitdrukkingen voor β gelden echter alleen als de excentriciteit loodrecht op de rand van de plaatvloer naar binnen is gericht. In het geval dat deze naar buiten is gericht, wordt β op de volgende manier berekend:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} * \frac{u_1}{W_1} \quad \{15\}$$

Anders dan in de VB en de VBC bevindt de eerste periferie zich op een afstand van $2d$ van de rand van de kolom. De perimeter van de eerste periferie wordt dan voor de rand- {16} en hoekkolom {17} gegeven door de volgende uitdrukkingen:

$$u_1 = 2r_x + c_1 + c_2 + 2\pi d \quad \{16\}$$

$$u_1 = r_x + r_y + \frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} + \pi d \quad \{17\}$$



Figuur 5: De verkleinde perimeter u_{1*} en de eerste toetsingsperimeter u_1 van de rand- en hoekkolom [7].

Vervolgens wordt de rekenwaarde van de **uiterst opneembare schuifspanning** gegeven door:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \quad \{18\}$$

Waarin:

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad (d \text{ in mm})$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0.02$$

In dit voorschrift is er een exponentieel verband tussen de betondruksterkte en de uiterst opneembare schuifspanning. Bij de oude normen is dit verband lineair. Daarnaast hangt de uiterst opneembare schuifspanning net als in de VBC af van het buigwapeningspercentage. Tot slot is er een materiaalfactor γ_c in de formule van de $v_{Rd,c}$ verwerkt.

De waarden van v_{Ed} en $v_{Rd,c}$ zijn begrensd volgens de onderstaande eis en ondergrenswaarde:

- Er moet aan de volgende eis {19} worden voldaan ten aanzien van de maximale schuifspanning voor pons, zodat de ponskracht van de plaat op de kolom kan worden overgebracht [1]. Hiertoe wordt gerekend met de omsluitende perimeter van het lastvlak u_0 .

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} \quad \{19\}$$

Waarin:

$$u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1 \quad (\text{Randkolom})$$

$$u_0 = 3d \leq c_1 + c_2 \quad (\text{Hoekkolom})$$

$$v_{Rd,max} = 0.4 v f_{cd}$$

$$v = 0.5 * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

- Voor de rekenwaarde van de uiterst opneembare schuifspanning geldt een ondergrenswaarde die je altijd mag aanhouden:

$$v_{Rd,c} \geq v_{min} \quad \{20\}$$

Waarin:

$$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

Als de maximale schuifspanning de uiterst opneembare schuifspanning niet overschrijdt bij de eerste toetsingsperimeter u_1 , dan zal de kolom-vloerconstructie niet bezwijken op pons en hoeft er geen ponswapening te worden toegepast. In dit geval moet dus aan de onderstaande eis worden voldaan:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_1 d} \leq v_{Rd,c} \quad \{21\}$$

Indien niet aan de bovenstaande eis is voldaan, zullen er maatregelen in de vorm van ponswapening moeten worden toegepast. Echter, na toepassing van de wapening ontstaat er bezwijkgevaar in een volgende periferie omdat juist hier de schuifspanning minder goed wordt opgenomen. Er wordt in dit geval een uiterste toetsingsperimeter uitgerekend waar geen ponswapening meer toegepast hoeft te worden. De berekening hiervan volgt uit de volgende formulering [1]:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_{out} * d} < v_{Rd,c} \quad \{22\}$$

3 Veiligheidsfilosofie van de voorschriften

Dit onderzoek richt zich op de grenstoestand met betrekking tot bezwijken, omdat de ponsberekeningen hierop zijn gebaseerd. Om de kans op bezwijking beperkt te houden, dienen er veiligheidsfactoren in rekening te worden gebracht. De bewegingsruimte die op deze manier wordt gecreëerd, moet ervoor zorgen dat in ieder geval de rekenwaarde van de belasting moet kunnen worden opgenomen door de plaatvloer zonder dat bezwijken optreedt. In ieder voorschrift is deze zogeheten veiligheidsfilosofie anders beschreven. Het is daarom van essentieel belang om de veiligheidsfactoren die in dit hoofdstuk aan bod komen, te gebruiken in het parameteronderzoek.

3.1 Grenstoestand VB 1974/1984

In dit voorschrift [5] wordt bij de grenstoestand met betrekking tot bezwijken een allesomvattende veiligheidsfactor gebruikt die de belasting- en materiaalfactor integreert in één veiligheidsfactor op de belasting. De factor wordt dus toegepast op de aanwezige belasting, zodat er een rekenwaarde van de belasting ontstaat {23}:

$$Q_d = \gamma Q_k \quad \{23\}$$

Waarin:

$$\gamma = 1.7$$

3.2 Grenstoestand VBC 1995

In de VBC [8] wordt er gewerkt met belastingscombinaties en partiële belastingfactoren. In Tabel 1 zijn voor verschillende veiligheidsklassen en belastingscombinaties de belastingfactoren weergegeven.

veiligheidsklasse	belastings-combinaties (formules uit 6.4.2)	$\gamma_{f,g}$		$\gamma_{f,q}$
		normaal (ongunstig)	gunstig	
1	fundamentele combinaties			
2	1	1,2	0,9	1,2
3	1	1,2	0,9	1,3
1-2-3	1	1,2	0,9	1,5
	2	1,35	0,9	–

Tabel 1: Belastingfactoren per veiligheidsklasse en per belastingscombinatie volgens de VBC [8].

De belastingscombinaties 1 {24} en 2 {25} in de grenstoestand met betrekking tot bezwijken zijn als volgt:

$$\text{Combinatie 1: } \gamma_{f,g} * G_{rep} + \gamma_{f,q} * \psi_t * Q_{1,rep} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{f,q} * \psi_i * Q_{i,rep} \quad \{24\}$$

$$\text{Combinatie 2: } \gamma_{f,g} * G_{rep} \quad \{25\}$$

Tevens wordt er in deze norm gebruik gemaakt van een materiaalfactor γ_m om de weerstand tegen bezwijken rekenkundig te reduceren en zo een extra veiligheidsmarge te creëren. Voor beton onder druk geldt dat $\gamma_m = 1.2$ en voor de betontreksterkte is $\gamma_m = 1.4$ van toepassing.

3.3 Grenstoestand Eurocode

Ook in de Eurocodes [9] wordt er gerekend met partiële belastingfactoren die worden toegepast op twee fundamentele belastingscombinaties:

$$\text{Combinatie 1: } \gamma_G * G_k + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad \{26\}$$

$$\text{Combinatie 2: } \gamma_G * G_k + \gamma_Q * Q_k + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \quad \{27\}$$

De belastingfactoren in {26} en {27} hebben diverse waarden voor verschillende veiligheidsklassen (zie Tabel 2).

Gevolgklasse	Belastingscombinatie	γ_G ongunstig	γ_G gunstig	γ_Q
CC1	1	1.2	0.9	1.35
	2	1.1	0.9	1.35
CC2	1	1.35	0.9	1.5
	2	1.2	0.9	1.5
CC3	1	1.4	0.9	1.65
	2	1.25	0.9	1.65

Tabel 2: Belastingfactoren per veiligheidsklasse en per belastingscombinatie volgens de Eurocode.

Bovendien wordt er ook in de Eurocodes een materiaalfactor in rekening gebracht. De materiaalfactor γ_c is 1.5 voor beton.

4 Methode

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksmethode van de parameterstudie beschreven. Dit gebeurt door allereerst de uitgangspunten van het onderzoek te bespreken (4.1). Daarna wordt de werkwijze om tot bruikbare resultaten te komen uiteengezet (4.2).

4.1 Uitgangspunten

Dit onderzoek richt zich op de situatie waarbij de maximale schuifspanning kleiner dan of gelijk is aan de uiterst opneembare schuifspanning. De Unity Check (U.C.) is daarbij kleiner dan of gelijk aan 1.0 en er is dus geen ponswapening nodig om te veiligheid te garanderen. Er geldt in dit geval:

- $\tau_d \leq \tau_1$ (voor de VB 1974/1984 en VBC 1995)
- $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ (voor de Eurocode 2)
- $U.C. = \frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c}} \leq 1.0$ of $U.C. = \frac{\tau_d}{\tau_1} \leq 1.0$

In de uitdrukking voor de uiterst opneembare schuifspanning volgens de VBC en de EC2 zit een materiaalfactor verwerkt. Dit is niet het geval voor de VB, waar echter wel een veiligheidsfactor gebruikt moet worden die op de weerstand tegen pons wordt toegepast. In de VB wordt normaliter gerekend met één allesomvattende belastingfactor van 1.7 die de belasting- en materiaalfactor integreert. De VBC en EC2 rekenen met een belastingfactor van circa 1.25 als je de partiële factoren in beschouwing neemt. De veiligheidsfactor die dan nog op de weerstand die volgt uit de VB moet worden toegepast is: $1.7/1.25 \approx 1.4$.

Bij dit onderzoek wordt uitgegaan van een situatie waarbij een vlakke plaatvloer direct steunt op rechthoekige kolommen. Tevens is de excentriciteit van de kracht naar binnen gericht. De diverse parameters die invloed hebben op de uiterst opneembare schuifspanning en op de maximale schuifspanning zullen ieder een gestandaardiseerde waarde krijgen. Er is gekozen voor de magnitudes van de parameters die Maik Odijk tijdens zijn onderzoek naar de excentriciteitsfactor β ook heeft gebruikt [11]. Bovendien worden er vaststaande waarden gebruikt voor de excentriciteit en de randafstand. De waarden zijn terug te vinden in Tabel 3.

Parameter	Grootheid	Waarde
Betondekking	c_{nom}	25 mm
Betonsterkteklasse	-	C55/67
Diameter wapening (x- en y-richting)	$\emptyset$	20 mm
Plaatdikte	h	265 mm
Effectieve plaatdikte	d_{eff}	230 mm
Rechthoekige kolomafmeting	a	200 mm
Tussenafstand wapening	s	150 mm
Excentriciteit	e	0 mm
Randafstand	a_r	100 mm

Tabel 3: Basissituatie met gestandaardiseerde invloedparameters.

4.2 Werkwijze

Om te onderzoeken hoe conservatief de voorschriften ten opzichte van elkaar zijn, wordt er tijdens dit onderzoek gekeken naar de weerstand tegen bezwijken. De verschillen tussen de weerstanden van de voorschriften worden aan het licht gebracht aan de hand van diverse figuren en histogrammen. Het stappenplan in 4.2.1 wordt uitgevoerd voor zowel de rand- als hoekkolom.

4.2.1 Weerstand

De uiterst opneembare schuifspanning, ofwel weerstand, wordt in ieder voorschrift anders uitgedrukt. Om deze weerstanden te kunnen vergelijken wordt de rekenwaarde van het ponsdraagvermogen V_{Rd} uitgerekend volgens de verschillende voorschriften. De onderstaande uitdrukkingen voor het berekenen van de V_{Rd} gelden voor de VB {28}, de VBC {29} en de EC2 {30}:

$$\bullet \quad V_{Rd} = \tau_1 * \frac{\pi h(h+d)}{1 + \frac{2e}{h+d}} \quad \{28\}$$

$$\bullet \quad V_{Rd} = \tau_1 * \frac{pd}{\alpha_e} \quad \{29\}$$

$$\bullet \quad V_{Rd} = v_{Rd,c} * u_1 * \frac{d_{eff}}{\beta} \quad \{30\}$$

Er geldt dat hoe hoger de V_{Rd} is, hoe hoger de weerstand tegen bezwijken is. Als uit *Voorschrift 1* (willekeurig beschouwd voorschrift) een hogere weerstand volgt dan *Voorschrift 2*, betekent dit dat de bezwijkkracht volgens dit voorschrift ook hoger is en het *Voorschrift 1* dus minder conservatief is dan *Voorschrift 2*.

Er worden twee gevalideerde Excel-rekenbladen gebruikt om de weerstand tegen bezwijken volgens de VBC en de EC2 te berekenen [4]. Vervolgens worden deze rekenbladen uitgebreid om hieruit het ponsdraagvermogen te halen. Voor de VB zal een nieuw Excel-rekenblad worden gemaakt om volgens dezelfde procedure het ponsdraagvermogen te kunnen berekenen.

De onderzochte parameters die invloed hebben op de V_{Rd} zijn de volgende:

- Betonsterkteklasse
- Effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding
- Excentriciteit
- Randafstand

Er wordt een parameteronderzoek uitgevoerd om de invloed van bovenstaande parameters op de V_{Rd} te onderzoeken. Tevens worden de verschillen tussen de voorschriften in kaart gebracht. Om tot bruikbare resultaten te komen, wordt het volgende Stappenplan A gevolgd:

1. Allereerst wordt voor de invloedparameters betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte, excentriciteit en randafstand een domein gekozen en wordt dit domein opgedeeld in tien gelijke stappen. Vervolgens wordt voor elke invloedparameter, voor alle tien de domeinstappen en voor elk voorschrift de V_{Rd} berekend. Tijdens het variëren van de invloedparameters worden de andere parameters gelijk gehouden volgens de basissituatie van Tabel 3.
2. Daarna wordt er gekeken naar de invloed van de parameters op de V_{Rd} . Alle berekende V_{Rd} -waarden van de tien domeinstappen moeten daartoe worden vergeleken met een

referentiewaarde van de V_{Rd} : de V_{Rd} voor de standaardwaarde van de betreffende invloedparameter uit Tabel 3. Deze referentiewaarde wordt de $V_{Rd, ref}$ genoemd. In het geval dat bijvoorbeeld de randafstand wordt gevarieerd is de $V_{Rd, ref}$ de V_{Rd} die hoort bij een randafstand van 100 mm. Vervolgens wordt de verhouding $V_{Rd} / V_{Rd, ref}$ voor iedere domeinstap van de invloedparameter berekend en weergegeven in een grafiek. Zo wordt inzichtelijk hoe de voorschriften met een parameterwijziging omgaan.

3. Vervolgens worden de absolute V_{Rd} -waarden van de voorschriften onderling met elkaar vergeleken. Deze vergelijkingen worden weergegeven aan de hand van verhoudingen:

- a. VB/VBC: $\frac{V_{Rd}(VB)}{V_{Rd}(VBC)}$
- b. VB/EC2: $\frac{V_{Rd}(VB)}{V_{Rd}(EC2)}$
- c. VBC/EC2: $\frac{V_{Rd}(VBC)}{V_{Rd}(EC2)}$

Verhouding a. geeft de verhouding weer tussen de V_{Rd} die volgt uit de VB en de V_{Rd} die volgt uit de VBC. Verhouding b. deelt de V_{Rd} die volgt uit de VB door de V_{Rd} die volgt uit de EC2. Tot slot is verhouding c. de verhouding tussen de V_{Rd} -waarden die volgen uit de VBC en EC2. Er is voor gekozen om telkens het resultaat volgens een ouder voorschrift te delen door dat volgens een nieuwer voorschrift. Zo wijst een verhoudingsgetal onder de 1.0 erop dat het voorschrift op den duur minder conservatief is geworden. Een verhoudingsgetal boven de 1.0 wijst op zijn beurt op het conservatiever worden van de norm in de loop der jaren.

4. Vervolgens wordt onderzocht waar de eventuele verschillen tussen de normen uit voortkomen.
5. Om de resultaten overzichtelijk weer te geven, wordt er voor de verhoudingsgetallen tussen de normen (stap 3) een histogram gemaakt. Dit histogram bevat de verhoudingsgetallen van alle onderzochte varianten. Zo wordt in één oogopslag duidelijk hoe de normen in de loop der jaren zijn veranderd.

In Bijlage 1 is voor zowel de rand- als hoekkolom een uitgebreid rekenvoorbeeld uitgewerkt, zodat inzichtelijk wordt hoe de berekeningen lopen. Tevens wordt hiermee de juistheid van de Excel-rekenbladen gecontroleerd.

