

L. Duindam

Betonkolommen en Dubbele Buiging - Ontwerpformules

Betonkolommen en Dubbele Buiging - Ontwerpformules

By

L. Duindam

in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Bachelor of Science

in Civil Engineering

at the Delft University of Technology.

Supervisor:	Dr. ir. drs. C.R. Braam	TU Delft
	Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom	TU Delft

Voorwoord

Het rapport 'Betonnen kolommen en Dubbele Buiging – Ontwerpformules' dat u nu voor u heeft is het resultaat van tien weken hard werken. Buiten het feit dat het onderzoeksproces erg leerzaam was, is het vooral ook erg leuk bevonden.

Het eindproduct van het onderzoek betreft twee ontwerpformules. De ene ontwerpformule heeft betrekking op de Ultimate Limit State (ULS), terwijl de andere ontwerpformule in de Serviceability Limit State (SLS) kan worden toegepast. Naast de ontwerpformules is er ook nog een case van een ingenieursbureau opgelost.

Ten slotte wil ik mijn onderzoeksbegeleider Dr. ir. drs. C.R. Braam bedanken voor de deskundige begeleiding tijdens mijn onderzoek.

Veel leesplezier!

*L. Duindam
Delft, 22 Juni 2018*

Samenvatting

Uit eerder onderzoek is gebleken dat dimensioneren op basis van het voorschrift uit de Eurocode kan leiden tot niet-economisch of onveilig gedimensioneerde kolommen (Nijgh, 2015). Vooral bij rechthoekige doorsneden bleek dit het geval te zijn. Met betrekking tot ronde doorsneden bleek het voorschrift wel nauwkeurig te zijn. Voor rechthoekige doorsneden is er daarom een ontwerpformule ontwikkeld. Aan de hand van deze ontwerpformule kan een redelijk nauwkeurige doorsnedecheck worden uitgevoerd. De ontwerpformule ziet er als volgt uit:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^\alpha \leq 1$$

waar:

$$\alpha = f\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}, f_{cd}, \rho_l, m, n\right)$$

Hierin is exponent- α dus een functie van het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio, de rekenwaarde voor de druksterkte van beton f_{cd} , het wapeningpercentage ρ_l en de wapeningsconfiguratie (m en n).

Bovendien is er ook een ontwerpformule ontwikkeld voor het berekenen van de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf bij dubbele buiging. Eerder onderzoek heeft geleid tot een vrij complexe ontwerpformule (Harrass, 2017). Met deze formule wordt de spanning berekend als functie van de spanningen in dezelfde wapeningsstaaf bij twee aparte situaties met enkele buiging (σ_{My} en σ_{Mz}), de betondruksterkte f_{ck} , de wapeningsdiameter $\emptyset$, de normaalkracht N en de afmetingen van de doorsnede (b en h). De in dit onderzoek ontwikkelde ontwerpformule ziet er als volgt uit:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

waar:

$$V = f(N\text{-ratio})$$

$$W = f(N\text{-ratio}, f_{ck}, \rho_l)$$

In vergelijking met de formule van O. Harrass zijn een aantal parameters geëlimineerd. Daar zijn het N -ratio en het wapeningspercentage ρ_l voor in de plaats gekomen. Niet alleen is de ontwikkelde ontwerpformule een stuk eenvoudiger, de resultaten blijken in de meeste gevallen ook nauwkeuriger te zijn.

Lijst met symbolen

<i>Symbol</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Omschrijving</i>
α	-	Volheidsfactor
α_k	rad	Hoek tussen krommingsvlak en de horizontaal
α_m	rad	Hoek tussen momentvlak en de horizontaal
α_σ	rad	Hoek tussen resultaten spanningsvector en horizontaal
β	-	Afstandsfactor
ε	‰	Rek
ε_{c3}	‰	Betonrek bij einde lineair-elastisch materiaalgedrag
ε_{cu3}	‰	Beton stuikrek
σ	N/mm ²	Spanning
$\varnothing$	mm	Diameter wapeningsstaal
γ	-	Materiaalfactor
ρ_l	%	Wapeningspercentage
A_c	mm ²	Bruto oppervlakte betondoorsnede
A_s	mm ²	Totale oppervlakte wapening
b	mm	Breedte doorsnede
c	mm	Betondekking
E_c	N/mm ²	Elasticiteitsmodulus beton
E_s	N/mm ²	Elasticiteitsmodulus wapeningsstaal
f_{cd}	N/mm ²	Rekenwaarde druksterkte beton
f_{ck}	N/mm ²	Karakteristieke druksterkte beton
f_{yd}	N/mm ²	Rekenwaarde vloeispanning wapeningsstaal
f_{yk}	N/mm ²	Karakteristieke vloeispanning wapeningsstaal
h	mm	Hoogte doorsnede
I	mm ⁴	Traagheidsmoment
k	-	Krommingsvlak
$\kappa_{y/z}$	1/mm	Kromming in y/z-richting
m	-	Aantal wapeningsstaven in horizontale zijde (excl. hoekwapening)
n	-	Aantal wapeningsstaven in verticale zijde (excl. hoekwapening)
$M_{Ed,y/z}$	kNm	Rekenwaarde opgelegd moment om z/y-as
$M_{Rd,y/z}$	kNm	Weerstandsmoment om z/y-as
N_{Ed}	kN	Rekenwaarde normaalkracht
N_{Rd}	kN	Normaalkrachtcapaciteit
S	mm ³	Statisch moment
x_u	mm	Betondrukzone
y	mm	Coördinaat in y-richting
$\bar{y}$	mm	Coördinaat in $\bar{y}$ -richting
z	mm	Coördinaat in z-richting
$\bar{z}$	mm	Coördinaat in $\bar{z}$ -richting

Inhoudsopgave

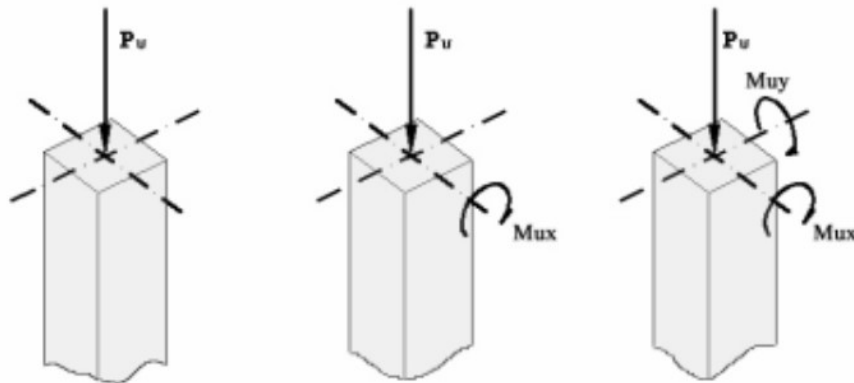
Voorwoord	iii
Samenvatting.....	v
Lijst met symbolen.....	vi
1.1. Definitie dubbele buiging.....	1
1.2. Probleem- en doelstellingen.....	2
1.3. Opbouw van het rapport	3
2 Materiaaleigenschappen & Mechanica	4
2.1. Materiaaleigenschappen beton.....	4
2.2. Materiaaleigenschappen wapeningsstaal	5
2.3. Mechanica dubbele buiging	5
3 Voorschriften	7
3.1. Load Contour Method	7
4 Model.....	9
4.1. Doorsnede & materiaal gerelateerde parameters	9
4.2. Toelichting model (ULS)	10
4.3. Toelichting model (SLS).....	13
4.4. Controle model (ULS)	16
4.4.1. Enkele buiging.....	16
4.4.2. Dubbele buiging	17
4.5. Controle model (SLS)	18
5 Doorsnede-Transformatie Methode (DTM).....	19
5.1. Toelichting methode.....	19
5.2. Rekenvoorbeeld.....	22
6 Ontwerpformule (ULS).....	24
6.1. Achtergrond ontwerpformule (ULS)	24
6.1.1. Exponent- α voor willekeurige doorsnede	24
6.1.2. Basis voor exponent- α formule	25
6.2. Parameterstudie.....	26
6.2.1. Afmetingen doorsnede	27
6.2.2. Druksterkte beton.....	29
6.2.3. Wapeningspercentage	32
6.2.4. Wapeningsconfiguratie.....	35
6.3. Definitieve ontwerpformule (ULS)	37
6.3.1. Ontwerpformule.....	37
6.3.2. Nauwkeurigheid	38
7 Ontwerpformule (SLS).....	39
7.1. Achtergrond ontwerpformule (SLS).....	39
7.1.1. Eerder onderzoek.....	39
7.1.2. Basis voor ontwerpformule.....	40
7.2. Parameterstudie.....	41
7.2.1. N -ratio	42
7.2.2. Afmetingen doorsnede	45
7.2.3. Druksterkte beton.....	46
7.2.4. Wapeningspercentage	48
7.2.5. Wapeningsconfiguratie.....	50
7.3. Definitieve ontwerpformule (SLS)	51
7.3.1. Ontwerpformule.....	51
7.3.2. Nauwkeurigheid	52
8 Case Ingenieursbureau	53
8.1. Case introductie	53
8.2. Controle DTM.....	54
8.2.1. Eurocode.....	54
8.2.2. Model	55
9 Conclusie.....	56
10 Discussie	58
Lijst met figuren	59
Literatuur	60
Bijlage.....	61
A: Betonsterkteklassen	61
B: Waarde voor exponent α als functie van N_{Ed}/N_{Rd} -ratio	61
C: Momentcapaciteit-curves ($m=2$)	62
D: Controle ontwerpformules: doorsnede 1	63
E: Controle ontwerpformules: doorsnede 2.....	68
F: Controle ontwerpformules: doorsnede 3.....	73
G: Controle ontwerpformules: doorsnede 4	78

1 Inleiding

In de inleiding van dit rapport zal in eerste instantie worden uitgelegd wat dubbele buiging op kolommen precies inhoudt en wanneer dit voorkomt. Vervolgens zullen gedetailleerd de problemen met betrekking tot het onderzoek worden beschreven en ten slotte wordt de opbouw van het rapport kort besproken.

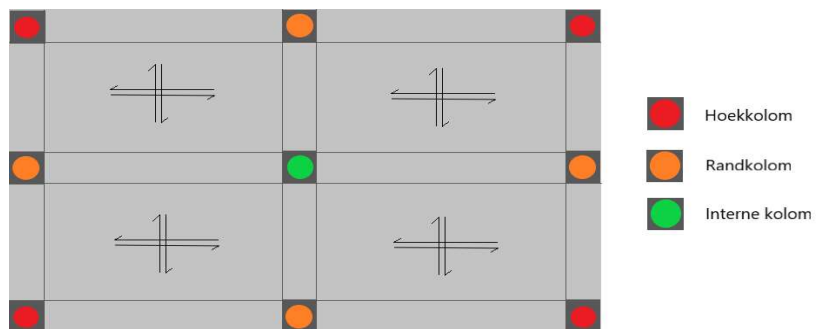
1.1. Definitie dubbele buiging

Buiging betreft het belasten van een constructief element op een moment waardoor dit element een kromming aanneemt. Buiging kan voorkomen om elke denk beeldige as in elke mogelijke doorsnede van een constructief element. Wanneer men spreekt van enkele buiging, dan bedoelt met dat er enkel een moment werkt om een van beide hoofdassen. Bij dubbele buiging zijn er dus moment om beide hoofdassen. In figuur 1 hieronder zijn goed de verschillen weergegeven wat betreft de verschillende combinaties van krachten werkend op een willekeurige doorsnede.



Figuur 1: Verschillende belasting combinaties

In praktijk komt dubbele buiging voor in bijna elk constructief element. Echter is in de meeste gevallen in ieder geval één van de momenten verwaarloosbaar klein. In dat geval is er dus sprake van enkele buiging of helemaal geen buiging en dus alleen een axiale kracht. Bij kolommen is dit vaak niet het geval. Vooral in wat hogere kantoorgebouwen worden een aantal kolommen belast op een combinatie van een axiale kracht en relatief grote buigende momenten om beide hoofdassen. Deze kolommen zijn vaak gepositioneerd in de hoeken van het gebouw, dit is te zien in figuur 2. De hoekkolommen worden namelijk in beide richtingen slechts aan één zijde belast op een excentrische belasting. Er is dus geen contrabelasting om het moment dat zo ontstaat op te heffen. Deze contrabelasting is bij interne kolommen wel in beide richtingen aanwezig, waardoor er over het algemeen gezien enkel sprake is van een axiale kracht. Bij kolommen gepositioneerd aan de rand van een gebouw, maar niet in een hoek, is er een contrabelasting in slechts een van de twee richtingen. Bij deze kolommen is er dus vaak sprake van buiging om één as.



Figuur 2: Verschillende posities kolommen

1.2. Probleem- en doelstellingen

Dubbele buiging leidt tot een complexe rekverdeling over de betondoorsnede. In de praktijk wordt deze complexiteit vervangen door vereenvoudigde rekenmethoden, zo ook in de Eurocode. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat dimensioneren op basis van het voorschrift uit de Eurocode kan leiden tot niet-economisch of onveilig gedimensioneerde kolommen (Nijgh, 2015). Vooral bij rechthoekige doorsneden bleek dit het geval te zijn. Met betrekking tot ronde doorsneden bleek het voorschrift wel nauwkeurig te zijn. De eerste doelstelling van dit onderzoek is dan ook als volgt:

Ontwikkel een ontwerpformule waarmee snel en nauwkeurig een indicatie kan worden verkregen van of een kolom voldoet of niet. Deze moet toepasbaar zijn op elke willekeurige rechthoekige doorsnede en de foutmarge moet binnen de 10% blijven.

Verder is bij het dimensioneren van een kolom handig om een indicatie te hebben hoe groot de spanning (σ_{DB}) zal zijn in de meest getrokken wapeningsstaaf. Op basis hiervan kan dan een veilige en economische keuze worden gemaakt wat betreft de wapening in een kolom. Eerder onderzoek door O. Hannass heeft geresulteerd in een vrij complexe ontwerpformule met een foutmarge van 20%. Deze ontwerpformule heeft de volgende vorm:

$$\sigma_{DB} = \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} + V$$

waar:

$$V = f(b, h, f_{ck}, \emptyset, N, \sigma_{My}, \sigma_{Mz})$$

Echter is de ontwerpformule alleen toepasbaar op rechthoekige kolommen met enkel hoekwapening. En is er nog de voorwaarde dat wanneer het probleem met dubbele buiging wordt gesplitst in twee situaties met enkele buiging, de spanningen in de wapeningsstaaf in beide situaties groter moeten zijn dan 50 N/mm^2 ($\sigma_{My} \geq 50 \text{ N/mm}^2 \wedge \sigma_{Mz} \geq 50 \text{ N/mm}^2$). De tweede doelstelling van het onderzoek luidt dan ook:

Ontwikkel een ontwerpformule waarmee de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf kan worden bepaald. Deze moet toepasbaar zijn op elke willekeurige rechthoekige doorsnede en de foutmarge moet binnen de 20% blijven.

Ten slotte is er nog een case van een anoniem ingenieursbureau. Dit bureau heeft met een zelf bedachte methode een kolom belast op dubbele buiging berekend en op basis van de berekeningen aangenomen dat de kolom voldoet. De methode wordt de 'doorsnede-transformatie methode' genoemd. De volgende vraag moet aan de hand van dit onderzoek worden opgelost:

Hoe betrouwbaar is 'doorsnede-transformatie methode' en voldoet de kolom uit de case ook daadwerkelijk?

1.3. Opbouw van het rapport

Stapsgewijs is er gewerkt om de doelstellingen te behalen en de case op te lossen. Elke stap is zo duidelijk mogelijk verwerkt in het rapport. Hieronder is een overzicht gegeven van de opbouw van het rapport, om het voor de lezer wat overzichtelijker te maken.

In het volgende hoofdstuk worden allereerst de materiaaleigenschappen van beton en wapeningsstaal behandeld, evenals de mechanica met betrekking tot dubbele buiging. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het voorschrift uit de Eurocode bekeken en toegelicht.

Hoofdstuk 4 staat in het teken van de modelvorming. Zowel het ULS model, essentieel voor het behalen van de eerste doelstelling en het oplossen van de vraag met betrekking tot de case van het ingenieurbureau, en het SLS model, essentieel voor het behalen van de tweede doelstelling, worden uitgelegd en gevalideerd om er zeker van te zijn dat de modellen betrouwbaar zijn. De 'doorsnede transformatie methode' wordt vervolgens behandeld in hoofdstuk 5.

In de hoofdstukken 6 en 7 worden de ontwerpformules ontwikkeld aan de hand van een parameterstudie. Ook zal de nauwkeurigheid van deze ontwerpformules worden besproken. Daarna wordt in hoofdstuk 8 de case van het ingenieurbureau opgelost en ten slotte worden in de hoofdstukken 9 en 10 respectievelijk de conclusie gegeven en de discussie.

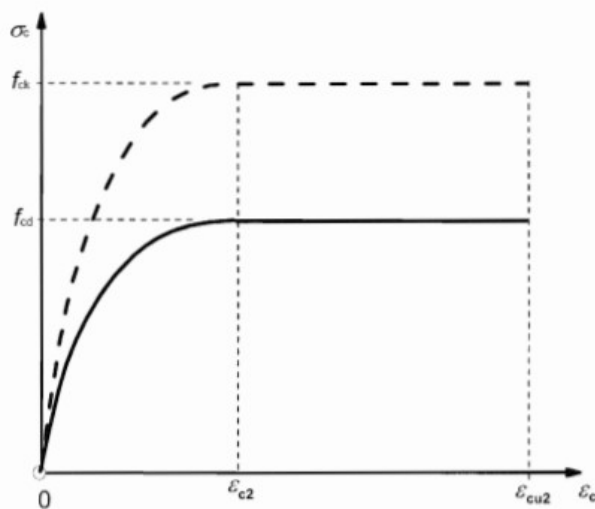
2 Materiaaleigenschappen & Mechanica

De inhoud van dit hoofdstuk betreft een korte uitleg van de mechanica gerelateerd tot buiging en er zal worden ingegaan op de verschillende materiaaleigenschappen van zowel beton als wapeningsstaal. Deze kennis is noodzakelijk voor het ontwikkelen van het model.

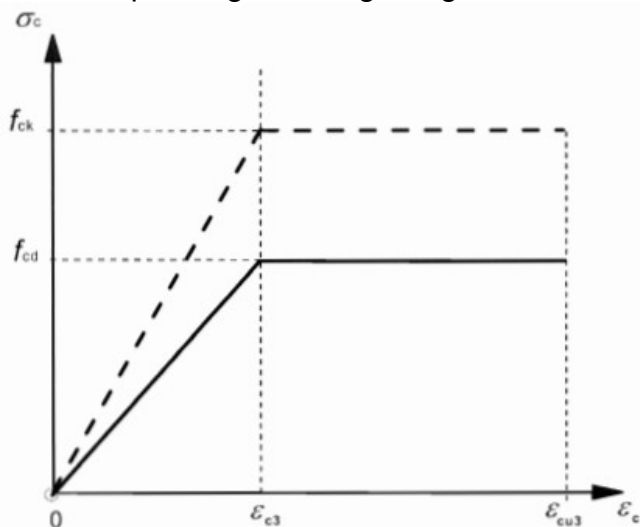
2.1. Materiaaleigenschappen beton

Beton wordt geclassificeerd in betonsterkteklassen. De sterkteklassen verschillen onderling door bijvoorbeeld andere rekenwaarden voor druk- en treksterkte van het beton en de elasticiteitsmodulus. In Bijlage A is een tabel te vinden afkomstig uit Eurocode 2, deze tabel bevat karakteristieke waarden gerelateerd tot de verschillende betonsterkteklassen.

Het spannings-rek verloop van beton is essentieel voor het model. Het meer realistische spannings-rekdiagram is te zien in figuur 3. Aangezien dit diagram wordt verkregen aan de hand van een relatief complexe formule, zal het vereenvoudigde spannings-rekdiagram worden toegepast. Dit diagram is weergegeven in figuur 4 en wordt ook wel het bi-lineaire spannings-rekdiagram genoemd.



Figuur 3: Ideaal spannings-rekdiagram beton



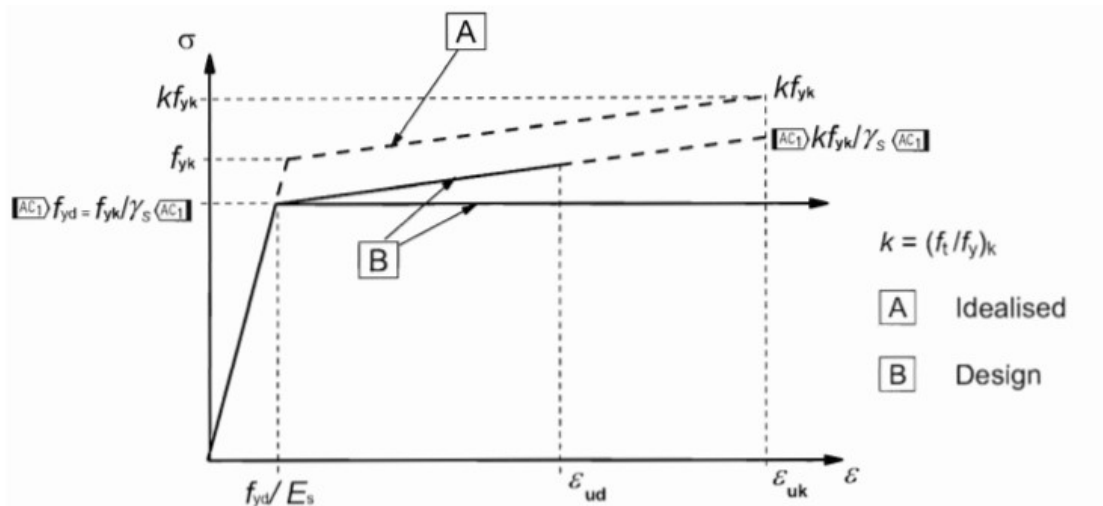
Figuur 4: Bi-lineair spannings-rekdiagram beton

Het verschil tussen de gestippelde en de doorgetrokken lijn ontstaat door de materiaalfactor γ_c . Dit is een veiligheidsfactor en deze is gelijk aan 1.50. De factor wordt toegepast omdat beton niet altijd presteert zoals wordt beschreven in de Eurocode. De waarden gegeven in de voorschriften gaan altijd gepaard met een zekere standaarddeviatie. De rekenwaarde voor de druksterkte van beton kan als volgt worden berekend:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

2.2. Materiaaleigenschappen wapeningsstaal

Wapeningsstaal kan ook onderling van elkaar verschillen. Zo kan wapeningsstaal variëren in textuur, maar ook in sterkte. De voorschriften van wapeningsstaal, ook wel betonstaal genoemd, zijn te vinden in de NEN-EN 10080. Over het algemeen wordt in Europa vaak betonstaal B500A of B500B toegepast. Het verschil tussen deze twee zit hem in de textuur van de wapening. Overigens geldt voor beide soorten dat de minimale vloeigrens f_{yk} gelijk is aan 500 N/mm^2 en de elasticiteitsmodulus E_s gelijk is aan $200,000 \text{ N/mm}^2$. Het vereenvoudigde spannings-rekverloop, zoals wordt gehanteerd in de Eurocode, is weergegeven in figuur 5 hieronder.



Figuur 5: Bi-lineair spannings-rekdiagram wapeningsstaal

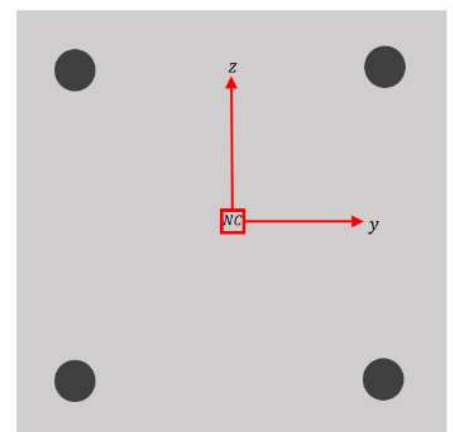
Ook hier is een gestippelde en doorgetrokken lijn te zien, enkel is het verschil tussen de lijnen wat kleiner. Dit heeft ermee te maken dat de veiligheidsfactor voor betonstaal significant kleiner is dan voor beton. De veiligheidsfactor γ_s is namelijk gelijk aan 1.15. De rekenwaarde voor vloeispanning van betonstaal B500A/B kan als volgt worden berekend:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 435 \text{ N/mm}^2$$

2.3. Mechanica dubbele buiging

De mechanica voor buiging in een willekeurige richting zal in deze paragraaf kort worden samengevat. Een uitgebreide behandeling van deze mechanica is te vinden in het dictaat *Niet-symmetrische en inhomogene doorsneden* (Welleman & Hartsuijker, 2008).

De oorsprong van het assenstelsel wordt in dit onderzoek gepositioneerd in het normaalkrachten centrum NC van de doorsnede. Aangezien dit onderzoek enkel rechthoekige symmetrische doorsneden omvat, ligt dit normaalkrachten centrum NC te allen tijde in het midden van de doorsnede.



Figuur 6: Assenstelsel doorsnede

In het onderzoek wordt uitgegaan van enkele wetten/hypotheses. Zo zijn de hypothese van Bernouilli en de wet van Hooke van kracht:

- Vlakke doorsneden blijven ook na vervorming vlak en loodrecht op de staaf-as (Bernouilli)
- De lengteverandering in een vezel is recht evenredig met de spanning in die vezel (Hooke)

De rek in een willekeurige vezel met de coördinaten y en z kan, uitgaande van de hypothese van Bernouilli, als volgt worden berekend:

$$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_{NC} + \kappa_y * y + \kappa_z * z$$

Hierin zijn κ_y en κ_z de krommingen in de richting van respectievelijk de y -as en z -as. ε_{NC} is de rek in het normaalkrachten centrum van de doorsnede. De spanning in een willekeurige vezel met de coördinaten y en z kan, uitgaande van wet van Hooke, als volgt worden bepaald:

$$\sigma(y, z) = E(y, z) * \varepsilon(y, z) = E(y, z) * (\varepsilon_{NC} + \kappa_y * y + \kappa_z * z)$$

De interne krachten in de doorsnede die worden veroorzaakt door de spanningen in de vezels en de externe krachten moeten in evenwicht zijn. Dit leidt tot de volgende constitutieve relaties:

$$\begin{aligned} N &= \int_A \sigma(y, z) dA = \int_A E * (\varepsilon_{NC} + \kappa_y * y + \kappa_z * z) dA = EA * \varepsilon_{NC} + ES_y * \kappa_y + ES_z * \kappa_z \\ M_y &= \int_A y * \sigma(y, z) dA = \int_A E * y * (\varepsilon_{NC} + \kappa_y * y + \kappa_z * z) dA = ES_y * \varepsilon_{NC} + EI_{yy} * \kappa_y + EI_{yz} * \kappa_z \\ M_z &= \int_A z * \sigma(y, z) dA = \int_A E * z * (\varepsilon_{NC} + \kappa_y * y + \kappa_z * z) dA = ES_z * \varepsilon_{NC} + EI_{zy} * \kappa_y + EI_{zz} * \kappa_z \end{aligned}$$

In matrix-vector notatie ziet dit er als volgt uit:

$$\begin{bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & ES_y & ES_z \\ ES_y & EI_{yy} & EI_{yz} \\ ES_z & EI_{zy} & EI_{zz} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_{NC} \\ \kappa_y \\ \kappa_z \end{bmatrix}$$

Omdat dit onderzoek enkel rechthoekige symmetrische doorsneden omvat, zijn bepaalde factoren in dit stelsel gelijk aan 0. Het stelsel kan als volgt worden vereenvoudigd:

$$\begin{bmatrix} N \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & & \\ & EI_{yy} & \\ & & EI_{zz} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_{NC} \\ \kappa_y \\ \kappa_z \end{bmatrix}$$

Echter kunnen de constitutieve relaties in dit onderzoek niet worden gehanteerd. Er wordt namelijk aangenomen dat het beton geen trekspanningen kan ondergaan, beton scheurt bij een geringe trekspanning. Het gescheurde betondeel draagt niet bij aan de buigstijfheden EI , deze zullen variëren afhankelijk van de rek- en spanningsverdeling. Het systeem wordt dus gecompliceerder. Hoe de interne doorsnede krachten wel bepaald worden, wordt uitgelegd in hoofdstuk 4.

3 Voorschriften

Zowel de ACI als de Eurocode maken gebruik vrijwel identieke voorschriften van betreft dubbele buiging op betonnen kolommen. De methode die hier wordt toegepast noemt met de 'Load Contour Method'. In dit hoofdstuk zal deze methode verder worden toegelicht. Aangezien beide voorschriften dus bijna identiek zijn, zal er enkel en alleen gekeken worden naar de voorschriften zoals deze zijn beschreven in de Eurocode.

3.1. Load Contour Method

Wat betreft de Eurocode wordt dubbele buiging op betonnen kolommen behandeld in EN 1992-1-1 sectie 5.8.9. (Europese Commissie voor Normalisatie, 2011). Hier wordt dus, zoals eerder vermeld, de Load Contour Method gebruikt om te checken of een kolom voldoet of niet. Bij deze methode wordt dubbele buiging als het ware ontbonden in twee gevallen van enkele buiging. Op deze manier kan relatief eenvoudig en snel een kolom worden gedimensioneerd. Volgens de norm in de Eurocode moet een willekeurige doorsnedecheck voldoen aan het volgende criterium, mits er geen nauwkeurige doorsnede-berekening is gemaakt:

$$\left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^{\alpha} \leq 1$$

waar:

$M_{Ed,y/z}$ is de rekenwaarde van het optredende moment om de respectievelijke as, inclusief 2^e orde moment;

$M_{Rd,y/z}$ is de rekenwaarde van het maximaal opneembare moment om de respectievelijke as;

α exponent;

voor ronde en elliptische doorsneden: $\alpha = 2$

voor rechthoekige doorsneden:

N_{Ed}/N_{Rd}	0.1	0.7	1.0
α	1.0	1.5	2.0

met:

N_{Ed} rekenwaarde van de optredende normaalkracht;

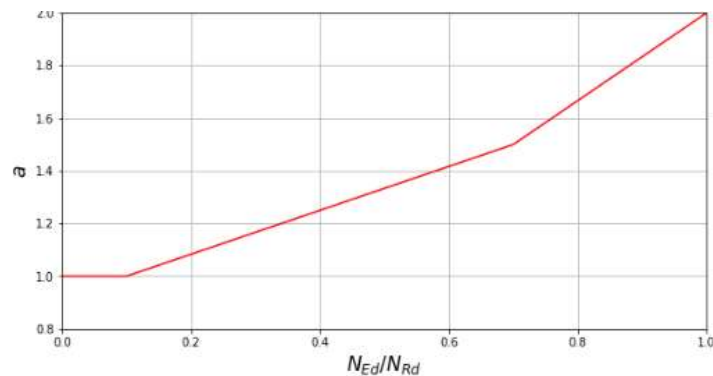
$N_{Rd} = A_c * f_{cd} + A_s * f_{yd}$ rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalkracht;

waar:

A_c is totale bruto oppervlak van het beton;

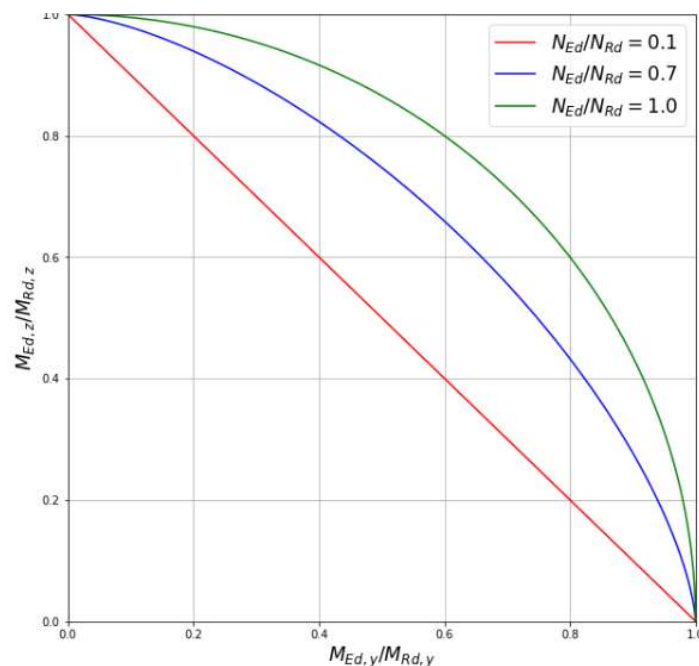
A_s is het totale oppervlak van de langswapening;

In de tabel voor de waarde van de exponent zijn slechts drie waarden gegeven. De Eurocode geeft aan dat men tussen deze waarden lineair mag interpoleren. De grafiek in figuur 7 geeft de waarde voor α als functie van de bezetting van de normaalkrachten (N_{Ed}/N_{Rd}).



Figuur 7: Exponent- α volgens Eurocode

Figuur 8 hieronder geeft het voorschrift uit de Eurocode op een grafische manier weer. Om de weergave overzichtelijk te houden zijn curves geplott voor drie verschillende waarden van α . Het verband tussen waarde van α en de kromming van de curve is duidelijk te zien. Des te groter de waarde van α , des te groter de kromming van de curve. Bovendien heeft een toenemende waarde voor de kromming, relatief gezien, een positief effect op de capaciteit van een kolom met betrekking tot dubbele buiging, de oppervlakte onder de curve neemt namelijk toe. Volgens de voorschriften van de Eurocode zou dat dus betekenen dat een toenemende normaalkracht de momentcapaciteit van een kolom, relatief gezien, dus positief beïnvloedt.



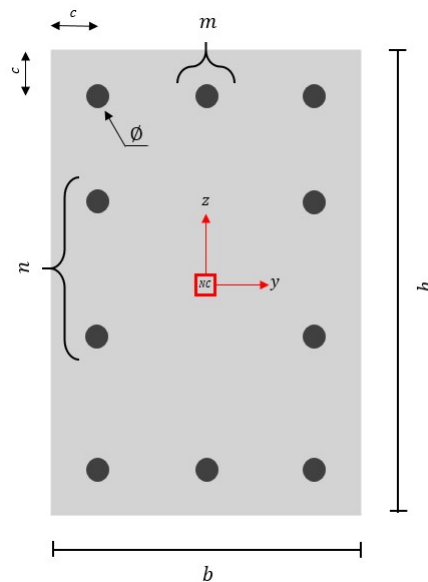
Figuur 8: Voorschrift Eurocode

4 Model

In dit hoofdstuk komt zowel het Ultimate Limit State model als het Serviceability Limit State model aan bod. Van beide modellen zal de werkwijze worden toegelicht en bovendien zal er voor beide modellen een bewijs worden gegeven dat de resultaten ook daadwerkelijk betrouwbaar zijn. Eerst zullen de parameters aanbod komen die in beide modellen essentieel zijn voor het definiëren van een kolom.

4.1. Doorsnede & materiaal gerelateerde parameters

Voordat het model voor zowel de Ultimate Limit State als voor de Serviceability Limit State verder wordt toegelicht, zullen eerst alle parameters gerelateerd tot de doorsnede en het gebruikte materiaal aan het licht worden gebracht. Al deze gegeven parameters kunnen in het model worden aangepast.



Figuur 9: Doorsnede parameters

Doorsnede parameters:

c	betondekking [mm]
b	breedte doorsnede [mm]
h	hoogte doorsnede [mm]
m	aantal wapingsstaven in enkele horizontale zijde, exclusief hoekwapeningsstaven [–]
n	aantal wapingsstaven in enkele verticale zijde, exclusief hoekwapeningsstaven [–]
$\emptyset$	diameter wapeningsstaven [mm]

Materiaal gerelateerde parameters:

ε_{c3}	betonrek bij einde lineair – elastisch materiaalgedrag [‰]
ε_{cu3}	beton stuikrek [‰]
f_{ck}	karakteristieke druksterkte beton [N/mm^2]
f_{cd}	rekenwaarde druksterkte beton [N/mm^2]
f_{yk}	karakteristieke vloeispanning [N/mm^2]
f_{yd}	rekenwaarde vloeispanning [N/mm^2]
E_s	elastischiteitsmodulus wapeningsstaal [N/mm^2]

4.2. Toelichting model (ULS)

Met het Ultimate Limit State model kan worden bepaald welke krachten combinaties in de uiterste grens toestand mogelijk zijn net voordat de kolom bezwijkt. In het model wordt er vanuit gegaan dat de kolom te allen tijde bezwijkt door het bereiken van de stuikrek ε_{cu3} in de meeste gedrukte betonvezel. Hieronder zal in het kort stap voor stap worden uitgelegd hoe het model werkt.

1) Definiëren doorsnede

De eerste stap die wordt genomen, is het definiëren van de doorsnede en materiaal gerelateerde parameters. Voor het ULS model moeten de rekenwaarden van bepaalde materiaal gerelateerde parameters worden bepaald. Dit wordt bereikt door de karakteristieke waarden van deze parameters te delen door de bijbehorende materiaalfactor (zie hoofdstuk 2.1 & 2.2).

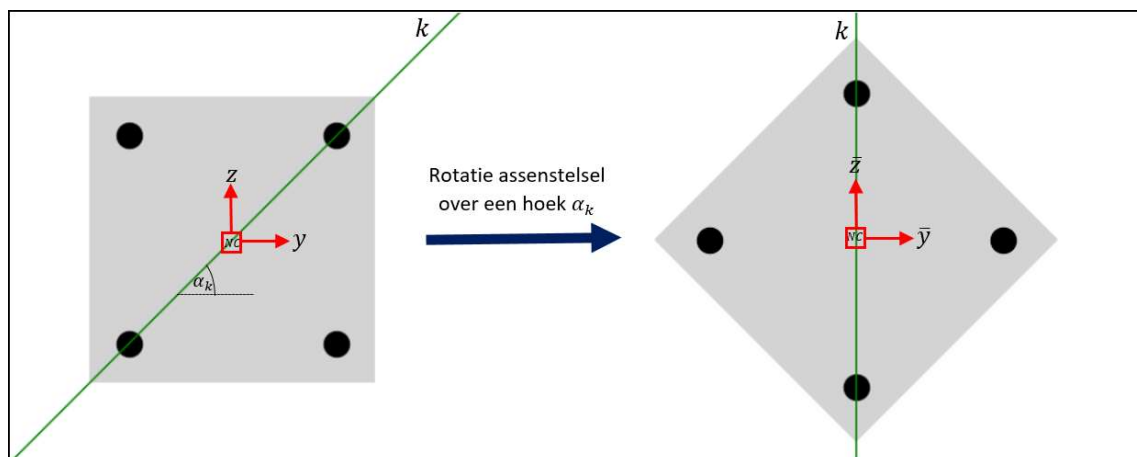
2) Invoeren input parameters en roteren assenstelsel

Wanneer de doorsnede is gedefinieerd, is de volgende stap het invoeren van de essentiële input parameters. Dit zijn de volgende parameters:

- N_{Ed} [kN] rekenwaarde normaalkracht werkend op de kolom
- α_k [rad] hoek tussen horizontale y-as en krommingsvlak

Het model is zo geprogrammeerd dat deze een nieuw coördinatenstelsel creëert, het $\bar{y}\bar{z}$ -assenstelsel. De richting van de $\bar{z}$ -as valt samen met die het krommingsvlak. De $\bar{y}$ -as valt hierdoor samen met de neutrale lijn (rekken zijn gelijk aan 0), omdat de neutrale lijn altijd loodrecht ten opzichte van het krommingsvlak staat georiënteerd. De rotatie van het assenstelsel is op een grafische manier weergegeven in figuur 10.