4.2.2 Parametercombinaties

Als Stappenplan A wordt gevolgd, wordt er telkens één invloedparameter gevarieerd. Echter, de resultaten kunnen veranderen als er meerdere invloedparameters tegelijkertijd worden gevarieerd. Bovendien kunnen pas gevalideerde conclusies worden getrokken als er meerdere varianten zijn onderzocht. In het kader van deze twee zaken worden er enkele combinaties van invloedparameters onderzocht:

- Betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding
- Excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding
- Betonsterkteklasse en excentriciteit

Er wordt een realistisch domein gekozen voor de parameters van elke combinatie. Vervolgens worden de V_{Rd} -waarden berekend en worden stap 2 en stap 3 van Stappenplan A doorlopen. $V_{Rd, ref}$ is in dit geval de V_{Rd} waarvoor elke parameter uit de combinatie de standaardwaarde uit Tabel 3 heeft. Daarna wordt een histogram gemaakt van alle verhoudingswaarden van alle

combinaties die volgen uit stap 3. Tot slot wordt er gekeken naar de verschillen tussen de normen en de verschillen tussen de histogrammen.

5 Resultaten randkolom

In dit hoofdstuk worden de resultaten gegeven van het parameteronderzoek naar de ponsweerstand van de randkolom. Allereerst wordt gekeken naar de resultaten van het onderzoek naar alle onafhankelijke parameters die invloed hebben op de weerstand tegen bezwijken door pons (5.1). Vervolgens wordt er gekeken naar diverse combinaties van gelijktijdige wijzigingen van parameters (5.2). In Bijlage 1 zijn een rekenvoorbeeld voor de randkolom en een uitleg van hoe de diverse figuren zijn ontstaan, opgenomen.

5.1 Invloedparameters

De weerstand van een constructie tegen bezwijken door pons wordt in ieder voorschrift anders uitgedrukt. De verschillen kunnen worden belicht door te kijken naar de invloed van de betonsterkteklasse (5.1.1), effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding (5.1.2), excentriciteit (5.1.3) en randafstand (5.1.4) op de V_{Rd} . Bovendien worden de absolute V_{Rd} -waarden die volgen uit de voorschriften met elkaar vergeleken door de verhouding tussen een oud en een nieuwer voorschrift in een grafiek weer te geven. Tot slot worden alle verhoudingswaarden gevisualiseerd met behulp van een histogram (5.1.3).

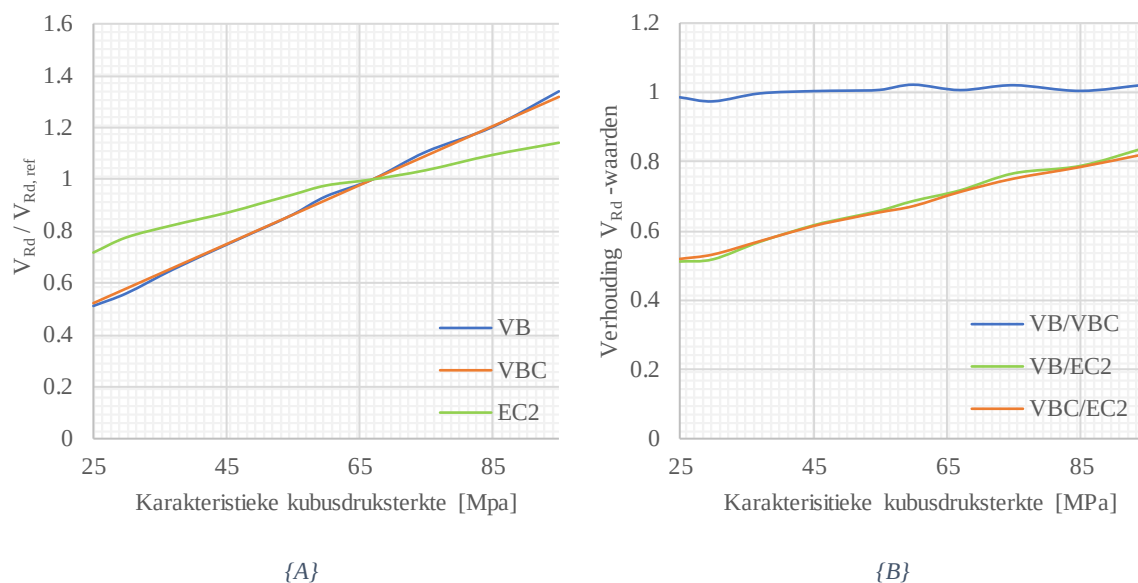
5.1.1 Betonsterkteklasse

In Figuur 6A is de invloed van de betonsterkteklasse op de V_{Rd} weergegeven volgens stap 2 van het stappenplan in 4.2.1. Op de horizontale as is de karakteristieke kubusdruksterkte van het beton uitgezet. Deze kubusdruksterktes worden in de voorschriften op verschillende manieren naar voren gebracht in de betonsterkteklasse. De volgende betonsterkteklassen volgens de VB {A}, de VBC {B} en de EC2 {C} zijn equivalent aan een karakteristieke kubusdruksterkte van 25 MPa:

- B25 {A}
- B25 {B}
- C20/25 {C}

In Figuur 6A komt naar voren dat de betonsterkteklasse minder invloed heeft op de V_{Rd} die berekend is volgens de EC2 dan volgens de VB en de VBC. Dit wordt veroorzaakt doordat er volgens de EC2 een exponentieel verband bestaat tussen de kubusdruksterkte en de weerstand terwijl deze bij de oude normen lineair is (*Bevinding 1*) (zie 2.4). Bovendien is op te merken dat de invloed van de betonsterkteklasse op de V_{Rd} vrijwel gelijk is voor de VB en VBC. Je kunt dus stellen dat de norm met de komst van de EC2 conservatiever omgaat met de invloedparameter betonsterkteklasse.

De V_{Rd} -waarden worden nu als absolute getallen naast elkaar gelegd volgens stap 3 van het stappenplan in 4.2.1. Uit Figuur 6B blijkt dat de V_{Rd} -waarden van de VB en de VBC nauwelijks van elkaar verschillen, vanwege een schommelende waarde tussen circa 0.97 en 1.03. De waarden van VB/EC2 en VBC/EC2 liggen dicht bij elkaar en allen onder de 1.0. Dit duidt erop dat het voorschrift gedurende de jaren minder conservatief is geworden.



Figuur 6: Invloed betonsterkteklasse {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

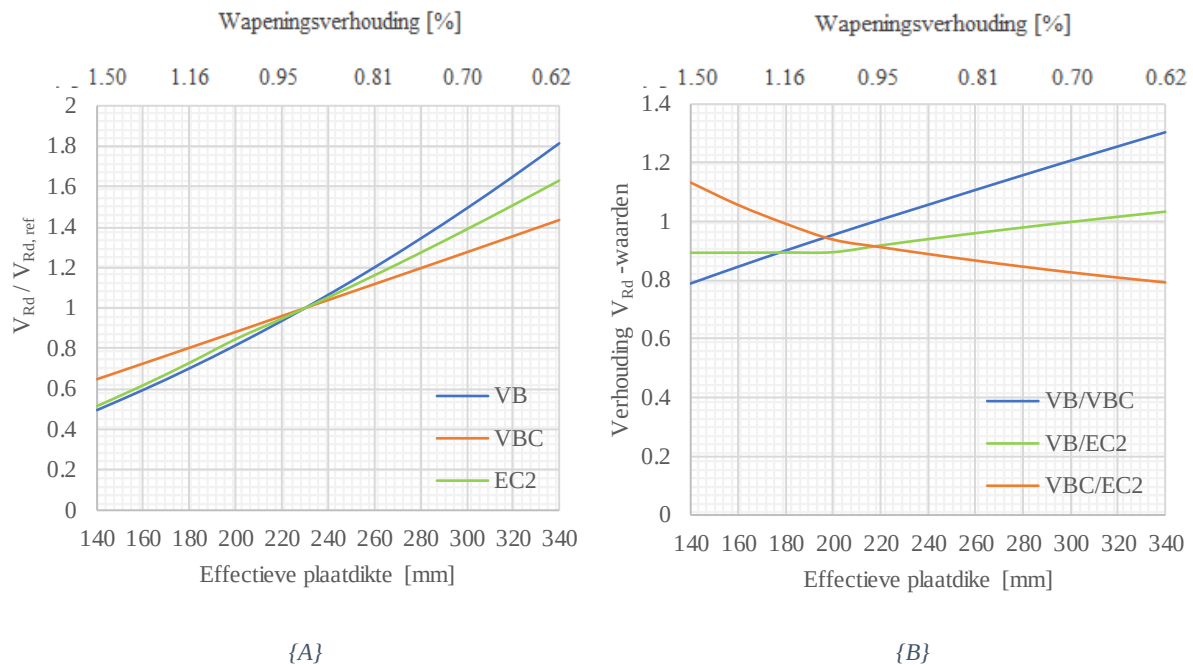
5.1.2 Effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding

Uitgaande van een vaststaande wapeningsdiameter (zie Tabel 3), verandert ook de wapeningsverhouding als de effectieve plaatdikte wordt gevarieerd. In Figuur 7A en Figuur 7B is een dubbele horizontale as aangebracht, omdat er dus wordt gekeken naar de invloed van beide parameters op de V_{Rd} .

De invloed van de wijziging van de effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding op de V_{Rd} is volgens de VB het grootst (zie Figuur 7A). De invoering van de VBC heeft het conservatisme ten aanzien van de wijziging van deze parameters groter gemaakt. De EC2 zorgde er vervolgens voor dat er weer wat conservatisme is ingeleverd ten opzichte van de VBC.

De verschillen tussen de grafieken in Figuur 7A worden veroorzaakt doordat de voorschriften de componenten die invloed hebben op de weerstand ieder op een andere manier in rekening brengen. Zo kan de oorzaak van het gegeven dat de blauwe lijn het snelst stijgt gedeeltelijk worden toegeschreven aan het feit dat de VB geen rekening houdt met de invloed van het “size-effect” en de invloed van de buigwapening. Het effect dat een toename van de plaatdikte leidt tot een afname van de weerstand (“size-effect”) [2], is namelijk wel meegenomen in de VBC en in de EC2 door respectievelijk $k_d \{10\}$ en $k \{18\}$ in rekening te brengen {Bevinding 2}. Bovendien zorgt een lagere wapeningsverhouding in deze normen (VBC en EC2) voor een lagere weerstand {Bevinding 3}. Het stijgende karakter kan worden verklaard doordat de effectieve plaatdikte – als op zichzelf staande parameter in de formule van de weerstand – snel stijgt. Eén van de oorzaken van de sneller stijgende grafiek van de EC2 dan de VBC is dat de perimeter van de EC2 procentueel gezien sneller stijgt dan die van de VBC bij een stijgende effectieve plaatdikte {Bevinding 4}. Dit procentuele verschil wordt veroorzaakt door de verschillende afstanden van de eerste periferie tot de rand van de kolom (voor de VBC en de EC2 respectievelijk $\frac{1}{2}d$ en $2d$).

Relatief hoge wapeningsverhoudingen en kleine effectieve plaatdiktes uitgesloten, geldt dat de norm conservatiever is geworden met de komst van de VBC (zie Figuur 7B). Vervolgens werd er met de EC2 weer conservatisme ingeleverd.



Figuur 7: Invloed effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

5.1.3 Excentriciteit

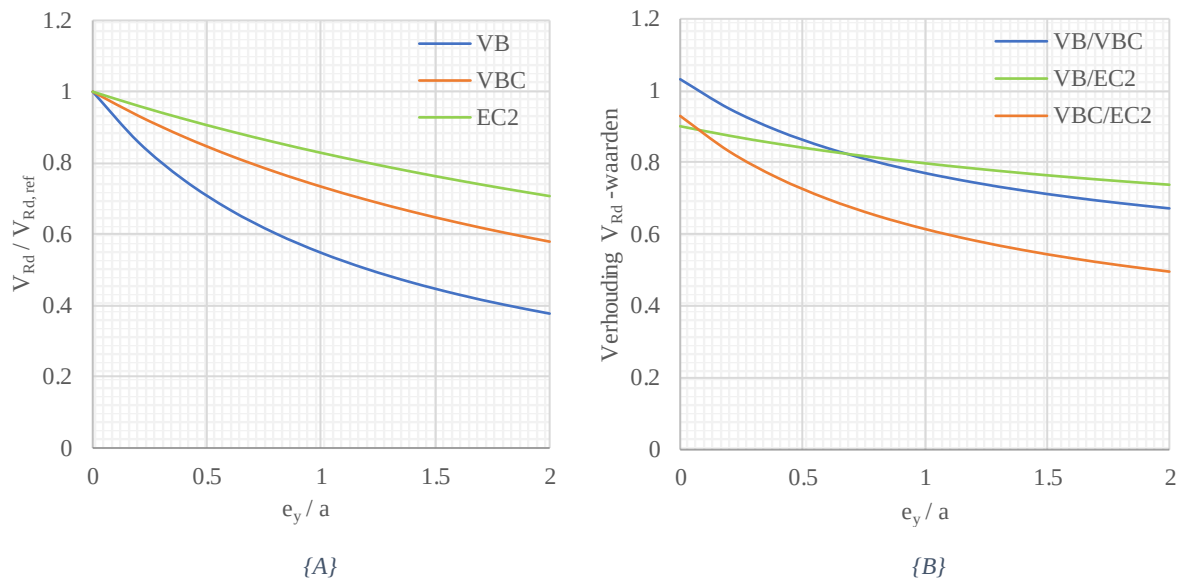
Een excentriciteit van de kracht zorgt voor een buigend moment in de plaatvloer. De vraag is hoeveel invloed deze excentriciteit heeft op de weerstand tegen bezwijken (V_{Rd}). De drie onderzochte normen brengen excentriciteit namelijk ieder op een andere manier in rekening. De excentriciteit kan in zowel de x- als de y-richting worden aangebracht (zie Figuur 4). De drie onderzochte situaties in deze subparagraaf zijn als volgt:

- De excentriciteit in y-richting wordt gevarieerd waarbij $e_x = 0$.
- De excentriciteit in x-richting wordt gevarieerd waarbij $e_y = 0$.
- De excentriciteiten in x- en y-richting worden gevarieerd. Er is sprake van dubbele buiging waarbij beide excentriciteiten even groot zijn.

Op de horizontale assen in Figuur 8 en Figuur 9 wordt een tot nu toe nog onbekende verhouding weergegeven: e/a . Dit is de verhouding tussen de excentriciteit van de ponskracht ten opzichte van het zwaartepunt van de kolom (e) en de kolomdiameter (a). Aangezien de kolomdiameter een vaste waarde heeft van $a = 200 \text{ mm}$, volgt daaruit dat bij $e/a = 1.0$ de excentriciteit ten opzichte van het hart van de kolom $e = 200 \text{ mm}$ is.

Uit Figuur 8A is af te leiden dat bij de oude voorschriften de V_{Rd} sterker afneemt bij een toename van de excentriciteit in y-richting dan bij het huidige voorschrift. De buigende momenten die ontstaan door de excentriciteit in y-richting hebben in der loop der jaren dus steeds minder invloed gekregen op de V_{Rd} . Door de uiteenlopende uitdrukkingen voor excentriciteitsfactor in de voorschriften is het lastig om directe componenten aan te wijzen die dit verschil veroorzaken {Bevinding 5}. Het staat wel vast dat de EC2 de bijdrage van het moment in y-richting aan de maximale schuifspanning kleiner inschat dan dat de oude voorschriften dit doen {Bevinding 6}. Dit wijst op een trend waarbij conservatisme wordt ingeleverd.

Uit Figuur 8B kan worden opgemaakt dat de norm minder conservatief is geworden ten aanzien van de aanwezigheid van een excentrische ponskracht in y-richting. Nagenoeg alle verhoudingsgetallen van de grafieken hebben namelijk een waarde van onder de 1.0. Ook geldt dat bij hogere excentriciteiten de norm nog meer conservatisme heeft afgestaan dan bij lagere excentriciteiten. Dit kan worden afgeleid uit het dalende karakter van de grafieken in Figuur 8B.

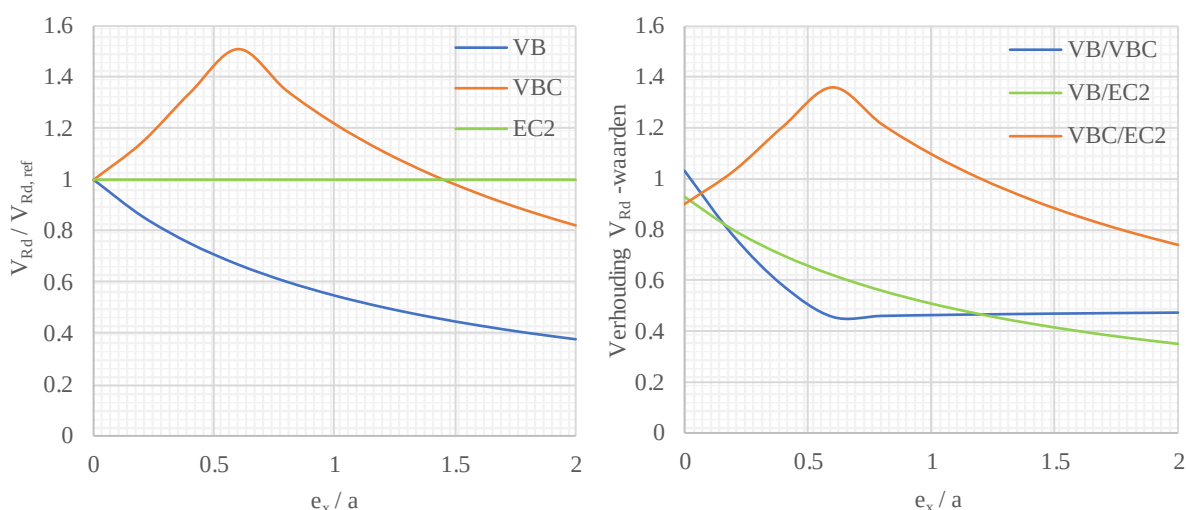


Figuur 8: Invloed excentriciteit in y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

In Figuur 9A zijn de aanzienlijke verschillen van de invloed van de excentriciteitswijziging in x-richting tussen de voorschriften duidelijk zichtbaar. Terwijl bij kleine excentriciteiten in x-richting de V_{Rd} volgens de VB daalt, stijgt de V_{Rd} volgens de VBC. De EC2 geeft daarentegen een constante waarde. Aangezien de VB geen onderscheid maakt tussen rand- en hoekkolommen, kan de daling van de V_{Rd} volgens dit voorschrift worden toegeschreven aan de stijging van de excentriciteit en de excentriciteitsfactor. De stijging van de V_{Rd} volgens de VBC voor relatief kleine excentriciteiten kan worden verklaard doordat de component $|e_x - e_z|$ in {5} in het begin daalt, waardoor de excentriciteitsfactor daalt en de V_{Rd} toeneemt. Het drukpunt van de ponskracht schuift dan vanuit het zwaartepunt van de kolom steeds verder naar het zwaartepunt van de periferie bij een toenemende excentriciteit in x-richting ten opzichte van de kolom. Hierdoor wordt de situatie gunstiger, waarna de meest gunstige situatie ontstaat als de ponskracht aangrijpt in het zwaartepunt van de periferie. In dit geval geldt dat $e_x = e_z$ en $|e_x - e_z| = 0$. Als de excentriciteit in x-richting echter nog verder toeneemt, wordt de situatie weer steeds ongunstiger en zal de V_{Rd} weer afnemen (zie Figuur 9A). Dit effect met betrekking tot het gunstiger worden van de situatie en het stijgen van de weerstand doordat het drukpunt en het zwaartepunt van de periferie elkaar naderen, wordt ter versimpeling het “zwaartepunteffect” genoemd {Bevinding 7}. Dat de excentriciteit in x-richting geen invloed heeft op de V_{Rd} volgens de EC2 komt doordat de excentriciteit in deze richting niet is opgenomen in de uitdrukking voor de excentriciteitsfactor {13}.

Figuur 9B laat zien dat de norm beduidend minder conservatief is geworden toen de VB overging in de VBC. Dit is voor het grootste gedeelte toe te schrijven aan het “zwaartepunteffect” {Bevinding 7}. Met de komst van de EC2 werd de norm echter weer

conservatiever, omdat in deze norm de excentriciteit in x-richting geen enkele invloed heeft op de weerstand.



Figuur 9: Invloed excentriciteit in x-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

Bij dubbele buiging komen dezelfde trends naar voren als bij excentriciteit in x-richting. In Bijlage 2 zijn de figuren voor excentriciteit in twee richtingen opgenomen.

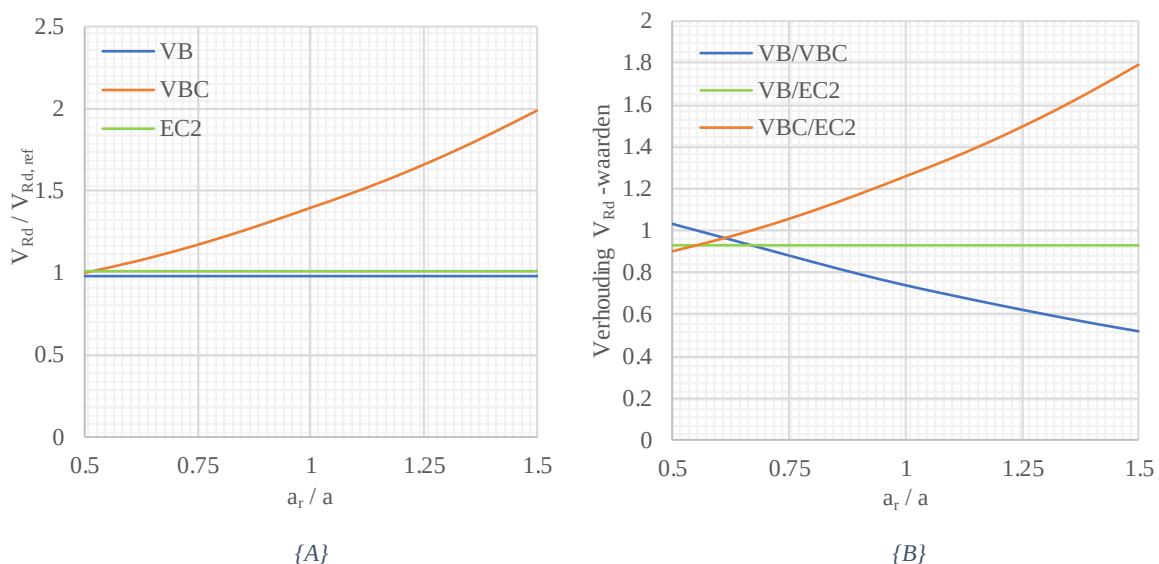
5.1.4 Randafstand

De randafstand is de afstand van het hart van de kolom tot de rand van de plaatvloer. Deze wordt in de VBC aangeduid met het symbool a_r . In de VB is de randafstand niet meegenomen als invloedparameter voor de maximale schuifspanning. In de EC2 zit de randafstand (r_x of r_y) verwerkt in de eerste toetsingsperimeter en de verkleinde perimeter u_{1*} . Er wordt bij het variëren van de randafstand steeds uitgegaan van een centriscche normaalkracht. Opnieuw wordt op de horizontale as een verhouding uitgezet. Dit keer gaat het om de verhouding tussen de randafstand a_r en de kolomdiameter a .

In Figuur 10A is te zien dat het variëren van de randafstand enkel invloed heeft op het ponsdraagvermogen dat volgt uit de VBC. De V_{Rd} wordt groter naarmate de randafstand toeneemt. Als de randafstand a_r twee keer zo groot is als de kolomdiameter a , is de V_{Rd} met 100% gestegen. De toenemende weerstand wordt wederom veroorzaakt door het “zwaartepuntteffect” {Bevinding 7 in 5.1.3}. Als de randafstand toeneemt, zal het zwaartepunt van de kolom dichter naar het zwaartepunt van de periferie toeschuiven. Hierdoor zal ook het drukpunt van deze kracht – die aangrijpt in het zwaartepunt van de kolom – steeds dichter bij het zwaartepunt van de periferie komen te liggen. De situatie wordt gunstiger, waarbij de excentriciteitsfactor zal afnemen en de V_{Rd} zal toenemen {Bevinding 8 (afgeleid van Bevinding 7 in 5.1.3)}. De VB geeft daarentegen een constante waarde van 1.0 in Figuur 10A, omdat de randafstand niet wordt meegenomen in de ponsberekeningen volgens dit voorschrift. De randafstand blijkt ook geen invloed te hebben op het ponsdraagvermogen berekend volgens de EC2. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de verkleinde perimeter een vaste waarde heeft voor verschillende randafstanden. De eerste toetsingsperimeter wordt wel groter als de randafstand toeneemt, maar de verhouding tussen de eerste toetsingsperimeter en de excentriciteitsfactor verandert niet. Dit komt omdat de eerste toetsingsperimeter als

parameter is verwerkt in de excentriciteitsfactor. Dit leidt tot een constante waarde van 1.0 in Figuur 10A.

De invoer van de VBC leidde, zoals te zien in Figuur 10B, tot het minder conservatief worden van de norm. Hoe groter de randafstanden ten opzichte van de kolomdiameter, hoe minder conservatief de VBC is in vergelijking met de VB. In contrast met deze bevinding staat de conclusie dat de norm met de ingebruikneming van de EC2 juist weer conservatiever werd. De stijgende oranje lijn verradt dat bij het groter worden van de randafstanden de EC2 steeds conservatiever werd ten opzichte van de VBC. Deze bevindingen kunnen worden toegeschreven aan de oorzaken die beschreven zijn in de vorige alinea aan de hand van Figuur 10A.



Figuur 10: Invloed randafstand {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

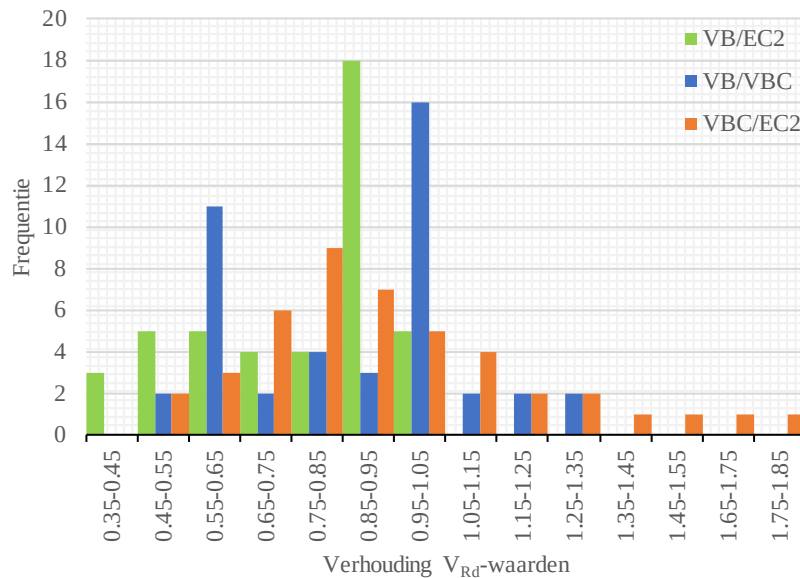
5.1.5 Histogram A_{rand}

In Figuur 11 is het histogram met alle verhoudingsgetallen van de V_{Rd} -waarden van de voorschriften weergegeven. De verhoudingswaarden van elke invloedparameter (5.1.1 t/m 5.1.4) zijn in het histogram verwerkt. Wat de excentriciteit betreft zijn louter de waarden van de dubbele buiging meegenomen in het histogram, om ervoor te zorgen dat alle parameters evenveel invloed hebben op het histogram.

Aan de groene staven in Figuur 11 – die allen onder de 1.0 liggen met een gemiddelde VB/EC2-waarde van 0.77 – is de trend af te leiden dat de norm minder conservatief wordt. Ook de meeste blauwe staven bevinden zich onder de 1.0, waarbij het gemiddelde van de VB/VBC-waarden een waarde aanneemt van 0.87. Met de overgang van de VB naar de VBC is er dus al ietwat aan conservatisme ingeleverd. In 68% van de onderzochte situaties is de VBC minder conservatief dan de VB. De ingebruikneming van de EC2 zorgde ervoor dat er nog meer conservatisme werd ingeleverd met een gemiddelde van 0.83 voor de VBC/EC2-waarden. Deze norm (EC2) is namelijk opnieuw in 68% van de gevallen minder conservatief dan zijn voorganger (VBC).

Opvallend zijn de significant hoge frequenties bij 0.55-0.65 en 0.95-1.05 voor de VB/VBC-verhoudingswaarden. De piek bij 0.55-0.65 ontstaat doordat de VB/VBC-verhoudingswaarden bij dubbele buiging (zie Bijlage 2) allen binnen deze groep vallen voor

$0.8 < e_{x,y}/a < 2.0$. Dit komt omdat de $V_{Rd} / V_{Rd, ref}$ -waarden van de VB en de VBC procentueel gezien evenveel dalen in dit interval (zie Figuur 27A). De piek bij 0.95-1.05 wordt veroorzaakt doordat alle VB/VBC-waarden in Figuur 6B in hetzelfde interval liggen. De oorzaak hiervan is de twee beschouwde normen (VB en VBC) het verband tussen de betonsterkteklasse en het ponsdraagvermogen op dezelfde (lineaire) manier beschrijven {Bevinding 1 in 5.1.1}.



Figuur 11: Histogram A_{rand} invloed parameters.

5.2 Parametercombinaties

In het kader van de eventuele verandering van uitkomsten en de mogelijkheid tot het verhogen van de mate van validiteit van de eindconclusies, worden er diverse combinaties (5.2.1 t/m 5.2.3) van parameters onderzocht. Bij een dergelijke combinatie worden er meerdere parameters tegelijk gewijzigd, waarna wordt gekeken naar de invloed hiervan op de V_{Rd} . Vervolgens wordt van de verhoudingswaarden van de combinaties een histogram gemaakt (5.2.4) en wordt deze vergeleken met Histogram A_{rand} (5.2.5).