Verder geldt voor α_k dat deze groter moet zijn dan 0 rad en kleiner dan $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$. Dit zorgt ervoor dat te allen tijde de stuikrek optreedt in de rechter bovenhoek van de doorsnede.

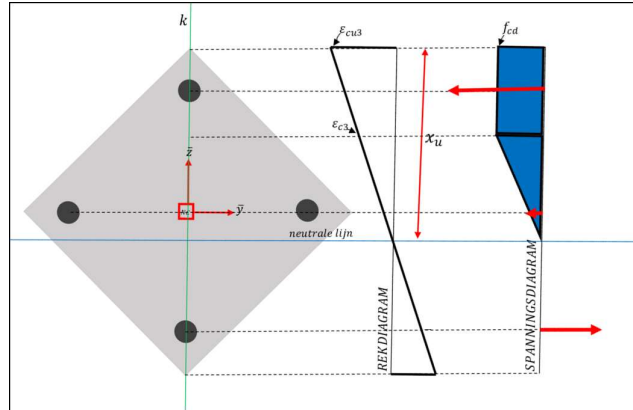


Figuur 10: Rotatie van assenstelsel doorsnede

3) Bepalen van betondrukzonehoogte x_u

Nu het nieuwe assenstelsel is gedefinieerd en de normaalkracht bekend is, kan de hoogte van de betondrukzone x_u worden bepaald. Dit doet het model door middel van een iteratief proces aan de hand van het verticale krachterevenwicht:

$$\sum F_v = N_{beton} + \sum F_{wapening,i} - N_{Ed} = 0$$



Figuur 11: Spannings-rekdiagram willekeurige doorsnede (ULS)

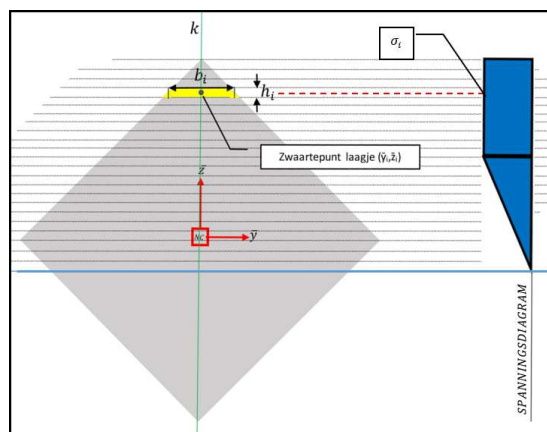
In figuur 11 is voor een willekeurige situatie met dubbele buiging het spannings-rekdiagram weergegeven. De drukkracht van het beton wordt bepaald door het gedrukte deel van de doorsnede te verdelen in dunne horizontale laagjes met een dikte h_i . Het totaal aantal laagjes is dan gelijk aan:

$$aantal\ laagjes = \frac{x_u}{h_i}$$

Om een zo goed als exact resultaat te krijgen is voor de dikte h_i een zeer kleine waarde aangenomen. De foutmarge wordt hierdoor verwaarloosbaar klein. De breedte b_i van een laagje is afhankelijk van de z -coördinaat. De laagjes zijn evenwijdig aan de neutrale lijn, dus elke vezel binnen hetzelfde laagje heeft dezelfde spanning. De totale kracht die wordt geleverd door het beton kan dan als volgt worden gedefinieerd:

$$N_{beton} = \sum b_i * h_i * \sigma_{beton,i}$$

In figuur 12 is deze manier om de drukkracht van het beton te bepalen op een grafische manier weergegeven.



Figuur 12: Bepaling van betondrukkracht

$$\varepsilon_{wap,i} = \frac{\bar{z}_{neutrale\ lijn} - \bar{z}_{wap,i}}{x_u} * \varepsilon_{cu3}$$

[illegible]

De spanning die kan worden gekoppeld aan de rek in de staaf kan worden herleid uit het bi-lineaire spannings-rekdiagram, te zien in figuur 13. Of kan als volgt worden berekend:

Het vermenigvuldigen van deze spanning met de oppervlakte $A_{wap,i}$ van de staaf resulteert in de uiteindelijk kracht die wordt geleverd door deze staaf:

Het is nu duidelijk hoe zowel de krachten in het beton als in de wapeningsstaven worden berekend. Beide krachten zijn een functie van de betondrukzonehoogte. Het model bepaalt deze hoogte dus aan de hand van het eerder genoemde verticale krachtenevenwicht.

De krachten in zowel het beton als in de wapeningsstaven zijn bekend. Het berekenen van de weerstandsmomenten om beide geroteerde assen is nu enkel nog een kwestie van het vermenigvuldigen van deze krachten met de afstand tussen het punt waar deze krachten aangrijpen en de oorsprong van het assenstelsel, oftewel het normaalkrachten centrum van de doorsnede:

12

Het aangrijppunt van de kracht in een willekeurige wapeningsstaaf ligt in het centrum van deze staaf en heeft de coördinaten $(\bar{y}_{wap,i}, \bar{z}_{wap,i})$. Het aangrijppunt van de kracht opgewekt door het beton is lastiger te vinden. Daarom wordt voor elk laagje de bijdrage aan de momenten apart berekend. Van elk laagje is namelijk eenvoudig het zwaartepunt te bepalen, deze ligt in het centrum van elk laagje. De totale bijdrage van het beton is dan een opsomming van al deze laagjes:

$$N_{beton} * \bar{y}_{beton} = \sum b_{laag,i} * h_{laag,i} * \sigma_{laag,i} * \bar{y}_{laag,i}$$

$$N_{beton} * \bar{z}_{beton} = \sum b_{laag,i} * h_{laag,i} * \sigma_{laag,i} * \bar{z}_{laag,i}$$

Ten slotte resteert enkel nog het omrekenen van de momenten om de $\bar{y}$ -as en $\bar{z}$ -as naar de momenten om de oorspronkelijke assen, de y -as en z -as. Dit gebeurt als volgt:

$$M_{Ed,y} = \cos(\alpha_k) * M_{Ed,\bar{y}} + \sin(\alpha_k) * M_{Ed,\bar{z}}$$

$$M_{Ed,z} = -\sin(\alpha_k) * M_{Ed,\bar{y}} + \cos(\alpha_k) * M_{Ed,\bar{z}}$$

4.3. Toelichting model (SLS)

Met behulp van het Serviceability Limit State model moet uiteindelijk een ontwerpformule worden ontwikkeld waarmee de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf kan worden bepaald. Het SLS model is net iets gecompliceerder dan het ULS model. Hieronder zal in het kort stap voor stap worden uitgelegd hoe het model werkt.

1) Definiëren doorsnede

Ook hier is eerste stap het definiëren van de doorsnede en materiaal gerelateerde parameters. Voor het SLS model hoeven de materiaal gerelateerde parameters met betrekking tot de rekenwaarde niet te worden bepaald. Deze parameters zijn enkel belangrijk voor de ULS.

2) Invoeren input parameters en roteren assenstelsel

Wanneer de doorsnede is gedefinieerd, is de volgende stap het invoeren van de essentiële input parameters. Voor het SLS model zijn dit de volgende parameters:

- $\varepsilon_{A,DB}$ [%] rek in wapeningsstaaf A (staaf met grootste trekspanning) bij dubbele buiging
- N [kN] normaalkracht werkend op de kolom
- α_k [rad] hoek tussen horizontale y -as en krommingsvlak

Het roteren van het assenstelsel gebeurt op dezelfde manier in dit model als in het ULS model. Dit is in de vorige paragraaf uitgelegd.

Voor de rek in de meeste getrokken wapeningsstaaf zijn er bepaalde randvoorwaarde. Het wapeningsstaal mag in de SLS namelijk niet vloeien, de rekken moeten zich te allen tijde bevinden in het lineair-elastische deel van het spannings-rekdiagram:

$$0.00 \leq \varepsilon_{A,DB} \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

3) Bepalen van betondrukzonehoogte x_u

Het bepalen van de betondrukzonehoogte gebeurt ook hier door middel van een iteratief proces aan de hand van het verticale krachterevenwicht:

$$\sum F_v = N_{beton} + \sum F_{wapening,i} - N = 0$$

Het berekenen van de verschillende krachten is in de vorige paragraaf uitgelegd. Maar er is hier een extra obstakel die opduikt bij het bepalen van de betondrukzonehoogte. Er is namelijk slechts één evenwichtsvergelijking, terwijl er twee onbekende zijn:

- x_u [mm] betondrukzonehoogte
- σ_c [N/mm²] betondrukspanning is meest gedrukte betonvezel

Er moet dus gezocht worden naar een tweede vergelijking. Deze kan gevonden worden aan de hand van het lineair-elastische betongedrag in de SLS. De rek in de meest getrokken wapeningsstaaf ε_A is namelijk bekend en de spanning in het beton is evenredig met de rek. De spanning in de meest gedrukte betonvezel σ_c kan dus worden geschreven als een functie van de betondrukzonehoogte x_u en de rek in de uiterst getrokken wapeningsstaaf ε_A :

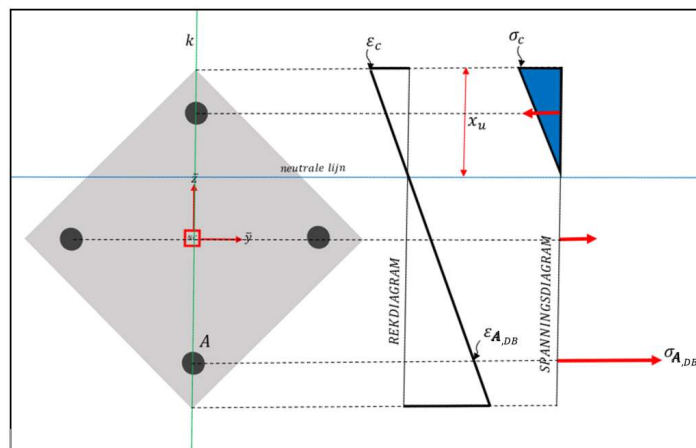
$$\sigma_c = \frac{x_u}{\bar{z}_A - \bar{z}_{neutrale\ lijn}} * \varepsilon_{A,DB}$$

Hierin zijn $\bar{z}_{neutrale\ lijn}$ en $\bar{z}_A$ de $\bar{z}$ -coördinaten van respectievelijk de neutrale lijn en de meest getrokken wapeningsstaaf. Er moet nog wel een opmerking worden gemaakt bij het berekenen van σ_c . Aangezien er wordt gewerkt in de SLS, is het niet toegestaan om rekken in het beton te hebben die groter zijn dan de rek bij het einde van het lineair-elastisch materiaalgedrag. Er moet dus gelden:

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3} \text{ of } \sigma_c \leq f_{ck}$$

Oorspronkelijk worden rekken als negatief beschouwd wanneer drukspanningen optreden, maar omdat het hier om beton gaat nemen we aan dat positieve rekken gekoppeld zijn aan drukspanningen. Bij wapeningsstaal worden positieve rekken overigens wel gekoppeld aan trekspanningen.

Indien het model een waarde vindt voor ε_c die het gegeven criterium overschrijdt, betekent dat dus dat de specifieke doorsnede niet voldoet aan de randvoorwaarden die zijn gesteld bij ingevoerde input parameters ($\varepsilon_{A,DB}$, N & α_k). Dit geeft het model dan ook netjes aan.



Figuur 14: Spannings-rekdiagram willekeurige doorsnede (SLS)

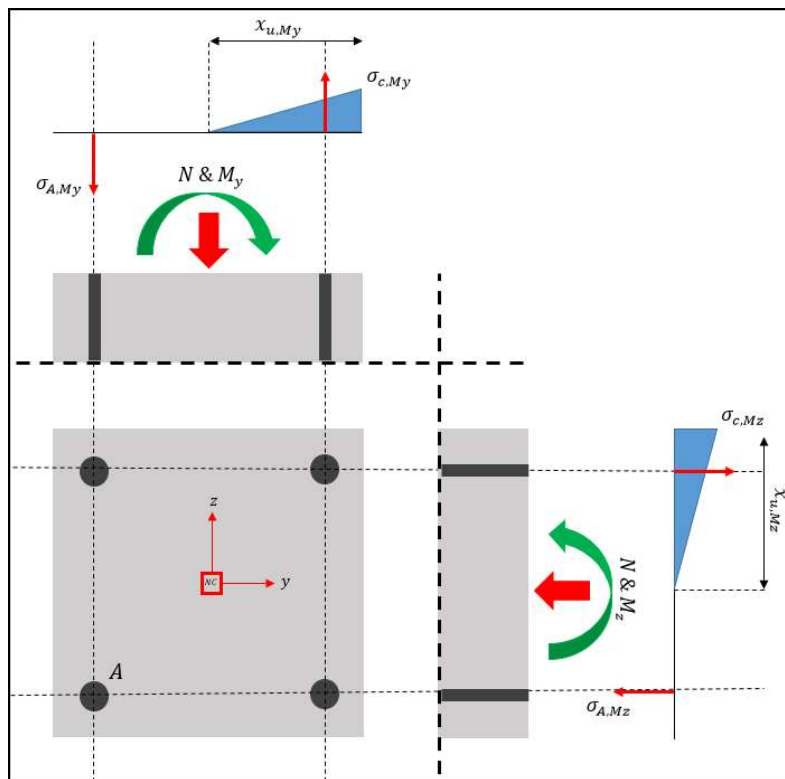
4) Bepalen van M_y en M_z

Het bepalen van de momenten M_y en M_z gebeurt op exact dezelfde manier zoals $M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$ worden bepaald door het ULS model. Er wordt daarom ook geen verdere uitleg gegeven.

5) Bepalen van σ_{A,M_y} en σ_{A,M_z}

De enige stap die nog resteert is het bepalen van σ_{A,M_y} en σ_{A,M_z} . Dit zijn de spanningen in wapeningsstaaf A ten gevolgen van normaalkracht N en moment M_y óf M_z . Let hierbij op de nadruk op óf. De situatie met buiging om beide assen wordt nu namelijk gesplitst in twee situaties met enkele buiging, dit is te zien in figuur 15. Maar naast σ_{A,M_y} en σ_{A,M_z} zijn er voor beide situaties nog twee extra onbekenden. De drie onbekenden voor de situatie met enkele buiging zijn:

- $\sigma_{A,M_{y/z}}$ [N/mm^2] spanning in wapeningsstaaf A t.g.v. N & $M_{y/z}$
- $x_{u,M_{y/z}}$ [mm] betondrukzonehoogte t.g.v. N & $M_{y/z}$
- $\sigma_{c,M_{y/z}}$ [N/mm^2] betondrukspanning is meest gedrukte betonvezel t.g.v. N & $M_{y/z}$



Figuur 15: Bepalen van σ_{M_y} en σ_{M_z}

Maar net als in stap 3 geldt hier dat er één onbekende te veel is. Er zijn namelijk twee evenwichtsvergelijkingen die moeten worden opgelost, het verticale kracht evenwicht en het momenten evenwicht. Voor de situatie met buiging in de y-richting kunnen deze vergelijkingen als volgt worden gedefinieerd:

$$\sum F_v = N_{beton} + \sum F_{wapening,i} - N = 0$$

$$\sum M_y = N_{beton} * y + \sum F_{wapening,i} * y_i - M_y = 0$$

Ondanks dat er drie onbekenden zijn en slechts twee vergelijkingen kan het probleem wel worden opgelost. De onbekenden zijn namelijk afhankelijk van elkaar. Net als in stap 3 kan de spanning in de meest gedrukte betonvezel $\sigma_{c,My}$ worden geschreven als functie van de betondrukzonehoogte $x_{u,My}$ en de spanning in wapeningsstaaf A $\sigma_{A,My}$:

$$\sigma_{c,My} = \frac{x_{u,My}}{y_A - y_{neutrale\ lijn}} * \frac{\sigma_{A,My}}{E_s}$$

Op deze manier kunnen alle onbekenden worden opgelost. Ten slotte moet wel worden opgemerkt dat ook in de situatie met enkele buiging de randvoorwaarden nog steeds gelden:

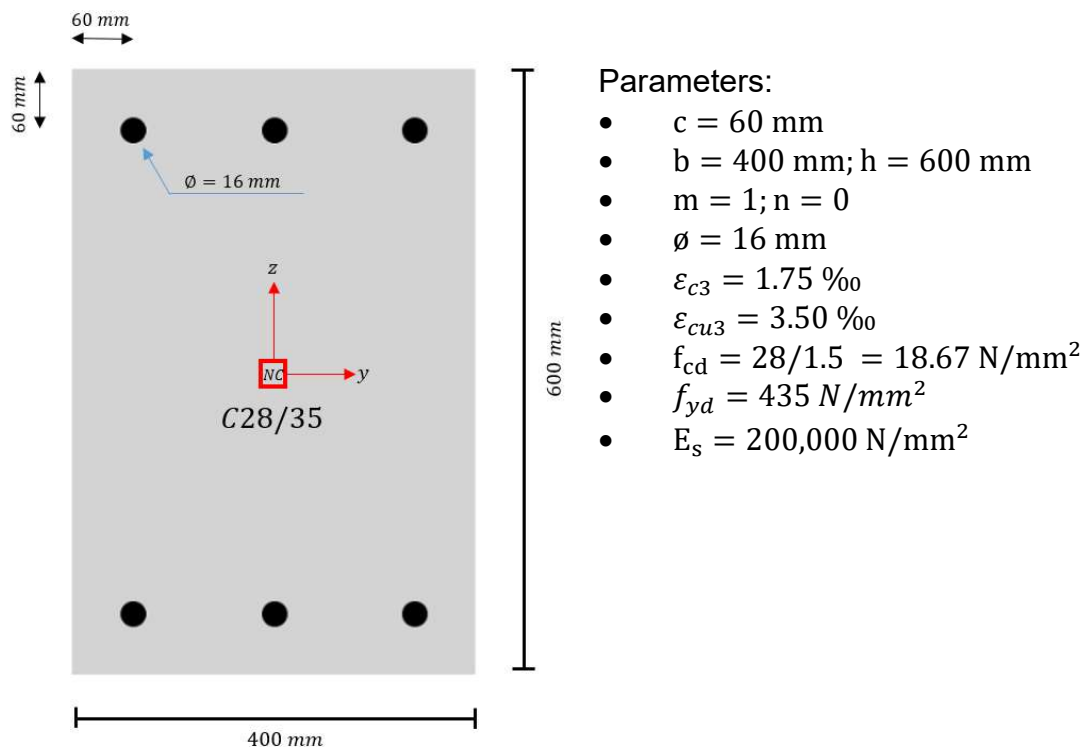
$$|\sigma_A| \leq f_{yd} \text{ \& } \sigma_c \leq f_{ck}$$

4.4. Controle model (ULS)

Het ULS model moet worden gecontroleerd om er zeker van te zijn dat de uitkomsten overeenkomen met de werkelijkheid. Er zal voor zowel enkele buiging als voor dubbele buiging een controle plaatsvinden.

4.4.1. Enkele buiging

Het model wordt op enkele buiging gecontroleerd door de uitkomsten te vergelijken met een voorbeeldberekening uit het vak CTB2220 Beton- & Staalconstructies en het model van M.P. Nijgh. Het voorbeeld is als volgt:



Figuur 16: Doorsnede voorbeeldberekening (ULS)

In het voorbeeld werd gevraagd om bij een axiale drukkracht $N_{Ed} = 1,800 \text{ kN}$ de momentcapaciteit om de y-as te berekenen $M_{Rd,z}$. De antwoorden van het rekenvoorbeeld en de uitkomsten van beide modellen zijn in de tabel hieronder weergegeven.

Tabel 1

	$F_{S,trek} [\text{kN}]$	$F_{S,druk} [\text{kN}]$	$x_u [\text{mm}]$	$\varepsilon_{S,trek} [\text{‰}]$	$\varepsilon_{S,druk} [\text{‰}]$	$M_{Rd,z} [\text{kNm}]$
CTB2220	262.3	-262.3	285.7	3.12	-2.76	428.0
Model M.P. Nijgh	262.3	-262.3	286.4	3.10	-2.77	427.4
Model L. Duindam	262.3	-262.3	285.9	3.11	-2.78	428.3

De resultaten komen zo goed als overeen. De verschillen die er zijn, zijn verwaarloosbaar klein en komen tot stand door het tussentijds afronden van bepaalde waarden. Het model is dus betrouwbaar wanneer het gaat om buiging om één as.

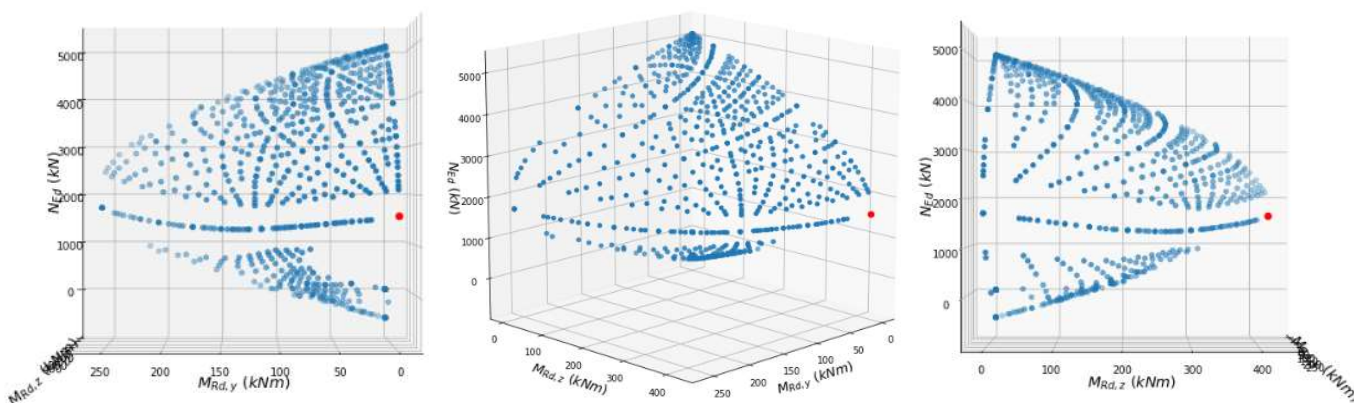
4.4.2. Dubbele buiging

Er zijn geen voorbeeld berekeningen beschikbaar wat betreft dubbele buiging, Het model zal daarom gecontroleerd worden aan de hand van een logische redenering.

In figuur 17 is de capaciteit van de kolom uit het voorbeeld in 4.2.1. in een 3D plot weergegeven. Het rode puntje in de plot representeert dat voorbeeld, de waarden van dit punt zijn:

- $N_{Ed} = 1,800.0 \text{ kN}$
- $M_{Ed,y} = 0.0 \text{ kNm}$
- $M_{Ed,z} = 428.3 \text{ kNm}$

Dit punt past perfect in de plot en de plot ziet er verder ook zeer strak uit. Er is geen enkel punt met merkwaardige waarden dat buiten de omtrek van het figuur valt. De aanname dat het model ook betrouwbaar is bij buiging om beide assen is dus plausibel.



Figuur 17: 3D-weergave van kolom capaciteit

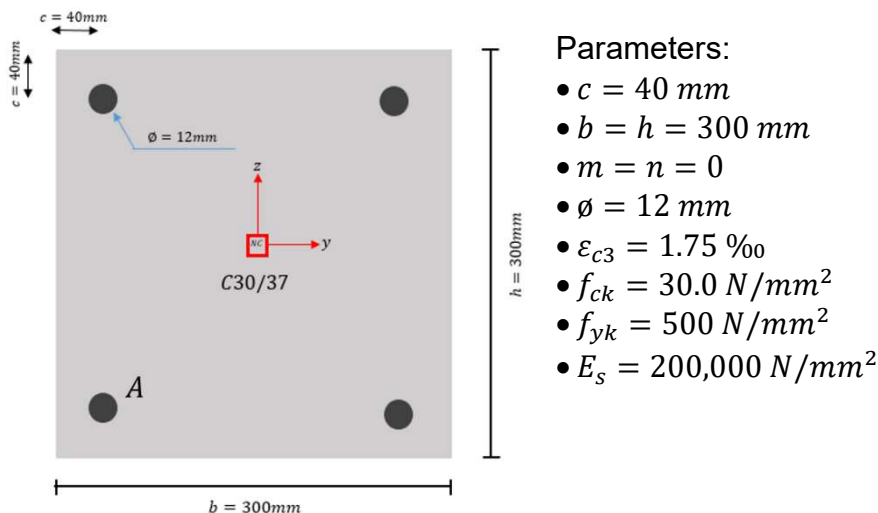
4.5. Controle model (SLS)

Het SLS model zal worden gevalideerd aan de hand van een voorbeeldberekening uit het rapport van R. Harteveld (Harteveld, 2015). Het verschil tussen het model uit zijn onderzoek en dit model zijn de input parameters. In tabel 2 zijn voor beide modellen de verschillende input parameters gegeven. Omdat de parameters verschillen, is het lastiger om de modellen te vergelijken. De normaalkracht werkend op de kolom komt bijvoorbeeld als output uit zijn model terwijl deze parameter juist als input nodig is in dit model.

Tabel 2

Input model R. Harteveld		Input model L. Duindam	
ϵ_{staal}	0.002175 ‰	ϵ_{staal}	0.002175 ‰
κ_y	$6.98 \cdot 10^{-6} \text{ 1/mm}$	N	-171.05 kN
κ_z	$6.98 \cdot 10^{-6} \text{ 1/mm}$	α_k	$0.25 \cdot \pi \text{ rad}$

In de voorbeeldberekening wordt gevraagd om σ_{A,M_y} en σ_{A,M_z} te berekenen bij een situatie met dubbele buiging. De waarden die zijn ingevoerd in beide modellen zijn ook te vinden in tabel 2. Een gedetailleerde uitleg van het probleem is te vinden in het rapport van R. Harteveld. De kolom doorsnede die hoort bij het voorbeeld is als volgt:



Figuur 18: Doorsnede voorbeeldberekening (SLS)

De modellen leveren de volgende uitkomsten wanneer bovenstaande waarden worden ingevoerd:

Tabel 3

	$N \text{ [kN]}$	$M_y \text{ [kNm]}$	$M_z \text{ [kNm]}$	$\sigma_{M_y} \text{ [MPa]}$	$\sigma_{M_z} \text{ [MPa]}$
Model R. Harteveld	-171.05	29.85	30.08	195.10	198.80
Model L. Duindam	-171.05	29.12	29.12	192.67	192.67

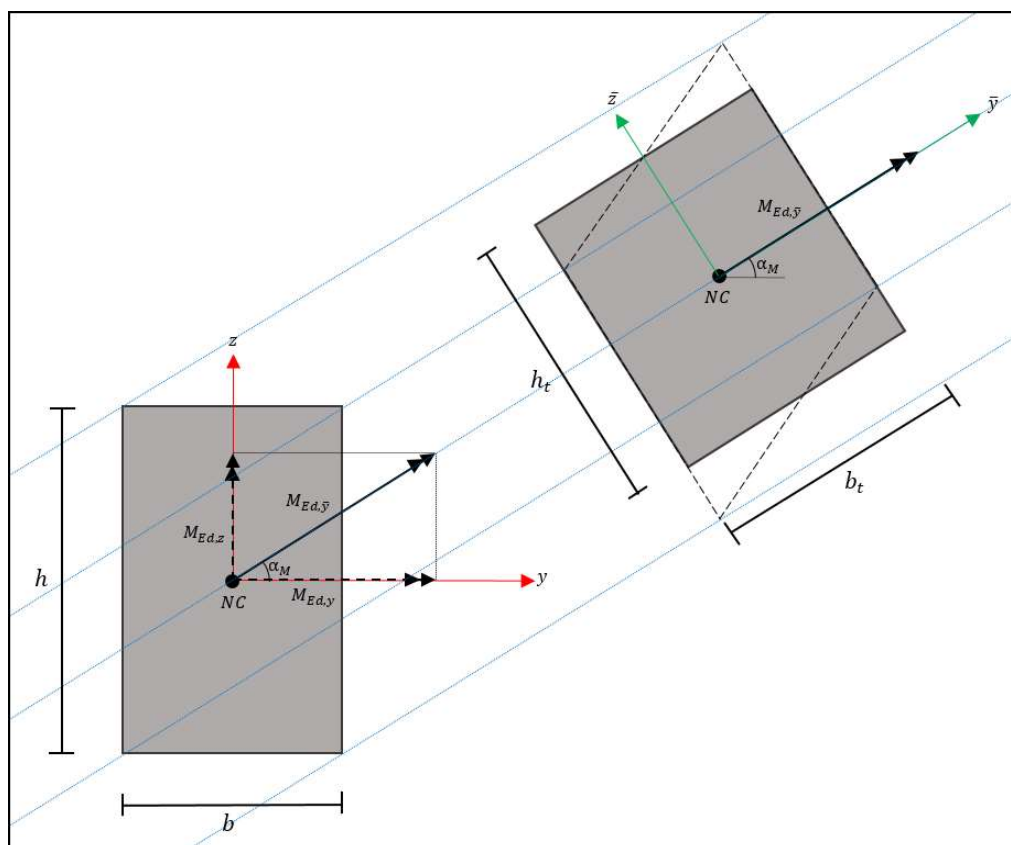
Zoals te zien komen de uitkomsten aardig overeen, maar toch zijn er wat verschillen. Deze verschillen worden hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door fouten in het model van R. Harteveld. De doorsnede is namelijk een vierkant met gelijke zijde waarbij de wapeningsconfiguratie in beide hoofdrichtingen identiek is. Bij een gelijke kromming in deze hoofdrichtingen (zie input model R. Harteveld, tabel 2) zou je verwachten dat de waarden voor M_y en M_z ook aan elkaar gelijk moeten zijn, net als de waarden van σ_{M_y} en σ_{M_z} . Dit blijkt bij zijn model niet het geval te zijn. Aangezien dit wel het geval is in mijn model, kan de aanname worden gemaakt dat het SLS model inderdaad betrouwbaar is.

5 Doorsnede-Transformatie Methode (DTM)

Het exact berekenen van dubbele buiging op kolommen is zeer complex. Zonder het gebruik van computers kost zo'n berekening erg veel tijd en de kans op fouten is daarom zeker aanwezig. Een anoniem ingenieursbureau is met een methode gekomen om dubbele buiging op betonnen kolommen relatief eenvoudig en snel te berekenen. Maar er is dus nog niet aangetoond dat deze methode daadwerkelijk correct. In dit hoofdstuk zal deze methode worden toegelicht.

5.1. Toelichting methode

De basis van deze methode is grafisch weergegeven in figuur 19. De doorsnede zal zodanig gerooteerd en getransformeerd worden zodat het probleem vereenvoudigt tot een kolom met slechts buiging om één as. Hieronder zal stap voor stap worden toegelicht hoe de methode wordt toegepast op een kolom belast op dubbele buiging.



Figuur 19: Doorsnede transformatie

Men begint met een doorsnede waarvan de hoofdassen van de doorsnede samenvallen met de assen van het xy-coördinatenstelsel. De normaalkracht, N , en de momenten om de hoofdassen, M_y en M_z zijn bekend. De momenten worden als vectoren bij elkaar opgeteld. Zo ontstaat een moment dat een bepaalde hoek maakt met de horizontale y-as. De waarden van het moment en van de hoek zijn als volgt:

$$M_{\bar{y}} = \sqrt{(M_y)^2 + (M_z)^2}$$

$$\alpha_M = \tan^{-1}\left(\frac{M_z}{M_y}\right)$$

De $\bar{y}$ refereert naar het nieuwe assenstelsel. Dit nieuwe $\bar{x}\bar{y}$ -assenstelsel wordt gevormd door het xy -assenstelsel tegen de klok in te roteren over een hoek α_M . De richting van de $\bar{y}$ -as valt nu samen met de richting van $M_{\bar{y}}$.

Vervolgens moet de doorsnede worden getransformeerd. Ten eerste wordt ook de doorsnede tegen de klok in geroteerd over een hoek α_M . Op deze manier vallen de hoofdasen van de doorsnede weer samen met het $\bar{x}\bar{y}$ -assenstelsel. De nieuwe breedte en hoogte (b_t en h_t) van de getransformeerde doorsnede worden als volgt berekend:

$$b_t = b / \cos(\alpha_M)$$

$$h_t = \sqrt{b^2 + h^2} - \sin(\alpha_M) * b$$

De totale oppervlakte van de doorsnede verandert niet:

$$b * h = b_t * h_t$$

Het wapeningsstaal zal, in tegen stelling tot het beton, enkel roteren. Aangezien we bij de getransformeerde doorsnede alleen buiging om de $\bar{y}$ -as hebben, hoeft alleen de $\bar{z}$ -coördinaat van elke wapeningsstaaf te worden bepaald. Deze kan eenvoudig worden berekend met behulp van de volgende formule:

$$\bar{z}_i = -\sin(\alpha_M) * y_i + \cos(\alpha_M) * z_i$$

De gehele doorsnede is nu geroteerd en/of getransformeerd. Aangezien het wapeningsstaal enkel is geroteerd, terwijl de hoogte van de doorsnede kleiner is geworden, kan het zo zijn dat een aantal wapeningsstaven buiten de getransformeerde doorsnede vallen. Maar omdat dit slechts een imaginaire doorsnede is, maakt dit verder voor de berekeningen niet uit.

Wat resteert is nu een probleem met een moment om enkel de $\bar{y}$ -as. Ten eerste moet nu de hoogte van de betondrukzone, x_u , worden bepaald. Dit gebeurt aan de hand van een iteratief proces. De juiste hoogte is gevonden als wordt voldaan aan het volgende criterium:

$$N_{Ed} = N_{beton} + N_{wapening}$$

waar:

$$N_{beton} = \alpha * b_t * x_u * f_{cd}$$

$$N_{wapening} = \sum A_i * \sigma_i$$

met:

$$\sigma_i = \begin{cases} E_s * \varepsilon_i & \text{als } |\varepsilon_i| \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ f_{yd} & \text{als } |\varepsilon_i| > \frac{f_{yd}}{E_s} \end{cases}$$

De rek ε_i in een willekeurige wapeningsstaaf kan worden berekend met de volgende formule:

$$\varepsilon_i = \frac{\left(\frac{h_t}{2} - x_u\right) - \bar{z}_i}{x_u} * \varepsilon_{cu3}$$

Hierin is $\left(\frac{h_t}{2} - x_u\right)$ de $\bar{z}$ -coördinaat van de neutrale lijn. De buigend moment weerstand om de $\bar{y}$ -as kan vervolgens worden berekend. Dit gebeurt als volgt:

$$M_{Ed,\bar{y}} = N_{beton} * \left(\frac{h_t}{2} - \beta * x_u\right) + \sum A_i * \sigma_i * z_i$$

De α en β in de formules hierboven zijn respectievelijk de volheidsfactor en de afstandsfactor. Het principe van de afstandsfactor is te zien in figuur 20. Er zal hier verder geen uitgebreide uitleg over worden gegeven. De formules voor de factoren zijn:

$$\alpha = \frac{0.5 * \varepsilon_{c3} + (\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{c3})}{\varepsilon_{cu3}}$$

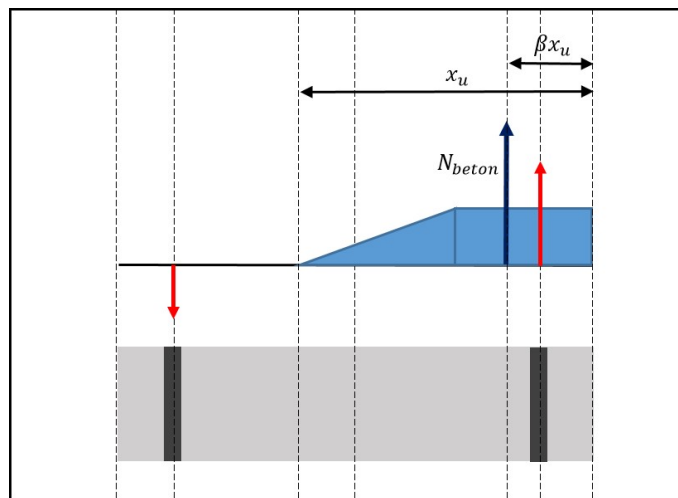
$$\beta = \frac{0.5 * \varepsilon_{c3} * \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{3} + (\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{c3})\right) + 0.5 * (\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{c3})^2}{\alpha * \varepsilon_{cu3}^2}$$

Wat nu enkel nog resteert is het omrekenen van het enkele moment om de $\bar{y}$ -as tot twee momenten om de hoofdassen x en y. Deze berekening is vrij eenvoudig en wordt als volgt gedaan:

$$M_{Ed,y} = M_{Ed,\bar{y}} * \cos(\alpha_M)$$

$$M_{Ed,z} = M_{Ed,\bar{y}} * \sin(\alpha_M)$$

De maximaal mogelijke momenten om de beide hoofdassen ($M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$) zijn nu bekend, net zoals de waardes van de optredende momenten om de hoofdassen (M_y en M_z). Als beide maximale momenten groter zijn dan de optredende momenten om de bijbehorende as, dan zou de doorsnede moeten voldoen, mits de methode correct is.



Figuur 20: Afstandsfactor β

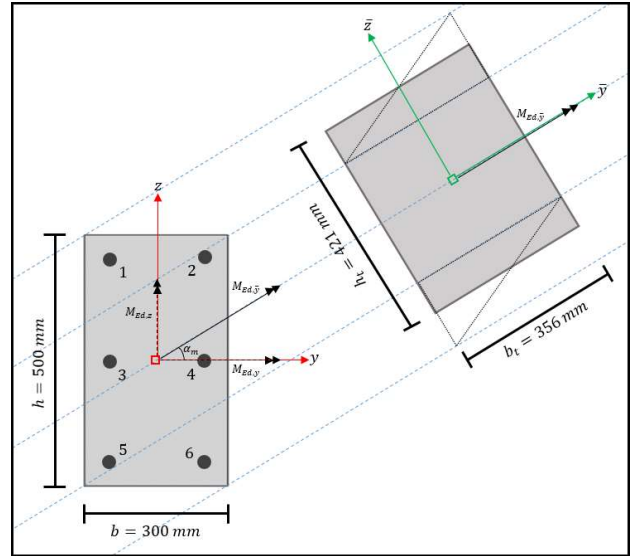
5.2. Rekenvoorbeeld

Het probleem is grafisch weergegeven in figuur 21. Er wordt gevraagd om de $M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$ in de uiterste grens toestand te berekenen bij de volgende input parameters:

- $N = 1,000 \text{ kN}$
- $\alpha_M = 0.18\pi \text{ rad}$

De doorsnede parameters zijn als volgt:

- $c = 46 \text{ mm}$
- $b = 300 \text{ mm}$; $h = 500 \text{ mm}$
- $m = 0$; $n = 1$
- $\phi = 20 \text{ mm}$
- $f_{cd} = 40/1.5 = 26.7 \text{ N/mm}^2$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu3} = 3.50 \text{ ‰}$
- $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$



Figuur 21: Doorsnede voorbeeldberekening DTM

De eerste stap die moet worden genomen is het transformeren van de doorsnede:

$$b_t = b / \cos(\alpha_M) = 300 / \cos(32.6) = 356 \text{ mm}$$

$$h_t = \sqrt{b^2 + h^2} - \sin(\alpha_M) * b = \sqrt{300^2 + 500^2} - \sin(0.18\pi) * 300 = 421 \text{ mm}$$

Uit de verticale krachterevenwicht blijkt dat:

$$x_u = 164 \text{ mm}$$

Aan de hand van de gevonden hoogte van de betondrukzone, kunnen voor elke wapeningsstaaf de interne krachten worden bepaald. In tabel 4 zijn voor elke wapeningsstaaf de waardes gegeven van de $\bar{z}$ -coördinaat, de rek, de spanning en de kracht.

Tabel 4

Wapeningsstaaf	$\bar{z}_i \text{ [mm]}$	$\varepsilon_i \text{ [‰]}$	$\sigma_i \text{ [MPa]}$	$F_i \text{ [kN]}$
1	227.9	-3.87	-435	-136.7
2	115.8	-1.48	-296	-93.0
3	56.0	-0.21	-41	-12.9
4	-56.0	2.18	435	136.7
5	-115.8	5.85	435	136.7
6	-227.9	3.46	435	136.7

Het verticale krachterevenwicht blijkt inderdaad aanwezig te zijn:

$$N_{beton} = \alpha * b_t * x_u * f_{cd} = 0.75 * 356 * 164 * 26.7 = 1,167 \text{ kN (druk)}$$

$$N_{wapening} = 167 \text{ kN (trek)}$$

$$\rightarrow N_{beton} + N_{wapening} - N = 1,167 - 167 - 1,000 = 0 \text{ kN}$$

Het moment om de $\bar{y}$ -as blijkt de volgende waarde te hebben:

$$M_{Ed,\bar{y}} = 269 \text{ kNm}$$

De waardes voor de momenten in de uiterste grens toestand om beide hoofdassen zijn nu als volgt:

$$M_{Ed,y} = M_{Ed,\bar{y}} * \cos(\alpha_M) = 269 * \cos(0.18\pi) = 227 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = M_{Ed,\bar{y}} * \sin(\alpha_M) = 269 * \sin(0.18\pi) = 144 \text{ kNm}$$

Voor de gegeven input parameters zijn dit dus volgens de DTM de grootste mogelijke momenten in de uiterste grens toestand.

6 Ontwerpformule (ULS)

De eerste hoofdvraag van het onderzoek had betrekking tot het opstellen van een ontwerpformule om snel en nauwkeurig een doorsnedecheck uit te voeren. Uit eerder onderzoek kwam naar voren dat de voorschriften uit de Eurocode vaak té veilig blijken te zijn. Dit heeft tot gevolg dat kolommen op een niet-economische wijze worden gedimensioneerd en dus duurder worden dan nodig. De ontwerpformule moet dit voorkomen.

In dit hoofdstuk zal eerst de achtergrond van de ontwerpformule aan bod komen, waarna vervolgens de resultaten van de parameterstudie zijn uitgewerkt. Ten slotte wordt aan het eind van het hoofdstuk de definitieve versie van de ontwerpformule gegeven.

6.1. Achtergrond ontwerpformule (ULS)

Het huidige voorschrift in de Eurocode is gedetailleerd behandeld in hoofdstuk 3. De unity check voor een willekeurige doorsnede moet voldoen aan het volgende criterium:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a \leq 1$$

waar:

$$a = f(N_{Ed}/N_{Rd})$$

Exponent- a is hier enkel afhankelijk van het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio, dit is grafisch weergegeven in figuur 5. Voor de ontwerpformule wordt er gezocht naar een betere formule voor exponent- a . De kern van het Eurocode voorschrift zal overigens de basis vormen voor de ontwerpformule. Deze ontwerpformule zal er dan als volgt uit komen te zien:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a$$

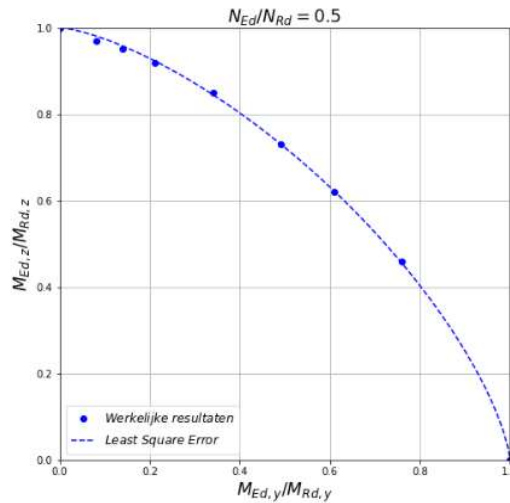
waar:

$$a = f(N_{Ed}/N_{Rd}, p_1, p_2, \dots, p_n)$$

Om uiteindelijk tot een daadwerkelijke formule voor exponent- a te komen, zijn een aantal punten noodzakelijk. Ten eerste moet een waarde voor exponent- a gevonden kunnen worden voor een enkele willekeurige doorsneden. En ten tweede moet er alvast een basis worden gevormd voor de formule van exponent- a . Vanuit deze basis kan daarna makkelijker een formule worden gevormd. Deze punten zullen in de volgende paragrafen aan bod komen.

6.1.1. Exponent- a voor willekeurige doorsnede

Een functie van het model is het plotten van de momentcapaciteit-curves voor een willekeurige doorsnede. Een momentcapaciteit-curve geeft aan welke combinaties van momenten in verhouding mogelijk zijn, bij een bepaalde axiale kracht, in de ULS zonder dat de kolom bezwijkt. In figuur 22 is een voorbeeld gegeven van een momentcapaciteit-curve voor een willekeurige doorsnede bij een axiale kracht gelijk aan 50% van de normaalkracht capaciteit ($N_{Ed}/N_{Rd}=0.5$).



Figuur 22: Momentcapaciteit-curve willekeurige doorsnede

De blauwe punten representeren de uitkomsten van het model. De gestreepte blauwe lijn is geplot aan de hand van het gelijkstellen van de van de ontwerpformule aan 1. Dit is namelijk de uiterste grens toestand waarbij de doorsnede, in theorie, net niet bezwijkt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a = 1$$

Hierin is exponent- a gevonden door middel van het gebruik van de 'least square error'-methode. Op deze manier word er dus een waarde voor exponent- a gevonden waarbij de bovenstaande vergelijking zo nauwkeurig mogelijk overeenkomt met de werkelijke resultaten. Zo te zien blijkt dat de aanname om de kern van het voorschrift niet te veranderen en enkel een nieuwe formule te vinden voor exponent- a , juist is. De punten komen namelijk sterk overeen met de lijn.

6.1.2. Basis voor exponent- a formule

In figuur in bijlage B zijn voor een willekeurige doorsnede de waardes voor exponent- a geplot tegen het bijbehorende N_{Ed}/N_{Rd} -ratio. De punten representeren de werkelijke waardes voor a gevonden met behulp van de 'least square error'-methode. De grafieken zijn interpolaties van deze resultaten aan de hand van een tweedegraads polynoom. Deze lijnen lijken redelijk goed overeen te komen met de punten. Voor de basis voor de a -formule is daarom een tweedegraads polynoom gekozen in de volgende vorm:

$$a = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2$$

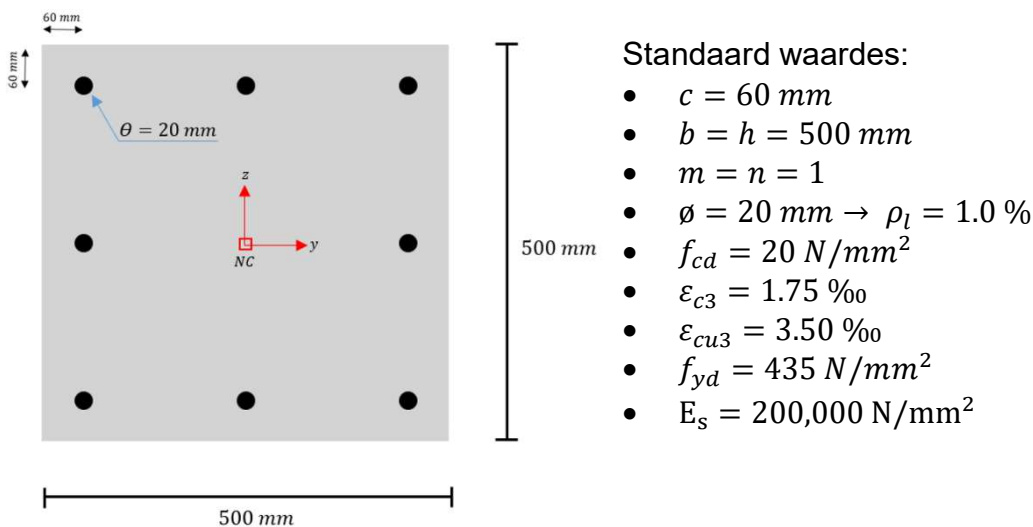
Vanuit deze formule is er verder gezocht naar een nauwkeurige formule. De waardes van de factoren A , B en C zullen op hun beurt namelijk weer afhankelijk zijn van verschillende parameters. Welke parameters dit zijn en hoe de waardes afhangen van deze parameters zal verder in dit hoofdstuk duidelijk worden.

6.2. Parameterstudie

In hoofdstuk 4 van dit onderzoek zijn alle parameters gegeven die in het model gevarieerd kunnen worden. Voor dit deel van het onderzoek zullen niet alle parameters worden onderzocht. Van een aantal parameters kan namelijk vooraf al geconcludeerd worden dat deze niet heel relevant zijn en/of weinig invloed zullen hebben op de resultaten. De parameters waar wel naar gekeken zal worden zijn de volgende:

- Afmetingen doorsnede
- Druksterkte beton
- Wapeningspercentage
- Wapeningsconfiguratie

De verschillende parameters zullen vanuit een standaard waarde worden gevarieerd. De standaardwaarden voor de doorsnede en materiaal gerelateerde parameters zijn hieronder gegeven.



Figuur 23: Standaard doorsnede (ULS)

In figuur 22 is de momentcapaciteit-curve gegeven voor een willekeurige doorsnede bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.5. In de inleiding van dit hoofdstuk is vermeld dat in de Eurocode de kromming van de curve enkel afhankelijk is van deze ratio. Het doel van dit onderzoek is dus onder andere om aan te tonen dat deze kromming ook een functie is van de eerder genoemde parameters. Bij het onderzoeken van deze parameters zullen de volgende N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's worden meegenomen:

- $N_{Ed}/N_{Rd} = 0.1$
- $N_{Ed}/N_{Rd} = 0.3$
- $N_{Ed}/N_{Rd} = 0.5$
- $N_{Ed}/N_{Rd} = 0.7$
- $N_{Ed}/N_{Rd} = 0.9$

In het vervolg van dit hoofdstuk zullen meerdere momentcapaciteit-curves te zien zijn. Hierbij moet worden opgemerkt dat dit de interpolaties zijn van de werkelijke resultaten. Deze interpolaties zijn gemaakt door het gebruik van de 'least square error'-methode zoals beschreven is in paragraaf 6.1.1. Aan de hand van de werkelijke resultaten is er dus eerst een waarde gevonden voor exponent a waarna vervolgens de momentcapaciteit-curve is geplott.

6.2.1. Afmetingen doorsnede

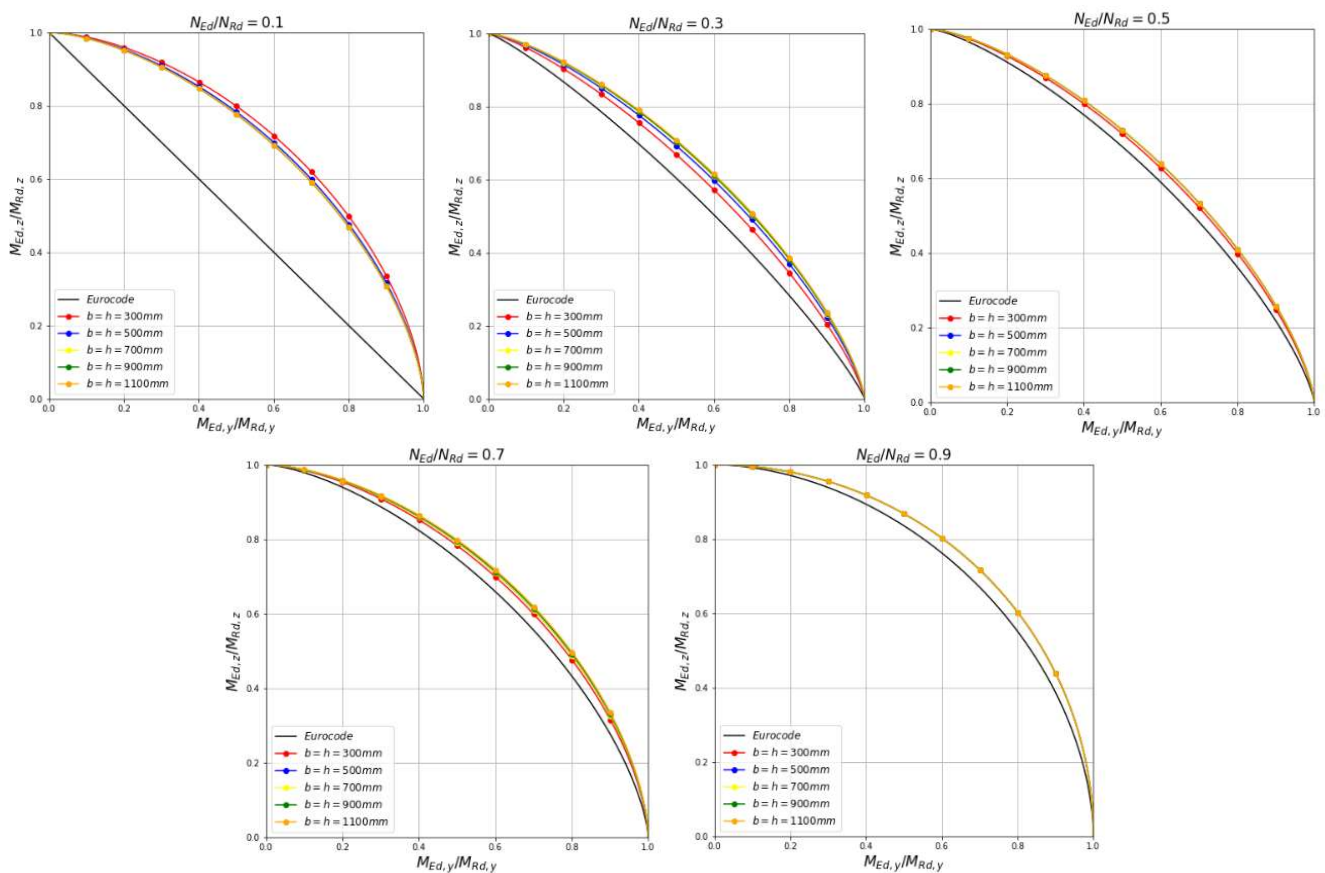
$$h/b = 1$$

Ten eerste zullen de afmetingen van de doorsnede in beschouwing worden genomen, waarbij de verhouding van de breedte en hoogte zal gelijk zijn aan 1. De breedte en hoogte van de doorsnede worden gevarieerd, terwijl voor de overige parameters de standaard waarden worden ingevoerd. Hierbij moet worden opgemerkt dat de diameter van het wapeningsstaal wel verandert bij het variëren van de afmetingen, het wapeningspercentage blijft namelijk gelijk. Dit wordt hieronder in een voorbeeld verder toegelicht.

Voorbeeld:

- Afmetingen doorsnede 1: 400x400 mm & $\rho_l = 1\% \rightarrow \theta \approx 16 \text{ mm}$
- Afmetingen doorsnede 2: 600x600 mm & $\rho_l = 1\% \rightarrow \theta \approx 24 \text{ mm}$

In figuur 24 hieronder zijn voor verschillende N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's de momentcapaciteit-curves geplot. Er zijn zes verschillende doorsneden getest. De afmetingen van deze doorsneden zijn te vinden in de legenda.



Figuur 24: Momentcapaciteit-curves (parameter: afmetingen doorsnede (1))

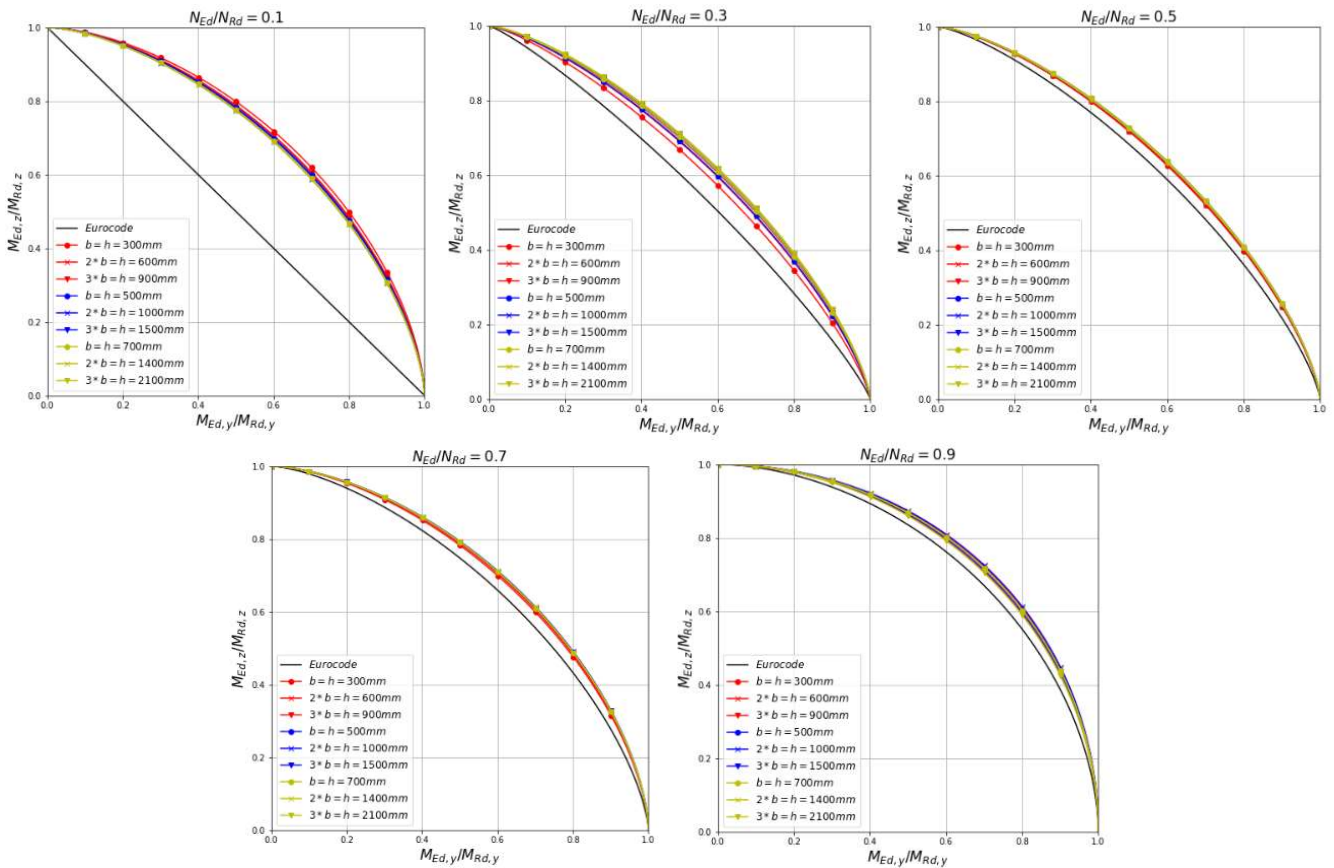
Aan de verschillende plots is te zien dat alle curves elkaar sterk overlappen. Enkel bij de N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's van 0.1 en 0.3 is te zien dat de curve van de doorsnede 1 iets afwijkt. Maar dit verschil is dusdanig klein dat wel geconcludeerd kan worden dat de afmetingen van een doorsnede, bij een breedte/hoogte-verhouding gelijk aan 1, verder geen invloed hebben op de kromming van de momentcapaciteit-curve.

$$h/b \geq 1$$

Ook de verhouding van de dimensies van de doorsnede kan worden veranderd. De breedte/hoogte-verhouding is nu telkens gevarieerd om te achterhalen of deze parameter invloed heeft op de kromming van de momentcapaciteit-curve. Er zijn drie verschillende verhoudingen gebruikt:

- $h/b = 1$
- $h/b = 2$
- $h/b = 3$

De overige parameters zijn wederom niet veranderd. Figuur 25 geeft de plots weer voor de verschillende N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's. In de legenda zijn weer de afmetingen te vinden van de geteste doorsneden.



Figuur 25: Momentcapaciteit-curves (parameter: afmetingen doorsnede (2))

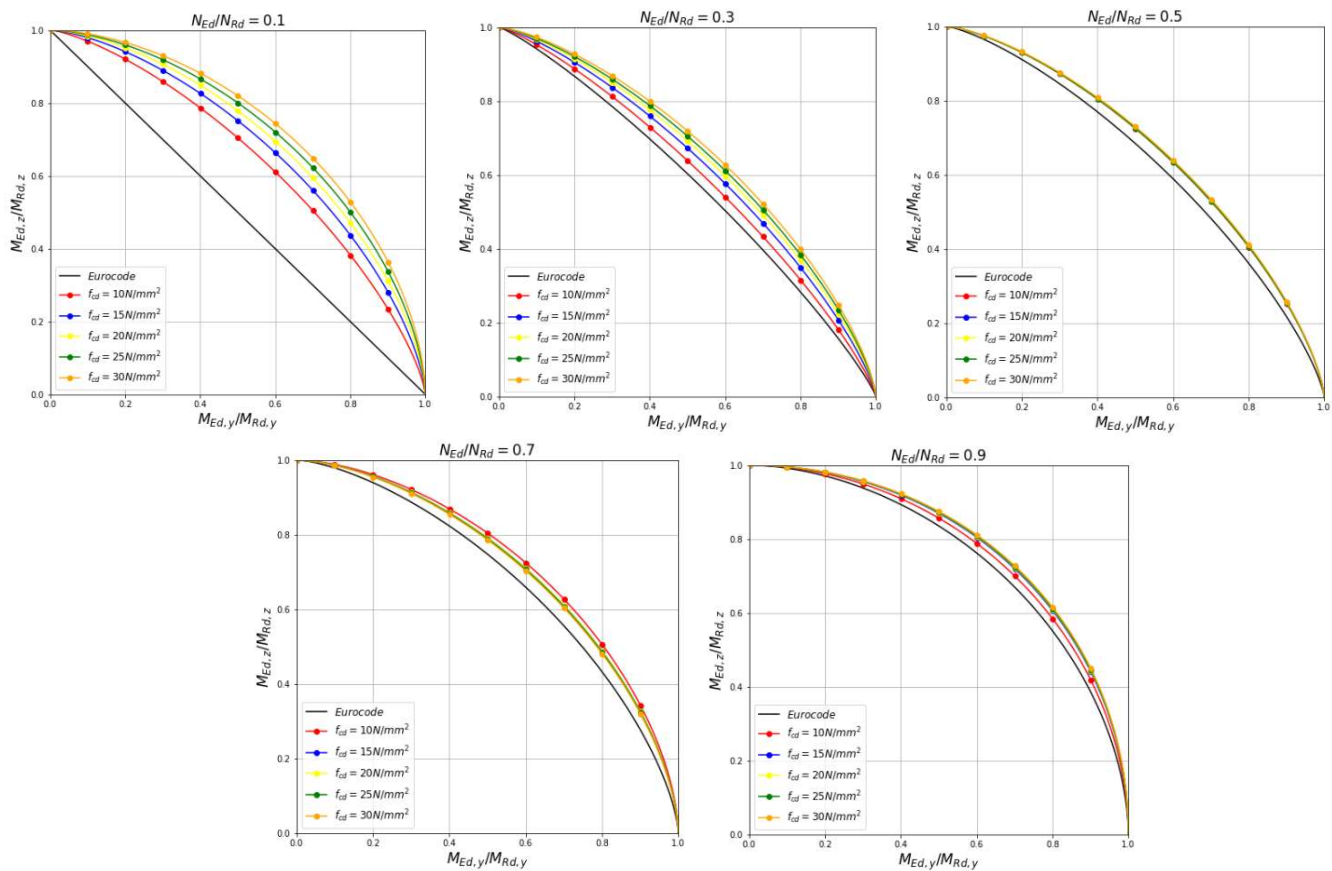
Ook hier is te zien dat de curves elkaar sterk overlappen. Dit betekent dus dat de breedte/hoogte-verhouding van een doorsnede verder nauwelijks invloed zal hebben op de kromming van de momentcapaciteit-curve. Aan de hand van deze resultaten en de resultaten op de vorige pagina kan worden gesteld dat de afmetingen van een doorsnede, ongeacht de breedte/hoogte-verhouding, niet bepalend zijn voor de kromming van de curve. Deze parameters zullen daarom niet in de uitdrukking voor α worden meegenomen.

6.2.2. Druksterkte beton

Elke betonsterkteklasse wordt gekarakteriseerd door zijn eigen druksterkte. In bijlage A is voor elke klasse deze bijbehorende druksterkte te vinden. Voor het onderzoek is er gespeeld met verschillende druksterktes. De volgende druksterktes zijn in het model ingevoerd en getest:

- $f_{cd} = 10\text{N/mm}^2$
- $f_{cd} = 15\text{N/mm}^2$
- $f_{cd} = 20\text{N/mm}^2$
- $f_{cd} = 25\text{N/mm}^2$
- $f_{cd} = 30\text{N/mm}^2$

Dit zijn geen waarden die gekoppeld kunnen worden aan werkelijke betonsterkteklassen. Maar voor het gemak zijn mooie getallen genomen met een gelijke stapgrootte. In figuur 26 zijn de resultaten weergegeven.



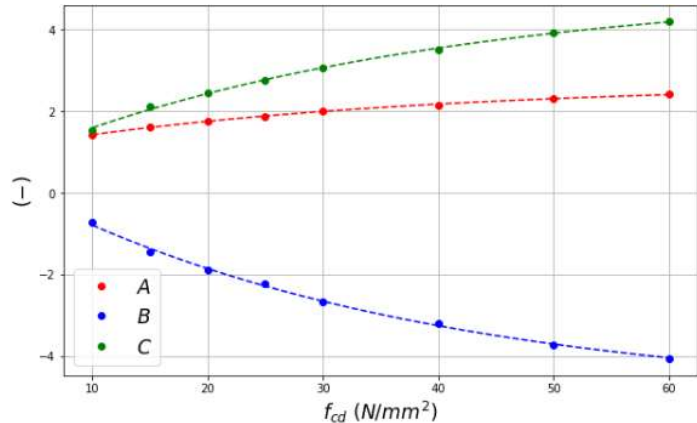
Figuur 26: Momentcapaciteit-curves (parameter: druksterkte beton)

In tegenstelling tot de afmetingen van een doorsnede heeft de betondruksterkte wel degelijk invloed op de kromming van de momentcapaciteit-curve. Zoals te zien zijn vooral voor lage N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's de verschillen tussen de curves significant. Bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.5 is er zo goed als geen verschil, maar wanneer het ratio weer toeneemt, ontstaan er kleine verschillen. De kromming van de curve is zeker afhankelijk van de betondruksterkte.

De volgende stap nu is het vinden van een formule voor exponent- a , zodat de ontwerpformule zo nauwkeurig mogelijk de werkelijke resultaten beschrijft. Voor elke combinatie van het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio en betondruksterkte f_{cd} is exponent- a bepaald op de manier zoals is beschreven in 6.1.1. Vervolgens zijn met de 'least square error'-methode de meest optimale waarden bepaald voor de factoren A , B en C . Deze waarden zijn in tabel 5 gegeven.

Tabel 5

f_{cd} [MPa]	A [-]	B [-]	C [-]
10	1.40	-0.73	1.53
20	1.76	-1.90	2.44
30	2.00	-2.68	3.05
40	2.14	-3.20	3.51
50	2.30	-3.72	3.92
60	2.40	-4.06	4.18



Figuur 27: Waardes voor A, B, en C als functie van f_{cd}

In figuur 27 zijn de waardes voor de factoren A , B en C geplott. Ook de meest optimale formules voor de factoren zijn geplott. Deze formules zijn als volgt:

$$\begin{aligned}
 A &= 2.68 - e^{0.53 - 0.03 \cdot f_{cd}} \\
 B &= -5.05 + e^{1.74 - 0.03 \cdot f_{cd}} \\
 C &= 5.03 - e^{1.52 - 0.03 \cdot f_{cd}}
 \end{aligned}$$

De voorlopige ontwerpformule is nu als volgt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a$$

waar:

$$a = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2$$

met:

$$\begin{aligned}
 A &= 2.68 - e^{0.53 - 0.03 \cdot f_{cd}} \\
 B &= -5.05 + e^{1.74 - 0.03 \cdot f_{cd}} \\
 C &= 5.03 - e^{1.52 - 0.03 \cdot f_{cd}}
 \end{aligned}$$

Om aan te tonen dat deze voorlopige ontwerpformule ook daadwerkelijk klopt is er op de volgende pagina een voorbeeld gegeven. Het voorbeeld heeft betrekking op de standaard doorsnede bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.1. De punten in beide figuren zijn identiek en representeren de werkelijke uitkomsten van het model. De grafieken representeren de uitkomsten aan de hand van de ontwerpformule. Maar in figuur 28 zijn de factoren A , B en C allen gelijk gesteld aan 1. Ongeacht de druksterkte van het beton is exponent- a dus gelijk aan:

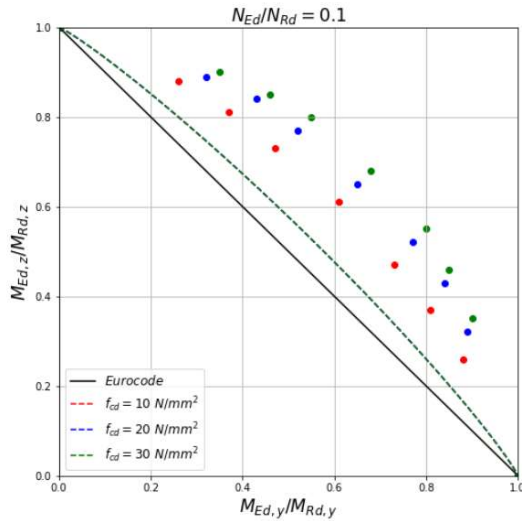
$$a = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2 = 1 + 1 * 0.1 + 1 * 0.1^2 = 1.11$$

Terwijl in figuur 29 de factoren A , B en C zijn berekend met de gevonden formules. Dit levert de volgende waarden op voor exponent- a :

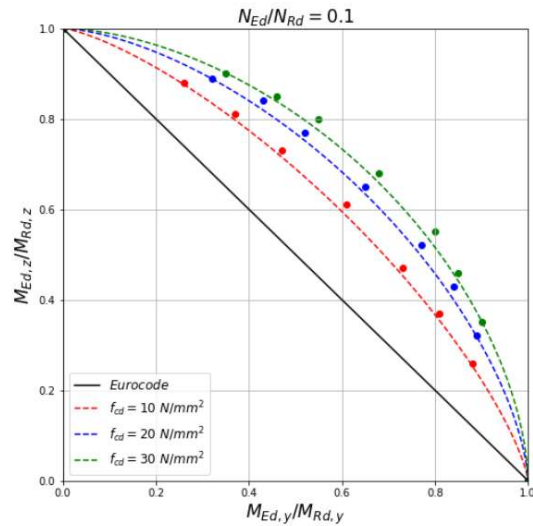
$$f_{ck} = 10 \text{ N/mm}^2 \rightarrow a = 1.35$$

$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \rightarrow a = 1.58$$

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2 \rightarrow a = 1.75$$



Figuur 28: Resultaten zonder toepassen formule



Figuur 29: Resultaten na toepassen formule

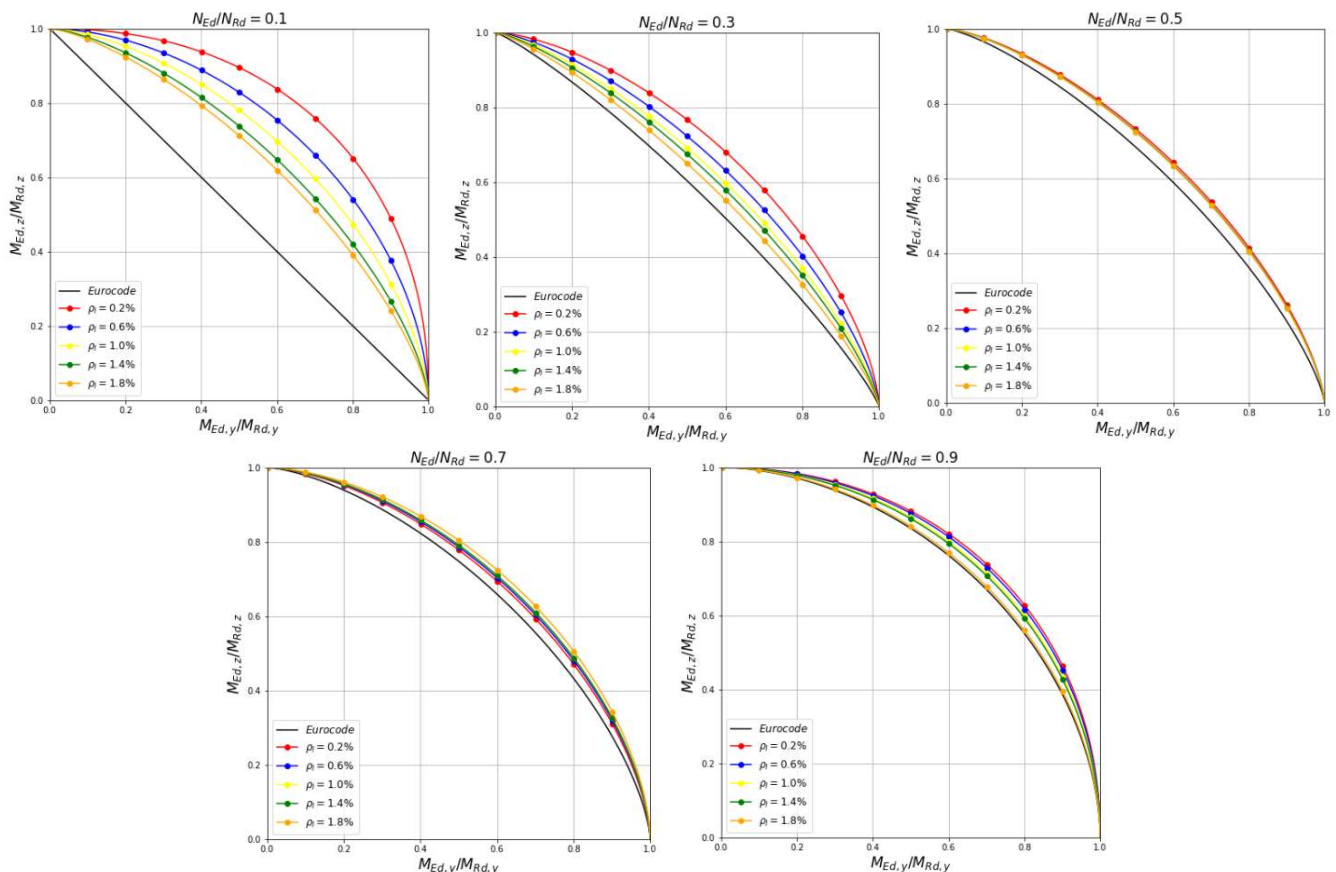
De grafieken in figuur 29 komen mooi overeen met de werkelijke resultaten. De voorlopige formules voor de factoren A , B en C lijken aan de hand van dit voorbeeld dus te kloppen.

6.2.3. Wapeningspercentage

Bij de voorgaande testen is telkens het standaard wapeningspercentage aangehouden van 1%. Bij het onderzoeken van de invloed van het wapeningspercentage op de curve zal deze juist worden gevarieerd. De volgende percentages zijn getest met het model:

- $\rho_l = 0.2\%$
- $\rho_l = 0.6\%$
- $\rho_l = 1.0\%$
- $\rho_l = 1.4\%$
- $\rho_l = 1.8\%$

Er is hier geen rekening gehouden met de normen voor een minimum of maximum wapeningspercentage, dit zal verder geen invloed hebben op de uitkomsten van de resultaten. Bij elk wapeningspercentage is een bijbehorende diameter van de wapeningsstaven berekend en deze is vervolgens in het model ingevoerd. In figuur 30 zijn de resultaten wederom op een grafische manier weergegeven.



Figuur 30: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningspercentage)

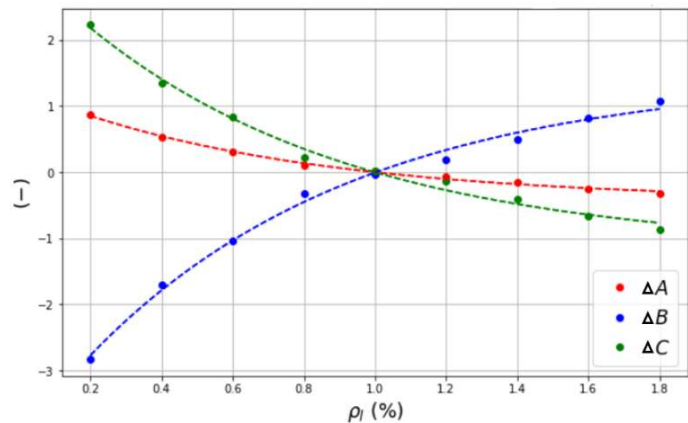
De resultaten hier zijn redelijk vergelijkbaar met de resultaten die werden gevonden na het variëren van de druksterkte van het beton. Bij lage N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's zijn de verschillen weer aanzienlijk, terwijl de curves elkaar sterk overlappen bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.5. Bij hogere N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's zijn er wederom kleine verschillen zichtbaar. Opvallend is dat voor bijna alle N_{Ed}/N_{Rd} -ratio's geldt dat de kromming toeneemt bij een afnemend wapeningspercentage. Enkel bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.7 is dit niet geldig.