5.2.1 Betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding

Het is interessant om te kijken naar een combinatie van wijzigingen van de betonsterkteklasse, de effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding, omdat deze parameters allen significante invloed hebben op de V_{Rd} . Aangezien er maar twee horizontale assen kunnen worden aangebracht, kan de wapeningsverhouding in procenten (ω) voor de verschillende effectieve plaatdiktes (d_{eff}) als volgt worden berekend:

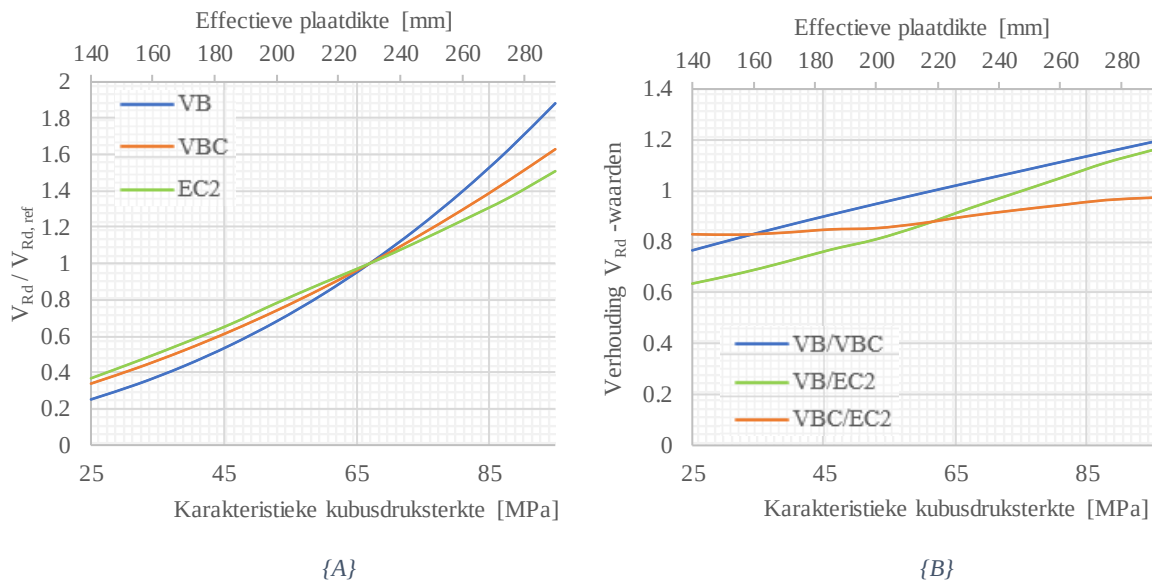
$$\omega = \frac{\frac{1}{4} \pi \phi^2}{s * d_{eff}}$$

Waarin:

$$\phi = 20 \text{ mm}$$

$$s = 150 \text{ mm}$$

De rekenwaarde van het ponsdraagvermogen verandert bij de parameterwijzigingen het meest voor respectievelijk de VB, VBC en EC2 (zie Figuur 12A). Je kunt stellen dat de EC2 ten aanzien van het meenemen van deze parameters dus het meest conservatief is. Als je echter gaat kijken naar de absolute ligging van de V_{Rd} -waarden ten opzichte van elkaar, kun je concluderen dat voor relatief kleine effectieve plaatdiktes en lage/gemiddelde betonsterkten de norm aan conservatisme heeft ingeleverd. Daarentegen heeft de overgang van de VB naar de VBC er voor hogesterktebeton wel voor gezorgd dat de norm conservatiever werd.



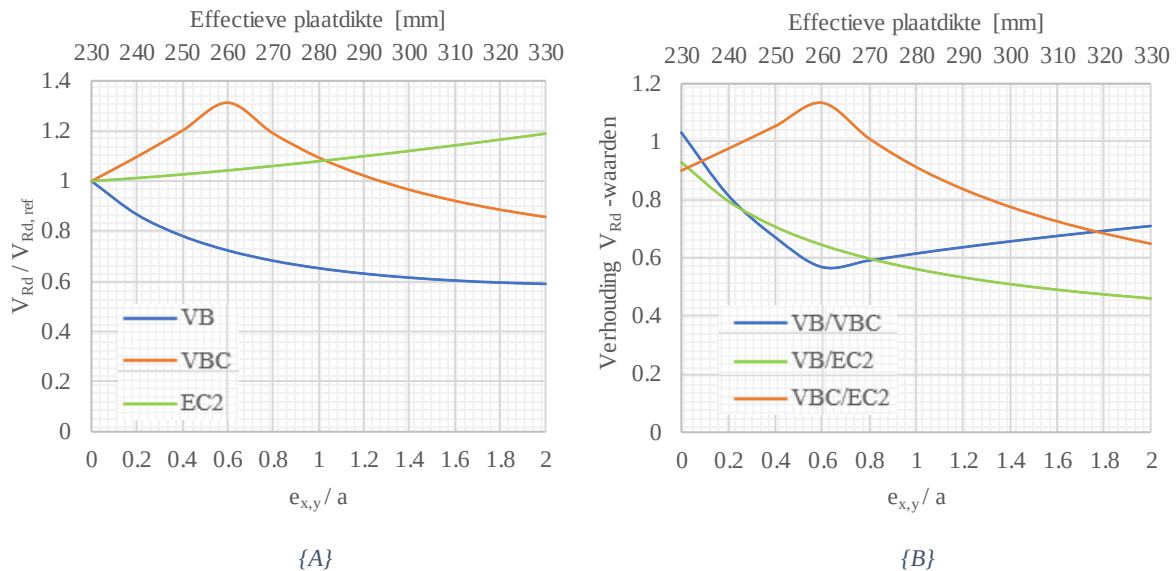
Figuur 12: Invloed betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.

5.2.2 Excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding

Bij de combinatie van wijzigingen van de excentriciteit in x- en y-richting, de effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding ontstaan er veel verschillen tussen de voorschriften. De keuze om bij deze combinatie enkel de dubbele buiging te betrekken is gemaakt om een representatief beeld van de buiging in beide richtingen te verkrijgen.

In Figuur 13A zien we de stijgende trend van de grafiek van de VBC voor kleine excentriciteiten terugkomen {Bevinding 7 in 5.1.3}. Deze norm blijkt dus minder conservatief dan de VB ten aanzien van de beschouwde parameters. Bovendien heeft louter de V_{Rd} van de EC2 een constante, toenemend stijgende trend als zowel de effectieve plaatdikte als de excentriciteit stijgen (zie Figuur 13A). Dit komt door een al eerder beschreven oorzaak in 5.1.3 {Bevinding 6}. Op dit gebied heeft de norm aan conservatisme ingeleverd.

Uit Figuur 13B blijkt dat de norm gedurende de jaren minder conservatief is geworden als de drie beschouwde parameters in acht worden genomen. De enige uitzondering hierop zijn excentriciteiten waarvoor geldt dat $0.24 < e_{x,y}/a < 0.8$, wat opnieuw kan worden toegeschreven aan de bevinding beschreven in 5.1.3 {Bevinding 7}.

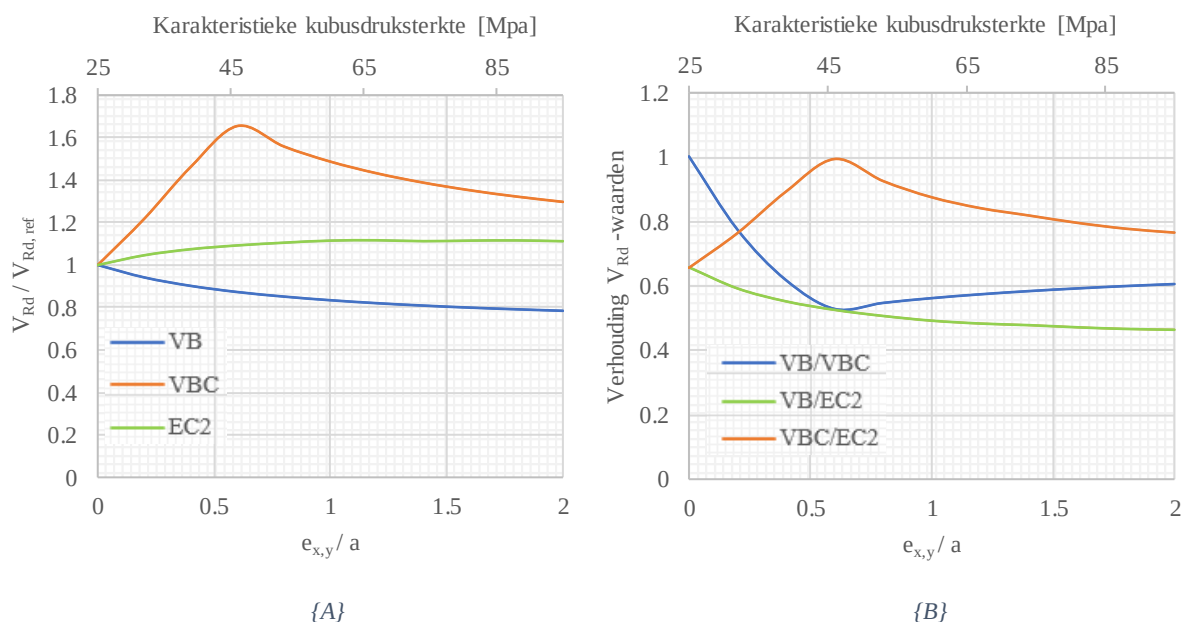


Figuur 13: Invloed excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.

5.2.3 Betonsterkteklasse en excentriciteit

Om niet enkel hogesterktebeton te betrekken in deze combinatie van parameters, wordt er een lagere karakteristieke kubusdruksterkte gekozen als standaardwaarde waarop de $V_{Rd, ref}$ gebaseerd is. De standaardwaarde van de druksterkte wordt aangepast van 67 MPa naar 25 MPa (C55/67 naar C20/25).

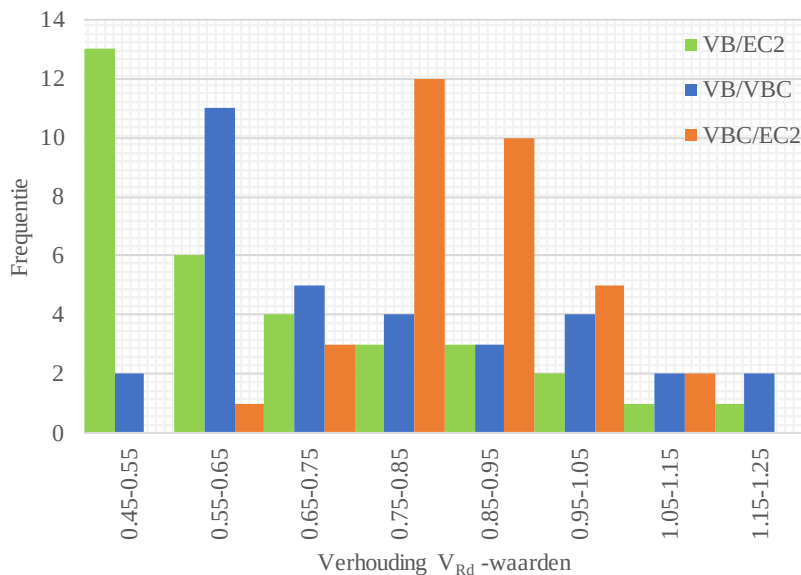
Figuur 14A en Figuur 14B tonen veel gelijkenissen met Figuur 13A en Figuur 13B. Dit is niet merkwaardig te noemen, omdat de excentriciteit – die significante invloed heeft op het ponsdraagvermogen – terugkomt in de beide combinaties in 5.2.2 en 5.2.3. Door hetzelfde karakter van de figuren kunnen dezelfde conclusies worden getrokken over het conservatisme van de normen op basis van Figuur 14A en Figuur 14B (zie 5.2.2).



Figuur 14: Invloed betonsterkteklasse en excentriciteit {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften.

5.2.4 Histogram B_{rand}

Het histogram in Figuur 15 bevat de V_{Rd} -verhoudingswaarden van alle beschouwde combinaties in 5.2.1 t/m 5.2.3. Uit het histogram is af te leiden dat de norm op den duur aan conservatisme heeft ingeleverd. De groene staven pieken namelijk fors onder de 1.0 (91% van de groenen staven bevindt zich onder de 1.0 met een gemiddelde waarde van 0.67). Met de invoering van de VBC is de norm significant minder conservatief geworden, wat af te leiden is aan een gemiddelde van 0.81 voor de VB/VBC-waarden. De VBC is voor deze situatie in 85% van de gevallen minder conservatief dan de VB. Vervolgens laten de oranje staven zien dat de norm met de komst van de EC2 nog meer conservatisme heeft afgestaan: met een gemiddelde van 0.86 is deze norm in 91% van de situaties minder conservatief dan de VBC.



Figuur 15: Histogram B_{rand} parametercombinaties.

5.2.5 Vergelijking Histogram A_{rand} en Histogram B_{rand}

Een vergelijking tussen de histogrammen in Figuur 11 en Figuur 15 is nodig om de conclusies voor de randkolom te bekrachtigen. In de histogrammen zien we dezelfde trend terugkomen: de voorschriften worden minder conservatief in de loop der jaren. In Figuur 15 komt deze conclusie nog duidelijker naar voren, doordat er meer en hogere pieken zijn onder de 1.0 met lagere gemiddeldes dan in Figuur 11. De bevinding van het inleveren van conservatisme is door hetzelfde karakter van de histogrammen meer valide geworden. De varianten die zijn onderzocht leiden namelijk allen tot eenzelfde eindconclusie voor de randkolom.

6 Resultaten hoekkolom

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van het onderzoek naar de ponsweerstand van de hoekkolom. De verandering van de weerstand tegen pons volgens de voorschriften wordt aan het licht gebracht door diverse parameterwaarden te variëren (6.1). In de paragraaf die volgt worden er verschillende combinaties van parameterwijzigingen onderzocht (6.2). Wanneer dit nuttig is, wordt er een vergelijking gemaakt met de resultaten van de randkolom. Dan wordt verwezen naar figuren, bevindingen of paragrafen in hoofdstuk 5 om te voorkomen dat zaken dubbel aan bod komen. Bijlage 1 bevat een voorbeeld van de berekening van de hoekkolom en een bijbehorende toelichting.

6.1 Invloedparameters

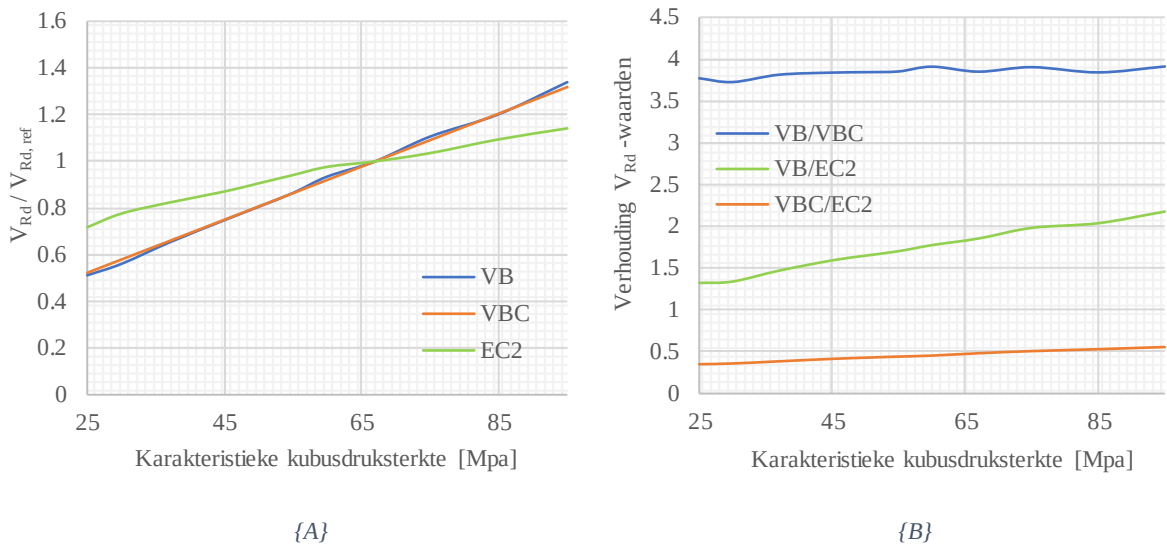
Opnieuw wordt gekeken naar de verschillen tussen de voorschriften met betrekking tot de invloed van de diverse parameters (6.1.1 t/m 6.1.4) op de weerstand. Ook de verschillen in absolute V_{Rd} -waarden komen in deze subparagrafen aan bod en worden vervolgens samengevoegd in een histogram (6.1.5).

6.1.1 Betonsterkteklasse

Wat opvalt is dat Figuur 16A identiek is aan Figuur 6A uit 5.1.1. Voor zowel de VBC als de EC2 wordt dit veroorzaakt doordat bij de variatie van de betonsterkteklasse enkel de weerstand tegen pons verandert. De perimeter, de effectieve plaatdikte en excentriciteitsfactor blijven gelijk. Aangezien de weerstand tegen pons gelijk is voor de rand- en hoekkolom, zullen de verhoudingsgetallen ook gelijk blijven. De VB maakt daarnaast geen onderscheid tussen rand- en hoekkolommen, waardoor de verhoudingen gelijk zijn in beide figuren. Dezelfde conclusies als in de eerste alinea van 5.1.1 kunnen worden getrokken op basis van Figuur 16A.