Aangezien er al een voorlopige formule is voor exponent- a , is de volgende stap nu het uitbreiden van deze formule. Voor elke combinatie van het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio en het wapeningspercentage ρ_l is wederom de exponent- a bepaald. Vervolgens zijn weer de meest optimale waarden bepaald voor de factoren A , B en C . Van deze waarden moet eerst nog het deel worden afgetrokken dat wordt veroorzaakt door de betondruksterkte f_{cd} . De standaardwaarde voor de betondruksterkte f_{cd} is namelijk 20 N/mm^2 . De restwaarden die dan overblijven, worden dus veroorzaakt door het wapeningspercentage ρ_l . Deze restwaarden zijn gegeven in tabel 6 en worden als volgt berekend:

$$\begin{aligned} A_{f_{ck}} &= 2.68 + e^{0.53-0.03*20} = 1.74 \rightarrow \Delta A = A - A_{f_{ck}} \\ B_{f_{ck}} &= -5.05 - e^{1.74-0.03*20} = -1.86 \rightarrow \Delta B = B - B_{f_{ck}} \\ C_{f_{ck}} &= 5.03 + e^{1.52-0.03*20} = 2.42 \rightarrow \Delta C = C - C_{f_{ck}} \end{aligned}$$

Tabel 6

ρ_l [%]	ΔA [-]	ΔB [-]	ΔC [-]
0.2	0.87	-2.83	2.23
0.4	0.53	-1.71	1.35
0.6	0.31	-1.04	0.84
0.8	0.11	-0.32	0.22
1.0	0.01	-0.04	0.02
1.2	-0.07	0.19	-0.13
1.4	-0.16	0.50	-0.41
1.6	-0.25	0.82	-0.66
1.8	-0.31	1.07	-0.86



Figuur 31: Waardes voor A , B en C als functie van ρ_l

Aan de grafieken in figuur 31 kan je mooi zien dat bij een wapeningspercentage van 1.0% de waardes voor ΔA , ΔB en ΔC zo goed als gelijk zijn aan 0. Dit heeft er mee te maken dat het standaard wapeningspercentage van de standaard doorsnede ook gelijk is aan 1.0%. Bij het opstellen van de formules voor de factoren A , B en C als functie van de betondruksterkte f_{cd} , is te allen tijde het wapeningspercentage constant gehouden op deze waarde. De gevonden formules voor de restwaarden zijn:

$$\begin{aligned} \Delta A &= -0.43 + e^{0.52-1.36*\rho_l} \\ \Delta B &= 1.47 - e^{1.71-1.32*\rho_l} \\ \Delta C &= -1.18 + e^{1.47-1.31*\rho_l} \end{aligned}$$

Deze formules kunnen bij de eerder gevonden formules worden opgeteld, de voorlopige ontwerpformule is nu als volgt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a$$

waar:

$$\alpha = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2$$

met:

$$\begin{aligned} A &= 2.25 - e^{0.53-0.03*f_{cd}} + e^{0.52-1.36*\rho_l} \\ B &= -3.59 + e^{1.74-0.03*f_{cd}} - e^{1.71-1.32*\rho_l} \\ C &= 3.85 - e^{1.52-0.03*f_{cd}} + e^{1.47-1.31*\rho_l} \end{aligned}$$

Om aan te tonen dat deze voorlopige ontwerpformule ook daadwerkelijk klopt is er op de wederom een voorbeeld gegeven. Het voorbeeld heeft betrekking op de standaard doorsnede bij een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio van 0.1. De punten in beide figuren zijn identiek en representeren de werkelijke uitkomsten van het model. De grafieken representeren de uitkomsten aan de hand van de ontwerpformule. Maar in figuur 32 zijn de factoren A , B en C berekend met de formules uit 6.2.2. waar enkel de druksterkte f_{cd} in voorkomt. Ongeacht het wapeningspercentage van de doorsnede is exponent- a gelijk aan:

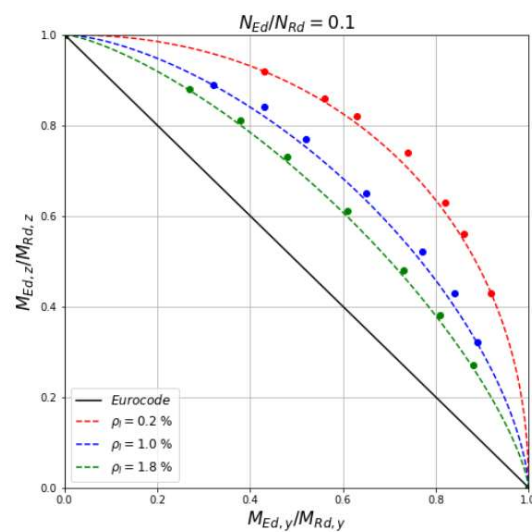
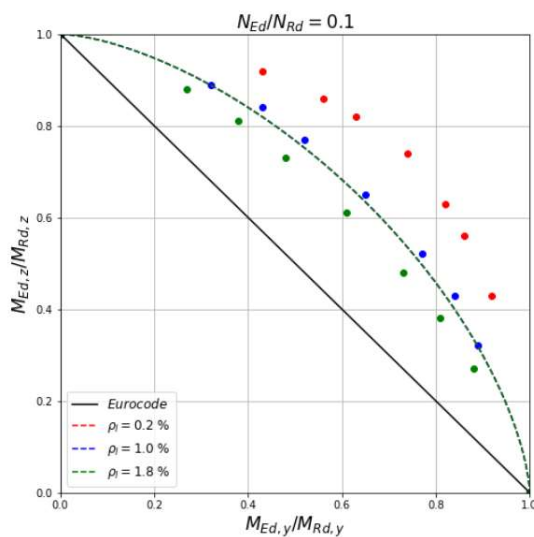
$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \rightarrow a = 1.58$$

Terwijl in figuur 33 de factoren A , B en C zijn berekend met de meest recente formules. Dit levert de volgende waarden op voor exponent- a :

$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \text{ \& } \rho_l = 0.2 \% \rightarrow a = 2.18$$

$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \text{ \& } \rho_l = 1.0 \% \rightarrow a = 1.58$$

$$f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2 \text{ \& } \rho_l = 1.8 \% \rightarrow a = 1.38$$



Figuur 32: Resultaten na toepassen oude formule **Figuur 33: Resultaten na toepassen nieuwe formule**

De grafieken in figuur 33 komen aardig overeen met de werkelijke resultaten. De formules van de factoren A , B en C lijken dus op een correcte manier te zijn uitgebreid.

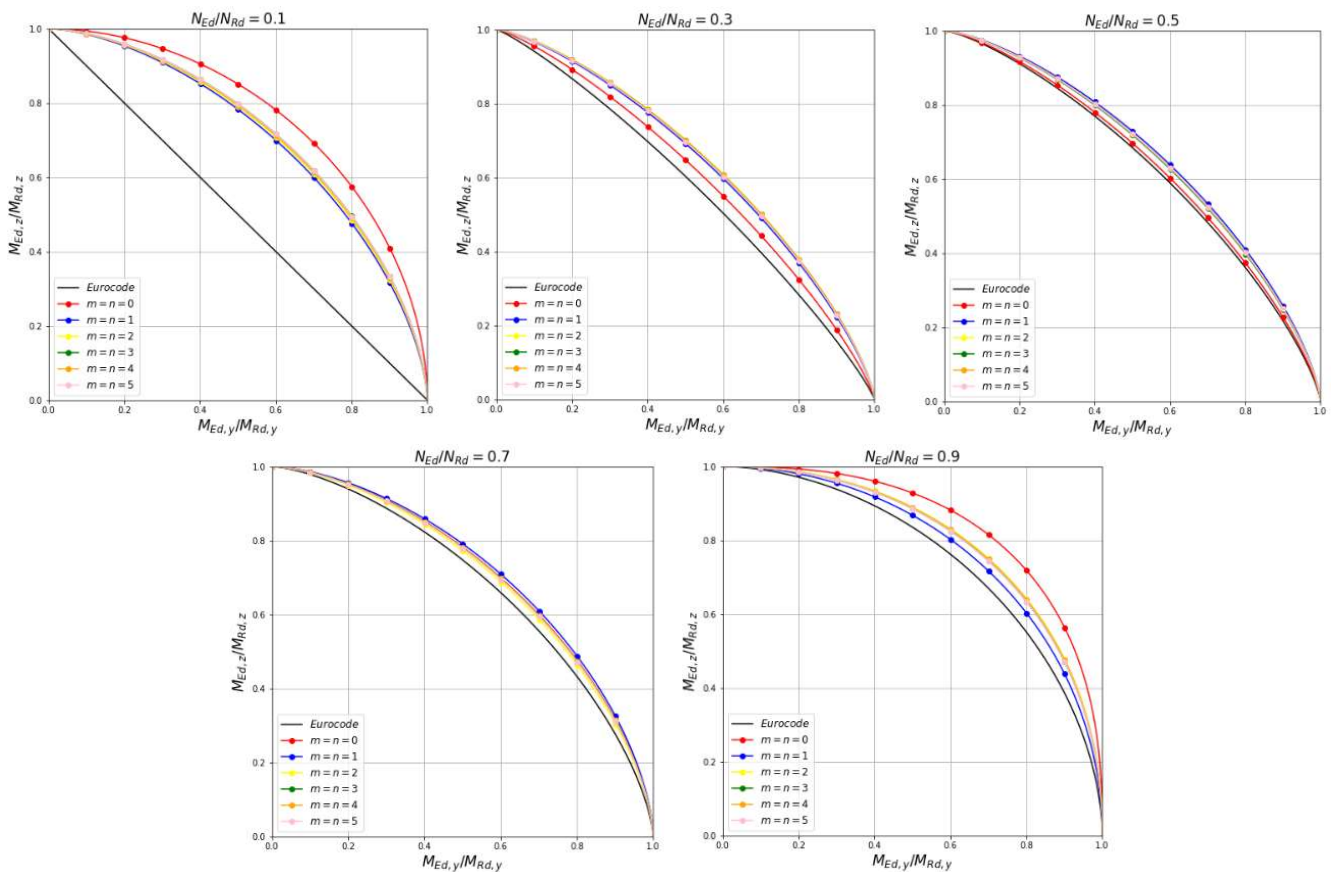
6.2.4. Wapeningsconfiguratie

$m = n$

Wat wapeningsconfiguratie betreft zijn er talloze combinaties mogelijk. Het is daarom ook lastig om deze parameter te onderzoeken. Om te beginnen is gevarieerd met het variëren van m en n bij een m/n -verhouding gelijk aan 1. De volgende varianten zijn getest:

- $m = n = 0$
- $m = n = 1$
- $m = n = 2$
- $m = n = 3$
- $m = n = 4$
- $m = n = 5$

De rest van de standaardwaardes zijn behouden. Er is hier verder geen rekening gehouden met de normen wat betreft de minimum en maximum hart op hart afstand van de wapening. Voor het onderzoek doet dit er verder niet toe. De resultaten zijn te zien in figuur 34.



Figuur 34: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningsconfiguratie (1))

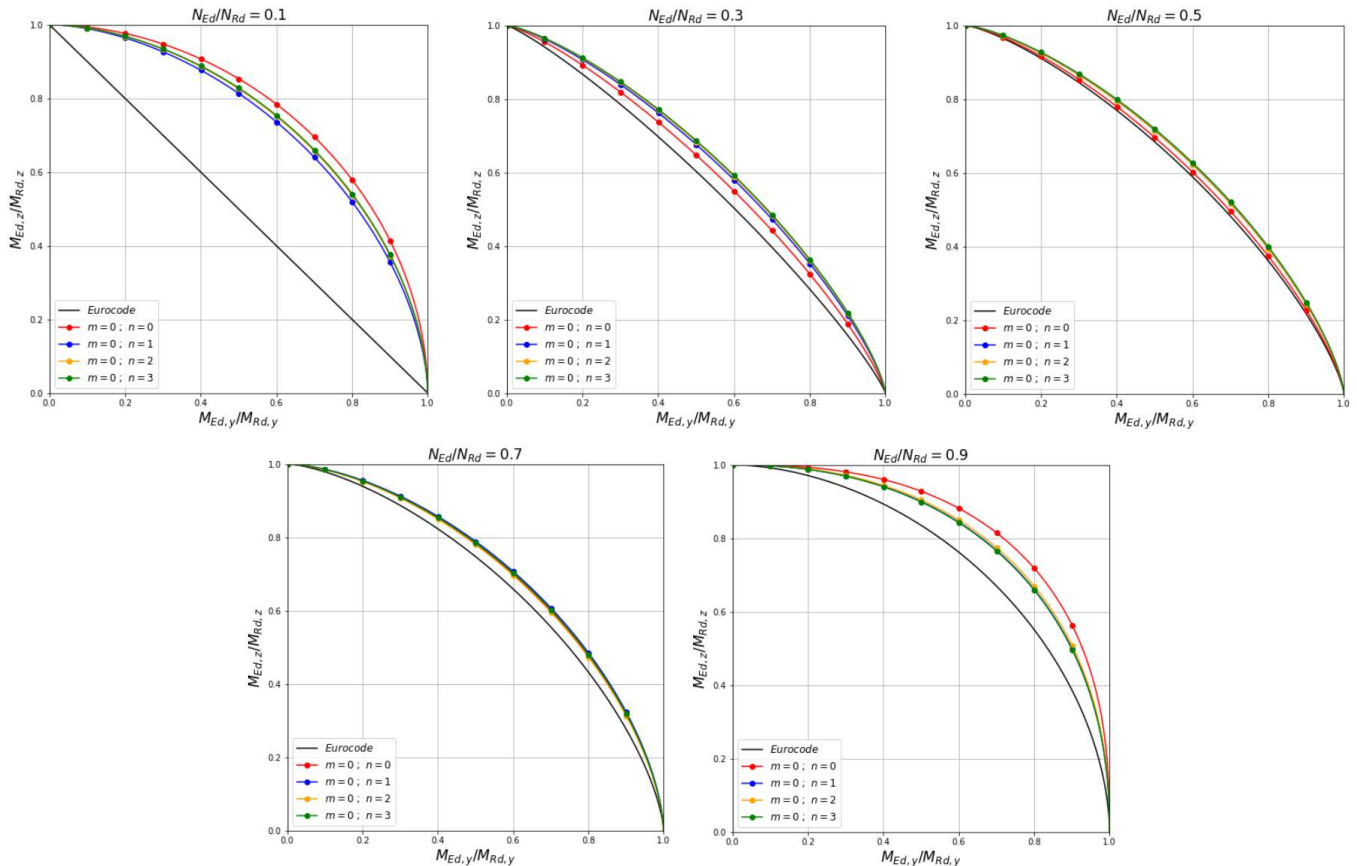
Opvallend is dat bij de rode curve, waarbij dus alleen hoekwapening is toegepast ($m = n = 0$), in bij alle gevallen redelijk afwijkt van de andere curves. Bovendien wijkt de blauwe curve ($m = n = 1$) in een aantal gevallen ook af van de andere curves, maar dit verschil is zeer gering. Wanneer zowel m als n groter dan 1 zijn is er geen verschil meer op te merken tussen de curves.

$m \neq n$

Er zijn ook testen uitgevoerd waarbij de m/n -verhouding niet gelijk is aan 1. De volgende varianten zijn onder andere getest:

- $m = 0 ; n = 0$
- $m = 0 ; n = 1$
- $m = 0 ; n = 2$
- $m = 0 ; n = 3$

De resultaten zijn weergegeven in figuur 35. In bijlage C zijn de resultaten weergegeven van een soortgelijke test, enkel geldt daar dat in alle gevallen $m = 2$.



Figuur 35: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningsconfiguratie (2))

Wederom wijkt de rode curve, waarbij enkel hoekwapening is toegepast ($m = n = 0$), in alle gevallen iets af van de andere curves. Verder zijn de verschillen zeer klein. Er kan dus worden geconcludeerd dat de wapeningsconfiguratie tot op een zekere hoogte invloed heeft op de kromming van de momentcapaciteit-curve. Echter was er geen mooi verband te vinden tussen de waarde van exponent- a en de wapeningsconfiguratie. Zo'n verband werd wel gevonden bij de druksterkte f_{ck} en het wapeningspercentage ρ_l . Aan de hand van een 'trial and error'-proces zijn er wel bepaalde constante factoren gevonden. De waardes van deze factoren zijn afhankelijk van de wapeningsconfiguratie. In de volgende paragraaf zijn deze factoren te vinden.

6.3. Definitieve ontwerpformule (ULS)

Alle parameters zijn onderzocht en in de ontwerpformule terug te vinden indien ze van invloed zijn. De ontwerpformule is in paragraaf 6.3.1. in zijn totaliteit gegeven. In paragraaf 6.3.2. wordt de nauwkeurigheid van de formule onder de loop genomen en wordt gesteld wanneer het de formule wel te gebruiken en wanneer niet.

6.3.1. Ontwerpformule

Met de gevonden ontwerpformule kan zeer snel en nauwkeurig worden gecontroleerd of een doorsnede voldoet of niet. De formule is enkel toepasbaar op rechthoekige doorsneden. Een doorsnede zou theoretisch gezien moeten voldoen wanneer de uitkomst van de ontwerpformule kleiner dan of gelijk is aan 1 ($U.C. \leq 1$). De definitieve ontwerpformule is als volgt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^\alpha$$

waar:

$$\alpha = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2$$

met:

$$\begin{aligned} A &= \eta_A * \mu_A * (2.25 - e^{0.53-0.03*f_{cd}} + e^{0.52-1.36*\rho_l}) \\ B &= \eta_B * \mu_B * (-3.59 + e^{1.74-0.03*f_{cd}} - e^{1.71-1.32*\rho_l}) \\ C &= \eta_C * \mu_C * (3.85 - e^{1.52-0.03*f_{cd}} + e^{1.47-1.31*\rho_l}) \end{aligned}$$

Factor η :

Te allen tijde geldt:

	$Min(m,n)=0$	$Min(m,n)=1$	$Min(m,n)>1$
η_A	1.20	1.00	1.10
η_B	1.85	1.10	1.15
η_C	1.75	1.05	1.20

Factor μ :

Indien $m=n$, dan geldt: $\mu_A = \mu_B = \mu_C = 1.00$

Indien $m \neq n$, dan geldt:

	$Min(m,n)=0$	$Min(m,n)=1$	$Min(m,n)>1$
μ_A	0.85	1.05	1.00
μ_B	0.65	1.25	1.00
μ_C	0.65	1.25	1.00

6.3.2. Nauwkeurigheid

Na een aantal controles blijkt dat de resultaten gevonden met de ontwerpformule sterk overeenkomen met de werkelijke resultaten. In bijlage D t/m G zijn voor een aantal willekeurige doorsneden de controle resultaten te vinden. Deze zijn zowel grafisch verwerkt als in een tabel.

De kwantitatieve controles van de ontwerpformule zijn in de tabellen verwerkt. Tabel 7 geeft een klein deel van deze resultaten weer ter verduidelijking. Het model berekend voor een gedefinieerde doorsnede de momenten in de uiterste grens toestand ($M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$) bij een specifieke normaalkracht N_{Ed} en richting van het krommingsvlak α_k . Bovendien berekend het model ook de weerstandsmomenten om beide assen bij enkele buiging ($M_{Rd,y}$ en $M_{Rd,z}$) bij de specifieke normaalkracht N_{Ed} . Om het model te controleren zijn voor verschillende doorsneden en belasting situaties deze waarden in de ontwerpformule gestopt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^\alpha$$

De unity check zou te allen tijde precies gelijk zijn aan 1.0 indien de ontwerpformule helemaal exact is. Het model berekend nou eenmaal de momenten in de uiterste grens toestand, waarvoor geldt dat $U.C. = 1$. Maar aangezien er een bepaalde foutmarge aanwezig is, zullen de resultaten iets afwijken. In tabel 7 zijn in de kolommen 3, 4, 5 en 6 de waarden gegeven voor respectievelijk $M_{Rd,y}$, $M_{Rd,z}$, $M_{Ed,y}$ en $M_{Ed,z}$ van een bepaalde kolom bij een specifieke belastingssituatie. In kolom 7 zijn de uitkomsten gegeven van de ontwerpformule wanneer deze waarden worden ingevoerd. Zoals te zien is, wijken de uitkomsten inderdaad iets af van de waarde 1.0. In kolom 8 zijn de foutmarges te vinden.

Tabel 7

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
N_{Ed}/N_{Rd} [-]	exponent-a [-]	$M_{Rd,y}$ [kNm]	$M_{Rd,z}$ [kNm]	$M_{Ed,y}$ [kNm]	$M_{Ed,z}$ [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.1	1.92	377.83	766.68	0.0	766.78	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	0.0	766.79	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	0.01	766.56	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	74.77	741.76	0.983	1.7
0.1	1.92	377.83	766.68	111.97	716.8	0.975	2.5
0.1	1.92	377.83	766.68	142.98	693.14	0.978	2.2
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	239.39	584.07	1.009	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	272.22	525.17	1.016	1.6
0.1	1.92	377.83	766.68	310.5	434.48	1.021	2.1
0.1	1.92	377.83	766.68	377.8	0.06	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	377.84	0.02	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	377.85	0.03	1.0	0.0

Uiteindelijk blijkt zo goed als altijd de foutmarge binnen de 8% te liggen. Maar niet in elke situatie levert de ontwerpformule nauwkeurige resultaten. In het volgende geval resulteert het gebruik van het voorschrift in onveilig of niet-economisch gedimensioneerde kolommen:

- Betonsterkteklasse > C50/60
- Niet-rechthoekige doorsnede

Indien hier sprake van is, wordt aangeraden een nauwkeurige doorsnede-berekening te maken. Het is namelijk gebleken dat het gebruik van zowel het voorschrift uit de Eurocode als de ontwerpformule niet veilig is. In alle andere gevallen levert het gebruik van de ontwerpformule zeer nauwkeurige resultaten op.

7 Ontwerpformule (SLS)

In dit hoofdstuk zal ten eerste de achtergrond van de nieuwe ontwerpformule worden toegelicht. Net als voor het ULS onderzoek, zal ook hier er een parameterstudie worden uitgevoerd. Aan het eind van het hoofdstuk zal de nieuwe ontwerpformule in zijn totaliteit worden gegeven.

7.1. Achtergrond ontwerpformule (SLS)

De definitieve ontwerpformule is ontwikkeld op basis van voorafgaand onderzoek (Harrass, 2017) en aan de hand van de ondervindingen in dit onderzoek. In paragraaf 7.1.1. zal eerst de eerder gevonden ontwerpformule door O. Harrass worden besproken. Vervolgens zal in paragraaf 7.1.2. de basis van de ontwerpformule worden behandeld. Vanuit deze basis is de uiteindelijke ontwerpformule gevormd.

7.1.1. Eerder onderzoek

Eerder onderzoek door O. Harrass heeft geresulteerd in een vrij complexe ontwerpformule. Deze formule is als volgt:

$$\sigma_{DB} = \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} + V$$

waar:

$$V = 78 * \left(1.55 - 1.80 * \frac{b}{1,000}\right) * (f_{ck}^{-0.24} * \emptyset^{-0.80}) * |N|^x$$

met:

$$x = \frac{0.42}{\left(\frac{h}{b}\right)^{1.4}} * \min(\sigma_{My}, \sigma_{Mz})^{0.1 * \left(\frac{h}{b}\right)^{1.3}}, \text{ met } \frac{h}{b} \geq 1$$

De spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf bij dubbele buiging is dus volgens deze formule onder andere afhankelijk van de afmetingen van de doorsnede (b en h), de betondruksterkte f_{ck} , de diameter van de wapeningsstaven $\emptyset$ en de normaalkracht N werkend op de kolom.

De formule brengt echter wel een aantal beperkingen met zich mee. Zo is de formule alleen toepasbaar op rechthoekige doorsnede met enkel hoekwapening en bovendien moet gelden dat:

$$\sigma_{My} \geq 50 \wedge \sigma_{Mz} \geq 50$$

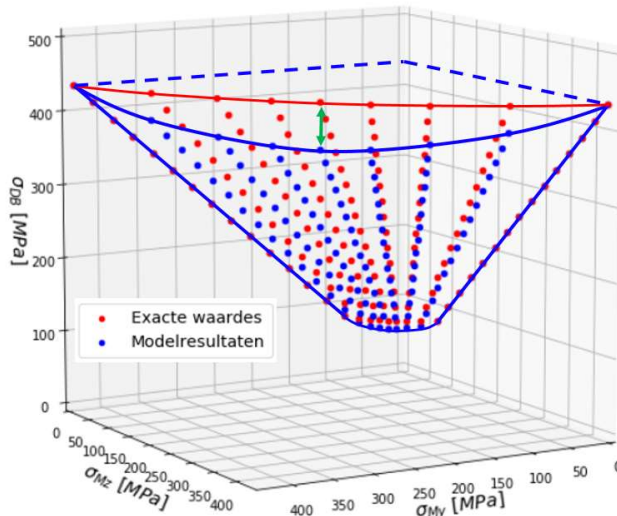
Indien wordt voldaan aan de randvoorwaarde blijft de foutmarge over het algemeen binnen de 20%. Wel geldt dat hoe hoger de spanningen σ_{My} en σ_{Mz} , hoe kleiner de foutmarge.

7.1.2. Basis voor ontwerpformule

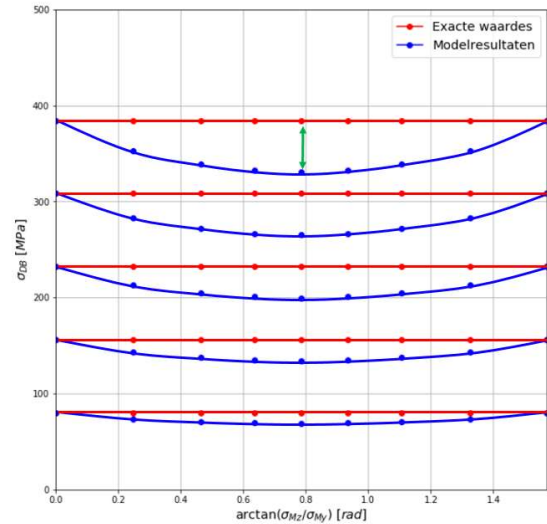
Het eerste deel van de ontwerpformule van O. Harrass wordt gezien als de ondergrens-formule. Er geldt namelijk dat de spanningen berekend met de ondergrens-formule nooit hoger zullen zijn dan de werkelijke spanningen. In de figuren 36 en 37 is dit goed te zien. De figuren geven de resultaten weer van een willekeurige doorsnede. De blauwe punten zijn berekend met de ondergrens-formule:

$$\sigma_{ondergrens} = \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

De rode punten daarentegen zijn de werkelijke resultaten. Uiteindelijk is het doel om een formule te ontwikkelen waardoor de blauwe punten zo dicht mogelijk bij deze rode punten komen te liggen. Maar als basis vormt de ondergrens-formule zeker een mooie benadering.



Figuur 36: 3D-weergave modelresultaten



Figuur 37: 2D-weergave modelresultaten

Wat verder gelijk opviel bij het analyseren van de resultaten was de sinus-vorm die het verschil tussen de werkelijke resultaten en de modelresultaten beschrijft. Vooral in figuur 37 is dit goed te zien. Op de horizontale as is de hoek tussen de resultante van de spanningen (σ_{My} en σ_{Mz}) en de horizontale y-as uitgezet. De verticale as geeft de waarde voor σ_{DB} weer. De amplitude van de sinus-vorm neemt toe bij het toenemen van deze spanning σ_{DB} . Daarom is er gekozen voor een formule in de volgende vorm:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

waar:

$$\alpha_\sigma = \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My})$$

Deze formule zal de basis vormen voor de uiteindelijke ontwerpformule. Vanuit deze basis zal namelijk worden gezocht naar de meeste optimale formule.

7.2. Parameterstudie

Net als bij de ULS parameterstudie, zullen ook hier niet alle parameters worden onderzocht. De parameters die wel onder de loep worden genomen, zijn de volgende:

- N-ratio
- Afmetingen doorsnede
- Druksterkte beton
- Wapeningspercentage
- Wapeningsconfiguratie

Het N-ratio is nog niet eerder voorgekomen in dit rapport. Dit ratio kan worden vergeleken met het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio in het ULS onderzoek. Het verschil zit hem in het weglaten van de materiaalfactoren. Er wordt nu namelijk niet gerekend met rekenwaarde van een bepaalde parameter, maar met de karakteristieke waarde. Het ratio kan als volgt worden gedefinieerd:

$$N\text{-ratio} = N/N_k$$

waar:

N optredende normaalkracht op kolom [kN]

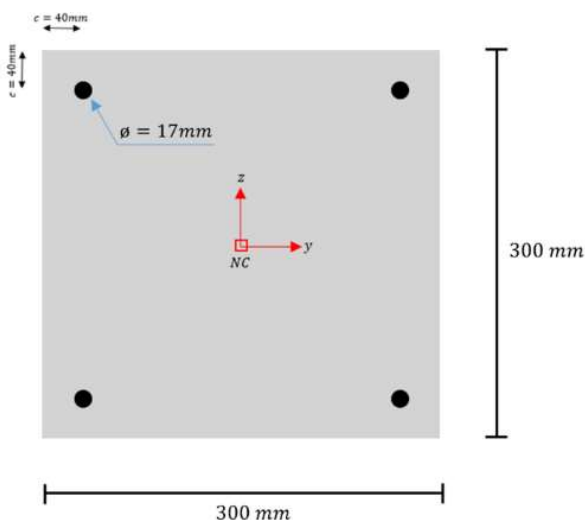
N_k karakteristieke waarde voor normaalkrachts capaciteit kolom [kN]

Aan de hand van de volgende formule kan deze N_k worden berekend:

$$N_k = \frac{(b * h * f_{ck}) + (4 + 2 * (m + n)) * \left(\frac{1}{4} * \pi * \phi^2\right) * f_{yk}}{1,000}$$

Dit lijkt een hele ingewikkelde formule, maar in principe is die zeer eenvoudig. Het is niets meer dan het bruto oppervlakte van het beton vermenigvuldigt met de karakteristieke druksterkte plus de oppervlakte van het totaal aantal wapeningsstaven maal de karakteristieke vloeispanning van het wapeningsstaal.

De verschillende parameters zullen vanuit een standaard waarde worden gevarieerd. De standaard waarden voor de doorsnede en materiaal gerelateerde parameters zijn hieronder gegeven.



Standaard waarden:

- $c = 40 \text{ mm}$
- $b = h = 300 \text{ mm}$
- $m = n = 0$
- $\phi = 17 \text{ mm} \rightarrow \rho_l = 1.0 \%$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

Figuur 38: Standaard doorsnede (SLS)

7.2.1. *N*-ratio

Als eerst zal het *N*-ratio onder de loep worden genomen. Net zoals bij de ULS parameterstudie, zullen de overige parameters niet afwijken van de standaard waarden, tenzij dit wordt aangegeven. De volgende *N*-ratio's worden in beschouwing genomen:

- *N*-ratio = 0.000 → $N = 0.0 \text{ kN}$
- *N*-ratio = 0.025 → $N = 78.9 \text{ kN}$
- *N*-ratio = 0.050 → $N = 157.7 \text{ kN}$
- *N*-ratio = 0.075 → $N = 236.6 \text{ kN}$

De waarden voor *N* zijn berekend voor de standaard doorsnede uit figuur 38. Wat opvalt is dat de *N*-ratio's vrij laag zijn. Dit heeft te maken met het voorkomen van drukspanningen in de wapeningsstaven. Wanneer bij een situatie met dubbele buiging namelijk een relatief grote normaalkracht aanwezig is, kan het zijn dat in alle wapeningsstaven drukspanningen aanwezig zijn. Aangezien dit onderzoek over trekspanningen gaat, moet dit te allen tijde worden vermeden.

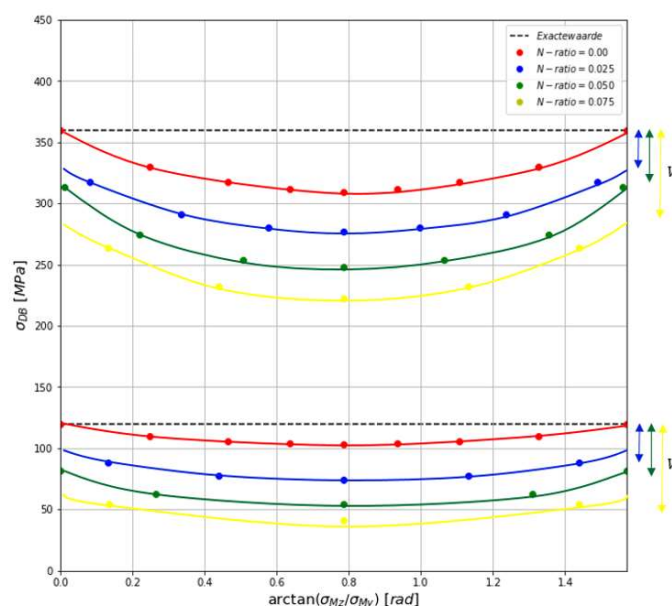
In figuur 39 zijn voor de verschillende *N*-ratio's de modelresultaten geplot. De gestreepte zwarte lijnen representeren de exacte ingevoerde waarden voor ε_{DB} . Om de weergave overzichtelijk te houden, zijn er slechts twee waarden gebruikt:

- $\varepsilon_{DB} = 0.6 \text{ ‰} \rightarrow \sigma_{DB} = 120 \text{ N/mm}^2$
- $\varepsilon_{DB} = 1.8 \text{ ‰} \rightarrow \sigma_{DB} = 360 \text{ N/mm}^2$

De resultaten in de figuur zijn gevonden met ondergrens-formule. Het *N*-ratio is namelijk de eerste parameter die is onderzocht, daarom zijn er nog geen functies gevonden voor de factoren *V* en *W*, deze zijn dus nog gelijk aan 0. Dit resulteert in de ondergrens-formule:

$$V = W = 0 \rightarrow \sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} = \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

Het vinden van een functie voor zowel *V* als *W*, moet er uiteindelijk voor zorgen dan de resultaten gevonden met de ontwerpformule zo dicht mogelijk bij de exacte waarden komen te liggen.



Figuur 39: Resultaten (parameter: *N*-ratio)

Wat meteen opvalt is dat bij $\alpha_\sigma = 0$ en $\alpha_\sigma = 0.5\pi$ de verschillen tussen de modelresultaten en de exacte waarden toenemen bij een toenemend N -ratio. Dit is aan de zijkant van het figuur met de gekleurde pijlen en de letter V aangegeven. De basis voor de ontwerpformule is namelijk:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

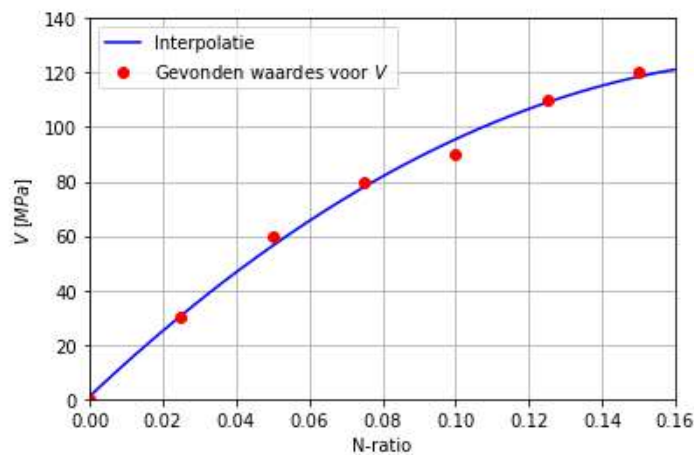
Maar bij $\alpha_\sigma = 0$ en $\alpha_\sigma = 0.5\pi$ is de sinus gelijk aan 0, dit heeft tot gevolg dat de factor W in zijn geheel wegvalt:

$$\sin(2 * 0) = \sin(2 * 0.5\pi) = 0 \rightarrow \sigma_{DB} = V + \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

De verschillen tussen de exacte waarden en de modelresultaten bij $\alpha_\sigma = 0$ en $\alpha_\sigma = 0.5\pi$ kunnen dus enkel worden geminimaliseerd door het optimaliseren van de factor V .

Tabel 8

N -ratio	V [MPa]
0.000	0
0.025	30
0.050	60
0.075	80
0.100	90
0.125	110
0.150	120



Figuur 40: Waarde voor V als functie van N -ratio

Na onderzoek zijn voor V de waarden gevonden uit tabel 8. De grafiek in figuur 40 betreft de onderstaande functie en is gevonden aan de hand van het toepassen van de 'least square error'-methode op een tweedegraads polynoom:

$$V = 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio}^2$$

De voorlopige ontwerpformule voor σ_{DB} ziet er nu als volgt uit:

$$\sigma_{DB} = \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} + V$$

waar:

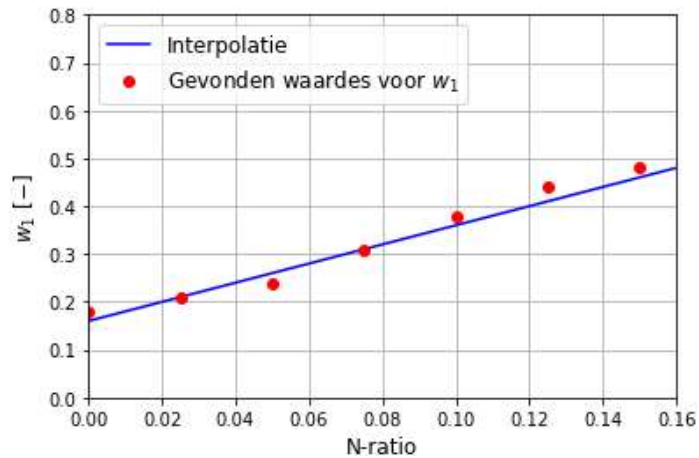
$$\alpha_\sigma = \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My})$$

$$V = 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio}^2$$

De resultaten die worden gevonden met de bovenstaande formule zijn weergegeven in figuur 42 op de volgende pagina. Wat betreft de input is er niks veranderd vergeleken met de resultaten uit figuur 39. Zoals goed is te zien, heeft de factor V er inderdaad voor gezorgd dat de modelresultaten zo goed als overeenkomen met de exacte waarden bij $\alpha_\sigma = 0$ en $\alpha_\sigma = 0.5\pi$, ongeacht de waarde voor het N -ratio. Het enige wat nu nog resteert is het vinden van een functie voor W , zodat alle modelresultaten zo dicht mogelijk bij de exacte waarden komen te liggen, ongeacht de waarden voor het N -ratio en α_σ .