Figuur 16B visualiseert de uiteenlopende V_{Rd} -waarden die volgen uit de verschillende voorschriften. In de figuur is aan de blauwe grafiek te zien dat de invoer van de VBC heeft gezorgd voor het significant conservatiever worden van de norm. Daarentegen zorgde de EC2 er juist weer voor dat het voorschrift ten opzichte van de VBC minder conservatief werd.

De VB maakt geen onderscheid tussen rand- en hoekkolommen {*Bevinding 9*}. Terwijl de perimeter en de excentriciteitsfactor – voor een hoekkolom ten opzichte van een randkolom – dalen volgens de VBC en de EC2, veranderen deze parameters niet volgens de VB. De VBC en de EC2 leiden voor een hoekkolom dus tot een fors lagere weerstand dan voor een randkolom. De weerstand volgens de VB blijft echter gelijk voor een rand- en hoekkolom. Dit leidt ertoe dat de blauwe en groene grafiek waarden ver boven de 1.0 aannemen (zie Figuur 16B). De oranje grafiek heeft enkel waarden onder de 1.0 voor het gekozen domein. Dit wordt onder andere veroorzaakt door een relatief hoge tabelwaarde van α_x {5} en een relatief grote excentriciteitsfactor α_e {5} voor de VBC {*Bevinding 10*}. Deze relatief grote excentriciteitsfactor wordt bij zijn beurt weer veroorzaakt doordat de afstand tussen het zwaartepunt van de kolom en het zwaartepunt van de periferie (e_z) relatief groot is voor een hoekkolom. Dit zorgt voor een behoorlijk ongunstige situatie ten aanzien van het “zwaartepunteffect”, waardoor de weerstand tegen bezwijken voor de VBC laag zal uitvallen {*Bevinding 7 in 5.1.3*}. Daarnaast is de procentuele daling van de perimeter van de randkolom ten opzichte van de hoekkolom groter voor de VBC dan voor de EC2 {*Bevinding 11*}. Hierdoor neemt de oranje grafiek in Figuur 16B lagere waarden aan dan de oranje grafiek in Figuur 6B (5.1.1).

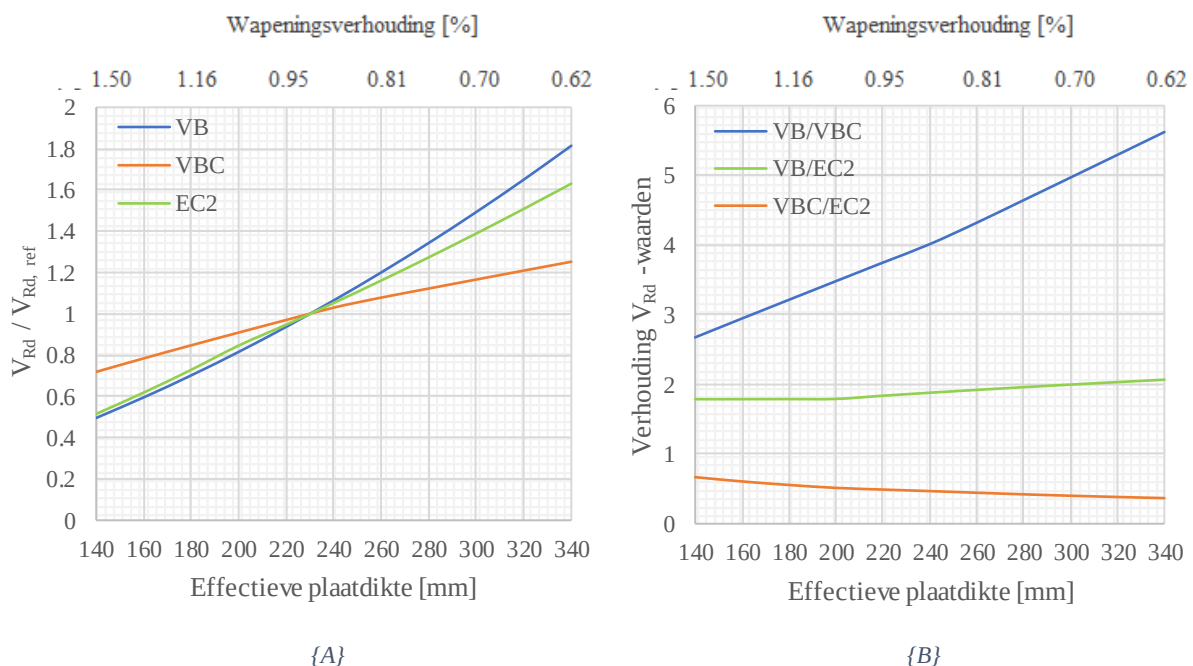


Figuur 16: Invloed betonsterkteklasse {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.1.2 Effectieve plaatdikte en wapeningspercentage

De effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding hebben respectievelijk de meeste invloed op de weerstand van de VB, EC2 en VBC (zie Figuur 17A). Net als bij de randkolom (zie 5.1.2) is de norm eerst conservatiever geworden met overgang van de VB naar de VBC om vervolgens weer aan conservatisme in te leveren met de overgang van de VBC naar de EC2. De oorzaken hiervan kunnen worden toegeschreven aan dezelfde bevindingen als beschreven in 5.1.2 {Bevinding 2, Bevinding 3 en Bevinding 4}.

De resultaten in Figuur 17B duiden erop dat het voorschrift nadat het conservatiever werd door de invoer van de VBC weer minder conservatief werd met de EC2. De hoge verhoudingswaarden van de blauwe grafiek en de lage verhoudingswaarden van de oranje grafiek zijn gedeeltelijk toe te schrijven aan de bevindingen beschreven in 6.1.1 {Bevinding 9, Bevinding 10 en Bevinding 11}.

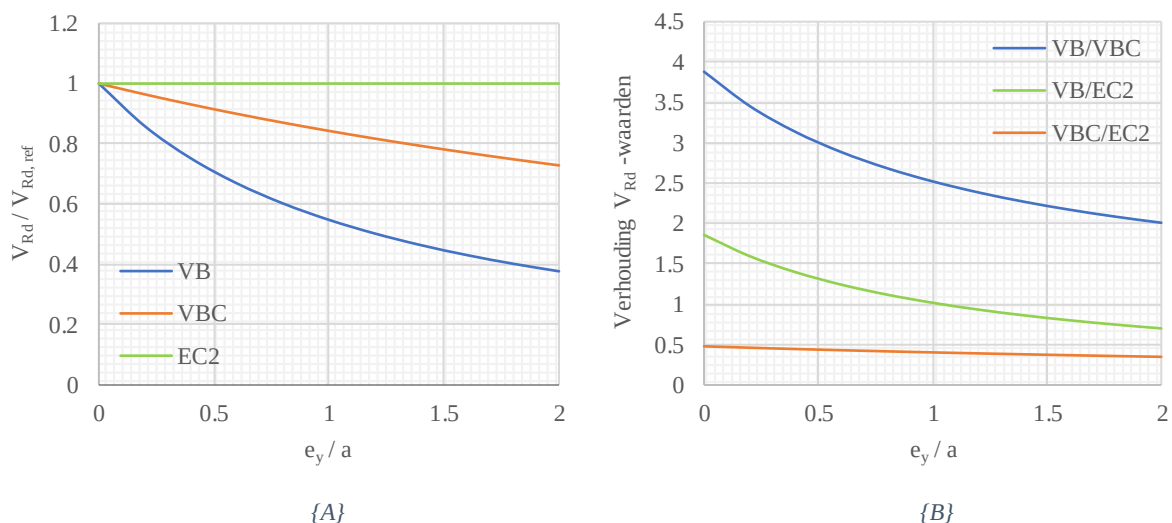


Figuur 17: Invloed effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.1.3 Excentriciteit

Bij het aanbrengen van een excentriciteit van de kracht, ontstaan ook bij de hoekkolom verschillen tussen de voorschriften. Allereerst valt op dat de situatie die te zien is in Figuur 18A lijkt op de situatie die in Figuur 8A is weergegeven (zie 5.1.3). De trend dat het aanbrengen van een buigend moment door middel van een excentrische ponskracht in y-richting meer invloed blijkt te hebben op de oude voorschriften dan op het huidige voorschrift, is in de beide figuren te bespeuren. De nuance ligt hem in het feit dat bij een hoekkolom de excentriciteit geen invloed heeft op de ponskracht volgens de EC2. De oorzaak hiervan is dat de excentriciteitsfactor voor een hoekkolom een vaste waarde heeft in de EC2 en dus niet afhankelijk is van het buigend moment. Uit Figuur 18A kan worden afgeleid dat de norm dus minder conservatief is geworden als wordt gekeken naar de invloed van de excentriciteit in y-richting bij hoekkolommen. De V_{Rd} daalt namelijk het snelst voor het oude voorschrift en daalt niet voor het huidige voorschrift.

Eenzijds komt deze conclusie echter niet naar voren uit Figuur 18B, omdat alle VB/VBC-waarden en grofweg de helft van de VB/EC2-waarden boven de 1.0 ligt. Dit wordt onder andere veroorzaakt door de hoge weerstand die volgt uit de VB {Bevinding 9 in 6.1.1}. Anderzijds is de norm op basis van de VBC/EC2-waarden wel minder conservatief geworden. Het is echter lastig hiervoor een duidelijke oorzaak aan te wijzen {Bevinding 5 in 5.1.3}, ondanks dat de bevindingen uit 6.1.1 hier wel invloed op hebben {Bevinding 10 en Bevinding 11}. Je kunt dus stellen dat het voorschrift met de komst van de VBC beduidend conservatiever is geworden. De introductie van de EC2 leverde vervolgens een minder conservatief voorschrift op.

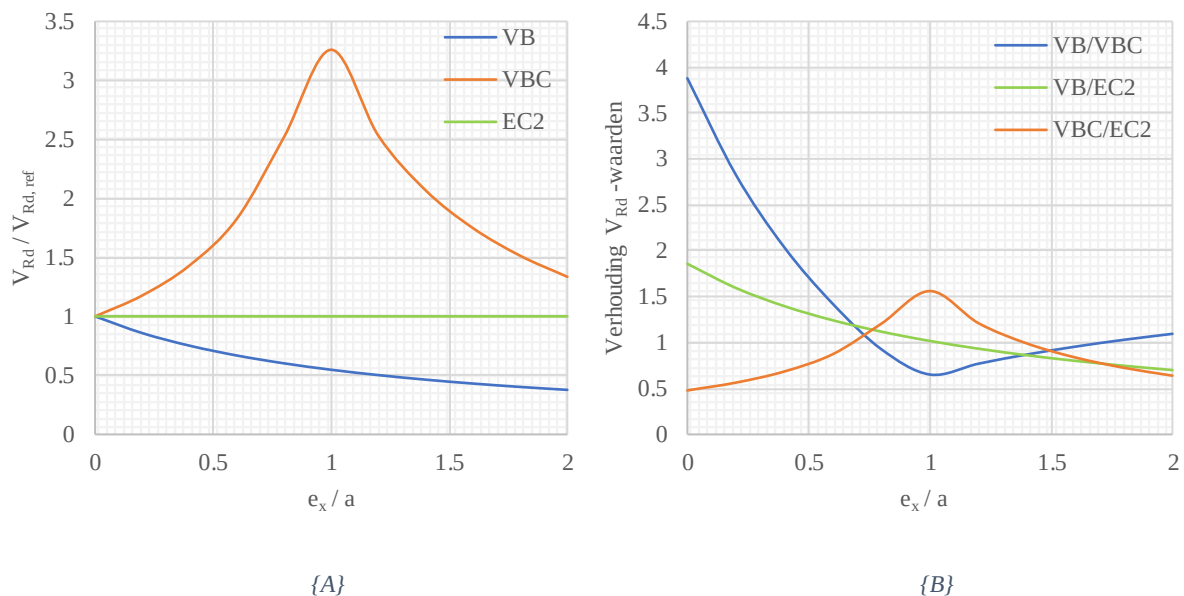


Figuur 18: Invloed excentriciteit in y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

De oranje grafiek in Figuur 19A illustreert de aanzienlijke invloed van de excentriciteit in x-richting op de weerstand volgens de VBC. Bovendien zien we wederom een constante waarde van de weerstand volgens de EC2. De weerstand volgens de VB daalt als enige van de drie grafieken. Het “zwaartepunt-effect” {Bevinding 7 in 5.1.3} heeft significante invloed op de weerstand volgens de VBC bij het variëren van de excentriciteit in x-richting (zie Figuur 19A). De V_{Rd} is bij $e_x / a = 1.0$ zelfs gestegen met circa 225%. Dat dit “zwaartepunt-effect” meer invloed heeft bij de hoekkolom dan bij de randkolom (vergelijk Figuur 19A met Figuur 9A uit 5.1.3) komt omdat de e_z van een hoekkolom {7} fors groter is dan van een randkolom

{6}. Anders geformuleerd: de situatie van een hoekkolom blijft langere tijd steeds gunstiger worden, terwijl de situatie van de randkolom alweer ongunstiger wordt nadat $e_x > e_z$.

Uit Figuur 19B is af te leiden dat de VBC steeds minder conservatief wordt naarmate de excentriciteit in x-richting stijgt. Dit wordt in de figuur gevisualiseerd door de dalende blauwe grafiek en de stijgende oranje grafiek. Als de excentriciteit in x-richting voor de VBC voorbij zijn gunstige punt is, wordt deze norm weer conservatiever ten opzichte van de VB en de EC2 (stijgende blauwe en dalende oranje grafiek). Het is lastig om verdere conclusies te trekken over het conservatisme van de normen, vanwege de schommelende waarden rond de 1.0.



Figuur 19: Invloed excentriciteit in x-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

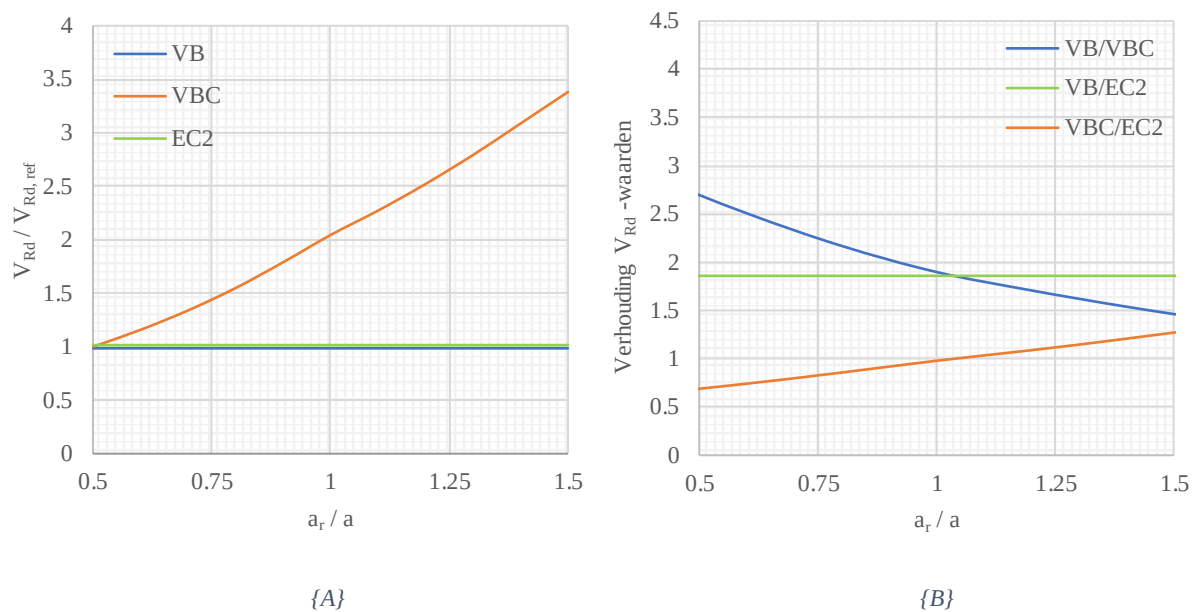
In Bijlage 2 zijn opnieuw de figuren voor dubbele buiging opgenomen, omdat deze hetzelfde karakter hebben als Figuur 19A en Figuur 19B.

6.1.4 Randafstand

Zoals te zien in Figuur 20A heeft de randafstand bij hoekkolommen geen invloed op de ponskracht die volgt uit de VB en de EC2. Daarentegen wordt de ponskracht die uitgerekend is volgens de VBC wel groter als de randafstand toeneemt. Bij een randafstand van $a_r = 400 \text{ mm}$ is deze zelfs gestegen met 238% ten opzichte van de startwaarde. Dit verschil in weerstand wordt veroorzaakt door het “zwaartepunteffect” {Bevinding 8 uit 5.1.4}. Op basis hiervan kan de conclusie worden getrokken dat bij hoekkolommen het voorschrift eerst minder conservatief en vervolgens weer conservatiever is geworden.

Kijkend naar de situatie van de grootte van de ponsdraagvermogens volgens de voorschriften, volgt uit Figuur 20B dat de voorschriften met betrekking tot pons van hoekkolommen over het algemeen conservatiever zijn geworden. Dit valt af te leiden uit het feit dat de meeste verhoudingswaarden in de grafieken groter dan 1.0 zijn. De dalende blauwe lijn laat zien dat bij het vergroten van de randafstand ten opzichte van de kolomdiameter de VBC steeds minder conservatief wordt in vergelijking met de VB. De VBC blijft voor alle verschillende randafstanden echter wel conservatiever dan de VB, omdat alle waarden boven de 1.0 liggen. De invoering van de EC2 heeft ervoor gezorgd dat voor randafstanden kleiner dan of gelijk aan 200 mm het voorschrift minder conservatief is geworden. Voor grotere randafstanden is

de EC2 conservatiever geworden ten opzichte van de VBC. Dat de blauwe en oranje grafiek steeds meer naar elkaar toe kruipen wordt veroorzaakt door de stijgende weerstand volgens de VBC bij toenemende randafstand (zie Figuur 20A).

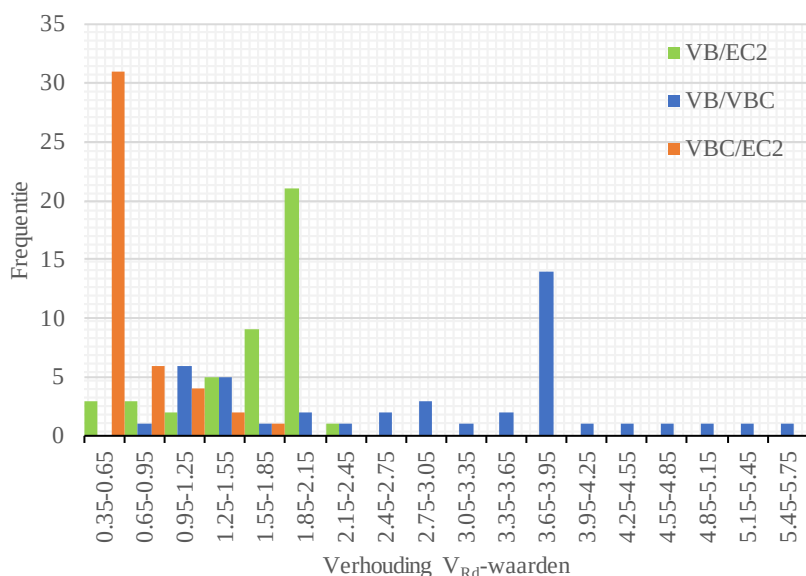


Figuur 20: Invloed randafstand {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.1.5 Histogram A_{hoek}

De verschillen tussen de voorschriften in de weerstand tegen bezwijken, komen in het histogram in Figuur 21 goed naar voren. Het histogram laat het volgende beeld zien:

- Met de intrede van de VBC werd de norm conservatiever in 93% van de situaties. De blauwe pieken liggen vrijwel allemaal boven de 1.0 met een gemiddelde waarde van 2.93.
- Met de intrede van de EC2 werd de norm minder conservatief in 88% van de gevallen. De oranje staven hebben een hoge frequentie onder de 1.0 met een gemiddelde waarde van 0.66.



Figuur 21: Histogram A_{hoek} invloedparameters.

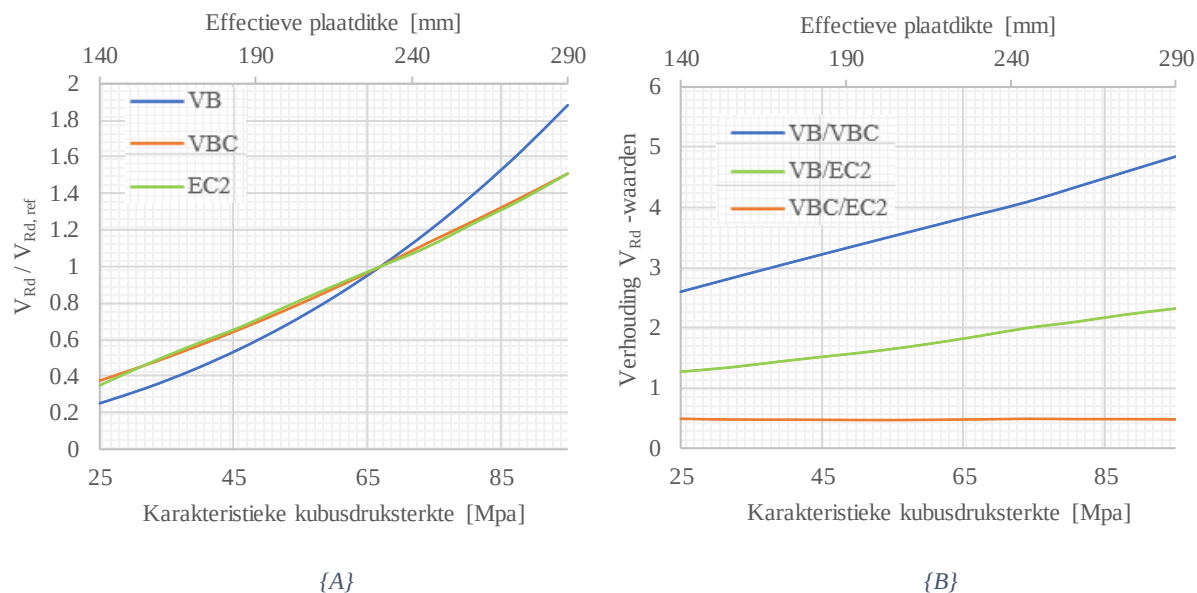
6.2 Parametercombinaties

Voor de hoekkolom worden dezelfde parametercombinaties (6.2.1 t/m 6.2.3) en de invloed van wijzigingen hiervan op de weerstand onderzocht. In 6.2.4 worden alle V_{Rd} -verhoudingswaarden van de combinaties gevisualiseerd met behulp van een histogram. Histogram A_{hoek} en Histogram B_{hoek} kunnen vervolgens vergeleken worden (6.2.5).

6.2.1 Betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding

Bij de overgang van de VB naar de VBC is de norm conservatiever geworden ten aanzien van de wijziging van de betonsterkteklasse, de effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding (zie Figuur 22A). Tussen de VBC en de EC2 zijn de verschillen daarentegen verwaarloosbaar klein met betrekking tot de verandering van de weerstand bij deze parameterwijzigingen. De componenten die hier de meeste invloed op hebben zijn de bevindingen beschreven in 5.1.1 en 5.1.2 {*Bevinding 1*, *Bevinding 2*, *Bevinding 3* en *Bevinding 4*}.

Met de overgang van de VB naar de VBC is de norm aanzienlijk conservatiever geworden. De norm werd echter weer minder conservatief door de ingebruikneming van de EC2. De componenten die hier de meeste invloed op hebben zijn de bevindingen beschreven in 6.1.1 {*Bevinding 9*, *Bevinding 10*, *Bevinding 11*}.

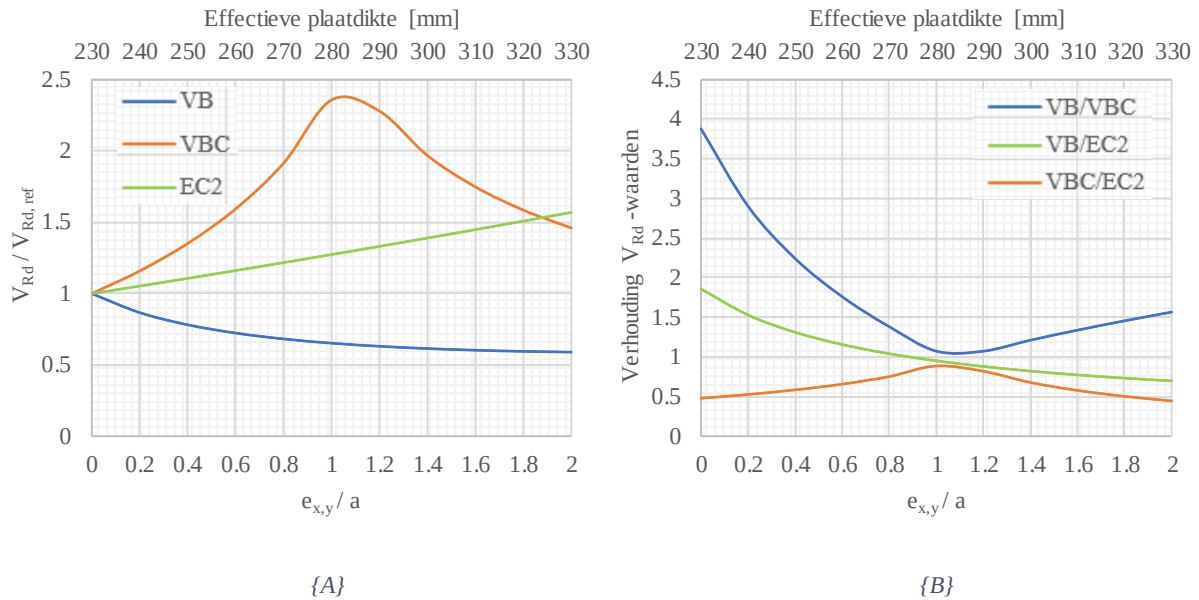


Figuur 22: Invloed betonsterkteklasse, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.2.2 Excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding

Op basis van Figuur 23A lijkt de VB het conservatiefst om te gaan met de parameters excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding. De VBC is daarentegen het minst conservatief bij wijzigingen van de drie beschouwde parameters. Op het laatstgenoemde heeft de component “zwaartepunt-effect” de meeste invloed {Bevinding 7 in 5.1.3}.

Figuur 23B geeft de conclusie weer dat de norm met de ingebruikneming van de VBC conservatiever werd en vervolgens weer aan conservatisme inleverde toen de EC2 werd ingevoerd. De oorzaken zijn voor het grootste gedeelte toe te schrijven aan enkele bevindingen in 6.1.1 {Bevinding 9, Bevinding 10 en Bevinding 11}.

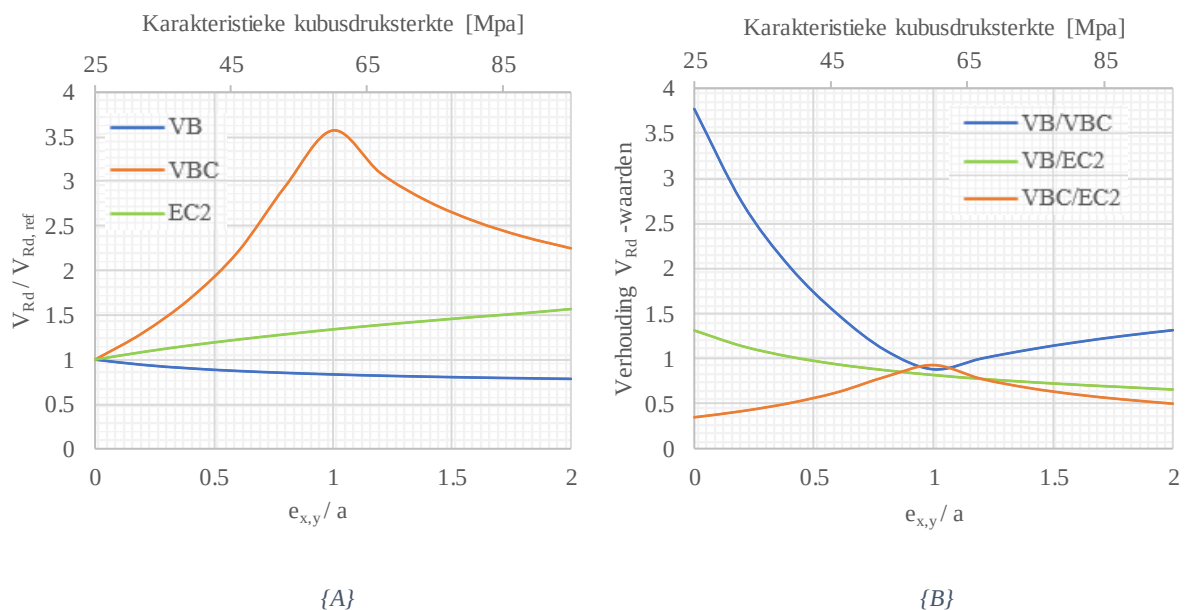


Figuur 23: Invloed excentriciteit, effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.2.3 Betonsterkteklasse en excentriciteit

Figuur 24A en Figuur 24B laten eenzelfde beeld zien als de figuren in 6.2.2. Daarom volgen hieruit dezelfde conclusies die worden veroorzaakt door dezelfde bevindingen:

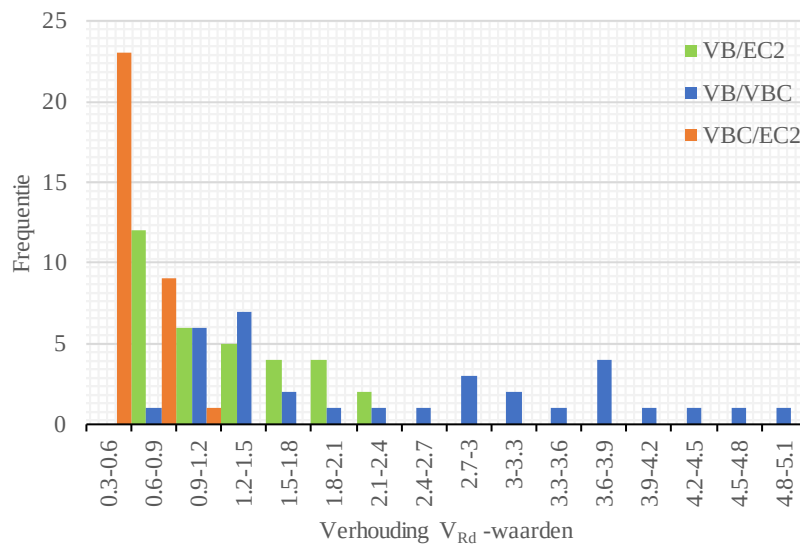
- Respectievelijk gaan de VB, EC2 en de VBC steeds conservatiever om met de invloedparameters betonsterkteklasse en excentriciteit.
- De norm is eerst conservatiever geworden met de VBC, waarna deze weer minder conservatief werd met de EC2.