Tabel 9

N-ratio	w_1 [-]
0.000	0.18
0.025	0.21
0.050	0.24
0.075	0.31
0.100	0.38
0.125	0.44
0.150	0.48

Figuur 41: Waarde voor w_1 als functie van N-ratio

Na onderzoek zijn voor w_1 de waarden gevonden uit tabel 9. In figuur 41 zijn deze waarden geplott en is er aan de hand van deze waarden een lineaire interpolatie gemaakt. De volgende functie werd gevonden:

$$w_1 = 0.16 + 2 * ratio$$

De voorlopige ontwerpformule voor σ_{DB} ziet er nu als volgt uit:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

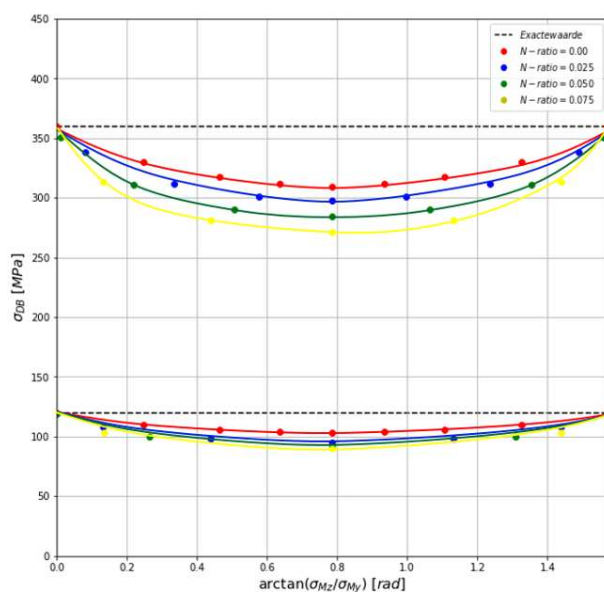
waar:

$$\alpha_\sigma = \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My})$$

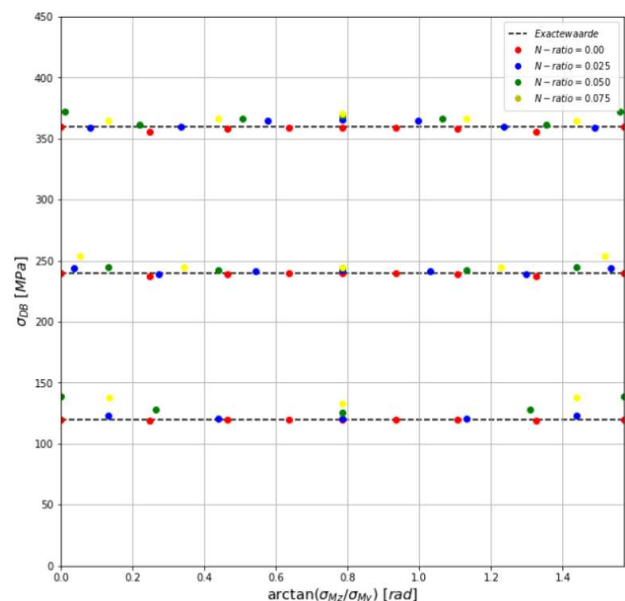
$$V = 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio}^2$$

$$W = w_1 = 0.16 + 2 * ratio$$

Dit levert vervolgens zeer exacte resultaten op. Deze zijn in figuur 43 weergegeven. De modelresultaten zijn zo goed als gelijk aan de exacte waarden. Dit is



Figuur 42: Resultaten V (parameter: N-ratio)

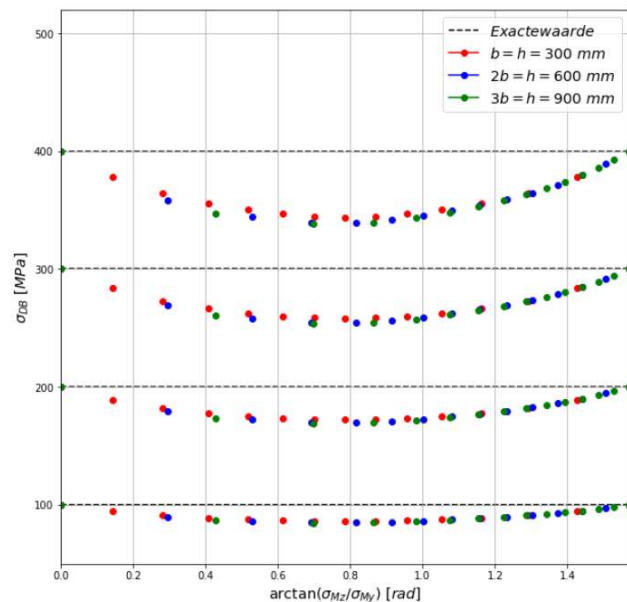
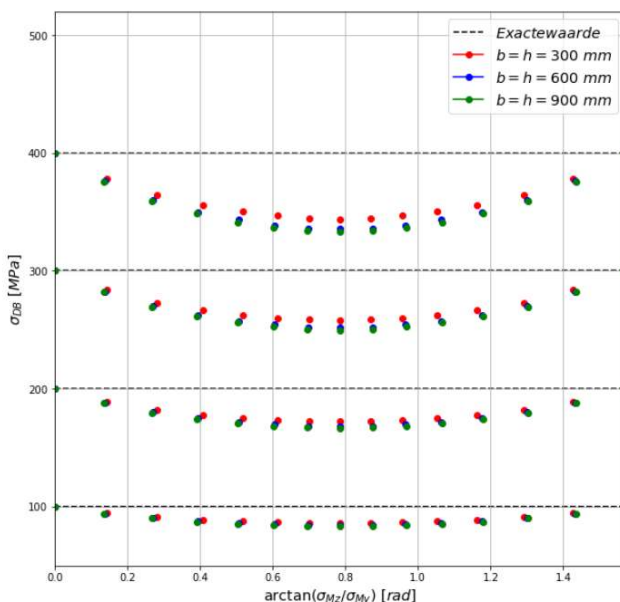
Figuur 43: Resultaten V+ w_1 (parameter: N-ratio)

7.2.2. Afmetingen doorsnede

In het ULS onderzoek bleken de afmetingen van een doorsnede nauwelijks invloed uit te oefenen op de kromming van de momentcapaciteit-curve. Of de afmetingen wel invloedrijk zijn in het SLS onderzoek, zal in deze paragraaf blijken. Naast de afmetingen van de doorsnede worden er verder geen andere parameters aangepast. Enkel de diameter van de wapeningsstaven zal variëren om het wapeningspercentage constant te houden (zie 6.2.1.). De onderstaande doorsneden zijn onderzocht:

- $b = 300 \text{ mm} ; h = 300 \text{ mm}$ (standaard doorsnede)
- $b = 300 \text{ mm} ; h = 600 \text{ mm}$
- $b = 300 \text{ mm} ; h = 900 \text{ mm}$
- $b = 600 \text{ mm} ; h = 600 \text{ mm}$
- $b = 900 \text{ mm} ; h = 900 \text{ mm}$

Ondanks dat in de vorige paragraaf functies zijn gevonden voor de factoren V en W , is voor het vinden van de resultaten de ondergrens-formule gebruikt. Op deze manier is het duidelijker te zien of de resultaten van de verschillende doorsneden van elkaar afwijken of niet.



Figuur 44: Resultaten (parameter: afmetingen (1)) Figuur 45: Resultaten (parameter: afmetingen (2))

In beide figuren representeren de rode punten de standaard doorsnede ($b = h = 300 \text{ mm}$). Aangezien de resultaten in zowel figuur 44 als in figuur 45 sterk overeenkomen, kan worden geconcludeerd dat de afmetingen van de doorsnede geen invloed hebben op de waarde van de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf bij dubbele buiging.

Deze observatie is zeer interessant, aangezien de afmetingen van de doorsnede wel terugkomen in de ontwerpformule van O. Harrass. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de manier waarop de parameterstudie is uitgevoerd. In dit onderzoek is het wapeningspercentage te allen tijde constant gehouden bij het variëren van de afmetingen. In tegenstelling tot het eerdere onderzoek, waar de diameter van de wapeningsstaven constant bleef.

7.2.3. Druksterkte beton

In tegenstelling tot het ULS onderzoek, wordt er in het SLS onderzoek gewerkt met karakteristieke waarden voor de betondruksterkte. De volgende druksterkte zijn met het model gecheckt:

- $f_{ck} = 10 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$

Niet alle waarden kunnen worden gekoppeld aan werkelijke betonsterkteklassen. Maar voor het gemak zijn mooie getallen genomen met een gelijke stapgrootte. In figuur 46 zijn de resultaten weergegeven. De resultaten zijn nu niet berekend met de ondergrens-formule, maar met de voorlopige ontwerpformule zoals die hieronder is geformuleerd:

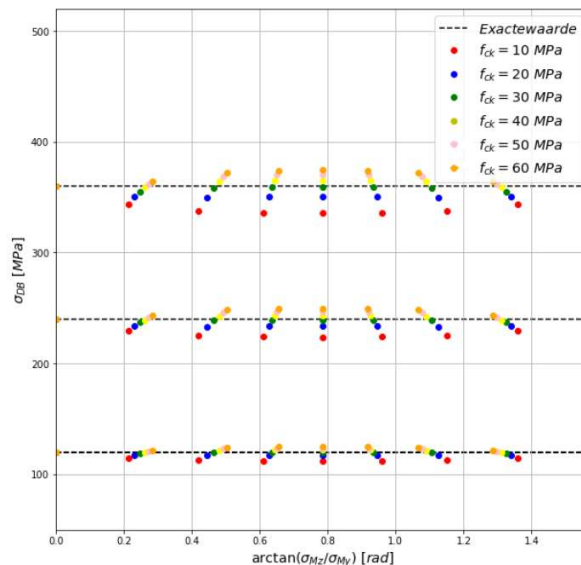
$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

waar:

$$\alpha_\sigma = \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My})$$

$$V = 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio}^2$$

$$W = w_1 = 0.16 + 2 * ratio$$

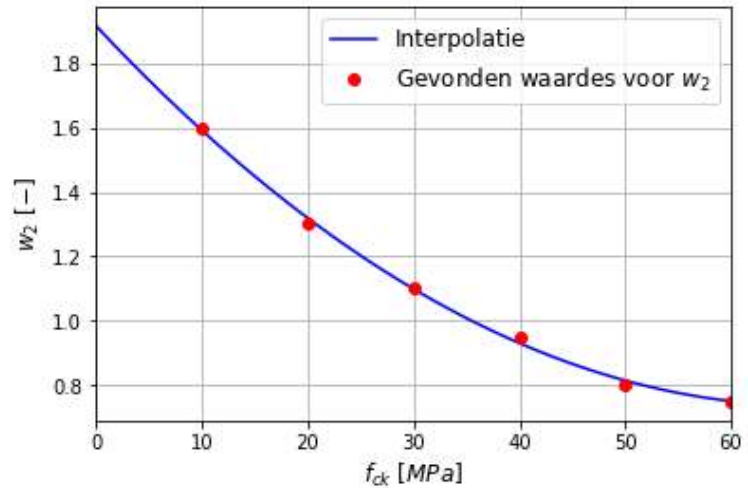


Figuur 46: Resultaten $V+w_1$ (parameter: druksterkte)

De betondruksterkte blijkt zeker een belangrijke rol te spelen. De resultaten van geteste druksterktes komen weliswaar overeen wanneer $\alpha_\sigma = 0$ of wanneer $\alpha_\sigma = 0.5\pi$, maar zo te zien varieert de amplitude van de sinus-vorm wel. De betondruksterkte f_{ck} zal dus verder geen invloed hebben op de factor V , maar zeker wel op de factor W .

Tabel 10

f_{ck} [MPa]	w_2 [-]
10	1.60
20	1.30
30	1.10
40	0.95
50	0.80
60	0.75

Figuur 47: Waarde voor w_2 als functie van f_{ck}

Na onderzoek zijn voor w_2 de waarden gevonden uit tabel 10. In figuur 47 zijn deze waarden geplott en is er wederom een interpolatie gemaakt. De volgende functie is gevonden:

$$w_2 = 1.90 - 3.50 \cdot 10^{-2} \cdot f_{ck} + 2.60 \cdot 10^{-4} \cdot f_{ck}^2$$

De voorlopige formule voor σ_{DB} ziet er nu als volgt uit:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W \cdot \sin(2\alpha_\sigma)) \cdot \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

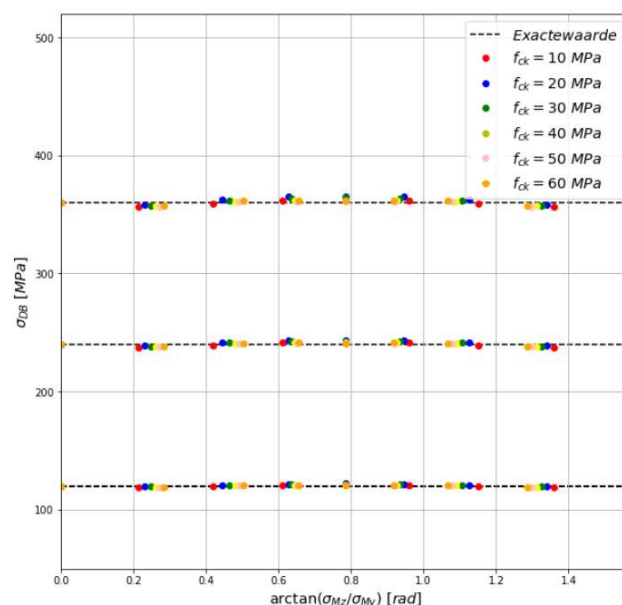
waar:

$$\alpha_\sigma = \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My})$$

$$V = 1,250 \cdot N\text{-ratio} - 3,250 \cdot N\text{-ratio}^2$$

$$W = w_1 \cdot w_2$$

Dit levert vervolgens zeer exacte resultaten op. Deze zijn in figuur 48 weergegeven. De punten liggen zeer dichtbij de bijbehorende exacte waarde.

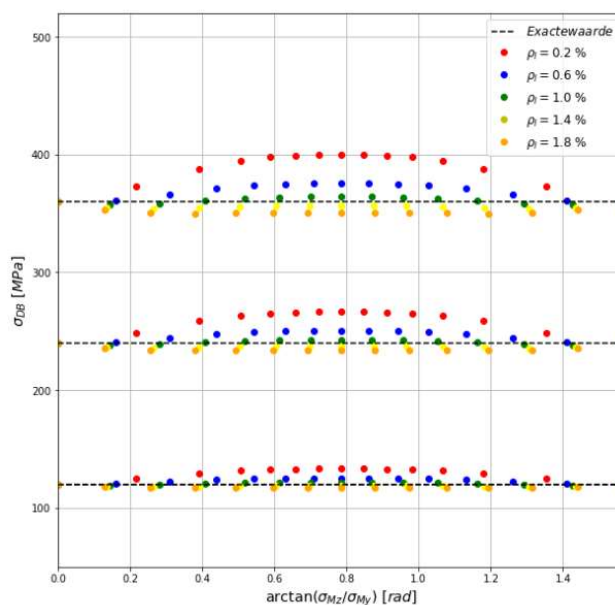
Figuur 48: Resultaten $V+w_1+w_2$ (parameter: druksterkte)

7.2.4. Wapeningspercentage

Net als bij de ULS parameterstudie, is er gevarieerd met het wapeningspercentage. Verschillende doorsneden zijn onderzocht met de volgende wapeningspercentages:

- $\rho_l = 0.2\%$
- $\rho_l = 0.6\%$
- $\rho_l = 1.0\%$
- $\rho_l = 1.4\%$
- $\rho_l = 1.8\%$

Of de wapeningspercentages verder voldoen aan de normen voor het minimale en maximale percentage toegepaste wapening doet er verder niet toe. In figuur 49 zijn de resultaten van de verschillende doorsneden weergegeven. De punten zijn geplot aan de hand van de voorlopige formule zoals die is gegeven aan het einde van de vorige paragraaf.

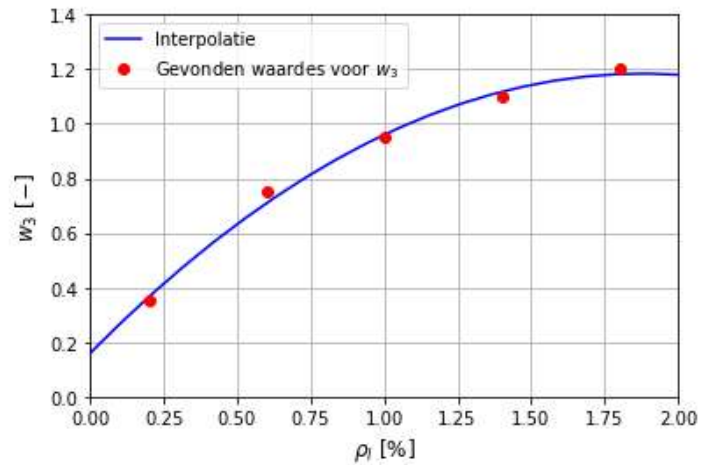


Figuur 49: Resultaten V+w₁+w₂ (parameter: wapeningspercentage)

Eigenlijk geldt voor het wapeningspercentage hetzelfde verhaal als voor de betondruksterkte. De resultaten bij de verschillende wapeningspercentages komen namelijk overeen wanneer $\alpha_\sigma = 0$ of wanneer $\alpha_\sigma = 0.5\pi$, maar de amplitude van de sinus-vorm varieert wel degelijk. Ook het wapeningspercentage ρ_l zal dus enkel invloed hebben op de factor W .

Tabel 11

ρ_l [%]	w_3 [-]
0.2	0.35
0.6	0.75
1.0	0.95
1.2	1.10
1.4	1.20

Figuur 50: Waarde voor w_3 als functie van ρ_l

De waarden die zijn gevonden voor w_3 , zijn te vinden in tabel 11. Bovendien deze punten geplott in figuur 50, net zoals de interpolatie van deze punten. De interpolatie betreft de volgende functie:

$$w_3 = 0.16 + 1.09 * \rho_l - 0.29 * \rho_l^2$$

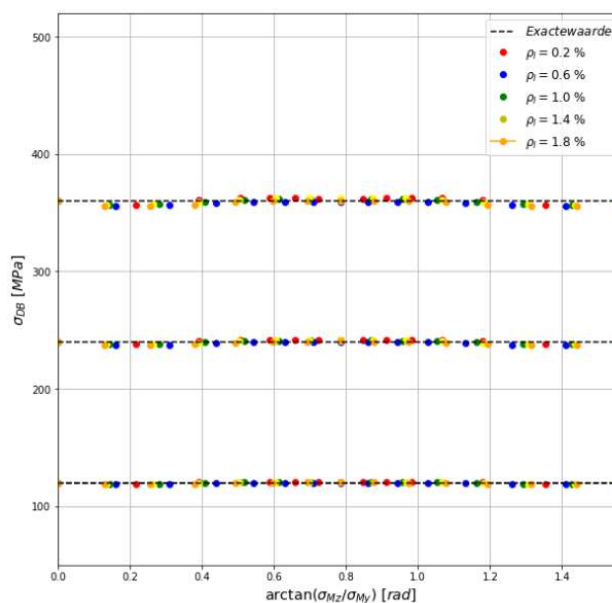
De functie voor σ_{DB} ziet er nu als volgt uit:

$$\sigma_{DB} = V + (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2}$$

waar:

$$\begin{aligned}\alpha_\sigma &= \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My}) \\ V &= 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio}^2 \\ W &= w_1 * w_2 * w_3\end{aligned}$$

De resultaten zijn in figuur 51 weergegeven. De punten waarden berekend met de ontwerpformule liggen allen zeer dicht bij de exacte waarden.

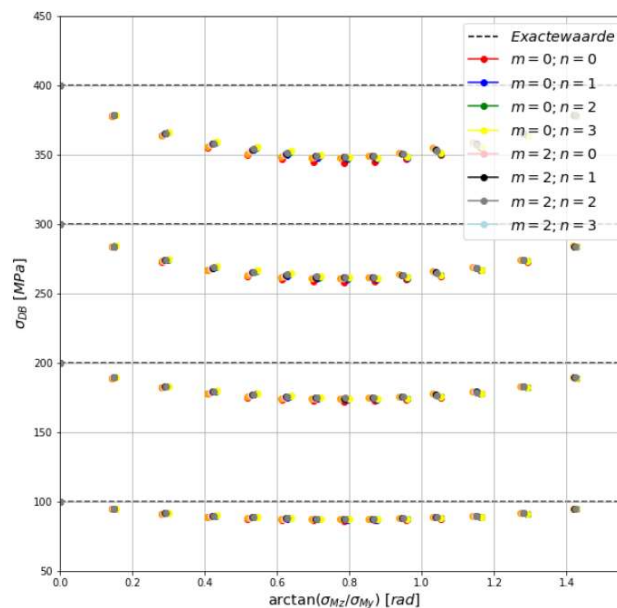
Figuur 51: Resultaten $V+w_1+w_2+w_3$ (parameter: wapeningspercentage)

7.2.5. Wapeningsconfiguratie

De ontwerpformule van O. Harrass is alleen toepasbaar op rechthoekige doorsneden met enkel hoekwapening. Van de nieuwe ontwerpformule wordt verwacht dat deze toepasbaar is op elke willekeurige rechthoekige doorsnede, ongeacht de wapeningsconfiguratie. Daarom worden wederom verschillende wapeningsconfiguraties getest om te achterhalen of deze parameter invloed heeft op de resultaten. De volgende varianten zijn onderzocht:

- $m = 0 ; n = 0,1,2,3$
- $m = 2 ; n = 0,1,2,3$

De resultaten van alle doorsneden zijn te zien in figuur 52. Alle punten zijn overigens geplot aan de hand van de ondergrens-formule.



Figuur 52: Resultaten (parameter: wapeningsconfiguratie)

In tegenstelling tot het ULS onderzoek blijkt de wapeningsconfiguratie hier klaarblijkelijk niet voor verschillen te zorgen. Alle punten liggen zo goed als over elkaar heen.

7.3. Definitieve ontwerpformule (SLS)

Alle parameters zijn onderzocht en in de ontwerpformule terug te vinden indien ze van invloed zijn. De afmetingen van de doorsnede (b en h), de diameter en de normaalkracht N zijn niet meer terug te vinden in de verbeterde ontwerpformule. Uit de parameterstudie is gebleken dat de afmetingen van de doorsnede nauwelijks van invloed zijn. De reden dat deze parameter wel in de oude ontwerpformule is verwerkt, heeft waarschijnlijk te maken met de manier van aanpak.

Verder is de ontwerpformule nog iets veranderd om de nauwkeurigheid van de formule te optimaliseren. De factor w_1 is als volgt aangepast:

$$w_1 = 0.16 + 2 * N\text{-ratio} \rightarrow w_1 = 0.16 + \omega * \frac{f_{ck}}{50} * N\text{-ratio}$$

Hierin is de factor ω afhankelijk van het wapeningspercentage ρ_l . Hoe deze factor bepaald kan worden, wordt duidelijk in de paragraaf 7.3.1. In deze paragraaf zal de ontwerpformule in zijn totaliteit worden gegeven. In paragraaf 7.3.2. wordt vervolgens de nauwkeurigheid van de ontwerpformule behandeld.

7.3.1. Ontwerpformule

Uit de parameterstudie is naar voor gekomen dat het N -ratio, de betondruksterkte f_{ck} en het wapeningspercentage ρ_l invloed hebben op

Alle parameters zijn onderzocht

$$\sigma_{DB} = (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} + V$$

waar:

$$\begin{aligned}\alpha_\sigma &= \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My}) \\ V &= 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio} \\ W &= w_1 * w_2 * w_3\end{aligned}$$

met:

$$\begin{aligned}w_1 &= 0.16 + \omega * \frac{f_{ck}}{50} * N\text{-ratio} \\ w_2 &= 1.90 - 3.50 * 10^{-2} * f_{ck} + 2.60 * 10^{-4} * f_{ck}^2 \\ w_3 &= 0.16 + 1.09 * \rho_l - 0.29 * \rho_l\end{aligned}$$

voor ω geldt:

ρ_l	0.0 %	0.4 %	0.8 %	≥ 1.4 %
ω	84	15	3	1

Bij het bepalen van ω voor tussengelegen waarden van het wapeningspercentage ρ_l mag lineaire interpolatie worden toegepast.

7.3.2. Nauwkeurigheid

Ook voor deze ontwerpformule zijn controles uitgevoerd. En weer lijken de resultaten berekend met de ontwerpformule aardig overeen te komen met de werkelijke resultaten. In bijlage D t/m G zijn de controle resultaten te vinden voor een aantal willekeurige doorsneden. De resultaten zijn wederom zowel grafisch verwerkt als in een tabel.

Tabel 12 geeft een deel van de resultaten weer ter verduidelijking. In de kolommen 4 en 5 zijn de waarden te vinden voor respectievelijk σ_{My} en σ_{Mz} . In kolom 7 zijn vervolgens de uiteindelijke gevonden waarden te vinden voor σ_{DB} , deze zijn berekend met de ontwikkelde ontwerpformule. Kolom 6 bevat de werkelijke waarde voor deze spanning. Hoe dichterbij de waarde uit kolom 7 ligt bij de waarde uit kolom 6, hoe nauwkeuriger de berekening van de ontwerpformule is. Ten slotte zijn in kolom 8 de foutmarges van de berekeningen gegeven.

Tabel 12

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
317.24	22.65	22.65	1.26	1.26	60.0	70.74	17.9
317.24	36.99	26.57	56.71	12.56	140.0	156.77	11.98
317.24	32.11	32.11	33.75	33.75	140.0	128.27	8.38
317.24	26.57	36.99	12.56	56.71	140.0	156.77	11.98
317.24	48.5	25.03	120.98	7.76	200.0	217.64	8.82
317.24	43.69	31.94	92.86	33.03	200.0	206.76	3.38
317.24	38.22	38.22	63.02	63.02	200.0	204.11	2.06
317.24	31.94	43.69	33.03	92.86	200.0	206.76	3.38
317.24	25.03	48.5	7.76	120.98	200.0	217.64	8.82
317.24	55.51	29.21	164.05	21.92	260.0	268.97	3.45
317.24	50.04	37.07	130.23	57.09	260.0	261.08	0.42
317.24	43.99	43.99	94.55	94.55	260.0	259.95	0.02
317.24	37.07	50.04	57.09	130.23	260.0	261.08	0.42
317.24	29.21	55.51	21.92	164.05	260.0	268.97	3.45
317.24	70.61	24.45	261.35	6.06	340.0	356.98	4.99
317.24	64.59	34.61	222.04	45.09	340.0	341.37	0.4
317.24	34.61	64.59	45.09	222.04	340.0	341.37	0.4
317.24	24.45	70.61	6.06	261.35	340.0	356.98	4.99

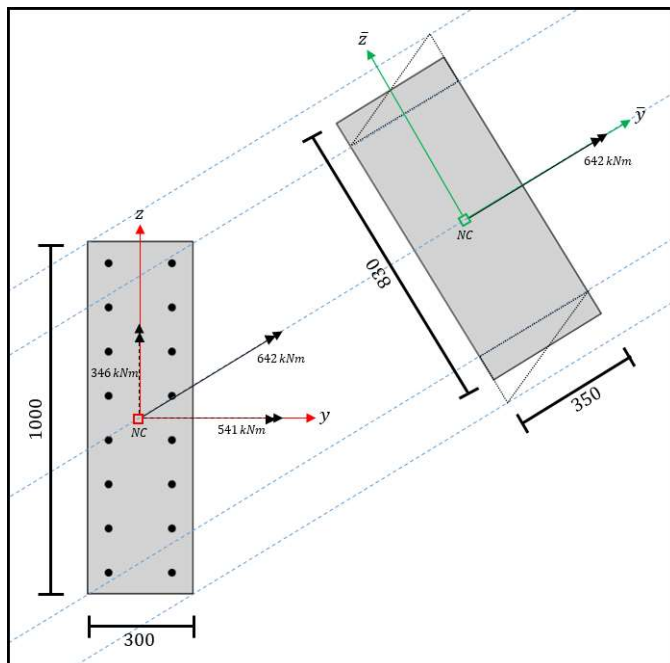
De foutmarge blijkt over het algemeen ruim binnen de 20% te liggen. Vooral bij lage waarden voor het N -ratio zijn de resultaten zeer nauwkeurig. In tegenstelling tot de formule van O. HARRAS kan deze ontwerpformule op elke willekeurige rechthoekige doorsnede worden toegepast. Verder hoeft ook niet te gelden dat $\sigma_{My} \geq 50 \wedge \sigma_{Mz} \geq 50$. Echter zijn de uitkomsten van de formule nauwkeuriger indien wordt voldaan aan deze voorwaarde, maar het is niet noodzakelijk.

8 Case Ingenieursbureau

Het laatste deel van het onderzoek heeft betrekking op de case van een anoniem ingenieursbureau. Het bureau heeft op basis van berekeningen met een zelf ontwikkelde methode (DTM), aangenomen dat een bepaalde kolom voldoet bij een specifieke belasting combinatie. Of deze aanname correct is, zal in dit hoofdstuk worden gecontroleerd. De introductie en controle van de case zijn te vinden in respectievelijk paragraaf 8.1. en 8.2.

8.1. Case introductie

De case betreft een kolom belast met buiging om beide hoofdassen, zoals te zien in figuur 53. De sterkteklasse van het beton is C53/65 en de kolom omvat 16 wapeningsstaven met een diameter van 16 mm. De waarden van de verschillende doorsnede parameters en de rekenwaarden voor de belasting op de kolom zijn hieronder gegeven.



Parameter waarden:

- $c = 46 \text{ mm}$
- $b = 300 \text{ mm}; h = 1,000 \text{ mm}$
- $m = 0; n = 6$
- $\phi = 16 \text{ mm}$
- $\varepsilon_{c3} = 1.80 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu3} = 3.10 \text{ ‰}$
- $f_{cd} = 53/1.5 = 35.3 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

Belasting:

- $N_{Ed} = 2,814 \text{ kN}$
- $M_{Ed,y} = 346 \text{ kNm}$
- $M_{Ed,z} = 541 \text{ kNm}$

Figuur 53: Case ingenieursbureau

Het ingenieursbureau suggereert dat kolom belast met de aangegeven belasting moet voldoen. Zij hebben hun berekening gemaakt aan de hand van de door hun zelf bedachte 'doorsnede-transformatie methode'. In de komende paragraaf zal duidelijk worden of de kolom inderdaad voldoet.

8.2. Controle DTM

Nu de case duidelijk is hoeft deze enkel nog gecontroleerd te worden. In eerste instantie zal worden gecontroleerd met het voorschrift uit de Eurocode, zoals deze is beschreven in hoofdstuk 3. Vervolgens zal er een controle zijn aan de hand van de modelresultaten.

Voor de berekeningen zijn de waarden voor beide weerstandsmomenten essentieel. Uit het model blijkt dat bij een normaalkracht $N_{Ed} = 2,814 \text{ kN}$ de weerstandsmomenten gelijk zijn aan (figuur 53):

$$\begin{aligned}M_{Rd,y} &= 445 \text{ kNm} \\M_{Rd,z} &= 1379 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Uit de controles zal blijken hoe nauwkeurig de methode is en dus met andere woorden, hoe betrouwbaar deze is.

8.2.1. Eurocode

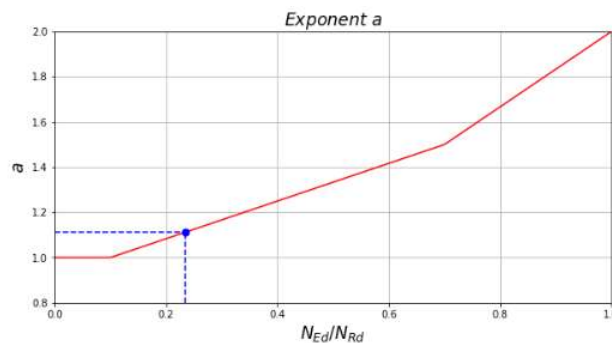
De weerstandsmomenten om beide hoofdasen van de doorsnede bij de gegeven axiale kracht zijn bepaald. Het enige wat nog resteert is het bepalen van de exponent a . De normaalkracht capaciteit van de kolom is als volgt:

$$N_{Rd} = A_c * f_{cd} + A_s * f_{yd} = 300,000 * 35.3 + 16 * \left(\frac{1}{4} * \pi * 16^2\right) * 435 = 12,000 \text{ kN}$$

dit levert een N_{Ed}/N_{Rd} -ratio op van:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{2,814}{12,000} = 0.2345 \rightarrow a = 1.112$$

De waarde voor a die is gevonden door lineaire interpolatie is dus gelijk aan 1.112. Dit is ook nog eens op een grafische manier weergegeven in figuur 54.



Figuur 54: Bepalen van exponent-a (Eurocode)

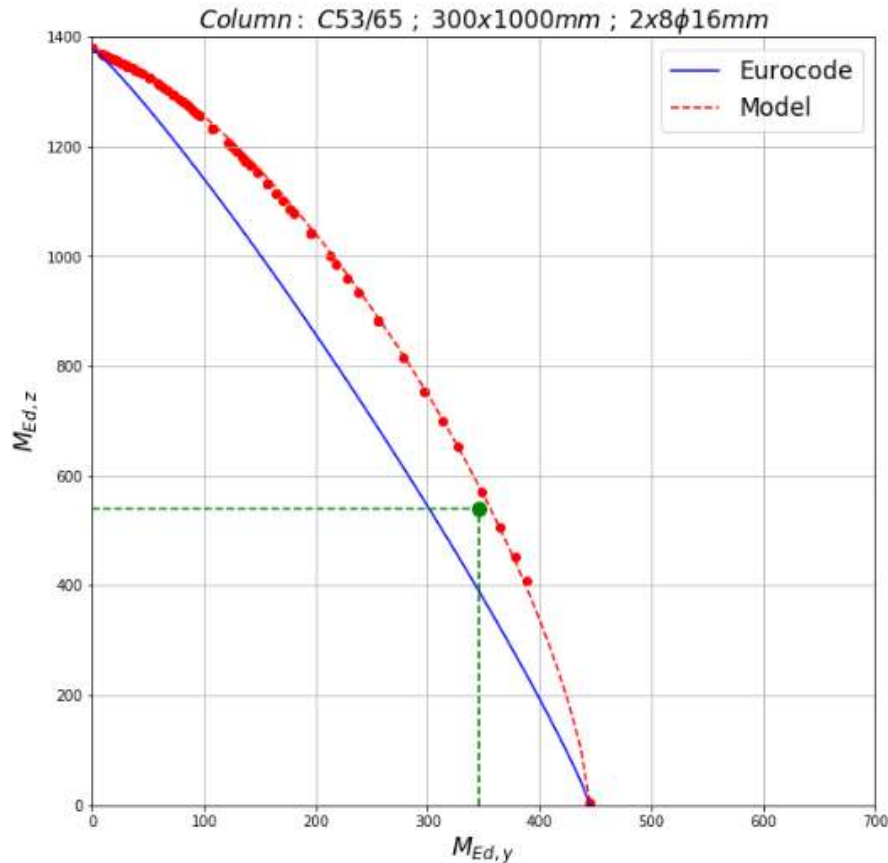
Dit levert de volgende unity check op:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^a = \left(\frac{346}{445}\right)^{1.112} + \left(\frac{541}{1379}\right)^{1.112} = 1.10 > 1$$

De unity check is groter dan 1. Volgens de Eurocode voldoet de kolom dus niet en mag daarom ook niet in de praktijk worden gerealiseerd, indien er geen gedetailleerde doorsnedeberekening wordt gemaakt waarin wordt aangetoond dat de kolom wel voldoet.

8.2.2. Model

In hoofdstuk 4 is aangetoond dat de door het model geproduceerde resultaten nauwkeurig en betrouwbaar zijn. In figuur 55 is de momentcapaciteit-curve door dit model geplot voor de desbetreffende kolom bij een normaalkracht van 2,814 kN. De rode punten representeren de exacte waarden voor de momenten in de uiterste grens toestand voor de kolom, deze zijn berekend door het model. De gestreepte rode lijn is de interpolatie van de werkelijke resultaten.



Figuur 55: Momentcapaciteit-curve case kolom

Dit levert de volgende unity check op:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a = \left(\frac{346}{445} \right)^{1.40} + \left(\frac{541}{1379} \right)^{1.40} = 0.97 < 1$$

De unity check is kleiner dan 1 en dus, na het maken van een nauwkeurige doorsnede-berekening door het model, blijkt de kolom inderdaad te voldoen. Dit is exact wat het ingenieursbureau al eerder suggereerde aan de hand van de berekeningen met de DTM.

9 Conclusie

Het doel van het onderzoek was het ontwikkelen van twee ontwerpformules en het oplossen van een case van een ingenieurbureau. Er zal nu kort voor elke doelstelling worden nagegaan in hoeverre deze is volbracht.

Ontwikkel een ontwerpformule waarmee snel en nauwkeurig een indicatie kan worden verkregen van of een kolom voldoet of niet. Deze moet toepasbaar zijn op elke willekeurige rechthoekige doorsnede en de foutmarge moet binnen de 10% blijven.

Het onderzoek heeft inderdaad geresulteerd in een ontwerpformule waarmee vrij snel en nauwkeurig een indicatie kan worden verkregen van of een kolom voldoet of niet. De formule is een functie van het N_{Ed}/N_{Rd} -ratio, de betondruksterkte f_{cd} , het wapeningspercentage ρ_l en de wapeningsconfiguratie (m en n).

De formule kan in principe toegepast worden op elke willekeurige rechthoekige doorsnede. Echter is de formule niet nauwkeurig voor betonsterkteklassen $> C50/60$. Dit heeft te maken met het veranderen van de waarde voor de stuikrek ε_{cu3} .

Een kolom zou in theorie moeten voldoen indien de ontwerpformule een resultaat geeft dat kleiner of gelijk is aan 1 ($U.C. \leq 1$). Maar aangezien er een zekere foutmarge aanwezig is, mag dit niet met zekerheid worden gezegd. Over het algemeen lijkt de foutmarge binnen de 8% te liggen. Wanneer de ontwerpformule een resultaat geeft van bijvoorbeeld 0.90, kan er dus vanuit worden gegaan dat de kolom zo goed als zeker voldoet. Bij hogere uitkomsten wordt aangeraden om voor de zekerheid een nauwkeurige doorsnede-berekening te maken. Hieronder is de formule nog eenmaal in zijn totaliteit gegeven.

Ontwerpformule (ULS):

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^\alpha$$

waar:

$$\alpha = A + B * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right) + C * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \right)^2$$

met:

$$\begin{aligned} A &= \eta_A * \mu_A * (2.25 - e^{0.53-0.03*f_{cd}} + e^{0.52-1.36*\rho_l}) \\ B &= \eta_B * \mu_B * (-3.59 + e^{1.74-0.03*f_{cd}} - e^{1.71-1.32*\rho_l}) \\ C &= \eta_C * \mu_C * (3.85 - e^{1.52-0.03*f_{cd}} + e^{1.47-1.31*\rho_l}) \end{aligned}$$

Factor η :

Te allen tijde geldt:

	$Min(m,n)=0$	$Min(m,n)=1$	$Min(m,n)>1$
η_A	1.20	1.00	1.10
η_B	1.85	1.10	1.15
η_C	1.75	1.05	1.20

Factor μ :

Indien $m=n$, dan geldt: $\mu_A = \mu_B = \mu_C = 1.00$

Indien $m \neq n$, dan geldt:

	$Min(m,n)=0$	$Min(m,n)=1$	$Min(m,n)>1$
μ_A	0.85	1.05	1.00
μ_B	0.65	1.25	1.00
μ_C	0.65	1.25	1.00

Ontwikkel een ontwerpformule waarmee de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf kan worden bepaald. Deze moet toepasbaar zijn op elke willekeurige rechthoekige doorsnede en de foutmarge moet binnen de 20% blijven.

Het onderzoek heeft ook geresulteerd in een verbeterde ontwerpformule om de spanning in de meest getrokken wapeningsstaaf bij dubbele buiging te bepalen. De ontwikkelde formule is een functie van een aantal verschillende parameters. Zo zijn naast de spanningen bij enkele buiging (σ_{My} en σ_{Mz}), ook het N -ratio, de betondruksterkte f_{ck} en het wapeningspercentage ρ_l van invloed.

Niet alleen is de formule eenvoudiger en nauwkeuriger dan de eerder gevonden ontwerpformule, ook zijn een aantal randvoorwaarde weggefallen. Zo kan de formule worden toegepast op elke willekeurige rechthoekige doorsnede, ongeacht de wapeningsconfiguratie. En bovendien is het niet noodzakelijk dat $\sigma_{My} \geq 50 \text{ N/mm}^2 \wedge \sigma_{Mz} \geq 50 \text{ N/mm}^2$. Wel blijkt de formule een stuk nauwkeuriger indien wordt voldaan aan deze laatste voorwaarde.

De foutmarge van de formule blijkt vaak ruim binnen de 20% te liggen. Sterker nog, de fout blijkt, na het analyseren van de controleresultaten, in de meeste gevallen kleiner te zijn dan 10%. De marge is over het algemeen groter bij een hoog N -ratio. Hieronder is de formule nog eenmaal in zijn totaliteit gegeven.

Ontwerpformule (SLS):

$$\sigma_{DB} = (1 + W * \sin(2\alpha_\sigma)) * \sqrt{\sigma_{My}^2 + \sigma_{Mz}^2} + V$$

waar:

$$\begin{aligned}\alpha_\sigma &= \tan^{-1}(\sigma_{Mz}/\sigma_{My}) \\ V &= 1,250 * N\text{-ratio} - 3,250 * N\text{-ratio} \\ W &= w_1 * w_2 * w_3\end{aligned}$$

met:

$$\begin{aligned}w_1 &= 0.16 + \omega * \frac{f_{ck}}{50} * N\text{-ratio} \\ w_2 &= 1.90 - 3.50 * 10^{-2} * f_{ck} + 2.60 * 10^{-4} * f_{ck}^2 \\ w_3 &= 0.16 + 1.09 * \rho_l - 0.29 * \rho_l\end{aligned}$$

voor ω geldt:

ρ_l	0.0 %	0.4 %	0.8 %	≥ 1.4 %
ω	84	15	3	1

Bij het bepalen van ω voor tussengelegen waarden van het wapeningspercentage ρ_l mag lineaire interpolatie worden toegepast.

Hoe betrouwbaar is 'doorsnede-transformatie methode' en voldoet de kolom uit de case ook daadwerkelijk?

Voor kolom uit de case heeft het model alle mogelijke combinaties van momenten bepaald bij de gegeven normaalkracht. De unity check was als volgt:

$$U.C. = \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^a = \left(\frac{346}{445}\right)^{1.40} + \left(\frac{541}{1379}\right)^{1.40} = 0.97 < 1$$

De doorsnedecheck bleek dus inderdaad te voldoen. Het ingenieursbureau heeft terecht de conclusie getrokken dat de kolom voldoet onder de gegeven belasting.

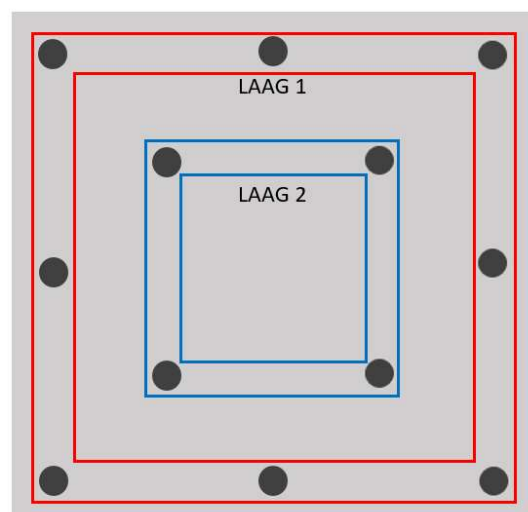
10 Discussie

Zowel het ULS model als het SLS model gaan uit van onder andere de hypothese van Bernoulli en de wet van Hooke. Volgens Bernoulli mag worden aangenomen dat alle doorsneden na vervorming vlak blijven. Aangezien beton bij een geringe trekspanning scheurt, zal de doorsnede van een betonnen kolom bij buiging niet helemaal vlak blijven. Voor een volgend onderzoek zou dit wellicht interessant zijn.

Hooke beweert dat de lengteverandering in een vezel recht evenredig is met de spanning in die vezel. Voor zowel beton als het wapeningsstaal werden de bi-lineaire spannings-rekdiagrammen aangenomen. Verder werd ervan uitgegaan dat beton geen trekspanningen opneemt. Over het algemeen zullen deze aannames zeer terecht zijn. De resultaten zullen misschien enkele procenten afwijken van de resultaten wanneer de realistische spannings-rekdiagrammen worden toegepast.

Verder is er geen rekening gehouden met andere onderdelen binnen een kolom die wellicht van invloed zouden kunnen zijn. De dwarswapening in een kolom zou bijvoorbeeld invloed kunnen hebben op de momentcapaciteit van de kolom, ook al is de verwachting dat deze invloed minimaal is. Bovendien is ook aangenomen dat de wapeningsstaven zich enkel in één laag bevinden, terwijl dit niet altijd het geval is. In figuur 56 is hier een voorbeeld van gegeven. Maar ook deze invloed wordt zeer klein verwacht. Wapeningsstaven in de buitenste laag leveren ten eerste meer bijdrage aan de momenten in de doorsnede en ten tweede omvatten de buitenste lagen vaak ook meer wapeningsstaven.

Ten slotte gaat het model ervan uit dat elke wapeningsstaaf dezelfde diameter heeft, ook dit is niet altijd het geval. Wat betreft de ULS ontwerpformule zou dit nog wel eens voor verschillen in resultaten kunnen zorgen. De formule is namelijk onder andere een functie van de wapeningsconfiguratie (m en n). Een doorsnede waarvan de wapeningsstaven onderling van diameter verschillen zou fysisch gezien een andere wapeningsconfiguratie kunnen hebben dan deze in theorie heeft. Wanneer bijvoorbeeld de hoekwapeningsstaven een veel grotere diameter hebben dan de tussenliggende wapeningsstaven, kan de wapeningsconfiguratie wellicht beter worden beschouwd als enkel vier hoekwapeningsstaven ($m = n = 0$), terwijl er wel tussenliggende staven aanwezig zijn ($m, n > 0$). Voor de SLS ontwerpformule zal dit minder een rol spelen, de wapeningsconfiguratie komt namelijk niet in de formule voor.



Figuur 56: Kolom met wapening in meerdere lagen

Lijst met figuren

Figuur 1: Verschillende belasting combinaties	1
Figuur 2: Verschillende posities kolommen	1
Figuur 3: Ideaal spannings-rekdiagram beton	4
Figuur 4: Bi-lineair spannings-rekdiagram beton	4
Figuur 5: Bi-lineair spannings-rekdiagram wapeningsstaal	5
Figuur 6: Assenstelsel doorsnede	5
Figuur 7: Exponent-a volgens Eurocode	8
Figuur 8: Voorschrift Eurocode	8
Figuur 9: Doorsnede parameters	9
Figuur 10: Rotatie van assenstelsel doorsnede	10
Figuur 11: Spannings-rekdiagram willekeurige doorsnede (ULS)	11
Figuur 12: Bepaling van betondrukkracht	11
Figuur 13: Bepaling van rekken in wapeningsstaven	12
Figuur 14: Spannings-rekdiagram willekeurige doorsnede (SLS)	14
Figuur 15: Bepalen van σ_{My} en σ_{Mz}	15
Figuur 16: Doorsnede voorbeeldberekening (ULS)	16
Figuur 17: 3D-weergave van kolom capaciteit	17
Figuur 18: Doorsnede voorbeeldberekening (SLS)	18
Figuur 19: Doorsnede transformatie	19
Figuur 20: Afstandsfactor β	21
Figuur 21: Doorsnede voorbeeldberekening DTM	22
Figuur 22: Momentcapaciteit-curve willekeurige doorsnede	25
Figuur 23: Standaard doorsnede (ULS)	26
Figuur 24: Momentcapaciteit-curves (parameter: afmetingen doorsnede (1))	27
Figuur 25: Momentcapaciteit-curves (parameter: afmetingen doorsnede (2))	28
Figuur 26: Momentcapaciteit-curves (parameter: druksterkte beton)	29
Figuur 27: Waardes voor A, B, en C als functie van f_{cd}	30
Figuur 28: Resultaten zonder toepassen formule	31
Figuur 29: Resultaten na toepassen formule	31
Figuur 30: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningspercentage)	32
Figuur 31: Waardes voor A, B en C als functie van ρ_l	33
Figuur 32: Resultaten na toepassen oude formule	34
Figuur 33: Resultaten na toepassen nieuwe formule	34
Figuur 34: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningsconfiguratie (1))	35
Figuur 35: Momentcapaciteit-curves (parameter: wapeningsconfiguratie (2))	36
Figuur 36: 3D-weergave modelresultaten	40
Figuur 37: 2D-weergave modelresultaten	40
Figuur 38: Standaard doorsnede (SLS)	41
Figuur 39: Resultaten (parameter: N-ratio)	42
Figuur 40: Waarde voor V als functie van N-ratio	43
Figuur 41: Waarde voor w_1 als functie van N-ratio	44
Figuur 42: Resultaten V (parameter: N-ratio)	44
Figuur 43: Resultaten $V+w_1$ (parameter: N-ratio)	44
Figuur 44: Resultaten (parameter: afmetingen (1))	45
Figuur 45: Resultaten (parameter: afmetingen (2))	45
Figuur 46: Resultaten $V+w_1$ (parameter: druksterkte)	46
Figuur 47: Waarde voor w_2 als functie van f_{ck}	47
Figuur 48: Resultaten $V+w_1+w_2$ (parameter: druksterkte)	47
Figuur 49: Resultaten $V+w_1+w_2$ (parameter: wapeningspercentage)	48
Figuur 50: Waarde voor w_3 als functie van ρ_l	49
Figuur 51: Resultaten $V+w_1+w_2+w_3$ (parameter: wapeningspercentage)	49
Figuur 52: Resultaten (parameter: wapeningsconfiguratie)	50
Figuur 53: Case ingenieursbureau	53
Figuur 54: Bepalen van exponent-a (Eurocode)	54
Figuur 55: Momentcapaciteit-curve case kolom	55
Figuur 56: Kolom met wapening in meerdere lagen	58

Literatuur

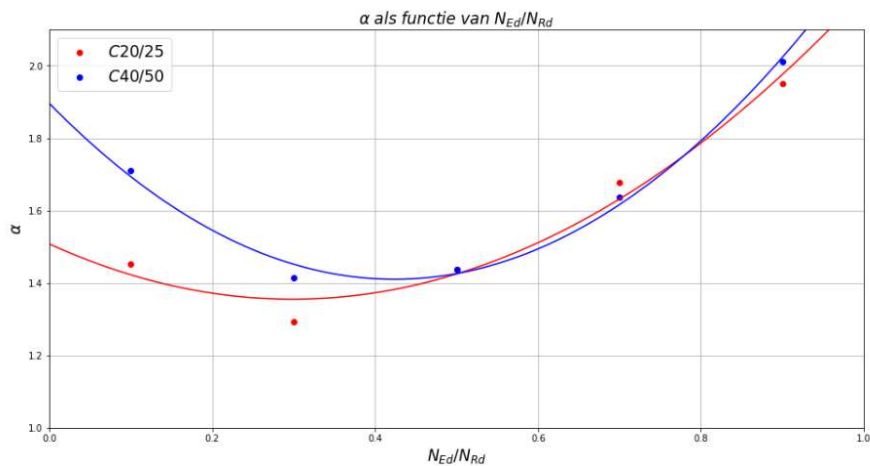
- Europese Commissie voor Normalisatie. (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en Berekening van Betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.
- Harrass, O. (2017). *Dubbele buiging in betonnen kolommen - ontwerpformule*. TU Delft, Civiele Techniek, Delft.
- Harteveld, R. (2015). *Dubbele buiging in betonnen kolommen in de Serviceability Limit State*. TU Delft, Civiele Techniek, Delft.
- Nijgh, M. (2015). *Dubbele Buiging in Betonnen Kolommen*. TU Delft, Civiele Techniek, Delft.
- Welleman, H., & Hartsuijker, C. (2008). *Niet-symmetrische en inhomogene doorsneden*. Delft.

Bijlage

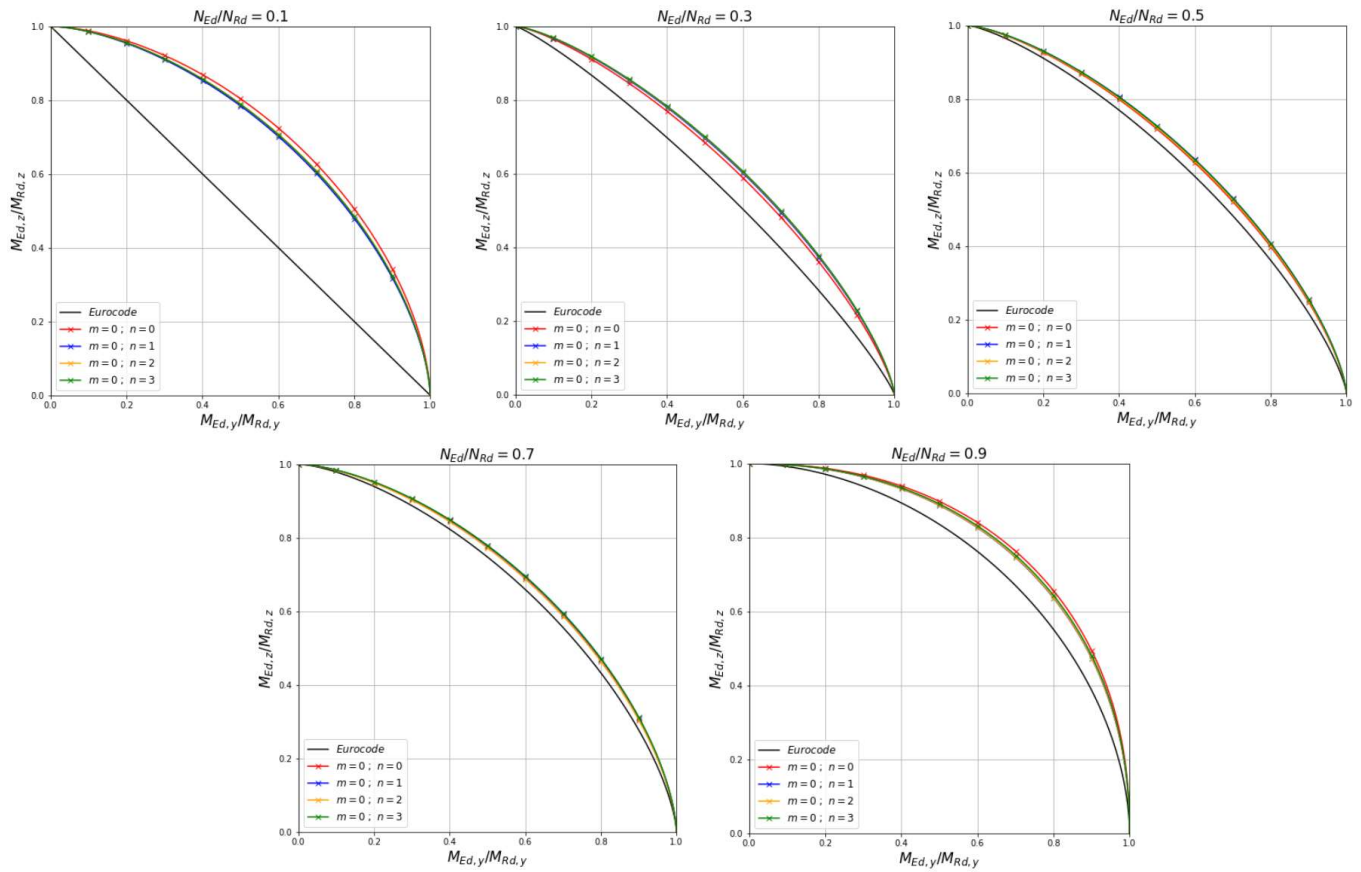
A: Betonsterkteklassen

Strength classes for concrete															Analytical relation / Explanation
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	2.8
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5% fractile
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	see Figure 3.2 $\varepsilon_{c1}(\rho_{fs}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$ (‰)
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	see Figure 3.2 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu1}(\rho_{fs}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c2}(\rho_{fs}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu2}(\rho_{fs}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{c3}(\rho_{fs}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\varepsilon_{cu3}(\rho_{fs}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

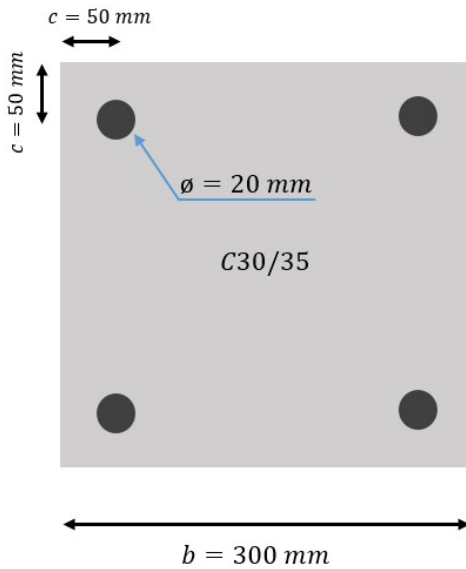
B: Waarde voor exponent α als functie van N_{Ed}/N_{Rd} -ratio



C: Momentcapaciteit-curves (m=2)



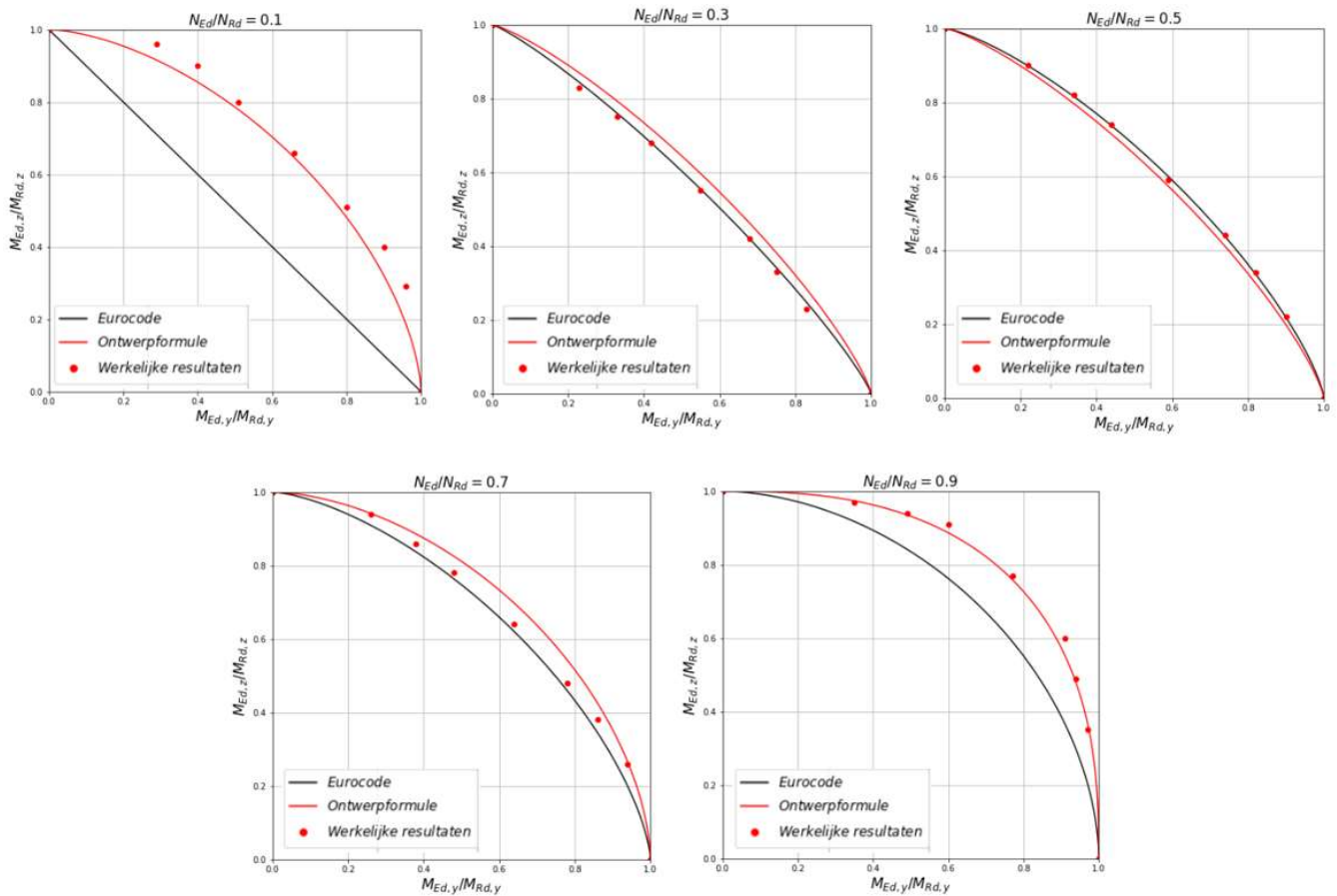
D: Controle ontwerpformules: doorsnede 1



Parameters:

- $c = 50 \text{ mm}$
- $b = 300 \text{ mm}; h = 300 \text{ mm}$
- $m = 0; n = 0$
- $\phi = 20 \text{ mm} \rightarrow \rho_l = 1.4 \%$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu3} = 3.50 \text{ ‰}$
- $f_{ck} = 30.0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = 30/1.5 = 20.0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 500/1.1 = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

ULS controle resultaten

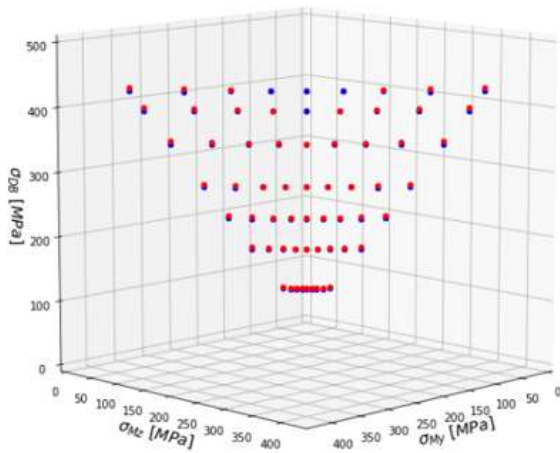


N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.1	1.63	87.04	87.04	0.0	87.06	1.0	0.0
0.1	1.63	87.04	87.04	0.0	87.06	1.0	0.0
0.1	1.63	87.04	87.04	0.0	87.06	1.0	0.0
0.1	1.63	87.04	87.04	25.56	83.54	1.072	7.2
0.1	1.63	87.04	87.04	35.0	78.74	1.077	7.7
0.1	1.63	87.04	87.04	44.71	69.95	1.039	3.9
0.1	1.63	87.04	87.04	57.53	57.53	1.02	2.0
0.1	1.63	87.04	87.04	57.53	57.53	1.02	2.0
0.1	1.63	87.04	87.04	57.53	57.53	1.02	2.0
0.1	1.63	87.04	87.04	57.53	57.53	1.02	2.0
0.1	1.63	87.04	87.04	69.95	44.71	1.039	3.9
0.1	1.63	87.04	87.04	78.74	35.0	1.077	7.7
0.1	1.63	87.04	87.04	83.54	25.56	1.072	7.2
0.1	1.63	87.04	87.04	87.06	0.0	1.0	0.0
0.1	1.63	87.04	87.04	87.06	0.0	1.0	0.0
0.1	1.63	87.04	87.04	87.06	0.0	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.3	1.25	119.77	119.77	0.0	119.78	1.0	0.0
0.3	1.25	119.77	119.77	0.0	119.78	1.0	0.0
0.3	1.25	119.77	119.77	0.0	119.78	1.0	0.0
0.3	1.25	119.77	119.77	27.69	99.89	0.959	4.1
0.3	1.25	119.77	119.77	39.59	89.91	0.951	4.9
0.3	1.25	119.77	119.77	49.72	80.9	0.948	5.2
0.3	1.25	119.77	119.77	65.68	65.68	0.946	5.4
0.3	1.25	119.77	119.77	65.68	65.68	0.946	5.4
0.3	1.25	119.77	119.77	65.68	65.68	0.946	5.4
0.3	1.25	119.77	119.77	65.68	65.68	0.946	5.4
0.3	1.25	119.77	119.77	80.9	49.72	0.948	5.2
0.3	1.25	119.77	119.77	89.91	39.59	0.951	4.9
0.3	1.25	119.77	119.77	99.89	27.69	0.959	4.1
0.3	1.25	119.77	119.77	119.78	0.0	1.0	0.0
0.3	1.25	119.77	119.77	119.78	0.0	1.0	0.0
0.3	1.25	119.77	119.77	119.78	0.0	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.5	1.28	100.4	100.4	0.0	100.42	1.0	0.0
0.5	1.28	100.4	100.4	0.0	100.42	1.0	0.0
0.5	1.28	100.4	100.4	0.0	100.42	1.0	0.0
0.5	1.28	100.4	100.4	22.25	90.46	1.021	2.1
0.5	1.28	100.4	100.4	34.07	82.24	1.026	2.6
0.5	1.28	100.4	100.4	44.19	74.01	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	59.63	59.63	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	59.63	59.63	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	59.63	59.63	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	59.63	59.63	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	74.01	44.19	1.027	2.7
0.5	1.28	100.4	100.4	82.24	34.07	1.026	2.6
0.5	1.28	100.4	100.4	90.46	22.25	1.021	2.1
0.5	1.28	100.4	100.4	100.42	0.0	1.0	0.0
0.5	1.28	100.4	100.4	100.42	0.0	1.0	0.0
0.5	1.28	100.4	100.4	100.42	0.0	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.7	1.72	70.61	70.61	0.0	70.58	0.999	0.1
0.7	1.72	70.61	70.61	0.0	70.58	0.999	0.1
0.7	1.72	70.61	70.61	0.0	70.58	0.999	0.1
0.7	1.72	70.61	70.61	18.25	66.08	0.989	1.1
0.7	1.72	70.61	70.61	26.69	60.77	0.959	4.1
0.7	1.72	70.61	70.61	34.01	55.29	0.94	6.0
0.7	1.72	70.61	70.61	45.19	45.19	0.926	7.4
0.7	1.72	70.61	70.61	45.19	45.19	0.926	7.4
0.7	1.72	70.61	70.61	45.19	45.19	0.926	7.4
0.7	1.72	70.61	70.61	45.19	45.19	0.926	7.4
0.7	1.72	70.61	70.61	55.29	34.01	0.94	6.0
0.7	1.72	70.61	70.61	60.77	26.69	0.959	4.1
0.7	1.72	70.61	70.61	66.08	18.25	0.989	1.1
0.7	1.72	70.61	70.61	70.58	0.0	0.999	0.1
0.7	1.72	70.61	70.61	70.58	0.0	0.999	0.1
0.7	1.72	70.61	70.61	70.58	0.0	0.999	0.1
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.9	2.58	26.24	26.24	0.0	26.24	1.0	0.0
0.9	2.58	26.24	26.24	0.0	26.24	1.0	0.0
0.9	2.58	26.24	26.24	0.0	26.24	1.0	0.0
0.9	2.58	26.24	26.24	9.27	25.4	0.987	1.3
0.9	2.58	26.24	26.24	12.8	24.59	1.002	0.2
0.9	2.58	26.24	26.24	15.67	23.77	1.039	3.9
0.9	2.58	26.24	26.24	20.16	20.16	1.012	1.2
0.9	2.58	26.24	26.24	20.16	20.16	1.012	1.2
0.9	2.58	26.24	26.24	20.16	20.16	1.012	1.2
0.9	2.58	26.24	26.24	20.16	20.16	1.012	1.2
0.9	2.58	26.24	26.24	23.77	15.67	1.039	3.9
0.9	2.58	26.24	26.24	24.59	12.8	1.002	0.2
0.9	2.58	26.24	26.24	25.4	9.27	0.987	1.3
0.9	2.58	26.24	26.24	26.24	0.0	1.0	0.0
0.9	2.58	26.24	26.24	26.24	0.0	1.0	0.0
0.9	2.58	26.24	26.24	26.24	0.0	1.0	0.0

SLS controle resultaten

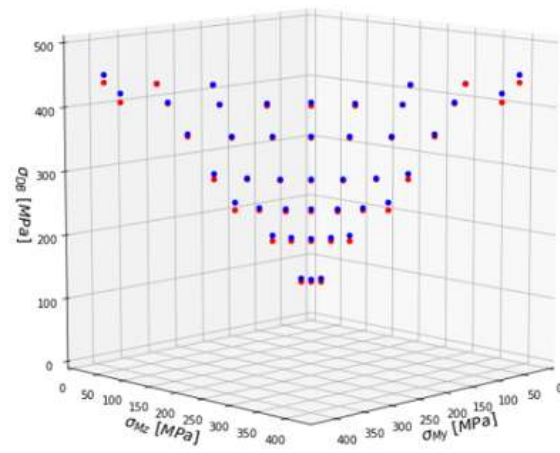
$N = 3.14 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



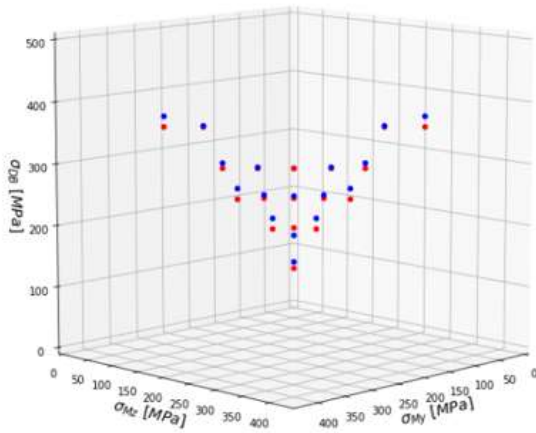
$N = 160.19 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



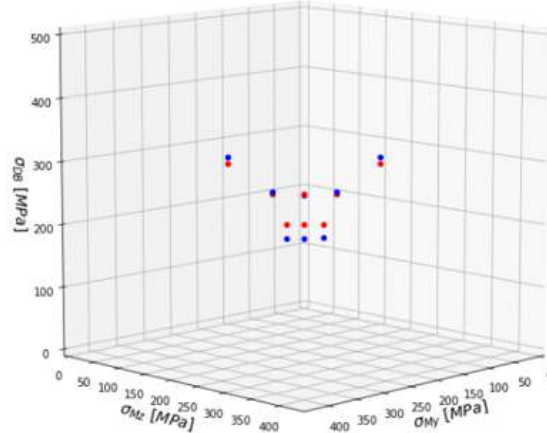
$N = 317.24 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



$N = 474.29 \text{ kN}$

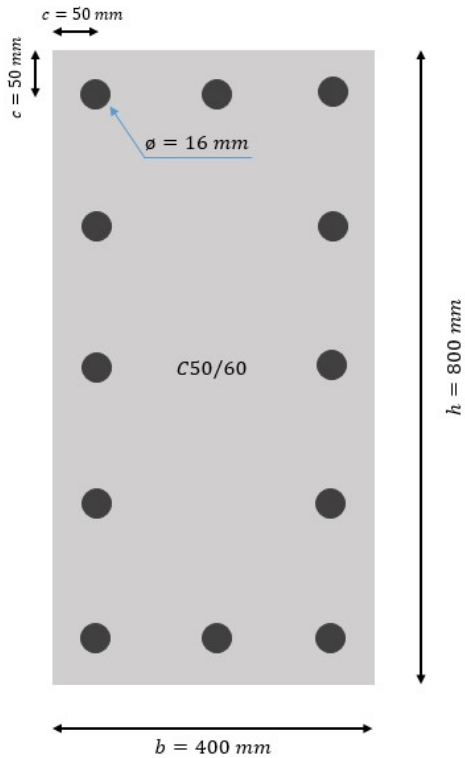
• Exacte waarden
• Ontwerpformule



N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
3.14	8.02	1.89	53.02	10.7	60.0	58.12	3.13
3.14	7.09	3.39	46.6	21.05	60.0	58.51	2.48
3.14	6.23	4.52	40.66	28.83	60.0	58.89	1.85
3.14	5.41	5.41	34.97	34.97	60.0	58.96	1.74
3.14	4.52	6.23	28.83	40.66	60.0	58.89	1.85
3.14	3.39	7.09	21.05	46.6	60.0	58.51	2.48
3.14	1.89	8.02	10.7	53.02	60.0	58.12	3.13
3.14	18.28	4.33	123.88	27.49	140.0	137.22	1.99
3.14	16.14	7.75	109.12	51.11	140.0	138.29	1.22
3.14	14.18	10.29	95.55	68.68	140.0	139.11	0.63
3.14	12.3	12.3	82.59	82.59	140.0	139.24	0.54
3.14	10.29	14.18	68.68	95.55	140.0	139.11	0.63
3.14	7.75	16.14	51.11	109.12	140.0	138.29	1.22
3.14	4.33	18.28	27.49	123.88	140.0	137.22	1.99
3.14	25.97	6.15	177.03	40.1	200.0	196.55	1.72
3.14	22.93	11.01	156.01	73.65	200.0	198.12	0.94
3.14	20.14	14.62	136.71	98.57	200.0	199.28	0.36
3.14	17.47	17.47	118.3	118.3	200.0	199.46	0.27
3.14	14.62	20.14	98.57	136.71	200.0	199.28	0.36
3.14	11.01	22.93	73.65	156.01	200.0	198.12	0.94
3.14	6.15	25.97	40.1	177.03	200.0	196.55	1.72
3.14	33.67	7.98	230.17	52.72	260.0	255.89	1.58
3.14	29.72	14.27	202.89	96.2	260.0	257.96	0.78
3.14	26.1	18.94	177.88	128.46	260.0	259.45	0.21
3.14	22.64	22.64	154.02	154.02	260.0	259.69	0.12
3.14	18.94	26.1	128.46	177.88	260.0	259.45	0.21
3.14	14.27	29.72	96.2	202.89	260.0	257.96	0.78
3.14	7.98	33.67	52.72	230.17	260.0	255.89	1.58
3.14	43.92	10.41	301.04	69.54	340.0	335.01	1.47
3.14	38.77	18.63	265.41	126.26	340.0	337.75	0.66
3.14	34.04	24.71	232.77	168.31	340.0	339.68	0.09
3.14	29.54	29.54	201.64	201.64	340.0	339.98	0.01
3.14	24.71	34.04	168.31	232.77	340.0	339.68	0.09
3.14	18.63	38.77	126.26	265.41	340.0	337.75	0.66
3.14	10.41	43.92	69.54	301.04	340.0	335.01	1.47
3.14	51.62	12.24	354.18	82.16	400.0	394.35	1.41
3.14	45.55	21.89	312.3	148.81	400.0	397.59	0.6
3.14	40.0	29.04	273.94	198.2	400.0	399.85	0.04
3.14	34.71	34.71	237.36	237.36	400.0	400.2	0.05
3.14	29.04	40.0	198.2	273.94	400.0	399.85	0.04
3.14	21.89	45.55	148.81	312.3	400.0	397.59	0.6
3.14	12.24	51.62	82.16	354.18	400.0	394.35	1.41
3.14	56.1	13.31	385.18	89.52	435.0	428.97	1.39
3.14	49.51	23.79	339.65	161.97	435.0	432.5	0.58
3.14	43.48	31.56	297.95	215.63	435.0	434.95	0.01
3.14	37.72	37.72	258.19	258.19	435.0	435.33	0.08
3.14	31.56	43.48	215.63	297.95	435.0	434.95	0.01
3.14	23.79	49.51	161.97	339.65	435.0	432.5	0.58
3.14	13.31	56.1	89.52	385.18	435.0	428.97	1.39
N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
160.19	17.4	12.41	22.42	3.25	60.0	66.45	10.76
160.19	15.05	15.05	12.24	12.24	60.0	63.54	5.9
160.19	12.41	17.4	3.25	22.42	60.0	66.45	10.76
160.19	29.03	15.34	89.13	13.4	140.0	150.4	7.43
160.19	26.17	19.45	71.26	32.57	140.0	145.9	4.21
160.19	23.03	23.03	52.46	52.46	140.0	145.06	3.61
160.19	19.45	26.17	32.57	71.26	140.0	145.9	4.21
160.19	15.34	29.03	13.4	89.13	140.0	150.4	7.43
160.19	39.15	13.7	155.07	7.31	200.0	212.87	6.43
160.19	35.78	19.36	132.77	32.11	200.0	204.85	2.42
160.19	32.25	24.33	109.75	60.13	200.0	202.96	1.48
160.19	28.53	28.53	85.95	85.95	200.0	202.94	1.47
160.19	24.33	32.25	60.13	109.75	200.0	202.96	1.48
160.19	19.36	35.78	32.11	132.77	200.0	204.85	2.42
160.19	13.7	39.15	7.31	155.07	200.0	212.87	6.43
160.19	46.47	16.55	204.13	18.51	260.0	267.54	2.9
160.19	42.39	23.28	176.73	53.9	260.0	262.06	0.79
160.19	38.21	29.08	148.86	89.41	260.0	262.1	0.81
160.19	33.89	33.89	120.41	120.41	260.0	262.5	0.96
160.19	29.08	38.21	89.41	148.86	260.0	262.1	0.81
160.19	23.28	42.39	53.9	176.73	260.0	262.06	0.79
160.19	16.55	46.47	18.51	204.13	260.0	267.54	2.9
160.19	56.15	20.29	269.66	37.07	340.0	342.89	0.85
160.19	51.13	28.43	235.59	85.32	340.0	340.6	0.18
160.19	46.08	35.28	201.49	129.53	340.0	342.34	0.69
160.19	40.94	40.94	167.03	167.03	340.0	343.09	0.91
160.19	35.28	46.08	129.53	201.49	340.0	342.34	0.69
160.19	28.43	51.13	85.32	235.59	340.0	340.6	0.18
160.19	20.29	56.15	37.07	269.66	340.0	342.89	0.85
160.19	69.16	12.43	358.48	3.3	400.0	414.34	3.58
160.19	63.36	23.08	318.86	52.76	400.0	400.7	0.18
160.19	57.64	32.26	279.84	109.79	400.0	400.42	0.1
160.19	51.95	39.89	241.15	160.01	400.0	403.06	0.76
160.19	46.2	46.2	202.26	202.26	400.0	403.99	1.0
160.19	39.89	51.95	160.01	241.15	400.0	403.06	0.76
160.19	32.26	57.64	109.79	279.84	400.0	400.42	0.1
160.19	23.08	63.36	52.76	318.86	400.0	400.7	0.18
160.19	12.43	69.16	3.3	358.48	400.0	414.34	3.58
160.19	73.79	13.31	390.22	6.01	435.0	447.31	2.83
160.19	67.57	24.7	347.57	62.35	435.0	434.78	0.05
160.19	61.44	34.48	305.69	124.26	435.0	435.52	0.12
160.19	34.48	61.44	124.26	305.69	435.0	435.52	0.12
160.19	24.7	67.57	62.35	347.57	435.0	434.78	0.05
160.19	13.31	73.79	6.01	390.22	435.0	447.31	2.83