Figuur 24: Invloed betonsterkteklasse en excentriciteit {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

6.2.4 Histogram B_{hoek}

Als er een histogram wordt gemaakt van de V_{Rd} -verhoudingswaarden van alle beschouwde parameterscombinaties, is Figuur 25 het resultaat. Op basis van deze figuur kan worden geconcludeerd dat de norm met de overgang van de VB naar de VBC beduidend conservatiever is geworden met een gemiddelde waarde van 2.24 voor de blauwe staven. De VBC is in 91% van de onderzochte situaties conservatiever dan oudste onderzochte norm (VB). De norm heeft met de invoering van de EC2 echter weer fors aan conservatisme ingeleverd ten opzichte van de VBC. Een gemiddelde VBC/EC2-waarde van 0.55 laat dit duidelijk zien. De huidige norm – de EC2 – is in 97% van de situaties minder conservatief dan de VBC.



Figuur 25: Histogram B_{hoek} parametercombinaties.

6.2.5 Vergelijking Histogram A_{hoek} en Histogram B_{hoek}

De histogrammen in Figuur 21 en Figuur 25 zijn niet wezenlijk verschillend. Er is echter wel één verschil tussen de histogrammen: de tendens van histogram A_{hoek} (te zien aan de groene staven) is het conservatiever worden van de norm, terwijl histogram B_{hoek} een tendens visualiseert die duidt op het minder conservatief worden van de norm. Ondanks dit verschil wijzen de histogrammen op dezelfde conclusie: de norm werd eerst conservatiever (met de VBC) en vervolgens minder conservatief (met de EC2).

7 Conclusie

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de rekenmethodieken voor pons volgens de verschillende voorschriften. Voor rand- en hoekkolommen is er een vergelijking gemaakt tussen de rekenwaarden van de ponsdraagvermogens die volgen uit de huidige en oude voorschriften. Het doel van dit rapport was om op basis van dit kwantitatieve parameteronderzoek te bepalen of de norm in de loop der jaren conservatiever is geworden.

Uit het onderzoek blijkt dat bij randkolommen de invoering van de VBC 1995 heeft geleid tot het minder conservatief worden van de norm. Als louter de afzonderlijke parameters in beschouwing worden genomen is deze norm in 68% van de onderzochte gevallen minder conservatief dan de VB 1974/1984 (zie 5.1.5). Indien de parameters gecombineerd worden stijgt dit percentage naar 85% (zie 5.2.4). De overgang van de VBC 1995 naar de Eurocode 2 zorgde ervoor dat er nog meer conservatisme werd ingeleverd. De Eurocode 2 is minder conservatief dan de VBC 1995 in respectievelijk 68% en 91% van de situaties betreffende de invloedparameters (zie 5.1.5) en de parametercombinaties (zie 5.3.4).

Bij hoekkolommen kan de conclusie worden getrokken dat de ingebruikneming van de VBC 1995 heeft geleid tot het conservatiever worden van het voorschrift in circa 92% van de gevallen (zie 6.1.5 en 6.2.4). Met de komst van de Eurocode 2 werd er aanzienlijk aan conservatisme ingeleverd. Als de invloedparameters afzonderlijk worden beschouwd, is dit voorschrift in omstreeks 88% van de situaties minder conservatief dan de VBC 1995 (zie 6.1.5). Uit de gemaakte parametercombinaties blijkt dit voorschrift zelfs in 97% van de gevallen minder conservatief te zijn dan zijn voorganger (zie 6.2.4).

Als er per voorschrift wordt gekeken naar de invloed van de parameters op het ponsdraagvermogen voor zowel de rand- als hoekkolom, kan het volgende worden geconcludeerd: de oude voorschriften – VB 1974/1984 en VBC 1995 – hebben extra veiligheid ingebouwd ten aanzien van de excentriciteit in x- en in y-richting (zie 5.1.3 en 6.1.3). De voorschriften hebben in principe dus aan conservatisme ingeleverd ten aanzien van deze parameterwijzigingen. De enige uitzondering hierop is de invloed van de excentriciteit in x-richting op de weerstand volgens de VBC 1995, die op dit vlak fors aan conservatisme inlevert ten opzichte van de VB 1974/1984 en de Eurocode 2 (zie 5.1.3 en 6.1.3). Dit wordt veroorzaakt doordat het drukpunt en het zwaartepunt van de periferie elkaar naderen en de situatie volgens de VBC steeds gunstiger maken bij het vergroten van de excentriciteit in x-richting {*Bevinding 7 in 5.1.3*}. Daarnaast gaan we vanaf de invoering van de Eurocode 2 conservatiever om met de invloed van de betonsterkteklasse op de ponsweerstand, door uit te gaan van een exponentieel verband hiertussen (5.1.1 en 6.1.1). Ten aanzien van de wijziging van de effectieve plaatdikte en de wapeningsverhouding heeft de VBC 1995 gezorgd voor het conservatiever worden van het voorschrift, waarna deze weer aan conservatisme inleverde met de komst van de Eurocode 2 (5.1.2 en 6.1.2). Tot slot werd louter de weerstand die volgde uit de VBC 1995 groter bij het vergroten van de randafstand. De randafstand had in de normen VB 1974/1984 en Eurocode 2 geen invloed op de weerstand tegen bezwijken.

7.1 Discussie

Uit de resultaten blijkt dat de Eurocode 2 voor zowel de rand- als hoekkolom aan conservatisme heeft ingeleverd ten opzichte van de VBC 1995. Laatstgenoemde norm is minder conservatief dan de VB 1974/1984 voor de randkolom en conservatiever dan de VB 1974/184 voor de hoekkolom. De uitkomsten waren niet op voorhand te voorspellen, omdat er

juist onduidelijkheid was over hoe de voorschriften waren veranderd in de loop der jaren. Echter, vooraf had wel voorspeld kunnen worden dat uit de VB 1974/1984 – aangezien deze geen onderscheid maakt tussen rand- en hoekkolommen – een relatief hoge weerstand zou volgen voor de hoekkolom. Het is dus voorspelbaar dat de VBC 1995 voor dit type kolom conservatiever is dan zijn voorganger (VB 1974/1984).

Dit onderzoek is een aanvulling op de al bestaande onderzoeken naar pons, omdat de gemaakte analyse duidelijkheid geeft over hoe de voorschriften ten aanzien van de veiligheid op den duur zijn veranderd. Er moet wel rekening worden gehouden dat dit onderzoek zich heeft beperkt tot een selecte groep onderzochte varianten en parameters met begrensde domeinen (zie 7.1.1).

7.1.1 Beperkingen

- Er is louter gekeken naar de verschillen tussen de ponsdraagvermogens van de voorschriften zonder de verschillen in rekenwaarden van de ponskrachten in beschouwing te nemen. Constructeurs rekenen doorgaans met een Unity Check, waarbij de weerstand met de belasting wordt vergeleken. De verschillen in belastingfactoren van de voorschriften worden dan ook meegenomen in de berekening. Dit is echter nagelaten in dit onderzoek, waardoor de eindconclusies in mindere mate geldig zijn. Het is echter wel zo dat de er geen significante verschillen zijn tussen de belastingfactoren van de voorschriften. De vraag is hoeveel invloed deze belastingfactoren hadden gehad voor de bepaling of de voorschriften conservatiever zijn geworden. Wellicht is het interessant om hiernaar te kijken in een vervolgonderzoek.
- Er is geprobeerd een zo realistisch mogelijk domein te kiezen voor de parameters en om zo veel mogelijk parameters in het onderzoek mee te nemen. Echter, als de domeinen, de parameters en de parametercombinaties anders waren gekozen, waren de uitkomsten van het onderzoek wellicht anders geweest. De mate van validiteit van de conclusies is hierdoor minder dan als er meer varianten onderzocht waren. In een eventueel vervolgonderzoek zou bovendien de ponswapening mee kunnen worden genomen.
- Er is uitgegaan van een bepaalde basissituatie waarbij enkele parameters een onpraktische referentiewaarde hebben gekregen. De gekozen betonsterkteklasse C55/67 is aan de hoge kant. Aangezien de oude voorschriften het gedrag van dit hogesterktebeton wellicht minder goed beschrijven, was het logischer geweest om een lagere betonsterkteklasse als referentiewaarde aan te nemen. Ook de randafstand is onhandig gekozen. De kleine waarde leidt er voor de VBC toe dat het zwaartepunt van de kolom en het zwaartepunt van de periferie voor een hoekkolom relatief ver uit elkaar liggen voor de basissituatie. Dit levert een ongunstige beginsituatie op voor de VBC, waarbij de weerstand volgens deze norm significant lager uitvalt dan de weerstanden berekend volgens de VB en de EC2. Dit verschil heeft aanzienlijke invloed op de histogrammen van de hoekkolom, waardoor de conclusies hierover aan validiteit inleveren.

Literatuurlijst

- [1] Braam, C.R. en Lagendijk, P. (2011). Constructieleer Gewapend Beton (4^e ed.). Nederland: Aeneas.
- [2] Brikle, G. and Dilger, W.H. (2008). Influence of Slab Thickness on Punching Shear Strength. ACI Structural Journal, vol. 105, No.2.
- [3] Dragosavic, M. (1974). CUR-rapport 65 pons. Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies.
- [4] Grontmij (2015). Ponscontrole (*Excelsheets*).
- [5] NEN 3880 (1984). Voorschriften beton (VB 1974/1984).
- [6] NEN 6720 (1995). Voorschriften Beton - Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995).
- [7] NEN-EN 1992-1-1 (2011). Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen.
- [8] NEN 6702 (2007). Technische grondslagen voor bouwconstructies - TGB 1990 - Belastingen en vervormingen.
- [9] NEN-EN 1990 (2011). Eurocode 0: Grondslag van het constructief ontwerp.
- [10] Nuri, M. (2018). De ponsweerstand van vlakke plaatvloeren (*Bachelor Eindproject*).
- [11] Odijk, M. (2015). Pons (*Bachelor Eindproject*).
- [12] Rijksoverheid (z.d.). Bouwbesluit 2012. Geraadpleegd van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/bouwregelgeving/bouwbesluit-2012>

Bijlage 1: Rekenvoorbeeld rand- en hoekkolom

De berekeningen van de weerstand volgens de voorschriften worden aan de hand van een stapsgewijs voorbeeld voor de rand- en hoekkolom (1.1 en 1.2) uitgewerkt. In deze voorbeelden wordt de referentiewaarde van het ponsdraagvermogen $V_{Rd, ref}$ uitgerekend aan de hand van de waarden in Tabel 1.1. Vervolgens wordt een korte toelichting gegeven over het verdere verloop van de berekening en de visualisatie van de resultaten (1.3).

Parameter	Grootheid	Waarde
Betondekking	c_{nom}	25 mm
Betonsterkteklasse	-	C55/67
Diameter wapening (x- en y-richting)	$\emptyset$	20 mm
Plaatdikte	h	265 mm
Effectieve plaatdikte	d_{eff}	230 mm
Rechthoekige kolomafmeting	a	200 mm
Tussenafstand wapening	s	150 mm
Excentriciteit	e	0 mm
Randafstand	a_r	100 mm

Tabel 4: Basissituatie met gestandaardiseerde invloedparameters

1.1 Rekenvoorbeeld randkolom

VB

De ponsdraagvermogen $V_{Rd, ref}$ wordt volgens de VB als volgt berekend:

$$V_{Rd,ref} = \tau_1 * \frac{\pi h(h + d)}{1 + \frac{2e}{h + d}}$$

Waarin:

$$\tau_1 = 0.5 * f_b = 0.5 * 2.7 = 1.35 \text{ N/mm}^2$$

$$h = 230 \text{ mm}$$

$$d = \frac{2(a_b + a_l)}{\pi} = \frac{2(200 + 200)}{\pi} = 255 \text{ mm}$$

$$e = 0 \text{ mm}$$

Dit levert – na deling door veiligheidsfactor 1.4 – de volgende V_{Rd} op:

$$V_{Rd,ref} = 1.35 * \frac{\pi * 230(230 + 255)}{1 + \frac{2 * 0}{230 + 255}} / 1.4 = 337 \text{ kN}$$

VBC

De $V_{Rd,ref}$ wordt volgens de VBC op de volgende manier berekend:

$$V_{Rd,ref} = \tau_1 * \frac{pd}{\alpha_e}$$

Waarin:

$$\tau_1 = 0.8 f_b k_d \sqrt[3]{\omega_0} = 0.8 * 2.2 * 1.34 * \sqrt[3]{0.91} = 2.29 \text{ N/mm}^2$$

$$d = 230 \text{ mm}$$

$$p = \frac{1}{2} \pi (d + a) + 2a_r = \frac{1}{2} \pi (230 + 255) + 2 * 100 = 961 \text{ mm}$$

$$\alpha_e = 1 + \alpha_x \frac{|e_x - e_z|}{d + a} + \alpha_y \frac{|e_y|}{d + a}$$

$$= 1 + 2.38 \frac{\left| 0 - \frac{0.5(230 + 255)^2 - 100^2}{961} \right|}{230 + 255} + 1.36 \frac{|0|}{230 + 255} = 1.55$$

Hieruit volgt dat V_{Rd} gelijk is aan:

$$V_{Rd,ref} = 2.29 * \frac{961 * 230}{1.55} = 327 \text{ kN}$$

EC2

De V_{Rd} wordt volgens de EC2 op de volgende manier uitgedrukt:

$$V_{Rd,ref} = v_{Rd,c} * u_1 * \frac{d_{eff}}{\beta}$$

Waarin:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} = \frac{0.18}{1.50} * 1.93 * (100 * 0.0091 * 55)^{\frac{1}{3}} = 0.855 \text{ N/mm}^2$$

$$d_{eff} = 230 \text{ mm}$$

$$u_1 = 2r_y + c_1 + c_2 + 2\pi d = 2 * 100 + 200 + 200 + 2\pi * 230 = 2.05 * 10^3 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} + k \frac{u_1}{W_1} e_{par} = \frac{2.05 * 10^3}{1.85 * 10^3} + 0.45 \frac{2.05 * 10^3}{8.02 * 10^5} * 0 = 1.11$$

De V_{Rd} kan nu worden berekend:

$$V_{Rd,ref} = 0.855 * 2.05 * 10^3 * \frac{230}{1.11} = 363 \text{ kN}$$

1.2 Rekenvoorbeeld hoekkolom

VB

De VB maakt geen onderscheid tussen rand- en hoekkolommen. Vandaar dat het volgende geldt:

$$V_{Rd,ref} = 337 \text{ kN}$$

VBC

De $V_{Rd, ref}$ wordt volgens de VBC op de volgende manier berekend:

$$V_{Rd,ref} = \tau_1 * \frac{pd}{\alpha_e}$$

Waarin:

$$\tau_1 = 0.8 f_b k_d \sqrt[3]{\omega_0} = 0.8 * 2.2 * 1.34 * \sqrt[3]{0.91} = 2.29 \text{ N/mm}^2$$

$$d = 230 \text{ mm}$$

$$p = \frac{1}{4} \pi (d + a) + 2a_r = \frac{1}{4} \pi (230 + 255) + 2 * 100 = 581 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \alpha_e &= 1 + \alpha_x \frac{|e_x - e_z|}{d + a} + \alpha_y \frac{|e_y|}{d + a} \\ &= 1 + 6.42 \frac{\left| 0 - 0.25 \sqrt{2} \frac{(230 + 255)^2 + 2 * 100 * (230 + 255) - 2 * 100^2}{581} \right|}{230 + 255} \\ &\quad + 1.59 \frac{|0|}{230 + 255} = 3.52 \end{aligned}$$

Hieruit volgt dat V_{Rd} gelijk is aan:

$$V_{Rd,ref} = 2.29 * \frac{581 * 230}{3.52} = 86.9 \text{ kN}$$

EC2

De V_{Rd} wordt volgens de EC2 op de volgende manier uitgedrukt:

$$V_{Rd,ref} = v_{Rd,c} * u_1 * \frac{d_{eff}}{\beta}$$

Waarin:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} = \frac{0.18}{1.50} * 1.93 * (100 * 0.0091 * 55)^{\frac{1}{3}} = 0.855 \text{ N/mm}^2$$

$$d_{eff} = 230 \text{ mm}$$

$$u_1 = r_y + r_z + \frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} + \pi d = 100 + 100 + \frac{200}{2} + \frac{200}{2} + \pi d = 1.12 * 10^3 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} = \frac{1.12 * 10^3}{923} = 1.22$$