N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
317.24	22.65	22.65	1.26	1.26	60.0	70.74	17.9
317.24	36.99	26.57	56.71	12.56	140.0	156.77	11.98
317.24	32.11	32.11	33.75	33.75	140.0	128.27	8.38
317.24	26.57	36.99	12.56	56.71	140.0	156.77	11.98
317.24	48.5	25.03	120.98	7.76	200.0	217.64	8.82
317.24	43.69	31.94	92.86	33.03	200.0	206.76	3.38
317.24	38.22	38.22	63.02	63.02	200.0	204.11	2.06
317.24	31.94	43.69	33.03	92.86	200.0	206.76	3.38
317.24	25.03	48.5	7.76	120.98	200.0	217.64	8.82
317.24	55.51	29.21	164.05	21.92	260.0	268.97	3.45
317.24	50.04	37.07	130.23	57.09	260.0	261.08	0.42
317.24	43.99	43.99	94.55	94.55	260.0	259.95	0.02
317.24	37.07	50.04	57.09	130.23	260.0	261.08	0.42
317.24	29.21	55.51	21.92	164.05	260.0	268.97	3.45
317.24	70.61	24.45	261.35	6.06	340.0	356.98	4.99
317.24	64.59	34.61	222.04	45.09	340.0	341.37	0.4
317.24	34.61	64.59	45.09	222.04	340.0	341.37	0.4
317.24	24.45	70.61	6.06	261.35	340.0	356.98	4.99
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
474.29	44.93	33.61	37.7	1.28	140.0	116.82	16.56
474.29	40.25	40.25	20.53	20.53	140.0	115.6	17.43
474.29	33.34	45.08	0.61	38.27	140.0	116.99	16.44
474.29	54.21	38.86	79.33	15.98	200.0	204.14	2.07
474.29	47.01	47.01	46.2	46.2	200.0	198.16	0.92
474.29	38.86	54.21	15.98	79.33	200.0	204.14	2.07
474.29	67.81	34.65	153.14	3.88	260.0	269.75	3.75
474.29	34.65	67.81	3.88	153.14	260.0	269.75	3.75

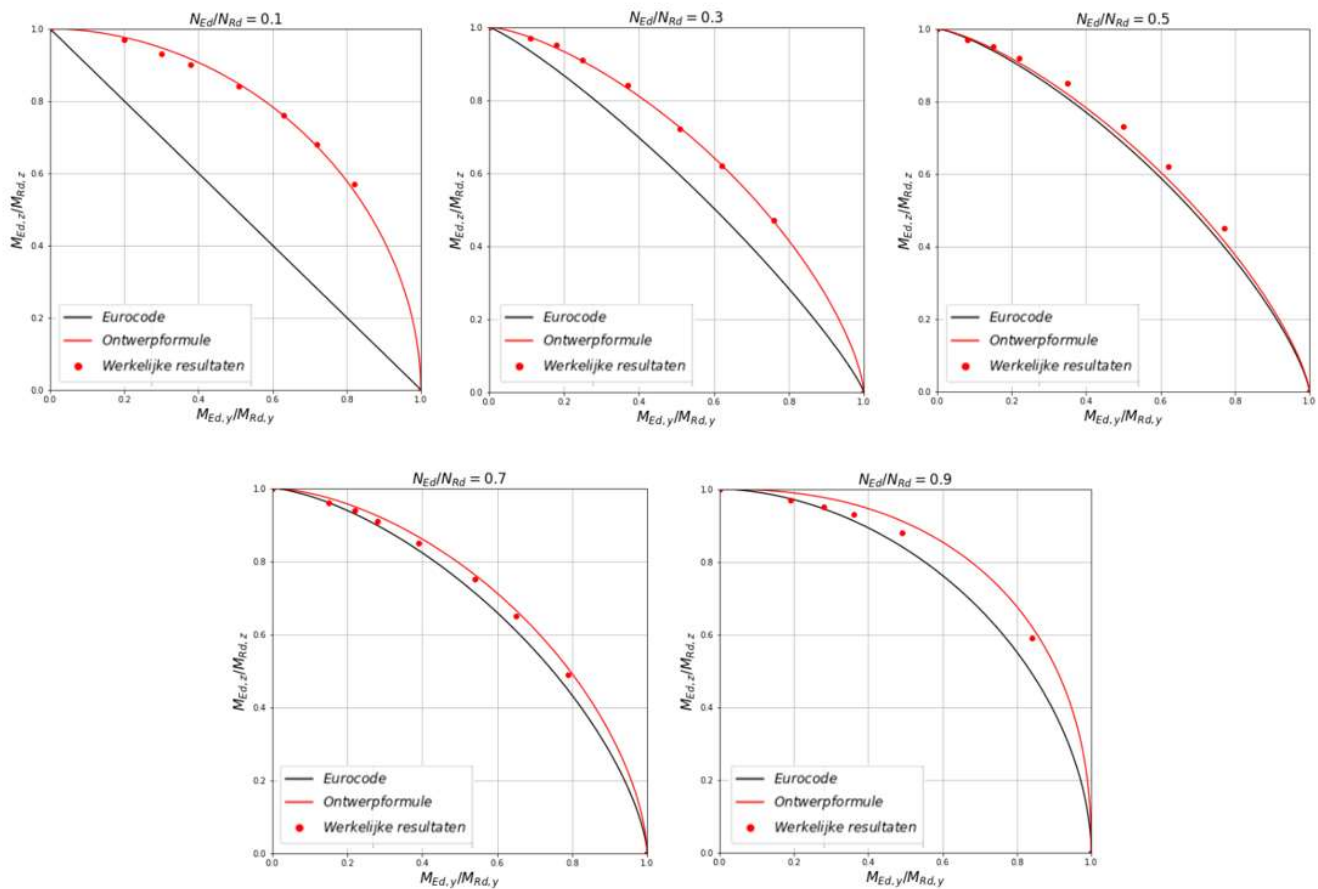
E: Controle ontwerpformules: doorsnede 2



Parameters:

- $c = 50 \text{ mm}$
- $b = 400 \text{ mm}$; $h = 800 \text{ mm}$
- $m = 1$; $n = 3$
- $\varnothing = 16 \text{ mm} \rightarrow \rho_l = 0.8 \%$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu3} = 3.50 \text{ ‰}$
- $f_{ck} = 50.0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = 50/1.5 = 33.3 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 500/1.1 = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

ULS controle resultaten

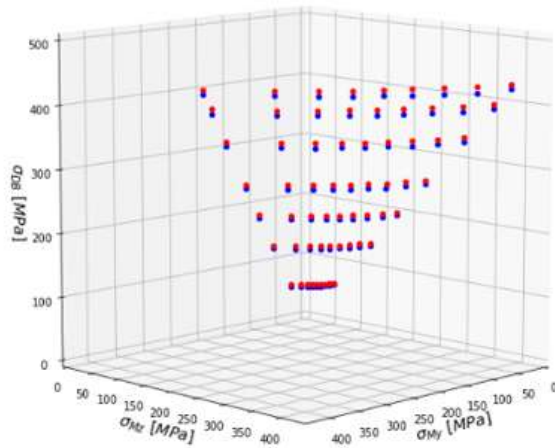


N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.1	1.92	377.83	766.68	0.0	766.78	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	0.0	766.79	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	0.01	766.56	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	74.77	741.76	0.983	1.7
0.1	1.92	377.83	766.68	111.97	716.8	0.975	2.5
0.1	1.92	377.83	766.68	142.98	693.14	0.978	2.2
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	191.41	646.59	0.991	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	239.39	584.07	1.009	0.9
0.1	1.92	377.83	766.68	272.22	525.17	1.016	1.6
0.1	1.92	377.83	766.68	310.5	434.48	1.021	2.1
0.1	1.92	377.83	766.68	377.8	0.06	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	377.84	0.02	1.0	0.0
0.1	1.92	377.83	766.68	377.85	0.03	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.3	1.46	609.04	1187.82	0.0	1187.9	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	0.0	1187.9	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	0.0	1187.9	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	69.75	1153.98	1.001	0.1
0.3	1.46	609.04	1187.82	111.37	1123.68	1.006	0.6
0.3	1.46	609.04	1187.82	152.0	1083.69	1.007	0.7
0.3	1.46	609.04	1187.82	223.43	994.33	1.004	0.4
0.3	1.46	609.04	1187.82	223.43	994.33	1.004	0.4
0.3	1.46	609.04	1187.82	223.43	994.33	1.004	0.4
0.3	1.46	609.04	1187.82	223.43	994.33	1.004	0.4
0.3	1.46	609.04	1187.82	310.37	861.07	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	377.36	739.94	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	461.43	556.51	0.999	0.1
0.3	1.46	609.04	1187.82	609.13	0.02	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	609.13	0.02	1.0	0.0
0.3	1.46	609.04	1187.82	609.13	0.05	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.5	1.37	614.09	1212.85	0.0	1212.97	1.0	0.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	0.0	1212.97	1.0	0.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	0.0	1212.97	1.0	0.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	50.85	1179.66	0.996	0.4
0.5	1.37	614.09	1212.85	91.55	1153.22	1.007	0.7
0.5	1.37	614.09	1212.85	134.61	1117.88	1.02	2.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	214.04	1026.4	1.032	3.2
0.5	1.37	614.09	1212.85	214.04	1026.4	1.032	3.2
0.5	1.37	614.09	1212.85	214.04	1026.4	1.032	3.2
0.5	1.37	614.09	1212.85	214.04	1026.4	1.032	3.2
0.5	1.37	614.09	1212.85	307.9	880.75	1.035	3.5
0.5	1.37	614.09	1212.85	379.1	748.37	1.034	3.4
0.5	1.37	614.09	1212.85	470.69	549.4	1.034	3.4
0.5	1.37	614.09	1212.85	614.24	0.02	1.0	0.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	614.24	0.02	1.0	0.0
0.5	1.37	614.09	1212.85	614.26	0.05	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.7	1.65	461.29	917.93	-0.0	917.99	1.0	0.0
0.7	1.65	461.29	917.93	-0.0	917.99	1.0	0.0
0.7	1.65	461.29	917.93	-0.0	917.98	1.0	0.0
0.7	1.65	461.29	917.93	67.56	884.5	0.982	1.8
0.7	1.65	461.29	917.93	99.39	861.25	0.979	2.1
0.7	1.65	461.29	917.93	128.97	836.16	0.978	2.2
0.7	1.65	461.29	917.93	182.12	781.72	0.981	1.9
0.7	1.65	461.29	917.93	182.12	781.72	0.981	1.9
0.7	1.65	461.29	917.93	182.12	781.72	0.981	1.9
0.7	1.65	461.29	917.93	249.81	687.05	0.982	1.8
0.7	1.65	461.29	917.93	301.59	594.44	0.982	1.8
0.7	1.65	461.29	917.93	364.73	452.16	0.988	1.2
0.7	1.65	461.29	917.93	461.46	0.01	1.001	0.1
0.7	1.65	461.29	917.93	461.46	0.02	1.001	0.1
0.7	1.65	461.29	917.93	461.51	0.04	1.001	0.1
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.9	2.32	181.46	362.54	0.0	362.66	1.001	0.1
0.9	2.32	181.46	362.54	0.0	362.66	1.001	0.1
0.9	2.32	181.46	362.54	0.0	362.67	1.001	0.1
0.9	2.32	181.46	362.54	35.04	352.56	0.959	4.1
0.9	2.32	181.46	362.54	50.56	346.12	0.95	5.0
0.9	2.32	181.46	362.54	64.7	338.72	0.946	5.4
0.9	2.32	181.46	362.54	89.54	320.75	0.947	5.3
0.9	2.32	181.46	362.54	89.54	320.75	0.947	5.3
0.9	2.32	181.46	362.54	89.54	320.75	0.947	5.3
0.9	2.32	181.46	362.54	153.15	212.78	0.966	3.4
0.9	2.32	181.46	362.54	181.49	0.01	1.0	0.0
0.9	2.32	181.46	362.54	181.5	0.01	1.0	0.0
0.9	2.32	181.46	362.54	181.56	0.03	1.001	0.1

SLS controle resultaten

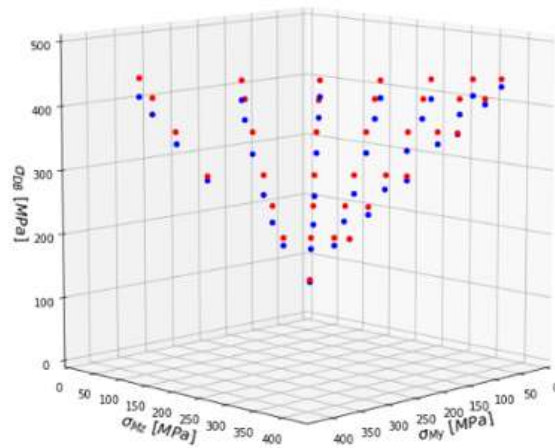
$N = 16.9 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



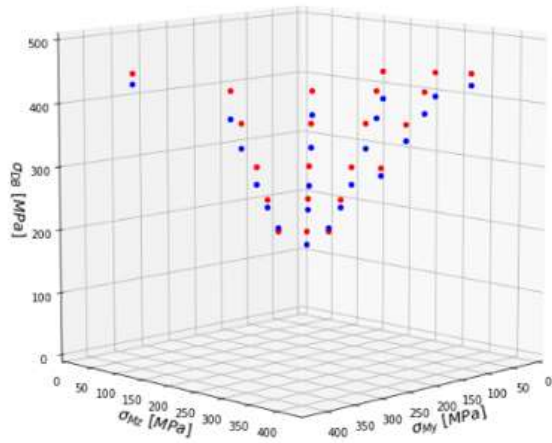
$N = 861.7 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



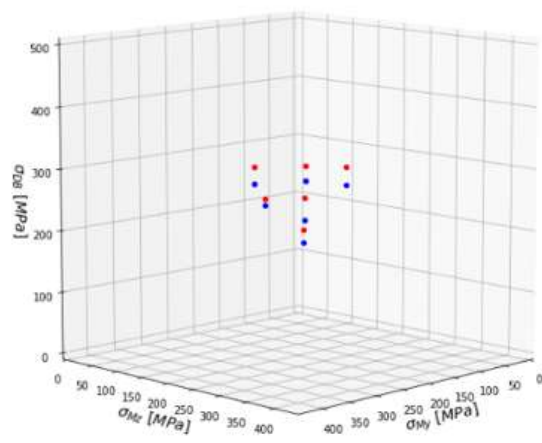
$N = 1706.5 \text{ kN}$

• Exacte waarden
• Ontwerpformule



$N = 2551.39 \text{ kN}$

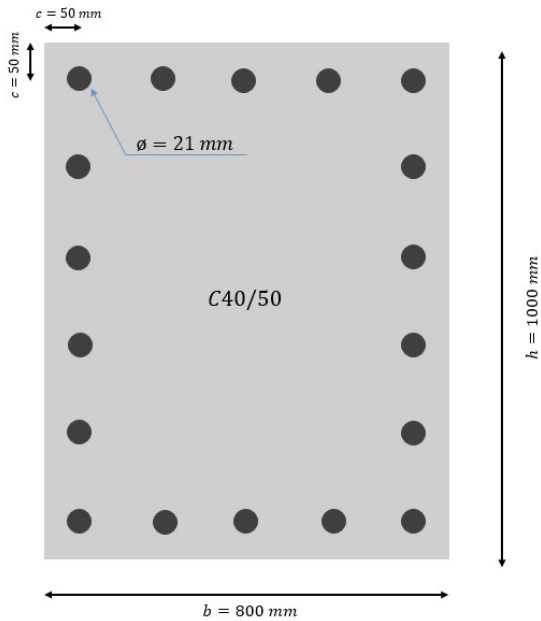
• Exacte waarden
• Ontwerpformule



N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
16.9	21.6	18.44	48.74	19.41	60.0	56.25	6.25
16.9	18.39	26.66	40.49	31.35	60.0	56.41	5.98
16.9	16.03	30.97	34.42	37.63	60.0	56.32	6.13
16.9	14.04	34.03	29.31	42.09	60.0	56.33	6.11
16.9	12.16	36.52	24.48	45.72	60.0	56.39	6.02
16.9	10.14	38.74	19.32	48.97	60.0	56.41	5.98
16.9	7.83	40.83	13.42	52.01	60.0	56.44	5.93
16.9	5.35	42.76	7.19	54.82	60.0	56.79	5.35
16.9	2.75	44.57	1.34	57.46	60.0	57.75	3.75
16.9	47.09	40.49	114.36	51.51	140.0	135.28	3.37
16.9	39.98	57.79	96.05	76.76	140.0	135.54	3.18
16.9	34.79	67.04	82.7	90.26	140.0	135.22	3.41
16.9	30.48	73.69	71.59	99.96	140.0	135.17	3.45
16.9	26.45	79.13	61.21	107.92	140.0	135.24	3.4
16.9	22.2	84.01	50.28	115.04	140.0	135.22	3.42
16.9	17.25	88.64	37.57	121.81	140.0	135.0	3.57
16.9	11.83	93.0	23.65	128.16	140.0	135.21	3.42
16.9	6.1	97.11	9.06	134.16	140.0	136.37	2.6
16.9	66.2	57.0	163.58	75.6	200.0	194.61	2.7
16.9	56.16	81.12	137.73	110.82	200.0	194.91	2.55
16.9	48.86	94.09	118.93	129.75	200.0	194.41	2.79
16.9	42.8	103.42	103.31	143.39	200.0	194.32	2.84
16.9	37.15	111.08	88.77	154.57	200.0	194.41	2.8
16.9	31.22	117.95	73.51	164.6	200.0	194.36	2.82
16.9	24.31	124.49	55.73	174.16	200.0	194.0	3.0
16.9	16.69	130.66	36.13	183.16	200.0	194.13	2.93
16.9	8.61	136.5	15.41	191.69	200.0	195.54	2.23
16.9	85.31	73.5	212.8	99.69	260.0	253.95	2.33
16.9	72.35	104.45	179.42	144.89	260.0	254.28	2.2
16.9	62.93	121.13	155.16	169.24	260.0	253.61	2.46
16.9	55.12	133.16	135.04	186.81	260.0	253.48	2.51
16.9	47.85	143.03	116.33	201.23	260.0	253.58	2.47
16.9	40.25	151.89	96.75	214.17	260.0	253.51	2.49
16.9	31.37	160.34	73.9	226.51	260.0	253.01	2.69
16.9	21.55	168.33	48.62	238.17	260.0	253.08	2.66
16.9	11.12	175.89	21.82	249.22	260.0	254.74	2.02
16.9	110.78	95.5	278.43	131.82	340.0	333.07	2.04
16.9	93.92	135.55	235.0	190.3	340.0	333.44	1.93
16.9	81.68	157.18	203.47	221.89	340.0	332.54	2.2
16.9	71.54	172.8	177.34	244.71	340.0	332.35	2.25
16.9	62.12	185.63	153.08	263.45	340.0	332.48	2.21
16.9	52.28	197.14	127.73	280.26	340.0	332.39	2.24
16.9	40.78	208.14	98.12	296.32	340.0	331.69	2.44
16.9	28.03	218.54	65.29	311.51	340.0	331.69	2.44
16.9	14.46	228.42	30.4	325.93	340.0	333.7	1.85
16.9	129.89	112.0	327.65	155.92	400.0	392.41	1.9
16.9	110.11	158.87	276.69	224.37	400.0	392.81	1.8
16.9	95.75	184.22	239.7	261.38	400.0	391.73	2.07
16.9	83.86	202.53	209.06	288.13	400.0	391.51	2.12
16.9	72.82	217.58	180.65	310.11	400.0	391.65	2.09
16.9	61.3	231.08	150.96	329.83	400.0	391.55	2.11
16.9	47.84	243.98	116.3	348.67	400.0	390.71	2.32
16.9	32.89	256.2	77.8	366.52	400.0	390.66	2.34
16.9	16.97	267.81	36.85	383.46	400.0	392.93	1.77
16.9	141.04	121.63	356.37	169.97	435.0	427.03	1.83
16.9	119.55	172.48	301.01	244.24	435.0	427.44	1.74
16.9	103.95	199.99	260.83	284.42	435.0	426.26	2.01
16.9	91.04	219.88	227.57	313.46	435.0	426.01	2.07
16.9	79.06	236.22	196.73	337.33	435.0	426.17	2.03
16.9	66.56	250.88	164.51	358.74	435.0	426.06	2.06
16.9	51.96	264.89	126.9	379.21	435.0	425.14	2.27
16.9	35.72	278.17	85.1	398.6	435.0	425.06	2.29
16.9	18.44	290.78	40.61	417.02	435.0	427.48	1.73

N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
861.7	85.4	171.79	6.33	10.08	60.0	57.51	4.14
861.7	136.94	181.86	62.7	13.6	140.0	126.56	9.6
861.7	115.96	231.07	32.61	39.52	140.0	120.79	13.72
861.7	95.34	261.87	12.72	63.89	140.0	127.05	9.25
861.7	76.15	282.85	1.86	83.78	140.0	139.29	0.5
861.7	156.5	214.63	98.22	29.11	200.0	173.65	13.17
861.7	134.12	266.0	58.13	67.62	200.0	170.15	14.93
861.7	112.49	298.34	28.58	99.86	200.0	174.83	12.59
861.7	90.94	321.71	9.67	125.98	200.0	186.54	6.73
861.7	201.75	147.3	196.0	3.47	260.0	252.5	2.89
861.7	174.71	244.42	135.66	49.33	260.0	226.7	12.81
861.7	150.75	297.97	87.18	99.47	260.0	226.21	13.0
861.7	128.03	332.13	48.76	138.21	260.0	228.69	12.04
861.7	104.64	357.71	20.5	169.44	260.0	237.33	8.72
861.7	82.13	377.36	4.6	194.33	260.0	251.54	3.25
861.7	229.12	172.88	260.42	10.44	340.0	321.29	5.5
861.7	198.04	281.3	187.47	82.22	340.0	304.53	10.43
861.7	171.75	338.31	129.34	145.61	340.0	307.5	9.56
861.7	147.28	375.29	80.74	191.68	340.0	307.27	9.63
861.7	121.88	403.65	40.11	228.59	340.0	310.3	8.74
861.7	96.31	426.27	13.45	258.72	340.0	321.55	5.43
861.7	71.75	444.57	0.15	283.44	340.0	337.91	0.62
861.7	249.2	191.47	308.95	17.47	400.0	374.34	6.41
861.7	215.14	307.67	227.2	110.05	400.0	366.6	8.35
861.7	186.99	367.61	162.52	181.89	400.0	371.43	7.14
861.7	161.1	406.85	107.34	232.82	400.0	369.57	7.61
861.7	134.29	437.27	58.39	273.54	400.0	368.54	7.87
861.7	106.6	462.07	22.38	307.31	400.0	375.97	6.01
861.7	79.63	482.41	3.39	335.3	400.0	391.74	2.07
861.7	260.8	202.15	337.32	22.41	435.0	405.93	6.68
861.7	225.01	322.72	250.6	127.16	435.0	403.82	7.17
861.7	195.76	384.44	182.27	203.47	435.0	409.47	5.87
861.7	168.99	425.06	123.55	257.1	435.0	406.82	6.48
861.7	141.38	456.67	70.22	299.92	435.0	403.67	7.2
861.7	112.5	482.74	28.58	335.75	435.0	408.52	6.09
861.7	84.15	504.25	5.65	365.59	435.0	423.42	2.66
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
1706.5	216.8	271.29	50.12	2.7	140.0	145.38	3.84
1706.5	179.31	360.2	18.63	26.95	140.0	116.55	16.75
1706.5	142.12	415.87	0.3	52.47	140.0	145.27	3.76
1706.5	242.8	312.79	81.37	11.96	200.0	186.54	6.73
1706.5	202.93	406.15	36.68	47.31	200.0	181.26	9.37
1706.5	163.95	465.26	9.77	83.64	200.0	186.38	6.81
1706.5	265.16	350.01	114.39	23.26	260.0	231.96	10.79
1706.5	224.0	446.74	57.98	70.97	260.0	228.9	11.96
1706.5	183.49	507.31	21.42	116.69	260.0	232.14	10.71
1706.5	146.3	548.16	1.87	154.06	260.0	248.43	4.45
1706.5	292.13	395.35	160.74	41.95	340.0	299.09	12.03
1706.5	249.17	495.16	90.23	106.55	340.0	300.77	11.54
1706.5	207.25	557.69	40.62	163.45	340.0	300.23	11.7
1706.5	166.62	601.79	11.17	209.66	340.0	313.57	7.77
1706.5	311.16	427.09	196.9	58.82	400.0	354.19	11.45
1706.5	266.74	528.95	116.92	135.89	400.0	360.13	9.97
1706.5	223.83	593.09	57.79	200.21	400.0	356.24	10.94
1706.5	181.02	639.52	19.75	252.29	400.0	365.2	8.7
1706.5	371.37	265.17	324.19	1.58	435.0	418.27	3.85
1706.5	233.14	613.13	68.83	222.21	435.0	390.68	10.19
1706.5	189.17	660.89	25.47	277.46	435.0	396.41	8.87
1706.5	147.91	696.76	2.5	321.07	435.0	416.07	4.35
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
2551.3	232.78	468.89	8.67	18.21	140.0	118.43	15.4
2551.3	319.59	398.65	70.24	2.76	200.0	188.5	5.75
2551.3	263.73	530.01	25.11	37.16	200.0	161.16	19.42
2551.3	347.01	441.62	101.0	11.51	260.0	231.93	10.8
2551.3	290.19	581.64	43.73	58.28	260.0	235.88	9.28
2551.3	231.43	665.32	8.07	104.43	260.0	230.31	11.42

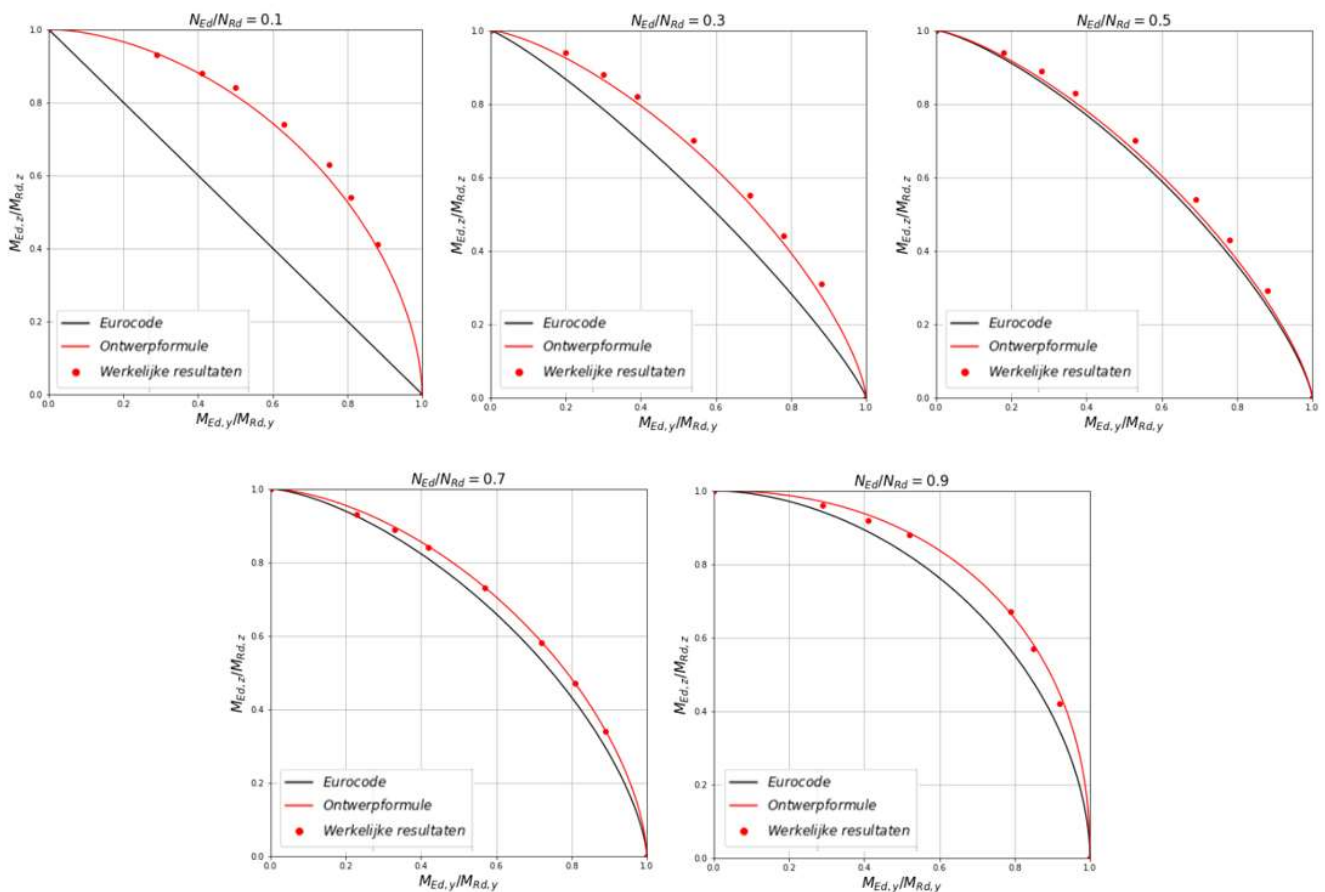
F: Controle ontwerpformules: doorsnede 3



Parameters:

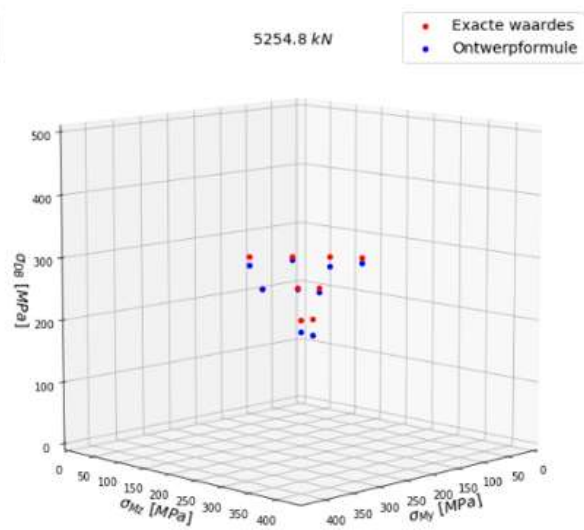
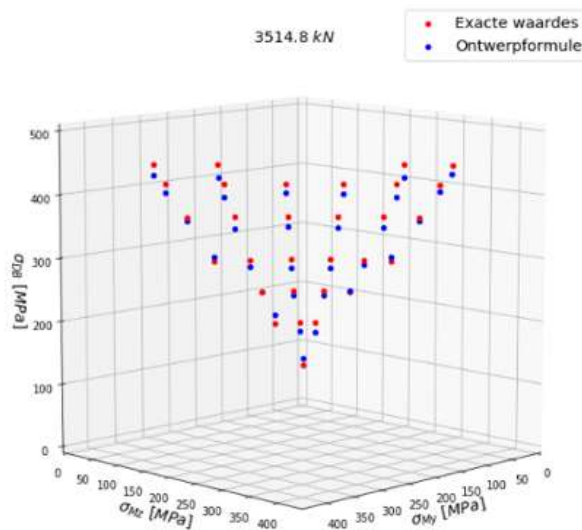
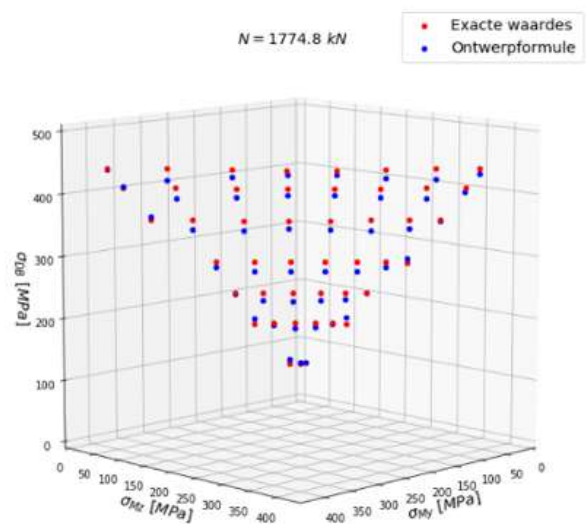
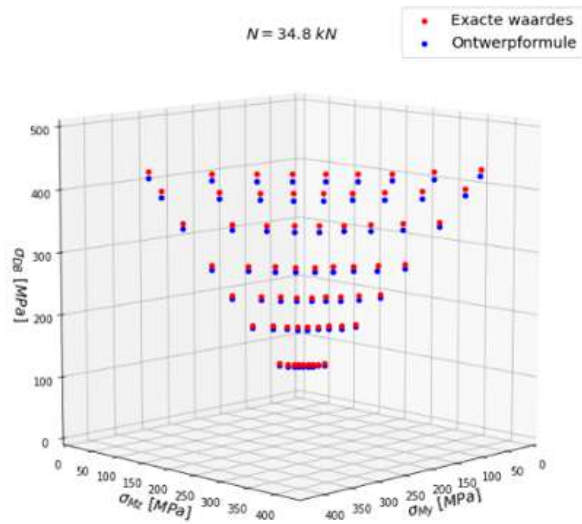
- $c = 50 \text{ mm}$
- $b = 800 \text{ mm}$; $h = 1000 \text{ mm}$
- $m = 3$; $n = 4$
- $\phi = 21 \text{ mm} \rightarrow \rho_l = 1.0 \%$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu3} = 3.50 \text{ ‰}$
- $f_{ck} = 40.0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = 40/1.5 = 26.7 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 500/1.1 = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

ULS controle resultaten



N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.1	1.67	2002.62	2481.35	0.01	2481.64	1.0	0.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	0.02	2481.47	1.0	0.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	0.04	2481.55	1.0	0.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	562.87	2313.64	1.01	1.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	790.81	2192.2	1.025	2.5
0.1	1.67	2002.62	2481.35	977.08	2061.23	1.036	3.6
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1237.32	1825.12	1.047	4.7
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1237.32	1825.12	1.047	4.7
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1237.32	1825.12	1.047	4.7
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1237.32	1825.12	1.047	4.7
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1482.32	1530.22	1.052	5.2
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1624.88	1298.6	1.045	4.5
0.1	1.67	2002.62	2481.35	1767.71	984.48	1.026	2.6
0.1	1.67	2002.62	2481.35	2002.7	0.03	1.0	0.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	2002.73	0.04	1.0	0.0
0.1	1.67	2002.62	2481.35	2002.81	0.09	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.3	1.39	2836.13	3485.61	0.01	3485.81	1.0	0.0
0.3	1.39	2836.13	3485.61	0.02	3485.81	1.0	0.0
0.3	1.39	2836.13	3485.61	0.04	3485.74	1.0	0.0
0.3	1.39	2836.13	3485.61	560.74	3272.09	1.022	2.2
0.3	1.39	2836.13	3485.61	845.64	3058.29	1.021	2.1
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1097.05	2835.57	1.019	1.9
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1504.77	2416.69	1.017	1.7
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1504.77	2416.69	1.017	1.7
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1504.77	2416.69	1.017	1.7
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1504.77	2416.69	1.017	1.7
0.3	1.39	2836.13	3485.61	1935.21	1894.99	1.018	1.8
0.3	1.39	2836.13	3485.61	2193.49	1528.58	1.019	1.9
0.3	1.39	2836.13	3485.61	2476.12	1069.12	1.023	2.3
0.3	1.39	2836.13	3485.61	2836.48	0.09	1.0	0.0
0.3	1.39	2836.13	3485.61	2836.54	0.03	1.0	0.0
0.3	1.39	2836.13	3485.61	2836.54	0.05	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.5	1.38	2734.83	3369.08	0.01	3369.45	1.0	0.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	0.02	3369.45	1.0	0.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	0.03	3369.44	1.0	0.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	492.85	3156.46	1.008	0.8
0.5	1.38	2734.83	3369.08	766.02	2986.14	1.02	2.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1020.67	2779.77	1.024	2.4
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1443.14	2353.73	1.024	2.4
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1443.14	2353.73	1.024	2.4
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1443.14	2353.73	1.024	2.4
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1443.14	2353.73	1.024	2.4
0.5	1.38	2734.83	3369.08	1870.82	1825.47	1.022	2.2
0.5	1.38	2734.83	3369.08	2137.54	1444.52	1.023	2.3
0.5	1.38	2734.83	3369.08	2404.79	981.33	1.02	2.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	2735.43	0.09	1.0	0.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	2735.43	0.04	1.0	0.0
0.5	1.38	2734.83	3369.08	2735.44	0.03	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.7	1.65	2000.81	2481.0	0.01	2481.33	1.0	0.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	0.01	2481.08	1.0	0.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	0.02	2481.11	1.0	0.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	462.67	2319.39	0.985	1.5
0.7	1.65	2000.81	2481.0	660.28	2208.27	0.987	1.3
0.7	1.65	2000.81	2481.0	837.84	2084.02	0.989	1.1
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1137.23	1812.43	0.991	0.9
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1137.23	1812.43	0.991	0.9
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1137.23	1812.43	0.991	0.9
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1444.09	1437.37	0.991	0.9
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1618.53	1167.76	0.994	0.6
0.7	1.65	2000.81	2481.0	1777.51	836.94	0.99	1.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	2001.06	0.06	1.0	0.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	2001.21	0.02	1.0	0.0
0.7	1.65	2000.81	2481.0	2001.23	0.03	1.0	0.0
N_Ed/N_Rd [-]	exponent-a [-]	M_Rd,y [kNm]	M_Rd,z [kNm]	M_Ed,y [kNm]	M_Ed,z [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.9	2.19	785.07	972.17	nan	nan	nan	nan
0.9	2.19	785.07	972.17	0.01	972.01	1.0	0.0
0.9	2.19	785.07	972.17	0.01	972.02	1.0	0.0
0.9	2.19	785.07	972.17	0.02	972.16	1.0	0.0
0.9	2.19	785.07	972.17	404.78	855.1	0.99	1.0
0.9	2.19	785.07	972.17	619.75	651.73	1.012	1.2
0.9	2.19	785.07	972.17	670.31	553.06	0.998	0.2
0.9	2.19	785.07	972.17	719.49	408.74	0.976	2.4
0.9	2.19	785.07	972.17	785.21	0.01	1.0	0.0
0.9	2.19	785.07	972.17	785.22	0.02	1.0	0.0
0.9	2.19	785.07	972.17	785.25	0.04	1.001	0.1
0.9	2.19	785.07	972.17	nan	nan	nan	nan
0.9	2.19	785.07	972.17	231.21	928.9	0.974	2.6
0.9	2.19	785.07	972.17	325.28	895.31	0.98	2.0