De V_{Rd} kan nu worden berekend:

$$V_{Rd,ref} = 0.855 * 1.12 * 10^3 * \frac{230}{1.22} = 181 \text{ kN}$$

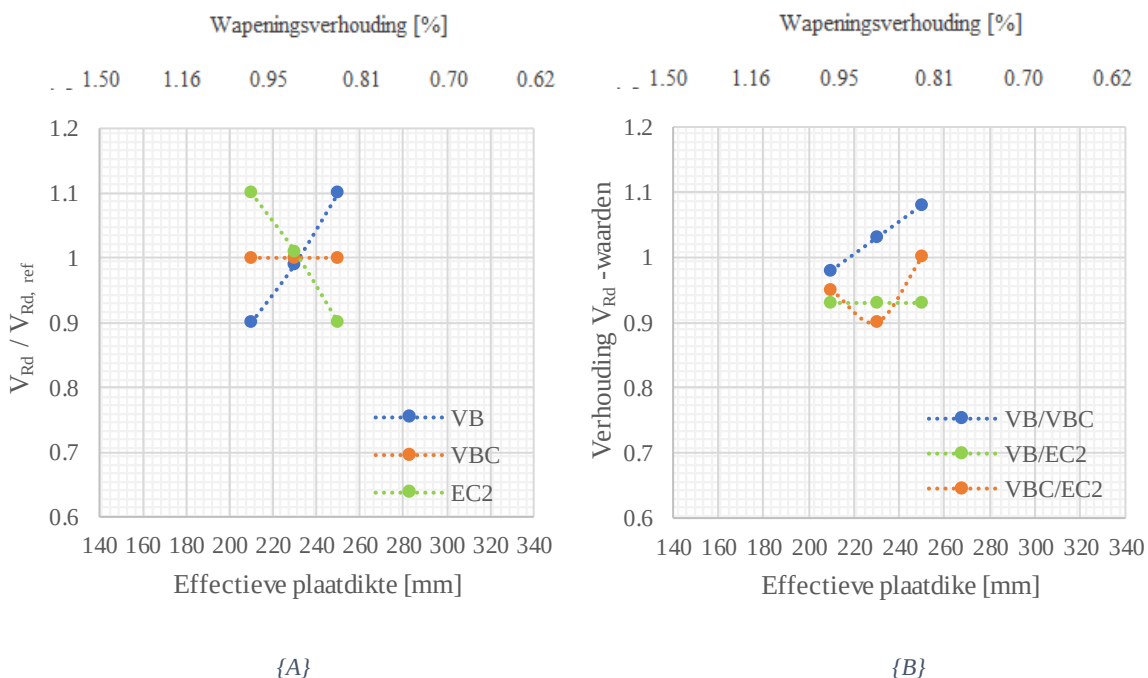
1.3 Vervolg

Nadat de referentiewaarden van de V_{Rd} zijn berekend, kunnen de formules in 1.1 en 1.2 opnieuw worden ingevuld met een bepaalde gewijzigde parameter. De V_{Rd} van alle waarden van het bepaalde domein van de beschouwde invloedparameter kunnen worden berekend. Er zijn dan genoeg gegevens verzameld om voor de rand- en hoekkolom twee figuren per invloedparameter te maken. In de eerste figuur wordt de V_{Rd} vergeleken met de $V_{Rd, ref}$ door te werken met het verhoudingsgetal tussen deze twee waarden. In de tweede figuur worden de absolute V_{Rd} -waarden met elkaar vergeleken door opnieuw te werken met verhoudingsgetallen. Een voorbeeld van de twee figuren wordt in de volgende alinea uitgewerkt.

Als de parameter effectieve plaatdikte (en wapeningsverhouding) wordt beschouwd voor de randkolom, vormen de waarden uit 1.1 en 1.2 het begin van Figuur 1.1A en Figuur 1.1B. De vaststaande waarden van Figuur 1.1A zijn: $V_{Rd} / V_{Rd, ref} = 1.0$. Dit geldt voor alle normen, omdat de beschouwde V_{Rd} gelijk is aan de $V_{Rd, ref}$. De vaststaande waarden van Figuur 1.1B zijn als volgt:

- VB/VBC: $\frac{V_{Rd}(VB)}{V_{Rd}(VBC)} = 1.03$
- VB/EC2: $\frac{V_{Rd}(VB)}{V_{Rd}(EC2)} = 0.93$
- VBC/EC2: $\frac{V_{Rd}(VBC)}{V_{Rd}(EC2)} = 0.90$

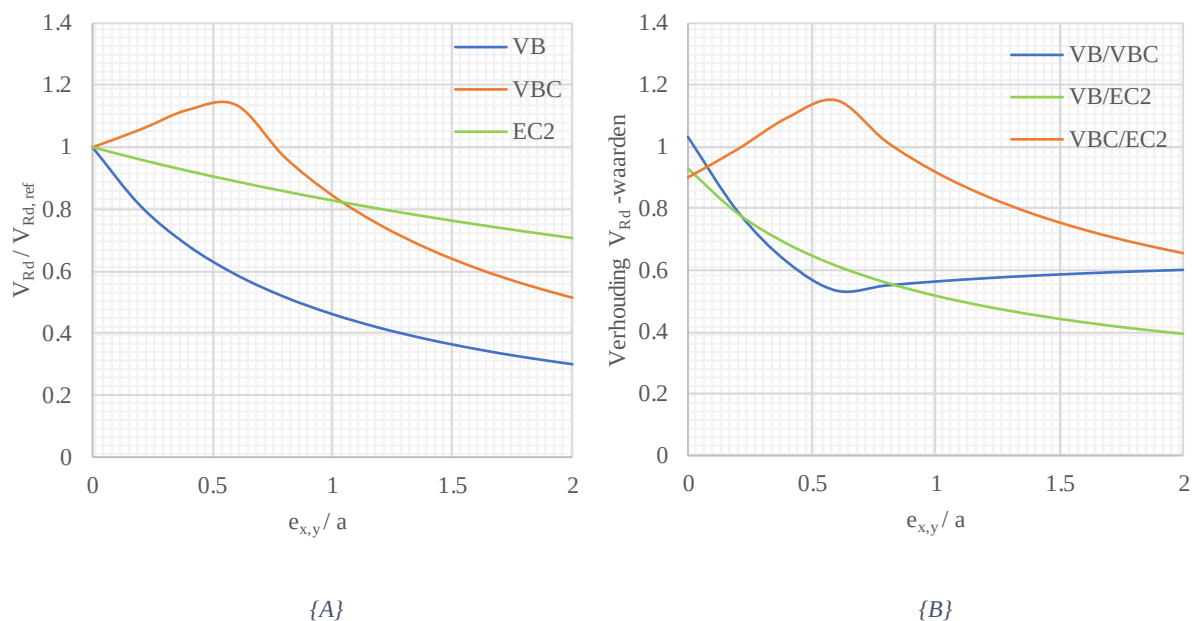
In de figuren zijn naast de vaststaande waarden voor $d_{eff} = 230 \text{ mm}$ ook nog denkbeeldige waarden ingevuld voor $d_{eff} = 210 \text{ mm}$ en $d_{eff} = 250 \text{ mm}$, zodat duidelijk wordt hoe de grafiek virtueel zou kunnen gaan lopen. De stippellijntjes geven dit virtuele verloop weer. De werkelijke waarden die bij deze effectieve plaatdiktes horen, moeten eerst worden berekend aan de hand van 1.1. Enkel de middelste van de drie weergegeven waarden is dus daadwerkelijk uitgerekend.



Figuur 26: Voorbeeldfiguren effectieve plaatdikte en wapeningsverhouding.

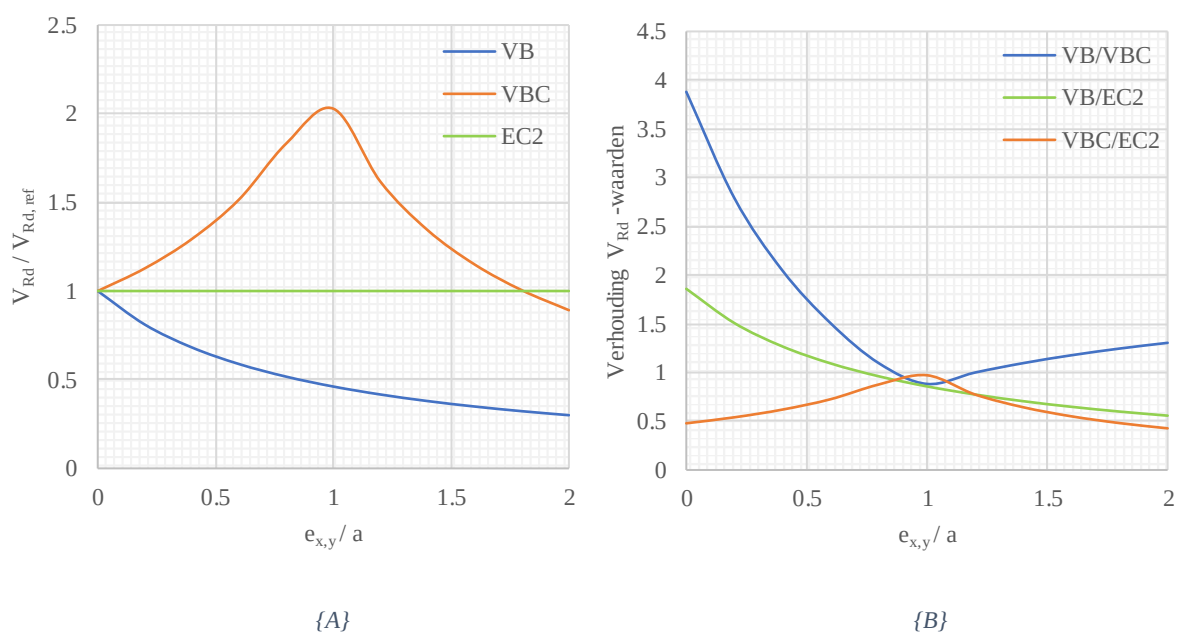
Bijlage 2: Dubbele buiging rand- en hoekkolom

2.1 Randkolom



Figuur 27: Invloed excentriciteit in x- en y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

2.2 Hoekkolom



Figuur 28: Invloed excentriciteit in x- en y-richting {A}; V_{Rd} -verhoudingswaarden van de voorschriften {B}.

Bijlage 3: Besprekingsverslag startnotitie

In dit besprekingsverslag wordt de startnotitiebespreking uiteengezet aan de hand van de opmerkingen, verbeterpunten en vragen van zowel begeleider als de student. De startnotitiebespreking vond plaats op 7 september 2018 van 15:15 tot 16:00 in kamer 2.06 op de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

P.C.J. Hoogenboom (tweede begeleider) kon niet aanwezig zijn bij de startnotitiebespreking. C.R. Braam (eerste begeleider) heeft de startnotitie nagekeken en zijn opmerkingen gedeeld tijdens de bespreking. Bovendien had de student enkele vragen voor de begeleider. Op basis van de opmerkingen en vragen ontstond een open gesprek waaruit meerdere **aandachts- en verbeterpunten** naar voren kwamen:

- Er zijn te weinig proefresultaten bekend. Deze moeten dus niet in het onderzoek worden meegenomen.
- De onderzoeksvraag moet worden aangepast vanwege het ontbreken van proefresultaten. De onderzoeksvraag kan op dit moment namelijk alleen worden beantwoord indien er bruikbare proefresultaten zijn. De onderzoeksvraag moet dus meer worden gericht op de vergelijking tussen de voorschriften.
- De doelstelling moet gedeeltelijk worden aangepast. De derde ‘zaak’ is niet meer relevant voor het onderzoek.
- Enkele deelvragen die betrekking hebben op de proefresultaten kunnen worden weggelaten.
- Het meenemen van het oude voorschrift VB 1974/1984 zou een goede uitbreiding van het onderzoek kunnen zijn.
- Het meenemen van M_x en M_y zou een goede uitbreiding van het onderzoek kunnen zijn.
- Het is een goede mogelijkheid om bij de parameterstudie te kiezen voor het model van Maik Odijk, die in 2015 onderzoek heeft gedaan naar de excentriciteitsfactor β . Alle parameters worden vastgezet op een bepaalde waarde, waarna er gekeken wordt naar de invloed van de verandering van de waarde van één bepaalde parameter.
- Het contact tussen de student en de begeleider kan hoofdzakelijk via de e-mail verlopen. Als de student echt niet verder komt, wordt er een afspraak gemaakt met de eerste en/of tweede begeleider. Het leek zowel de student als de eerste begeleider handig als er af en toe (wekelijks bijvoorbeeld) een e-mail naar de begeleiders werd gestuurd met het gemaakte werk.

Over het algemeen beoordeelde de eerste begeleider de startnotitie positief. De inleiding, de doelstelling, de beperkingen, het plan van aanpak en de tijdsplanning waren goed geformuleerd en realistisch. De aandachts- en verbeterpunten zijn meegenomen in de verbeterde versie van de startnotitie.

Bijlage 4: Tussenpeilingsverslag

In dit besprekingsverslag wordt de tussenpeiling samengevat waarbij zowel de oordelen en kritiekpunten van de begeleiders als een beschrijving van het nog te verrichten werk aan bod komen. Beide begeleiders hebben ermee ingestemd dat er geen bespreking gehouden hoefde te worden vanwege het tamelijk uitgebreide e-mailverkeer. De e-mails die werden gestuurd naar aanleiding van het tussenrapport – dat werd ingeleverd op 28 september – met algemene beoordeling, kritiekpunten en vragen kunnen daarom worden beschouwd als de tussenpeiling van dit Bachelor Eindproject.

Over het algemeen werd het tussenrapport goed beoordeeld: de inleiding was goed, het verhaal verzorgd en de uitleg helder. Daarnaast waren er logischerwijs **aandacht- en verbeterpunten** van beide begeleiders:

- In de bijlagen zou voor de rand- en hoekkolom een uitgebreid rekenvoorbeeld kunnen worden opgenomen om bij de lezer duidelijkheid over de berekeningen te scheppen.
- Probeer veel varianten te onderzoeken. Het is mogelijk om bijvoorbeeld twee parameterwaarden tegelijk te veranderen.
- Het zou goed zijn in de conclusies getallen te vermelden en te verwijzen naar bladzijdes in het rapport.
- Leg de focus op de weerstand tegen bezwijken (V_{Rd}).
- Gebruik de gekozen parameterwaarden als referentiewaarden, waarna wordt gekeken naar de invloed van de parameterwijzigingen.
- Onderzoek waar de verschillen in absolute weerstanden van de voorschriften uit voortkomen.

Eerste begeleider C.R. Braam heeft het rapport aangevuld waarbij aandacht was voor ontbrekende uitleg, verkeerde woordkeuzes, spellingsfouten en vragen. Daarnaast gaf hij verhelderende uitleg bij enkele tekstdelen en figuren.

Naar aanleiding van bovenstaande, opgesomde punten ga ik vanaf week 5 als volgt te werk. Allereerst wordt het rapport verbeterd naar aanleiding van de aanvulling van de eerste begeleider. Daarna wordt er een gedeeltelijk nieuwe werkwijze in hoofdstuk 4 beschreven. De dagen die volgen worden gebruikt om nieuwe resultaten te realiseren en visualiseren. Ook de nieuwe varianten worden onderzocht. De nieuwe resultaten worden vervolgens beschreven. Tot slot wordt onderzocht waar de verschillen tussen de voorschriften uit voortkomen.