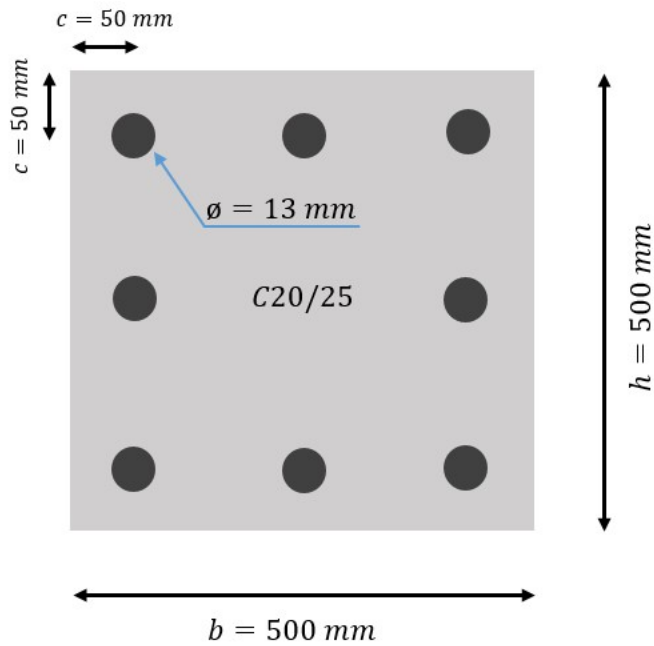
SLS controle resultaten



N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
34.8	133.56	41.99	52.83	10.6	60.0	56.75	5.41
34.8	118.67	72.87	46.44	21.7	60.0	56.69	5.52
34.8	106.03	92.76	41.01	28.87	60.0	56.69	5.52
34.8	94.89	107.2	36.23	34.09	60.0	56.61	5.64
34.8	84.2	119.42	31.65	38.51	60.0	56.61	5.66
34.8	72.99	130.8	26.84	42.62	60.0	56.65	5.59
34.8	59.75	142.22	21.17	46.75	60.0	56.65	5.58
34.8	42.92	154.12	13.98	51.05	60.0	56.66	5.57
34.8	22.99	166.28	5.57	55.45	60.0	57.26	4.57
34.8	298.16	94.48	123.51	29.5	140.0	134.91	3.63
34.8	264.3	162.87	108.97	54.21	140.0	135.13	3.48
34.8	235.95	206.24	96.79	69.9	140.0	135.06	3.53
34.8	211.04	238.11	86.09	81.43	140.0	134.85	3.68
34.8	187.27	265.29	75.89	91.26	140.0	134.82	3.7
34.8	162.54	290.71	65.27	100.45	140.0	134.92	3.63
34.8	133.65	316.29	52.87	109.7	140.0	134.94	3.61
34.8	96.47	343.23	36.91	119.45	140.0	134.78	3.73
34.8	51.83	371.05	17.79	129.52	140.0	135.6	3.14
34.8	421.6	133.84	176.52	43.72	200.0	193.58	3.21
34.8	373.52	230.32	155.87	78.61	200.0	193.98	3.01
34.8	333.36	291.32	138.63	100.67	200.0	193.85	3.08
34.8	298.12	336.27	123.49	116.93	200.0	193.54	3.23
34.8	264.55	374.68	109.07	130.83	200.0	193.49	3.25
34.8	229.66	410.62	94.09	143.83	200.0	193.64	3.18
34.8	189.02	446.82	76.64	156.93	200.0	193.68	3.16
34.8	136.61	485.05	54.14	170.76	200.0	193.4	3.3
34.8	73.45	524.61	27.04	185.07	200.0	194.43	2.78
34.8	545.02	173.18	229.53	57.94	260.0	252.26	2.98
34.8	482.73	297.76	202.78	103.0	260.0	252.83	2.76
34.8	430.78	376.39	180.46	131.45	260.0	252.64	2.83
34.8	385.21	434.42	160.89	152.44	260.0	252.24	2.99
34.8	341.83	484.06	142.26	170.4	260.0	252.17	3.01
34.8	296.78	530.53	122.92	187.21	260.0	252.37	2.94
34.8	244.39	577.36	100.42	204.15	260.0	252.43	2.91
34.8	176.75	626.86	71.37	222.06	260.0	252.04	3.06
34.8	95.07	678.16	36.31	240.62	260.0	253.28	2.59
34.8	709.59	225.65	300.21	76.92	340.0	330.51	2.79
34.8	628.35	387.68	265.32	135.53	340.0	331.3	2.56
34.8	560.67	489.82	236.25	172.48	340.0	331.03	2.64
34.8	501.32	565.29	210.76	199.79	340.0	330.49	2.8
34.8	444.86	629.89	186.51	223.16	340.0	330.4	2.82
34.8	386.28	690.41	161.35	245.05	340.0	330.66	2.75
34.8	318.21	751.4	132.12	267.12	340.0	330.75	2.72
34.8	230.26	815.94	94.35	290.47	340.0	330.22	2.88
34.8	123.89	882.9	48.68	314.7	340.0	331.74	2.43
34.8	833.02	264.99	353.22	91.15	400.0	389.2	2.7
34.8	737.56	455.11	312.22	159.93	400.0	390.15	2.46
34.8	658.08	574.88	278.09	203.26	400.0	389.82	2.54
34.8	588.4	663.44	248.16	235.3	400.0	389.19	2.7
34.8	522.13	739.27	219.7	262.73	400.0	389.08	2.73
34.8	453.39	810.32	190.18	288.44	400.0	389.39	2.65
34.8	373.57	881.93	155.89	314.35	400.0	389.5	2.63
34.8	270.39	957.75	111.58	341.78	400.0	388.86	2.79
34.8	145.51	1036.44	57.96	370.25	400.0	390.59	2.35
34.8	905.02	287.94	384.15	99.45	435.0	423.43	2.66
34.8	801.26	494.44	339.58	174.16	435.0	424.48	2.42
34.8	714.9	624.5	302.49	221.21	435.0	424.12	2.5
34.8	639.2	720.69	269.98	256.01	435.0	423.42	2.66
34.8	567.2	803.07	239.05	285.81	435.0	423.31	2.69
34.8	492.54	880.26	206.99	313.74	435.0	423.64	2.61
34.8	405.87	958.08	169.76	341.9	435.0	423.76	2.58
34.8	293.8	1040.47	121.63	371.71	435.0	423.06	2.74
34.8	158.12	1126.01	63.37	402.66	435.0	424.92	2.32

N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
1774.8	447.66	338.83	23.39	0.17	60.0	65.87	9.78
1774.8	374.99	448.11	10.66	9.43	60.0	60.68	1.13
1774.8	323.46	493.66	4.25	15.06	60.0	60.38	0.64
1774.8	689.41	359.49	93.95	1.53	140.0	149.22	6.58
1774.8	621.5	499.75	70.82	15.9	140.0	135.89	2.94
1774.8	547.92	615.89	48.23	36.17	140.0	131.33	6.19
1774.8	467.89	706.88	27.75	57.21	140.0	132.35	5.47
1774.8	381.29	780.84	11.59	76.9	140.0	138.74	0.9
1774.8	292.23	842.38	1.28	94.6	140.0	149.72	6.94
1774.8	811.99	439.84	139.24	8.54	200.0	198.78	0.61
1774.8	731.49	604.93	109.08	33.93	200.0	187.27	6.37
1774.8	648.81	733.21	79.9	63.99	200.0	185.51	7.24
1774.8	561.84	832.18	52.26	91.6	200.0	185.98	7.01
1774.8	463.67	916.43	26.82	117.06	200.0	189.53	5.24
1774.8	358.06	989.44	8.33	140.14	200.0	199.55	0.23
1774.8	929.13	516.5	185.04	18.33	260.0	250.83	3.53
1774.8	836.15	703.86	148.53	56.45	260.0	243.67	6.28
1774.8	744.31	843.06	113.79	94.8	260.0	244.43	5.99
1774.8	649.43	951.17	80.11	127.94	260.0	244.44	5.99
1774.8	541.55	1045.31	46.42	158.26	260.0	244.96	5.78
1774.8	420.9	1129.72	18.7	186.2	260.0	251.88	3.12
1774.8	291.61	1206.04	1.23	211.92	260.0	267.01	2.69
1774.8	1192.88	339.74	292.47	0.23	340.0	346.97	2.05
1774.8	1081.32	615.37	246.54	36.07	340.0	324.09	4.68
1774.8	972.0	829.96	202.19	90.95	340.0	323.85	4.75
1774.8	867.6	983.91	160.76	138.36	340.0	326.88	3.86
1774.8	761.3	1105.18	120.08	178.02	340.0	326.45	3.99
1774.8	641.25	1212.45	77.35	214.1	340.0	323.92	4.73
1774.8	501.98	1311.83	35.87	248.08	340.0	325.49	4.27
1774.8	349.37	1403.65	7.22	279.83	340.0	338.46	0.45
1774.8	1319.89	381.29	345.3	3.14	400.0	401.5	0.37
1774.8	1193.84	687.93	292.86	52.51	400.0	381.68	4.58
1774.8	1072.45	921.72	242.91	118.71	400.0	386.18	3.46
1774.8	958.39	1087.23	196.72	172.06	400.0	390.32	2.42
1774.8	843.15	1218.76	151.24	216.24	400.0	389.64	2.59
1774.8	714.01	1335.96	102.73	256.4	400.0	385.52	3.62
1774.8	561.5	1446.41	52.16	294.7	400.0	383.24	4.19
1774.8	391.91	1549.82	13.22	330.86	400.0	393.11	1.72
1774.8	1393.57	405.32	376.13	5.16	435.0	433.51	0.34
1774.8	1259.08	729.81	319.94	63.1	435.0	416.14	4.34
1774.8	1130.7	974.49	266.8	135.35	435.0	423.07	2.74
1774.8	1010.92	1146.9	217.89	191.96	435.0	427.72	1.67
1774.8	890.38	1284.53	169.7	238.7	435.0	426.92	1.86
1774.8	755.87	1407.56	118.07	281.19	435.0	422.05	2.98
1774.8	595.86	1524.41	62.61	321.95	435.0	417.76	3.96
1774.8	416.51	1634.58	17.38	360.65	435.0	425.44	2.2
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
3514.8	553.78	690.96	0.49	1.61	60.0	70.59	17.65
3514.8	940.78	718.43	58.18	3.49	140.0	153.83	9.88
3514.8	802.55	942.94	30.52	25.26	140.0	125.16	10.6
3514.8	688.85	1047.04	13.93	40.02	140.0	122.39	12.58
3514.8	1076.51	843.01	93.07	14.02	200.0	198.76	0.62
3514.8	942.9	1052.33	58.67	40.85	200.0	193.35	3.33
3514.8	793.67	1223.21	29.03	72.37	200.0	194.06	2.97
3514.8	640.87	1356.0	8.46	102.44	200.0	202.66	1.33
3514.8	1328.45	687.89	173.16	1.41	260.0	266.9	2.65
3514.8	1197.59	957.92	129.53	27.19	260.0	248.15	4.56
3514.8	1054.53	1183.84	86.95	64.35	260.0	245.96	5.4
3514.8	897.95	1361.95	48.72	103.89	260.0	245.86	5.44
3514.8	730.3	1505.4	19.36	141.01	260.0	251.62	3.22
3514.8	559.04	1623.97	0.91	174.38	260.0	267.68	2.95
3514.8	1495.41	797.14	233.25	9.73	340.0	334.46	1.63
3514.8	1347.73	1101.67	179.88	49.06	340.0	320.39	5.77
3514.8	1192.48	1345.0	127.91	99.78	340.0	323.6	4.82
3514.8	1026.98	1533.17	79.53	148.63	340.0	322.46	5.16
3514.8	842.68	1690.54	37.69	193.96	340.0	322.48	5.15
3514.8	648.53	1824.42	9.27	234.79	340.0	335.59	1.3
3514.8	1615.85	876.17	278.73	17.45	400.0	387.02	3.24
3514.8	1455.59	1204.63	218.57	68.53	400.0	378.81	5.3
3514.8	1291.27	1459.41	160.39	128.67	400.0	386.0	3.5
3514.8	1118.55	1655.97	105.23	183.72	400.0	384.17	3.96
3514.8	923.46	1823.46	54.26	234.49	400.0	379.47	5.13
3514.8	713.28	1968.81	17.05	280.52	400.0	388.44	2.89
3514.8	1684.87	921.41	305.37	22.61	435.0	418.45	3.8
3514.8	1517.31	1263.24	241.41	80.96	435.0	414.33	4.75
3514.8	969.54	1899.48	64.97	258.38	435.0	414.09	4.81
3514.8	750.36	2051.5	22.24	307.32	435.0	420.04	3.44
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
5254.8	996.92	1215.12	16.91	16.64	140.0	118.29	15.51
5254.8	866.66	1327.1	3.91	27.97	140.0	113.42	18.99
5254.8	1383.37	1053.6	81.74	3.79	200.0	200.64	0.32
5254.8	1173.97	1386.21	41.33	34.85	200.0	199.74	0.13
5254.8	1008.97	1535.6	18.31	55.23	200.0	192.99	3.51
5254.8	1524.89	1181.56	116.14	13.65	260.0	247.24	4.91
5254.8	1335.41	1527.62	71.35	54.03	260.0	254.49	2.12
5254.8	1114.53	1731.28	32.18	88.7	260.0	244.28	6.05
5254.8	897.01	1922.94	6.61	128.69	260.0	250.99	3.46

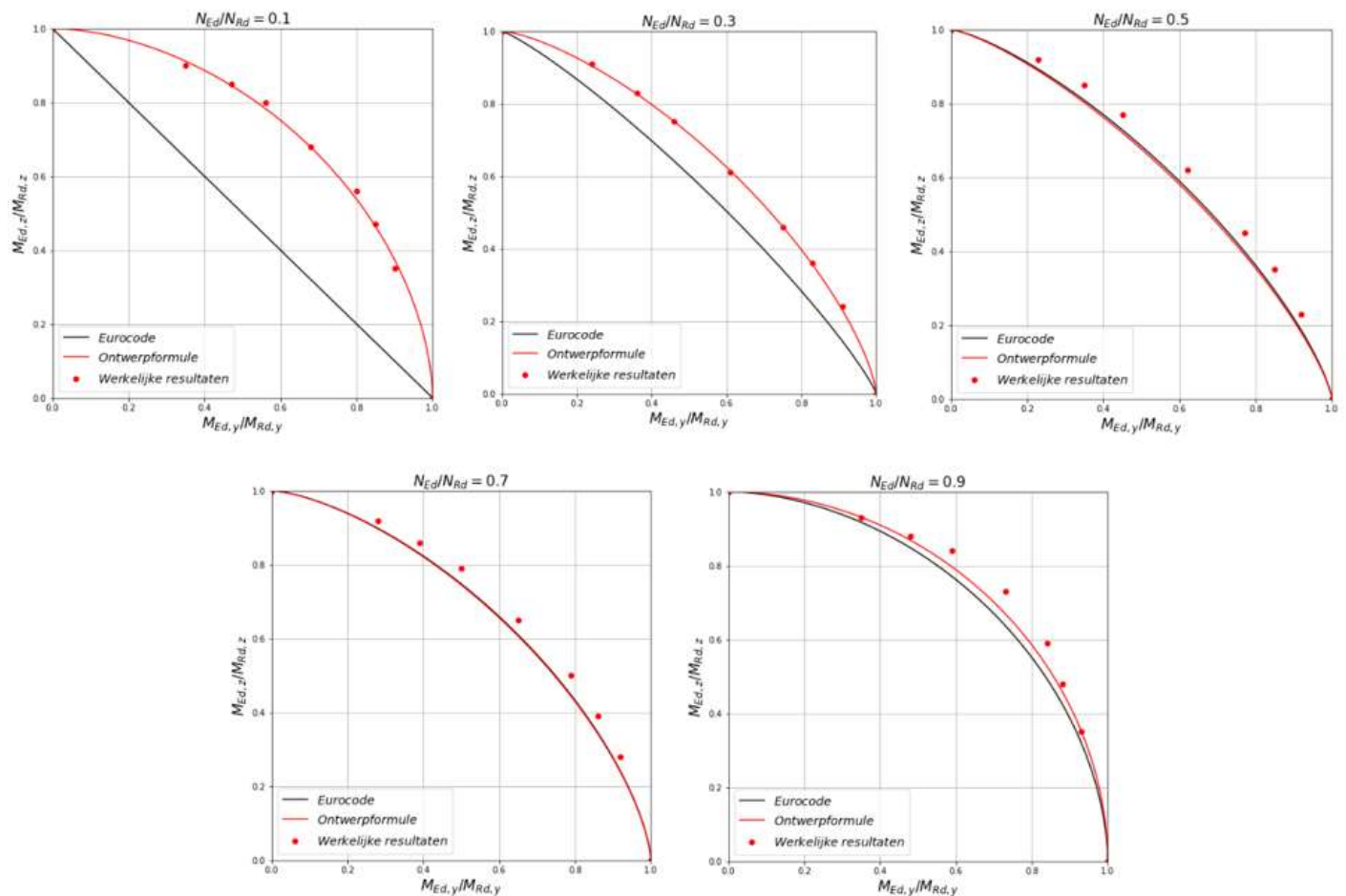
G: Controle ontwerpformules: doorsnede 4



Parameters:

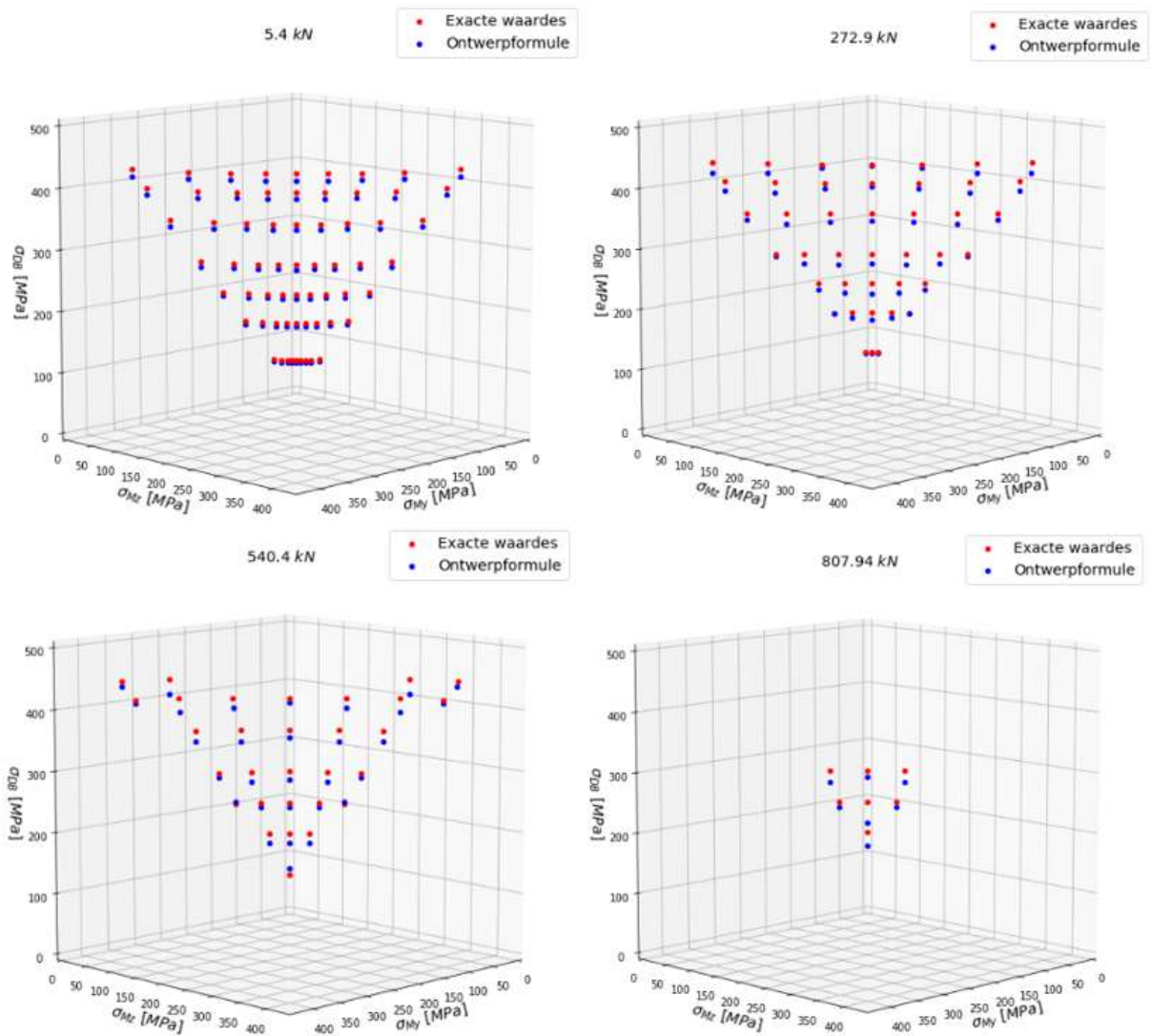
- $c = 50 \text{ mm}$
- $b = 500 \text{ mm}$; $h = 500 \text{ mm}$
- $m = 1$; $n = 1$
- $\varnothing = 13 \text{ mm} \rightarrow \rho_l = 0.4 \%$
- $\varepsilon_{c3} = 1.75 \text{ ‰}$
- $\varepsilon_{cu} = 3.50 \text{ ‰}$
- $f_{ck} = 20.0 \text{ N/mm}^2$
- $f_{cd} = 20/1.5 = 13.7 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
- $f_{yd} = 500/1.1 = 435 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$

ULS controle resultaten



N _{Ed} /N _{Rd} [-]	exponent-a [-]	M _{Rd,y} [kNm]	M _{Rd,z} [kNm]	M _{Ed,y} [kNm]	M _{Ed,z} [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.1	1.79	168.98	168.98	0.0	168.95	1.0	0.0
0.1	1.79	168.98	168.98	0.0	168.96	1.0	0.0
0.1	1.79	168.98	168.98	0.01	168.96	1.0	0.0
0.1	1.79	168.98	168.98	59.94	152.92	0.993	0.7
0.1	1.79	168.98	168.98	80.15	143.34	1.008	0.8
0.1	1.79	168.98	168.98	94.13	135.38	1.023	2.3
0.1	1.79	168.98	168.98	115.41	115.41	1.01	1.0
0.1	1.79	168.98	168.98	115.41	115.41	1.01	1.0
0.1	1.79	168.98	168.98	115.41	115.41	1.01	1.0
0.1	1.79	168.98	168.98	115.41	115.41	1.01	1.0
0.1	1.79	168.98	168.98	115.41	115.41	1.01	1.0
0.1	1.79	168.98	168.98	135.38	94.13	1.023	2.3
0.1	1.79	168.98	168.98	143.34	80.15	1.008	0.8
0.1	1.79	168.98	168.98	152.92	59.94	0.993	0.7
0.1	1.79	168.98	168.98	168.95	0.0	1.0	0.0
0.1	1.79	168.98	168.98	168.96	0.0	1.0	0.0
0.1	1.79	168.98	168.98	168.96	0.01	1.0	0.0
N _{Ed} /N _{Rd} [-]	exponent-a [-]	M _{Rd,y} [kNm]	M _{Rd,z} [kNm]	M _{Ed,y} [kNm]	M _{Ed,z} [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.3	1.41	250.89	250.89	0.0	250.94	1.0	0.0
0.3	1.41	250.89	250.89	0.0	250.94	1.0	0.0
0.3	1.41	250.89	250.89	0.0	250.94	1.0	0.0
0.3	1.41	250.89	250.89	61.26	229.1	1.016	1.6
0.3	1.41	250.89	250.89	90.75	208.51	1.007	0.7
0.3	1.41	250.89	250.89	115.64	189.05	1.005	0.5
0.3	1.41	250.89	250.89	154.16	154.16	1.004	0.4
0.3	1.41	250.89	250.89	154.16	154.16	1.004	0.4
0.3	1.41	250.89	250.89	154.16	154.16	1.004	0.4
0.3	1.41	250.89	250.89	154.16	154.16	1.004	0.4
0.3	1.41	250.89	250.89	189.05	115.64	1.005	0.5
0.3	1.41	250.89	250.89	208.51	90.75	1.007	0.7
0.3	1.41	250.89	250.89	229.1	61.26	1.016	1.6
0.3	1.41	250.89	250.89	250.94	0.0	1.0	0.0
0.3	1.41	250.89	250.89	250.94	0.0	1.0	0.0
0.3	1.41	250.89	250.89	250.94	0.0	1.0	0.0
N _{Ed} /N _{Rd} [-]	exponent-a [-]	M _{Rd,y} [kNm]	M _{Rd,z} [kNm]	M _{Ed,y} [kNm]	M _{Ed,z} [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.5	1.31	248.46	248.46	0.0	248.52	1.0	0.0
0.5	1.31	248.46	248.46	0.0	248.52	1.0	0.0
0.5	1.31	248.46	248.46	0.0	248.52	1.0	0.0
0.5	1.31	248.46	248.46	56.64	228.16	1.037	3.7
0.5	1.31	248.46	248.46	86.45	210.17	1.052	5.2
0.5	1.31	248.46	248.46	112.82	190.39	1.059	5.9
0.5	1.31	248.46	248.46	153.28	153.28	1.06	6.0
0.5	1.31	248.46	248.46	153.28	153.28	1.06	6.0
0.5	1.31	248.46	248.46	153.28	153.28	1.06	6.0
0.5	1.31	248.46	248.46	153.28	153.28	1.06	6.0
0.5	1.31	248.46	248.46	190.39	112.82	1.059	5.9
0.5	1.31	248.46	248.46	210.17	86.45	1.052	5.2
0.5	1.31	248.46	248.46	228.16	56.64	1.037	3.7
0.5	1.31	248.46	248.46	248.52	0.0	1.0	0.0
0.5	1.31	248.46	248.46	248.52	0.0	1.0	0.0
0.5	1.31	248.46	248.46	248.52	0.0	1.0	0.0
N _{Ed} /N _{Rd} [-]	exponent-a [-]	M _{Rd,y} [kNm]	M _{Rd,z} [kNm]	M _{Ed,y} [kNm]	M _{Ed,z} [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.7	1.49	185.33	185.33	0.0	185.35	1.0	0.0
0.7	1.49	185.33	185.33	0.0	185.36	1.0	0.0
0.7	1.49	185.33	185.33	0.0	185.36	1.0	0.0
0.7	1.49	185.33	185.33	51.58	170.05	1.028	2.8
0.7	1.49	185.33	185.33	73.16	158.95	1.045	4.5
0.7	1.49	185.33	185.33	92.18	146.24	1.055	5.5
0.7	1.49	185.33	185.33	121.14	121.14	1.06	6.0
0.7	1.49	185.33	185.33	121.14	121.14	1.06	6.0
0.7	1.49	185.33	185.33	121.14	121.14	1.06	6.0
0.7	1.49	185.33	185.33	121.14	121.14	1.06	6.0
0.7	1.49	185.33	185.33	146.24	92.18	1.055	5.5
0.7	1.49	185.33	185.33	158.95	73.16	1.045	4.5
0.7	1.49	185.33	185.33	170.05	51.58	1.028	2.8
0.7	1.49	185.33	185.33	185.35	0.0	1.0	0.0
0.7	1.49	185.33	185.33	185.36	0.0	1.0	0.0
0.7	1.49	185.33	185.33	185.36	0.0	1.0	0.0
N _{Ed} /N _{Rd} [-]	exponent-a [-]	M _{Rd,y} [kNm]	M _{Rd,z} [kNm]	M _{Ed,y} [kNm]	M _{Ed,z} [kNm]	U.C. [-]	foutmarge [%]
0.9	1.95	73.65	73.65	0.0	73.7	1.001	0.1
0.9	1.95	73.65	73.65	0.0	73.7	1.001	0.1
0.9	1.95	73.65	73.65	0.0	73.57	0.998	0.2
0.9	1.95	73.65	73.65	25.97	68.22	0.993	0.7
0.9	1.95	73.65	73.65	35.65	64.95	1.026	2.6
0.9	1.95	73.65	73.65	43.21	61.5	1.058	5.8
0.9	1.95	73.65	73.65	53.43	53.43	1.071	7.1
0.9	1.95	73.65	73.65	53.43	53.43	1.071	7.1
0.9	1.95	73.65	73.65	53.43	53.43	1.071	7.1
0.9	1.95	73.65	73.65	53.43	53.43	1.071	7.1
0.9	1.95	73.65	73.65	61.5	43.21	1.058	5.8
0.9	1.95	73.65	73.65	64.95	35.65	1.026	2.6
0.9	1.95	73.65	73.65	68.22	25.97	0.993	0.7
0.9	1.95	73.65	73.65	73.57	0.0	0.998	0.2
0.9	1.95	73.65	73.65	73.7	0.0	1.001	0.1
0.9	1.95	73.65	73.65	73.7	0.0	1.001	0.1

SLS controle resultaten



N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
5.35	10.94	2.41	54.49	7.81	60.0	56.81	5.31
5.35	9.98	4.35	49.23	18.3	60.0	56.45	5.92
5.35	9.11	5.72	44.43	25.81	60.0	56.49	5.85
5.35	8.31	6.7	40.06	31.21	60.0	56.41	5.98
5.35	7.53	7.53	35.78	35.78	60.0	56.38	6.04
5.35	6.7	8.31	31.21	40.06	60.0	56.41	5.98
5.35	5.72	9.11	25.81	44.43	60.0	56.49	5.85
5.35	4.35	9.98	18.3	49.23	60.0	56.45	5.92
5.35	2.41	10.94	7.81	54.49	60.0	56.81	5.31
5.35	24.18	5.4	127.35	24.07	140.0	135.01	3.57
5.35	22.01	9.66	115.41	47.48	140.0	134.83	3.69
5.35	20.06	12.61	104.68	63.69	140.0	134.97	3.59
5.35	18.29	14.74	94.96	75.44	140.0	134.79	3.72
5.35	16.57	16.57	85.47	85.47	140.0	134.7	3.79
5.35	14.74	18.29	75.44	94.96	140.0	134.79	3.72
5.35	12.61	20.06	63.69	104.68	140.0	134.97	3.59
5.35	9.66	22.01	47.48	115.41	140.0	134.83	3.69
5.35	5.4	24.18	24.07	127.35	140.0	135.01	3.57
5.35	34.11	7.63	181.99	36.34	200.0	193.73	3.13
5.35	31.03	13.64	165.04	69.38	200.0	193.66	3.17
5.35	28.27	17.77	149.87	92.11	200.0	193.85	3.07
5.35	25.78	20.78	136.14	108.62	200.0	193.58	3.21
5.35	23.34	23.34	122.75	122.75	200.0	193.45	3.28
5.35	20.78	25.78	108.62	136.14	200.0	193.58	3.21
5.35	17.77	28.27	92.11	149.87	200.0	193.85	3.07
5.35	13.64	31.03	69.38	165.04	200.0	193.66	3.17
5.35	7.63	34.11	36.34	181.99	200.0	193.73	3.13
5.35	44.04	9.87	236.64	48.63	260.0	252.47	2.89
5.35	40.05	17.63	214.68	91.29	260.0	252.49	2.89
5.35	36.49	22.94	195.06	120.53	260.0	252.74	2.79
5.35	33.26	26.81	177.33	141.8	260.0	252.37	2.93
5.35	30.12	30.12	160.04	160.04	260.0	252.2	3.0
5.35	26.81	33.26	141.8	177.33	260.0	252.37	2.93
5.35	22.94	36.49	120.53	195.06	260.0	252.74	2.79
5.35	17.63	40.05	91.29	214.68	260.0	252.49	2.89
5.35	9.87	44.04	48.63	236.64	260.0	252.47	2.89
5.35	57.28	12.85	309.5	65.03	340.0	330.8	2.7
5.35	52.08	22.93	280.86	120.49	340.0	330.93	2.67
5.35	47.44	29.83	255.32	158.41	340.0	331.25	2.57
5.35	43.24	34.85	232.24	186.04	340.0	330.76	2.72
5.35	39.15	39.15	209.75	209.75	340.0	330.53	2.78
5.35	34.85	43.24	186.04	232.24	340.0	330.76	2.72
5.35	29.83	47.44	158.41	255.32	340.0	331.25	2.57
5.35	22.93	52.08	120.49	280.86	340.0	330.93	2.67
5.35	12.85	57.28	65.03	309.5	340.0	330.8	2.7
5.35	67.21	15.09	364.14	77.33	400.0	389.55	2.61
5.35	61.1	26.92	330.5	142.4	400.0	389.77	2.56
5.35	55.65	34.99	300.52	186.83	400.0	390.13	2.47
5.35	50.73	40.88	273.42	219.22	400.0	389.56	2.61
5.35	45.93	45.93	247.03	247.03	400.0	389.29	2.68
5.35	40.88	50.73	219.22	273.42	400.0	389.56	2.61
5.35	34.99	55.65	186.83	300.52	400.0	390.13	2.47
5.35	26.92	61.1	142.4	330.5	400.0	389.77	2.56
5.35	15.09	67.21	77.33	364.14	400.0	389.55	2.61
5.35	34.99	55.65	186.83	300.52	400.0	390.13	2.47
5.35	26.92	61.1	142.4	330.5	400.0	389.77	2.56
5.35	15.09	67.21	77.33	364.14	400.0	389.55	2.61
5.35	73.01	16.39	396.02	84.5	435.0	423.83	2.57
5.35	66.36	29.24	359.45	155.18	435.0	424.09	2.51
5.35	60.44	38.0	326.88	203.41	435.0	424.48	2.42
5.35	55.09	44.39	297.45	238.58	435.0	423.86	2.56
5.35	49.88	49.88	268.78	268.78	435.0	423.56	2.63
5.35	44.39	55.09	238.58	297.45	435.0	423.86	2.56
5.35	38.0	60.44	203.41	326.88	435.0	424.48	2.42
5.35	29.24	66.36	155.18	359.45	435.0	424.09	2.51
5.35	16.39	73.01	84.5	396.02	435.0	423.83	2.57

N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
272.85	38.46	28.88	14.61	1.3	60.0	58.65	2.26
272.85	34.95	34.95	8.68	8.68	60.0	59.44	0.93
272.85	28.68	38.54	1.11	14.76	60.0	58.65	2.25
272.85	60.17	32.25	82.49	4.99	140.0	140.29	0.21
272.85	54.72	40.99	60.94	19.76	140.0	130.8	6.57
272.85	48.45	48.45	39.48	39.48	140.0	128.56	8.17
272.85	40.99	54.72	19.76	60.94	140.0	130.8	6.57
272.85	32.25	60.17	4.99	82.49	140.0	140.29	0.21
272.85	69.66	38.88	124.47	15.41	200.0	189.85	5.08
272.85	63.46	48.76	96.48	40.43	200.0	183.5	8.25
272.85	56.69	56.69	68.45	68.45	200.0	183.0	8.5
272.85	48.76	63.46	40.43	96.48	200.0	183.5	8.25
272.85	38.88	69.66	15.41	124.47	200.0	189.85	5.08
272.85	85.1	32.05	199.77	4.75	260.0	257.33	1.03
272.85	78.62	45.1	167.42	29.78	260.0	243.69	6.27
272.85	71.7	55.9	134.03	65.39	260.0	242.14	6.87
272.85	64.37	64.37	100.5	100.5	260.0	243.21	6.46
272.85	55.9	71.7	65.39	134.03	260.0	242.14	6.87
272.85	45.1	78.62	29.78	167.42	260.0	243.69	6.27
272.85	32.05	85.1	4.75	199.77	260.0	257.33	1.03
272.85	97.82	37.98	265.03	13.72	340.0	328.76	3.31
272.85	90.18	53.01	225.57	54.7	340.0	321.42	5.46
272.85	82.33	64.91	185.84	102.86	340.0	325.94	4.14
272.85	74.19	74.19	145.89	145.89	340.0	328.51	3.38
272.85	64.91	82.33	102.86	185.84	340.0	325.94	4.14
272.85	53.01	90.18	54.7	225.57	340.0	321.42	5.46
272.85	37.98	97.82	13.72	265.03	340.0	328.76	3.31
272.85	107.19	42.32	314.14	22.78	400.0	384.27	3.93
272.85	98.69	58.77	269.6	76.71	400.0	383.17	4.21
272.85	90.15	71.44	225.45	132.82	400.0	391.26	2.18
272.85	81.37	81.37	181.07	181.07	400.0	394.6	1.35
272.85	71.44	90.15	132.82	225.45	400.0	391.26	2.18
272.85	58.77	98.69	76.71	269.6	400.0	383.17	4.21
272.85	42.32	107.19	22.78	314.14	400.0	384.27	3.93
272.85	112.61	44.82	342.84	29.04	435.0	417.46	4.03
272.85	103.62	62.07	295.39	90.49	435.0	420.19	3.41
272.85	94.68	75.2	248.75	150.76	435.0	429.99	1.15
272.85	85.52	85.52	201.86	201.86	435.0	433.68	0.3
272.85	75.2	94.68	150.76	248.75	435.0	429.99	1.15
272.85	62.07	103.62	90.49	295.39	435.0	420.19	3.41
272.85	44.82	112.61	29.04	342.84	435.0	417.46	4.03
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
540.35	54.72	54.72	0.3	0.3	60.0	70.66	17.76
540.35	84.78	60.42	47.42	5.89	140.0	124.13	11.34
540.35	73.47	73.47	24.08	24.08	140.0	122.54	12.47
540.35	60.42	84.78	5.89	47.42	140.0	124.13	11.34
540.35	105.74	54.6	111.02	0.2	200.0	203.74	1.87
540.35	95.94	70.07	78.14	18.5	200.0	192.35	3.82
540.35	84.11	84.11	45.82	45.82	200.0	192.48	3.76
540.35	70.07	95.94	18.5	78.14	200.0	192.35	3.82
540.35	54.6	105.74	0.2	111.02	200.0	203.74	1.87
540.35	116.29	61.86	151.53	7.49	260.0	252.35	2.94
540.35	105.72	78.79	110.93	34.09	260.0	243.94	6.18
540.35	93.43	93.43	70.57	70.57	260.0	246.49	5.2
540.35	78.79	105.72	34.09	110.93	260.0	243.94	6.18
540.35	61.86	116.29	7.49	151.53	260.0	252.35	2.94
540.35	129.27	70.92	206.95	19.84	340.0	321.85	5.34
540.35	117.69	89.5	157.24	59.48	340.0	321.03	5.58
540.35	104.77	104.77	107.52	107.52	340.0	327.13	3.78
540.35	89.5	117.69	59.48	157.24	340.0	321.03	5.58
540.35	70.92	129.27	19.84	206.95	340.0	321.85	5.34
540.35	149.73	54.64	302.44	0.23	400.0	395.19	1.2
540.35	138.55	77.41	249.28	31.33	400.0	377.5	5.63
540.35	126.22	97.04	193.48	81.58	400.0	384.11	3.97
540.35	112.79	112.79	137.58	137.58	400.0	392.71	1.82
540.35	97.04	126.22	81.58	193.48	400.0	384.11	3.97
540.35	77.41	138.55	31.33	249.28	400.0	377.5	5.63
540.35	54.64	149.73	0.23	302.44	400.0	395.19	1.2
540.35	155.53	57.37	330.76	2.74	435.0	426.25	2.01
540.35	143.84	81.09	274.19	38.96	435.0	411.34	5.44
540.35	81.09	143.84	38.96	274.19	435.0	411.34	5.44
540.35	57.37	155.53	2.74	330.76	435.0	426.25	2.01
N [kN]	My[kNm]	Mz [kNm]	sig_My [MPa]	sig_Mz [MPa]	sig_exact [MPa]	sig_formule [MPa]	absolute fout [%]
807.85	95.1	95.1	14.31	14.31	140.0	116.19	17.0
807.85	124.82	88.73	66.32	7.09	200.0	191.75	4.13
807.85	108.03	108.03	32.9	32.9	200.0	162.4	18.8
807.85	88.73	124.82	7.09	66.32	200.0	191.75	4.13
807.85	136.53	98.69	96.45	18.92	260.0	240.79	7.39
807.85	119.15	119.15	53.78	53.78	260.0	248.02	4.61
807.85	98.69	136.53	18.92	96.45	260.0	240.79	7.39